

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

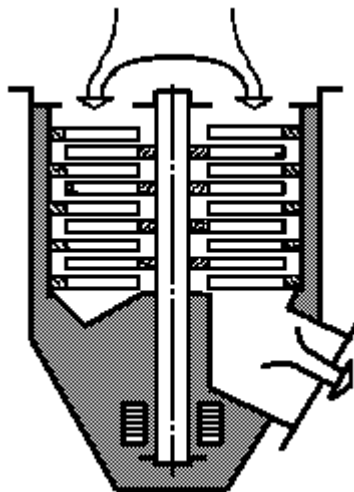
Є. В. ШЕПІЛКО

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з курсу

**“ВАКУУМНА ТЕХНІКА”**

(для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”)



**ХАРКІВ**  
**ХНАМГ**  
**2013**

**Шепілко Є. В.** Конспект лекцій з курсу “Вакуумна техніка” (для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”) / Є. В. Шепілко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2013. – 127 с.

Автор: кандидат фізико-математичних наук,  
доцент Є. В. Шепілко

Рецензент: кандидат фізико-математичних наук,  
доцент В. М. Ткаченко (ХНУ ім. В. Н. Каразіна)

Рекомендовано кафедрою світлотехніки та джерел світла,  
протокол № 6 від 02.02.2012 р.

© Шепілко Є. В.  
ХНАМГ, 2013

## ЗМІСТ

<b>Передмова</b> .....		4
<b>Лекція перша</b>	Головні параметри та опис стану газів.....	5
<b>Лекція друга</b>	Молекулярно-кінетична теорія газів.....	10
<b>Лекція третя</b>	Число молекул, що ударяються в стінку. Течія газу через отвір у тонкій стінці. Закон Грехема.....	16
<b>Лекція четверта</b>	Явища переносу в газах.....	21
<b>Лекція п'ята</b>	Течія газу через вакуумні магістралі.....	25
<b>Лекція шоста</b>	Основні визначення фізико-хімічних явищ за низьких тисків оточуючих газів.....	31
<b>Лекція сьома</b>	Хімічні явища у вакуумі.....	36
<b>Лекція восьма</b>	Сорбційні явища.....	39
<b>Лекція дев'ята</b>	Теоретичні основи процесу відкачки.....	47
<b>Лекція десята</b>	Техніка отримання вакууму. Вакуумні насоси.....	52
<b>Лекція одинадцята</b>	Обертові насоси (продовження).....	64
<b>Лекція дванадцята</b>	Пароструминні насоси.....	74
<b>Лекція тринадцята</b>	Насоси високого вакууму.....	88
<b>Лекція чотирнадцята</b>	Вимірювання низьких тисків.....	96
<b>Лекція п'ятнадцята</b>	Теплові манометричні перетворювачі.....	102
<b>Лекція шістнадцята</b>	Вимірювання парціальних тисків.....	111
<b>Лекція сімнадцята</b>	Вакуумні системи і елементи їх розрахунку.....	116
<b>Список джерел</b> .....		125
<b>Додаток</b> .....		126

## ПЕРЕДМОВА

“Речовина народжується з вакууму завдяки новому радіоактивному процесу ...”

П. А. Дірак

“Фізичний вакуум – фундамент нашого світу, це ніщо, що породжує все.”

Д. фіз.-мат. наук Богдан Гнатик

Вакуумна техніка є важливою спеціальною дисципліною в технічних навчальних закладах і її вивчення без систематичного вивчення курсу буде пов'язано з певними труднощами.

Головна мета цього конспекту – допомогти студентам у вивченні курсу “Вакуумна техніка” і в отриманні навичок для виконання різних практично необхідних розрахунків.

Слово “вакуум” у перекладі з латинської означає “пустота” і це дійсно справедливо у світлі нових досліджень і теорій. Але для розуміння питань дисципліни використовують визначення, що вакуумом називають стан газу за тиском нижче атмосферного. Ясно, що таких станів газу може бути багато, тому умовно вакуум поділяють на такі ступені: низький, середній, високий і надвисокий. Оскільки вакуум це – стан газу, то необхідно знати закони, за якими може змінюватися стан газу.

У дисципліні “Вакуумна техніка” вивчаються різні фізичні й хімічні закони і процеси, що відбуваються в газах за низьких тисків, техніка отримання і вимірювання вакууму, будова і розрахунок елементів та обладнання, з яких складаються вакуумні системи. Без використання вакуумної техніки неможливі як створення сучасних нових технологій, так і подальший розвиток науково-технічного прогресу.

Для полегшення вивчення курсу, наведений нижче навчальний матеріал, розміщений у послідовності зростання складності.

## Лекція перша

### ГОЛОВНІ ПАРАМЕТРИ ТА ОПИС СТАНУ ГАЗІВ

#### 1.1 Поняття тиску і температури

Будь-який стан газу характеризують в основному трьома параметрами: тиском  $P$ , температурою  $T$  і об'ємом  $V$ . Зміна будь-якого з цих параметрів відповідає новому іншому стану газу, тому останній може мати безліч станів.

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

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

Тобто це сила, яка перпендикулярно діє на одиницю площі і вимірюється в одиницях, що називаються “паскаль” [ $\text{Па} = \text{н/м}^2$ ]. Але у вакуумній техніці більше використовують одиницю “Торр”, яка значно більша одного паскаля ( $1 \text{ Торр} = 1 \text{ мм.рт.ст.} = 133 \text{ Па}$ ).

Температура, як окреме поняття, в природі не існує. Температуру ми розуміємо інтуїтивно, відчуваючи різницю між гарячим і холодним тілом, а також знаємо, що при нагріванні тіло може змінювати свої фізичні властивості (наприклад, змінює розмір, густину, оптичні властивості і т.п.). Таким чином, поняття температури, це продукт нашого мозку, спосіб віддзеркалення явищ природи. У дійсності ж температура – це показник енергії.

Для обчислення температури була введена шкала таким чином. Кулясту колбу ( рис. 1.1), що закінчувалась U-подібною капілярною трубкою, наповнили газом воднем, а в трубку помістили краплю ртуті. Такий прилад називають газовим термометром, а температурну шкалу отримали так: спочатку занурили колбу в лід, що тане, і відмітили положення, яке зайняла крапля ртуті й позначили її положення як нуль, потім колбу занурили в киплячу воду і також відмітили положення краплі. Проміжок між цими крайніми положеннями краплі ртуті розділили на 100 однакових частин і кожен частину назвали градусом Цельсія, а всю шкалу (з початком  $0^\circ \text{C}$ ) назвали температурною шкалою за Цельсієм. Оскільки пониження температури на один градус зменшує тиск газу на  $1/273$  частину від значення при  $0^\circ$ , то очевидно, що нижче ніж за  $-273^\circ \text{C}$  температура газу понизитися не може, тому цю температуру назвали абсолютним нулем за Цельсієм. Якщо відлік температури вести від абсолютного нуля (тобто від  $-273^\circ$ ), то таку шкалу називають абсолютною температурною шкалою і відстань між сусідніми поділками називають градусом Кельвіна ( $^\circ \text{K}$ ). Для відрізнення температуру за Цельсієм позначають малою буквою  $t$ , а за Кельвіном –  $T$ . Ясно, що  $T^\circ \text{K} = t^\circ \text{C} + 273$ .

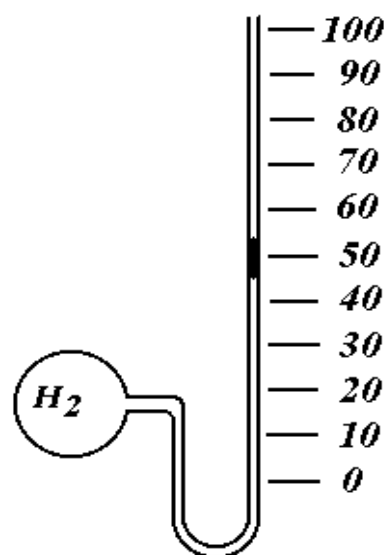


Рис. 1.1

## 1. 2 Електричні методи вимірювання температури

Введення поняття температури потребує методів її вимірювання. Вимірювання температури можна виконувати ще за допомогою інших, ніж газовий термометр, приладів. Розглянемо два методи, які використовують у вакуумній техніці.

### 1. 2. 1 Метод електричного опору

Відомо з досвіду, що електричний опір провідників  $R$  зростає за збільшення температури нагрівання. Формула, яка показує цю залежність, є такою:

$$R_t = R_o(1 + \alpha \cdot t + \beta \cdot t^2 + \dots), \quad (1.2)$$

де  $R_t$  – опір за температури  $t^\circ\text{C}$ ;  $R_o$  – опір при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  і  $\beta$  – температурні коефіцієнти опору. Вони визначені експериментально і наведені в довідниках, як і значення величини  $R_o$  для різних металів. Знаючи значення опорів  $R_t$ ,  $R_o$ , із зазначеної вище формули можна знайти температуру  $t^\circ$ . На використанні залежності електричного опору металів від температури побудовані манометричні прилади (манометри опору) для вимірювання низьких тисків у вакуумних системах.

### 1. 2. 2 Термопарний метод

Цей метод базується на використанні термопари. Термопарою називають два дротики з різних металів, що сукупно зварені з одного кінця у вигляді крапельки і вільні – з іншого.

Експериментально відомо, що під час нагрівання місця зварювання (крапельки) на вільних кінцях термопари виникає електрорушійна сила, величина якої пропорційна у відповідному діапазоні різниці температур нагрітої крапельки  $t_1$  і вільних кінців  $t_o$ , тому її називають термоелектрорушійною силою (Т.Е.Р.С.).  $E_t = a \cdot (t_1 - t_o)$ , де  $a$  – коефіцієнт пропорційності, який називають термопарною сталою, величину якої для відповідних різних пар металів наводять в технічних довідниках. Якщо точно знати температуру вільних кінців, то, вимірюючи Т.Е.Р.С., можна точно визначити температуру місця зварювання.

На використанні вимірювань температури нагрітого тіла за допомогою термопари у вакуумній техніці визначають тиск газу за низького ступеня вакууму. Термопари можуть бути вибрані такі: чиста **платина** і сплав **платини з 10% родію** – ця термопара дає Т.Е.Р.С. приблизно **1 мВ** за різниці температур  $100^\circ\text{C}$ ; пара: **хромель** – сплав(10%Cr + 90% Ni ) і **алюмель** – сплав(4%Al +96% Ni ) – створює Т.Е.Р.С. приблизно **5 мВ** для наведеної різниці температур.

### 1.3 Поняття “газ” і “пара”

Газ - це стан речовини. Відомо, що перехід речовини з одного стану в інший визначають його температурою відносно критичної температури, тобто такої температури, вище якої речовина завжди буде знаходитися тільки у газоподібному стані. Отже, газоподібну речовину називають **газом**, якщо її температура вище за критичну, і називають **парою**, якщо її температура не перебільшує критичну.

Наприклад, азот має критичну температуру  $-147^{\circ}\text{C}$ . Якщо азот матиме температуру вищу за  $-147^{\circ}\text{C}$ , то він завжди буде газом. Або якщо залізо має температуру меншу за  $3700^{\circ}\text{C}$  (критична температура), то навколо нього завжди буде присутня його пара. Отже за кімнатної температури навколо будь-яких твердих речовин (наприклад, металів, діелектриків і т. ін.) завжди присутня їх пара.

### 1.4 Закони ідеальних газів

Газ – це велика кількість молекул (найменших частинок речовини), які швидко і хаотично рухаються, постійно стикаючись одна з одною. Якщо газ не утримувати, то його молекули розлетяться. Гази, в яких не враховують іншу взаємодію між молекулами, ніж пружні зіткнення, називають ідеальними. Залежності між параметрами (тиском, температурою і об’ємом), що характеризують газ за зміни станів, були встановлені за допомогою експериментів ще в XVI ст.

#### 1.4.1 Закон Бойля–Маріотта

Якщо температура і маса газу залишаються незмінними, то в будь-якому стані добуток тиску газу на його об’єм є величиною також постійною:

$$pV = \text{Const} \quad (1.3)$$

Цей закон ще називають ізотермічним, тобто таким, що відображує зміни станів у газі, які відбуваються за постійної температури. Крива залежності  $V = f(p)$  очевидно є гіперболою і таким чином можна записати, що в будь-якому стані буде  $p_1V_1 = p_2V_2 = \dots = p_nV_n$ . Точки гіперболи і є станами газу.

#### 1.4.2 Закон Гей–Люссака

Якщо тиск і маса газу залишаються незмінними, то в будь-якому стані об’єм газу пропорційний його абсолютній температурі:

$$V = \text{Const} \cdot T. \quad (1.4)$$

Цей закон відображає зміни станів у газі, що відбуваються за незмінного тиску. Стала в рівнянні (1.4) відома і його наводять ще в такому вигляді:

$$V_t = \alpha \cdot V_o \cdot T = V_o \frac{T}{T_o} = V_o \cdot (1 + \alpha \cdot t^{\circ}), \quad (1.5)$$

де  $V_o$  – об’єм газу при  $0^{\circ}\text{C}$ , а коефіцієнт пропорційності  $\alpha \approx 1/273$  град $^{-1}$  називають коефіцієнтом об’ємного розширення.

### 1.4.3 Закон Шарля

Якщо об'єм і маса газу залишаються незмінними, то в будь-якому стані тиск газу пропорційний його абсолютній температурі:

$$p = \text{Const} \cdot T, \quad (1.6)$$

тобто в будь-якому стані  $p_1/T_1 = p_2/T_2 = \dots = p_n/T_n$ .

Очевидно, що тиск і температура відображають у своїй основі одне спільне явище.

### 1.4.4 Об'єднаний газовий закон Менделєєва–Клапейрона

Б. Клапейрон (1840 р.) об'єднав окремі закони для ідеальних газів і отримав таку залежність:

$$pV = B \cdot T \cdot \text{Const}, \quad (1.7)$$

тобто встановив, що добуток тиску газу на об'єм у будь-якому стані пропорційний його температурі. Виявилось, що стала  $B$  – має різні значення для різних газів. Д.І. Менделєєв (1875 р.) показав, що це пов'язано з неоднаковістю молекул різних газів і визначив, що добуток  $B \cdot \text{Const} = \nu \cdot R$ , де  $\nu$  – число молей газу ( $\nu = M/\mu$ , де  $M$  – маса газу, кг;  $\mu$  – молекулярна маса, кг/кмоль), а  $R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,31$  Дж/(моль·К)). Після цих визначень об'єднаний газовий закон для будь-яких газів буде виражати таке рівняння:

$$pV = \frac{M}{\mu} \cdot R \cdot T. \quad (1.8)$$

Його називають рівнянням (або об'єднаним газовим законом) Менделєєва – Клапейрона.

Як видно з рівняння (1.8), кількість газу (масу газу) можна виражати як у кілограмах, кілограм-молекулах, так і в одиницях  $pV$ . Останню частіше використовують у вакуумній техніці.

Дійсно, при  $T = \text{Const}$ , матимемо

$$M = \frac{\mu}{RT} pV = b \cdot pV, \quad (1.9)$$

де  $b$  - коефіцієнт пропорційності.

### 1.4.5 Закон Авогадро

Зважаючи на уявлення, що газ – це сукупність великої кількості молекул, А. Авогадро показав, що в однакових об'ємах різних газів знаходиться однакове число молекул, якщо тиски і температура теж однакові. Оскільки рівняння Менделєєва – Клапейрона справедливе для будь-якого газу то дійсно, визначивши масу газу як добуток числа молекул  $N$  на масу однієї  $m$ , тобто  $M = N m$ , можна записати

$$N = \frac{p \cdot V \cdot \mu}{R \cdot T \cdot m} \quad (1.10)$$

і зробити висновок, що число молекул будь-якого газу завжди пропорційне



відношенню його молярної маси до маси одної молекули, тобто числу  $\mu/m = N_A$ , яке показує кількість молекул в одному молі будь-якого газу і називається числом Авогадро. Експериментально Ж. Б. Перреном було визначено, що число Авогадро дорівнює  $6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

### 1.4.6 Закон Дальтона

Перед цим були розглянуті закони, що показували як змінює свій стан будь-який окремий газ. Якщо в об'ємі знаходиться суміш з  $N$  газів, що хімічно не взаємодіють, то для визначення тиску суміші використовують закон Дальтона – тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків кожного газу, що складає суміш:

$$p = \sum_{i=1}^N p_i . \quad (1.11)$$

Парціальний тиск  $p_i$  – це тиск, що створює складовий газ суміші, якби тільки цей газ один займав увесь об'єм, в якому знаходиться суміш.

Дійсно, якщо визначити в одиницях  $pV$  масу суміші газу як суму мас окремих газів, що складають суміш, то матимемо

$$pV = p_1V + p_2V + \dots + p_NV ,$$

після скорочення подібних отримаємо (1.11).

### Запитання для самоперевірки

1. У чому полягають електричні вимірювання температури?
2. Дайте визначення критичної температури тіла.
3. Сформулюйте і запишіть закон Бойля – Маріотта.
4. Сформулюйте і запишіть закон Гей – Люссака.
5. Сформулюйте, запишіть і поясніть об'єднаний газовий закон Менделєєва – Клапейрона.
6. Сформулюйте і запишіть закон Авогадро.
7. Дайте визначення парціальному тиску.
8. Сформулюйте, запишіть і поясніть закон Дальтона.

## Лекція друга

### МОЛЕКУЛЯРНО – КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ ГАЗІВ

#### 2.1 Елементи молекулярно – кінетичної теорії газів. Основне рівняння молекулярно – кінетичної теорії

Хоча будь-який газ виявляє себе завдяки тиску, закони ідеальних газів не дають можливості відповісти, що таке тиск газу і що його створює. На ці запитання допомагає відповісти молекулярно-кінетична теорія газів, яка будується на таких припущеннях:

1) усі речовини складаються з молекул. Молекула в перекладі з латинської мови означає найменшу частинку речовини, яка ще зберігає її хімічні властивості і складається з атомів;

2) газ – це сукупність окремих молекул, які знаходяться в безперервному і хаотичному русі;

3) взаємодіють молекули одна з одною тільки в результаті зіткнень, а тому траєкторія їх руху - це ламана лінія;

4) молекули настільки малі, що їх можна вважати матеріальними точками;

5) газ є ізотропним середовищем, тобто в ньому немає будь-яких переважних напрямків.

Оскільки молекули рухаються, то їх рух можна описати за допомогою законів механіки. За основним рівнянням молекулярно-кінетичної теорії газів тиск, який молекули газу створюють на стінки посудини, буде

$$p = \frac{2}{3} n \cdot W_{ck} = \frac{2}{3} n \cdot \frac{m \cdot v_{ck}^2}{2}, \quad (2.1)$$

де  $n$  – концентрація молекул, тобто число молекул в одиниці об'єму;  $m$  – маса однієї молекули газу;  $v_{ck}$  – середня квадратична швидкість молекули;  $W_{ck}$  – середня квадратична енергія поступового руху однієї молекули.

Таким чином, можна сказати, що тиск, за яким визначають наявність газу в будь-якому об'ємі - це середня сила, з якою молекули газу діють на одиницю площі стінки ємності, де він знаходиться.

З молекулярно-кінетичної теорії газів відомо, що молекули мають багато ступенів свободи руху і на одну ступінь поступового руху припадає енергія, яка дорівнює  $kT/2$ . Тому повна середньоквадратична енергія поступового руху однієї молекули

$$W_{ck} = \frac{mv_{ck}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (2.2)$$

де  $k$  – стала Больцмана, яка пов'язана з універсальною газовою сталою і числом Авогадро ( $k = R / N_A = 1,38 \cdot 10^{23}$  Дж/К).

## 2.2 Рівняння Больцмана

Враховуючи вирази (2.1) і (2.2), отримаємо рівняння Больцмана, яке фактично в іншій формі виражає об'єднаний газовий закон, але вже на основі молекулярно-кінетичної теорії:

$$p = n \cdot k \cdot T. \quad (2.3)$$

Тобто, тиск газу є пропорційним добутку його концентрації і температури. Оскільки тиск газу пропорційний кінетичній енергії молекул (див. 2.1), то тепер можна бачити, що його температура – це фактично теж кінетична енергія молекул.

Наслідком рівняння Больцмана є висновок, що молекулярна концентрація не залежить від природи газу:

$$n = \frac{p}{kT}, \quad (2.4)$$

а також можливість отримати співвідношення між густиною газу, його тиском і температурою:

$$\rho = n \cdot m = \frac{pm}{kT} = \frac{p\mu}{RT}. \quad (2.5)$$

## 2.3 Дослід Кантора

Підтвердженням молекулярно-кінетичної теорії газів є дослід Кантора.



Рис. 2.1

Якщо в колбі з водяною парою (рис.2.1) розмістити рухому слюдяну пластинку 1, яка з одного боку покрита порошком фосфорного ангідриду 2, то пластинка відхилиться від вертикального положення, наче на неї діє з непокритого боку - якась сила. Дійсно, від слюди молекули водяної пари будуть пружно відштовхуватися, тоді як на покритому боці вони будуть поглинатися ангідридом в результаті хімічного реагування.

Цей дослід показує, що молекули своїм рухом здійснюють тиск, причому з одного боку вдвічі більший, ніж з іншого.

## 2.4 Барометрична формула

Оскільки молекули газу рухаються з великими швидкостями, то за відсутності герметичної посудини вони розлетяться і газ зникне.

Якщо ж молекули газу знаходяться під дією сили тяжіння (або будь-якої центральної сили), то незважаючи на їх хаотичний рух вони не розлітаються у просторі, а утворюють газову оболонку (наприклад, атмосферу Землі). У цьому випадку тиск газу змінюється залежно від висоти  $h$  над Землею.

За теоремою Паскаля при збільшенні висоти на величину  $dh$  тиск зменшується на

$$dp = -\rho \cdot g dh. \quad (2.6)$$

Оскільки густина газу  $\rho = nm$ , а концентрацію  $n$  виразимо за рівнянням Больцмана, то можна скласти диференціальне рівняння:

$$dp = -\frac{pmg}{kT} dh. \quad (2.7)$$

Після відокремлення змінних величин і проведення інтегрування, за припущення, що сила земного тяжіння не змінюється, отримаємо залежність тиску газу від висоти над Землею:

$$p = p_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (2.8)$$

яку і називають барометричним рівнянням Больцмана;  $p_0$  – тиск газу на поверхні Землі (над рівнем моря;  $h = 0$ ). Вимірюванням тиску можна визначити висоту в атмосфері.

Якщо тиск виразити через концентрацію молекул газу і взяти до уваги, що  $mgh$  – це потенціальна енергія  $W$  молекул на висоті  $h$ , то з барометричної формули (2.8) одержимо залежність, яка покаже як змінюється концентрація молекул газу, коли вони знаходяться в будь-якому потенціальному полі:

$$n = n_0 e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (2.9)$$

де  $n_0$  – концентрація молекул газу на поверхні Землі.

Оскільки рівняння (2.8) і (2.9) справедливі для будь-якого силового поля і не тільки для молекул газу, а й інших частинок, що рухаються хаотично, то його називають законом Больцмана або законом розподілу частинок, що знаходяться під дією силового поля і рухаються хаотично.

## 2.5 Максвеллівський розподіл швидкостей молекул газу

Одним із положень молекулярно-кінетичної теорії є припущення, що молекули, з яких складається газ, рухаються хаотично і місцезнаходження будь-якої молекули має випадковий характер. Окрім цього, молекули нічим не відрізняються одна від одної і їх дуже багато (наприклад, в  $1\text{см}^3$  повітря за нормальних умов знаходиться приблизно  $10^{23}$  молекул). Усі ці положення стверджуються в досліді з броунівського руху. У зв'язку з цим важливими параметрами, що характеризують газ, будуть середні величини, тобто величини, що характеризують не одну окрему молекулу, а всі молекули одночасно в заданому об'ємі.

Для визначення і розрахунку середніх величин, що характеризують великий ансамбль одиниць, для яких наведені положення задовольняються, використовують методи статистичних досліджень, тобто науки статистики. Остання оперує такими величинами, як імовірність, флуктуація, функція статистичного розподілу, середні значення. То саме такими величинами і можна буде характеризувати газ.

Будемо вважати, що всі напрями в газі рівноймовірні і тому молекули можуть мати швидкість  $v$ , що не залежить від напрямку. Взаємодіють молекули тільки в результаті пружних зіткнень, а тому матимуть найрізніші швидкості як за напрямом, так і за величиною. Наше завдання полягає в тому, щоб відшукати закон, за яким будуть розподілятися швидкості молекул газу.

Позначимо в декартовій системі координат число молекул, швидкості яких у напрямі осі  $x$  лежать у межах від  $v_x$  до  $v_x + dv_x$ , як добуток  $f(v_x)dv_x$ . Це буде означати, що ймовірність наявності у молекули швидкості  $v_x$  дорівнює

$f(v_x)$ . Оскільки всі напрями рівноймовірні, то аналогічно в напрямі осей  $y$  і  $z$  число молекул, швидкості яких лежать у межах від  $v_y$  до  $v_y + dv_y$  і від  $v_z$  до  $v_z + dv_z$ , буде  $f(v_y)dv_y$  і  $f(v_z)dv_z$  відповідно. Таким чином, загальна кількість молекул, що в будь-який момент мають швидкості  $v_x$ ,  $v_y$  і  $v_z$ , буде дорівнювати добутку  $f(v_x) \cdot f(v_y) \cdot f(v_z) dv_x \cdot dv_y \cdot dv_z$  і це означає, що вона залежить не від напрямку, а тільки від величини швидкості.

Якщо введемо результуючу швидкість як  $v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2}$ , то тоді добуток  $f(v_x) \cdot f(v_y) \cdot f(v_z)$  можна виразити однією функцією, яка залежить тільки від  $v$ :

$$f(v_x) \cdot f(v_y) \cdot f(v_z) = F(\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}) = G(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2). \quad (2.10)$$

Єдиним рішенням цього рівняння буде функція:

$$f(v_x) = a \cdot e^{bv_x^2}, \quad f(v_y) = a \cdot e^{bv_y^2}, \quad f(v_z) = a \cdot e^{bv_z^2}.$$

Стала величина  $a$  є додатною, оскільки ймовірність не може бути від'ємною. Тоді можна записати:

$$f(v_x) \cdot f(v_y) \cdot f(v_z) = a^3 e^{bv^2}.$$

Будемо вважати, що за відповідних умов в газі є загальна кількість молекул  $N$ . Тоді частина молекул від  $N$ , які мають швидкості в межах від  $v$  до  $v + dv$ , дорівнюватиме

$$N \cdot f(v_x) \cdot f(v_y) \cdot f(v_z) dv_x \cdot dv_y \cdot dv_z = a^3 N \cdot e^{bv^2} dv_x \cdot dv_y \cdot dv_z$$

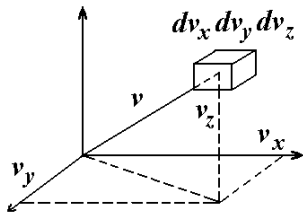


Рис. 2.2

і в просторі швидкостей в декартових координатах це можна показати, як зображено на рис. 2.2, де певна частина молекул буде знаходитися у середині вказаного куба.

Оскільки всі напрями швидкостей однаково ймовірні, то будуть ще молекули з такими ж швидкостями за величиною, але спрямовані за всіма іншими напрямками. Щоб визначити загальне число молекул з такими швидкостями, необхідно підрахувати скільки молекул буде в такому кульовому шарі радіусом

$v$  і товщиною  $dv$ . Відомо, що об'єм такого шару дорівнює  $4\pi \cdot v^2 dv$ , тоді можна записати, що частина молекул  $dN$  зі швидкостями від  $v$  до  $v + dv$  дорівнюватиме

$$dN = 4\pi a^3 N v^2 e^{bv^2} dv \quad (2.11)$$

а загальне число всіх молекул  $N$  з допущенням, що вони мають швидкості від  $v=0$  до  $v=\infty$ , тоді буде

$$N = \int_{v=0}^{v=\infty} dN = 4\pi \cdot a^3 N \int_0^{\infty} v^2 e^{bv^2} dv. \quad (2.12)$$

Загальне число молекул газу можна визначити окремо незалежно від цього, тоді з рівняння (2.12) знайдемо сталі  $a$  і  $b$ . Дійсно, інтеграл в (2.12) буде

скінченним тільки за умови, що значення сталої  $b$  є від'ємним. Таким чином,  $b < 0$ . Окрім цього, показник експоненти має бути безрозмірним, а тому розмірність  $b$  має бути оберненою до  $v^2$  і можна допустити, що  $b = -1/u^2$ , де  $u$  – якась величина з розмірністю швидкості, до того ж однакова для всіх молекул визначеного газу, але залежна від температури, що характеризує стан цього газу.

Після проведення інтегрування в (2.12) при врахуванні, що інтеграл Пуассона дорівнює

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha \cdot x^2} dx = 2 \int_0^{\infty} e^{-\alpha \cdot x^2} dx = \sqrt{\pi / \alpha}, \quad (2.13)$$

а також, що після диференціювання інтеграла в (2.13) за параметром  $\alpha$  –

$$\int_0^{\infty} x^2 e^{-\alpha \cdot x^2} dx = \frac{\sqrt{\pi / \alpha^3}}{4},$$

Із (2.12) отримаємо

$$1 = 4\pi \cdot a^3 \int_0^{\infty} v^2 e^{-v^2 / u^2} dv = 4\pi \cdot a^3 \frac{u^3 \sqrt{\pi}}{4}$$

і визначимо сталу, тобто  $a = \frac{1}{u\sqrt{\pi}}$ .

Підставляючи визначені сталі в (2.11), отримаємо

$$dN = \frac{4}{\sqrt{\pi}} N \frac{v^2}{u^2} e^{-v^2 / u^2} dv. \quad (2.14)$$

Це рівняння називають максвеллівським розподілом швидкостей газу у відповідному стані за визначеними значеннями  $u$  і  $N$ . Графік цього розподілу має такий вигляд, як на рис.2.3.

### 2.5.1 Швидкості молекул газу

З графіка функції (рис. 2.3) видно, що вона має максимум при  $v = u$ , тобто швидкість  $u$  молекули мають частіше, ніж іншого значення і з цієї причини її називають найбільш ймовірною. Наприклад, швидкість, що вдвічі більша за найбільш ймовірну зустрічається приблизно в 0,2 рази рідше, ніж найбільш ймовірна. Величина найбільш ймовірної швидкості залежить від температури і природи газу

$$u = \sqrt{2RT / \mu} = \sqrt{2kT / m}. \quad (2.15)$$

Найбільш ймовірна швидкість – це швидкість з якою рухається більша частина молекул газу.

Середню квадратичну швидкість молекул знаходять за формулою:

$$v_{ck} = \sqrt{3RT / \mu} = \sqrt{3kT / m}, \quad (2.16)$$

а середню арифметичну швидкість молекул

$$v_{ac} = \sqrt{8RT / (\pi\mu)} = \sqrt{8kT / (m\pi)}. \quad (2.17)$$

Середньо квадратична швидкість молекул відповідає кінетичній енергії молекул, а середньо арифметична швидкість – за поступальний рух молекул.

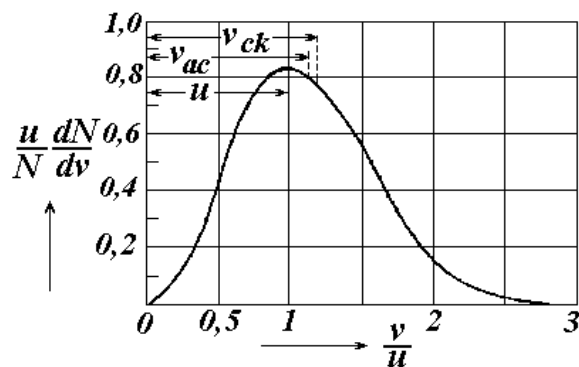


Рис. 2.3

Якщо вираз для найбільш ймовірної швидкості (2.15) підставимо в рівняння (2.14), то отримаємо в іншому вигляді функцію розподілу молекул за швидкостями, яку ще називають функцією розподілу Максвелла – Больцмана:

$$\frac{dN}{dv} = N \sqrt{\frac{2m^3}{\pi k^3 T^3}} \cdot e^{-mv^2 / 2kT} v^2. \quad (2.18)$$

При врахуванні, що кінетична енергія молекули це –

$$W = mv^2 / 2,$$

отримаємо з (2.18) функцію розподілу кінетичної енергії молекул:

$$\frac{dN}{dW} = 2N \sqrt{\frac{1}{k^3 \pi T^3}} \cdot e^{-W / kT} W^{1/2}. \quad (2.19)$$

### Запитання для самоперевірки

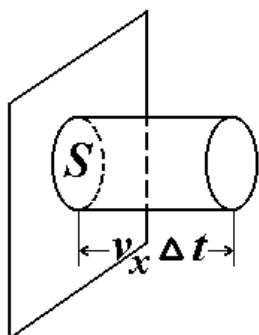
1. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії газів.
2. Що таке тиск згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів?
3. Сформулюйте і запишіть рівняння Больцмана і наслідки, що впливають з нього.
4. Що показує дослід Кантора?
5. Поясніть, що відображає барометричне рівняння Больцмана.
6. Як змінюється концентрація газу, що знаходиться під дією центральної сили?
7. За яких умов максвеллівський розподіл швидкостей молекул справедливий?
8. Який вигляд має максвеллівський розподіл швидкостей молекул і що він показує?
9. Запишіть як виражається середня квадратична швидкість молекул газу через його температуру.
10. Дайте визначення найбільш ймовірної швидкості молекул газу.

## Лекція третя

### ЧИСЛО МОЛЕКУЛ, ЩО УДАРЯЮТЬСЯ В СТІНКУ. ТЕЧІЯ ГАЗУ ЧЕРЕЗ ОТВІР У ТОНКІЙ СТІНЦІ. ЗАКОН ГРЕХЕМА

#### 3.1 Число молекул, що ударяються в стінку

У вакуумній техніці в багатьох випадках необхідно визначити кількість молекул газу, що проникнуть за одиницю часу через якийсь отвір у стінці ємності, в якій утримують газ. Для цього необхідно знати кількість молекул газу, що ударяються за одиницю часу в одиницю площини стінки ємності, в якій утримують газ.



Розглянемо циліндр з площею основи  $S$  і довжиною  $v_x \cdot \Delta t$ , що дорівнює відстані, яку пробігає одна молекула за проміжок часу  $\Delta t$ , маючи на увазі, що вона ударяється в стінку (основу  $S$ ). Тоді число молекул, що ударяються в основу  $S$  дорівнюватиме

$$n_t = \frac{n \cdot S \cdot v_x}{2} \Delta t,$$

де  $n$  – концентрація газу.

Двійка в знаменнику показує, що тільки половина молекул спрямовується до кожної основи.

Рис. 3.1

Оскільки  $v_x = v_{ck} / \sqrt{3}$ , то за одиницю часу

$$n_t = \frac{n \cdot S \cdot v_{ck}}{2\sqrt{3}}.$$

Замінімо середню квадратичну швидкість на середню арифметичну, тоді отримаємо

$$n_t = v_{ac} \frac{n}{4} S \sqrt{\frac{\pi}{2}}.$$

Якщо враховувати, що не всі молекули спрямляються до основи  $S$  перпендикулярно, а частина буде ударятися під всілякими кутами, то необхідно підкореневий вираз замінити на одиницю і остаточно отримаємо число молекул газу, які ударяються за одиницю часу в одиницю площі ( $S=1$ ) стінки

$$n_t = \frac{1}{4} n \cdot v_{ac}. \quad (3.1)$$

Використовуючи рівняння Больцмана (2.3) і формулу (2.17) матимемо, що ця кількість прямо пропорційно залежить від тиску

$$n_t = \sqrt{\frac{1}{2m\pi kT}} \cdot p. \quad (3.2)$$

Якщо маємо знайти масу молекул газу, що ударяються за одиницю часу в одиницю площі стінки ємності, в якій знаходиться газ, необхідно число молекул, що ударяються за одиницю часу в одиницю площі стінки (3.2)



помножити на масу одної молекули газу, що знаходиться в ємності. Тобто отримаємо

$$M_t = m \cdot n_t = \sqrt{\frac{m}{2\pi k}} \cdot \frac{p}{\sqrt{T}}. \quad (3.3)$$

Якщо маємо знайти середню енергію молекул газу, що ударяються за одиницю часу в одиницю площі стінки ємності, в якій знаходиться газ, необхідно мати на увазі, що середня енергія молекул газу (див. формулу 2.2) дорівнює  $W_{ck} = \frac{3}{2}kT$ , тобто на кожен поступальний ступінь свободи ( $x, y, z$ ) припадає енергія  $kT/2$ . За ступенями свободи  $y$  і  $z$  середня енергія молекул, що ударяються за одиницю часу в одиницю площі стінки ємності буде однаковою і дорівнюватиме  $kT/2$  за кожним вказаним поступальним ступенем свободи, але середня енергія молекул за ступенем  $x$  має бути більшою, оскільки число молекул, що ударяються за одиницю часу в одиницю площі стінки ємності пропорційне  $v_{ck}$ , тобто буде збільшене швидкими молекулами. Тому середня енергія молекул за ступенем  $x$  буде дорівнювати  $kT$  і тоді середня енергія молекул газу, що ударяються за одиницю часу в одиницю площі стінки ємності буде дорівнювати  $2kT$ .

З практичних міркувань часто важливо знати не число  $n_t$ , а об'єм  $V_t$  цих молекул. Щоб визначити цей об'єм необхідно число молекул  $n_t$  (3.1) розділити на концентрацію газу і отримаємо  $V_t = v_{ac} / 4$ .

### 3.2 Середня довжина вільного пробігу молекул

Незважаючи на хаотичність руху, відповідну частину свого шляху молекули газу проходять без зіткнень з іншими. Відстань, яку проходить молекула між двома послідовними зіткненнями, називають довжиною вільного пробігу молекули.

Середню довжину всіх прямолінійних відрізків шляхів, які молекула проходить між двома послідовними зіткненнями, називають середньою довжиною вільного пробігу молекули:

$$\lambda_c = \frac{v_{ac}}{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot d_m^2 \cdot (1 + C/T)}, \quad (3.4)$$

де  $\nu$  – число зіткнень молекули за одиницю часу;  $d_m$  – діаметр молекули;  $C$  – постійна величина, яку називають сталою Сазерленда.

Знову використовуючи рівняння Больцмана одержимо, що середня довжина вільного пробігу молекули залежить від тиску і температури, тобто визначається концентрацією газу

$$\lambda_c = \frac{k}{\sqrt{2}\pi \cdot d_m^2 (1 + C/T)} \cdot \frac{T}{p}. \quad (3.5)$$

Для скорочення записів вводять величину  $d_T$ , яку називають ефективним діаметром молекули:

$$d_T^2 = d_m^2(1 + C/T). \quad (3.6)$$

Стала Сазерленда залежить від роду газу, її значення наводять в фізичних довідниках.

При  $p = 1 \text{ Па}$  і  $T = 273 \text{ К}$  для повітря середня довжина вільного пробігу молекул

$$\lambda_{co} = 6.7 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}. \quad (3.7)$$

Тоді за будь-яких інших тисків для повітря

$$\lambda_{cp} = \lambda_{co} / p. \quad (3.8)$$

За дії різних причин в газі можуть з'являтися вільні електрони, тобто може додатково виникати електронний газ. Середня довжина вільного пробігу вільних електронів у газі

$$\lambda_{ce} = \sqrt{32} \cdot \lambda_{cp}, \quad (3.9)$$

тобто не залежить від їх концентрації і діаметра.

### 3.3 Властивості розріджених газів

До розріджених газів відносять високий вакуум. Очевидно, що в стані високого вакууму середня довжина вільного пробігу молекул  $\lambda_c$  буде визначатися характерним розміром  $D$  посудини, де знаходиться газ. Зменшення густини газу (збільшення розрідженості) за цих обставин не впливає на середню довжину вільного пробігу молекул, оскільки  $\lambda_c = D$ , а тільки зменшує число молекул, що переносять кінетичну енергію.

Отже, ступінь розрідженості залежить від відношення  $\lambda_c$ , що пов'язана з їх взаємними зіткненнями, до характерного лінійного розміру  $D$  посудини, де знаходиться газ. Якщо  $\lambda_c \ll D$ , то вважають, що це стан низького вакууму;

$\lambda_c \leq D$  – середнього вакууму;  $\lambda_c \geq D$  – високого вакууму;  $\lambda_c \gg D$  – надвисокого вакууму.

### 3.4 Закон Грехема

Молекули газу рухаються хаотично, але газ, як ціле також може переміщуватися і таке переміщення називають потоком газу.

Явище перетікання газу під впливом різниці тисків через малий отвір у тонкій стінці називають ефузією (в перекладі з латини – розлиттям) газу.

Якщо в стінці є отвір (рис. 3.2), площа якого  $S$ , то маса газу (витрата газу), що проходить через цей отвір за одиницю часу, як це слідує з формули (3.3), буде дорівнювати

$$M_p = \frac{1}{4} m \cdot v_{ac} \cdot S \cdot (n_1 - n_2), \quad (3.10)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – концентрація молекул газу відповідно в області 1 і 2; ( $n_1 > n_2$ ), що знаходяться по обидва боки від отвору, при цьому вважаємо, що температура однакова.

Якщо виразимо  $n_i$  та  $v_{ac}$  за формулами (2.4) і (2.17),

Рис. 3.2

одержимо закон Грехема

$$M_p = (p_1 - p_2) S \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}. \quad (3.11)$$

Якщо виразити витрату газу не в одиницях маси, а в одиницях об'єму за тиском  $p_1$ , то

$$M_V = \frac{(p_1 - p_2)}{p_1} S \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}. \quad (3.12)$$

Слід зазначити (будемо вважати, що отвір круглий, діаметром  $D$ ), що формули (3.11) і (3.12) справедливі, коли  $\lambda_c \gg D$ , де  $\lambda_c$  - середня довжина вільного пробігу молекул в частині 1 або 2.

При  $p_1 \gg p_2$  (наприклад  $p_1 > 10 p_2$ )

$$M_V = S \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}}, \quad (3.13)$$

тобто об'єм газу, що пройде через отвір за тиском  $p_1$ , не залежить від цього тиску. Якщо за атмосферного тиску ( $p_1 = 760 \text{ Торр}$ ) у стінці вакуумної камери, де, наприклад, створено тиск  $p_2$ , з'явиться отвір діаметром 1 мм, то об'єм повітря ( $\mu = 29$ ) при  $20^\circ \text{ C}$ , що буде надходити до камери за одну секунду, дорівнюватиме

$$M_V = 363 \text{ см}^3/\text{с} = 0,363 \text{ л/с}$$

### 3.5 Ефузія

Звичайні гази витікають через великі отвори струменем, тобто як суцільна речовина. Витікання через малі отвори для розріджених газів суттєво відрізняється від звичайних.

Явище перетікання розріджених газів під впливом різниці тисків через малий отвір у тонкій стінці (діаметр отвору значно менший за середню довжину вільного пробігу молекул газу) називають *ефузією* (в перекладі з латинської мови **effusion** – розлиття) газу.

Зазначена умова задовольняється у пористих тілах (наприклад, металах або посудинах з неглазурованої порцеляни).

За однакової температури легкі гази краще проходять через пористу стінку ніж важкі, оскільки, наприклад, для двох газів, як слідує з (3.13)

$$\frac{M_{V_1}}{M_{V_2}} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}},$$

тобто, витрати газу обернено пропорційні квадратному кореню з їх молекулярних мас.

Проявом ефузії є хоча й повільне, але з часом наповнення скляних (скло пірекс) вакуумних приладів атмосферним гелієм. Явище ефузії газів широко використовують для розділення (збагачення) ізотопів.

### 3.6 Термічна ефузія

Якщо в звичайному газі створити різницю температури, то поступово (завдяки хаотичному руху молекул) температура вирівнюється і буде однаковою у всіх частинах об'єму з газом, як і тиск, що буде відповідати цій температурі. По іншому відбувається в розрідженому газі.

Перетікання (розлиття) розрідженого газу через малий отвір у стінці (рис. 3.2) може відбуватися і за однакових початкових тисків ( $p_1 = p_2$ ), але різних температур. Якщо ( $T_1 > T_2$ ), то через отвір за одиницю часу відбудеться витрата газу

$$M_p = \frac{1}{4} m \cdot S \cdot (n_2 \cdot v_{ac2} - n_1 \cdot v_{ac1}) = \frac{1}{4} m \cdot S \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k}} \left( \frac{p_2}{\sqrt{T_2}} - \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \right). \quad (3.14)$$

Молекули газу проходять через отвір без зіткнень між собою. Виникне два зустрічних молекулярних потоки, які вирівнюються тоді, коли вираз в дужках в (3.14) дорівнюватиме нулю. Тобто тиски стануть різними, відповідно як

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}. \quad (3.15)$$

Явище появи різних тисків унаслідок перетікання газу через отвір зі сторони з меншою температурою називають термічною ефузією або – ефектом Кнудсена.

#### Запитання для самоперевірки

1. Що впливає на число молекул газу, що ударяються за одиницю часу в одиницю поверхні стінки ємності?
2. Дайте визначення середньої довжини вільного пробігу молекул у газі.
3. Що впливає на середню довжину вільного пробігу молекул?
4. Що називають “ефузією” в газі?
5. Сформулюйте закон Грехема.
6. Що виникає внаслідок термічної ефузії?

## Лекція четверта

### ЯВИЩА ПЕРЕНОСУ В ГАЗАХ

#### 4.1 Теплопровідність газів. Закон Фур'є

На попередній лекції було доведено, що газ – як ціле може перетікати з одної частини простору до іншої, якщо характерні параметри газу в цих частинах відрізняються за величиною. Але і в самому газі можуть виникати відповідні явища, якщо в різних місцях посудини, де знаходиться газ, характерні параметри газу відрізняються за величиною.

Якщо в газі створити ділянки з різною температурою, тобто нагріти якусь окрему частину об'єму і більше не підтримувати нагрівання, то з часом у всьому об'ємі температура підвищиться і вирівняється до однакової у будь-якому місці об'єма. Тепло від ділянки з більшою температурою буде переноситися до ділянки з меншою температурою доти, поки температура не вирівняється. Такий процес перенесення тепла здійснюється завдяки хаотичному руху молекул газу і зникає після вирівнювання температури, тому його називають нестационарним.

Якщо різницю температур постійно підтримувати, то перенесення тепла буде відбуватися постійно, і такий процес переносу називають стаціонарним.

Для аналізу теплопровідності розглянемо стаціонарний процес переносу тепла в газі, що знаходиться між двома паралельними пластинами з різними температурами з боків і будемо вважати для спрощення, що перенесення тепла відбувається тільки уздовж осі  $x$ .

**Властивість газу переносити теплоту називають теплопровідністю газу.** Кількість теплоти, що переноситься газом за час  $\Delta t$  через поверхню  $\Delta S$ , тобто потік тепла  $Q_w$ , визначають за законом Фур'є:

$$Q_w = -\chi \frac{dT}{dx} \Delta S \cdot \Delta t, \quad (4.1)$$

де  $\frac{dT}{dx}$  – градієнт температури в напрямі, що перпендикулярний до поверхні  $\Delta S$ , а  $\chi$  – коефіцієнт теплопровідності газу [ $\chi$ ] = Вт/(м·К). Знак “мінус” показує, що теплота переноситься до частини з меншою температурою.

За молекулярно-кінетичною теорією коефіцієнт теплопровідності газу дорівнює

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \cdot v_{ca} \lambda_c c_V, \quad (4.2)$$

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

Оскільки густина газу пропорційна тиску –  $\rho \sim p$ , а середня довжина вільного пробігу взагалі обернено пропорційна тиску –  $\lambda_c \sim 1/p$ , то можна зробити важливий висновок, що теплопровідність газу не залежить від його

тиску. Це дійсно так, але не завжди і залежить від ступеня вакууму, тобто розрідженості газу або, іншими словами, від співвідношення середньої довжини вільного пробігу молекул і характерного розміру об'єму, в якому газ знаходиться.

За високого вакууму число взаємних зіткнень молекул  $N_{mm}$  значно менше, ніж число зіткнень зі стінкою ємності, де знаходиться газ,  $N_{mc}$ , тому втрата тепла нагрітим тілом, розміщеним в газі, і викликана молекулами, буде незначною, а потік тепла між нагрітим і холодним тілами (вважаємо, що це паралельні пластини) вже буде прямо пропорційним тиску, тобто  $\chi \sim p$ .

Дійсно,

$$Q_w = \alpha \cdot p \sqrt{\frac{2R}{\pi \cdot \mu \cdot T_c}} (T_1 - T_2) \cdot S_n, \quad (4.3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт акомодатії;  $S_n$  – площа поверхні пластини;  $T_c$  – середня температура. Коефіцієнт акомодатії – це поправка, що залежить від природи газу і матеріалу пластин, його звичайна величина знаходиться в межах 0,2 – 0,99.

## 4.2 Дифузія в газах. Закон Фіка – основний закон дифузії

Дифузією називають фізичне явище проникнення двох або декількох стичних речовин одна в одну. Це явище є ще одним підтвердженням молекулярної будови речовин. Якщо з'єднати два або декілька газів, то з часом неоднорідна суміш перетвориться в однорідну, в якій кожний газ рівномірно розподілиться в іншому. Переміщення компоненти газу за дії різниці її концентрації називають дифузійним потоком цієї компоненти.

Будемо вважати для спрощення, що концентрація змінюється, наприклад, уздовж осі  $x$ .

Закон Фіка стверджує, що дифузійний потік маси газу пропорційний градієнту густини і протікає в протилежному напрямі:

$$D_m = -D \frac{d\rho}{dx}, \quad (4.4)$$

де  $d\rho/dx$  – градієнт густини газу в напрямі осі  $x$ ;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $D_m$  – потік маси газу; тобто маса газу, що переноситься за одиницю часу через одиницю поверхні, перпендикулярної до осі  $x$ . Знак “мінус” показує, що перенесення маси відбувається до частини, де менша густина.

Коефіцієнт дифузії дорівнює:

$$D = \frac{1}{3} \lambda_c v_{ca} \quad [\text{м}^2 \text{с}^{-1}], \quad (4.5)$$

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

Якщо розглядають дифузію різних газів, то вводять коефіцієнт взаємної

дифузії. Наприклад, для двох різних газів:

$$D_{\text{ез}} = \frac{D_1 n_2 + D_2 n_1}{n_1 + n_2}, \quad (4.6)$$

де  $n_1, n_2$  – початкові концентрації газів, а  $D_1, D_2$  – коефіцієнти самодифузії першого і другого газів відповідно.

Якщо один з газів має малу концентрацію, наприклад,  $n_2 \ll n_1$ , тобто газ 2 є лише малою домішкою в газі 1, тоді

$$D_{\text{ез}} = \frac{v_{2ca} \lambda_{2c}}{3} = \frac{2}{3d_m^2 p} \sqrt{\frac{k^3 T^3}{\pi^3 m_2}}. \quad (4.7)$$

Формула (4.4) дозволяє визначити молекулярну швидкість  $v_{\text{дф}}$ , з якою буде відбуватися дифузія в цьому випадку, тобто швидкість переносу маси моля газу через одиницю площі, перпендикулярної до напрямку осі  $x$ .

Дійсно,

$$v_{\text{дф}} = -D_2 \frac{dn_2}{dx}. \quad (4.8)$$

Таким чином, якщо два гази дифундують у третій, то швидкості їх дифузії обернено пропорційні квадратному кореню з їх молекулярної ваги, тобто

$$\frac{v_{1\text{дф}}}{v_{2\text{дф}}} = \frac{D_1}{D_2} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}}. \quad (4.9)$$

Легший газ швидше дифундує, ніж газ, який важчий. Отримана залежність важлива, її використовують при конструюванні дифузійних насосів.

### 4.3 В'язкість газів

В'язкість газів - це фізичне явище, яке показує, що в газі є внутрішнє тертя. Справді, якщо здійснити обертання диска 1 (рис. 4.1), то побачимо, що підвішений на нитці кручення верхній диск 2 також з часом почне обертатися, тобто на нього почне діяти сила, яку переносять молекули газу від диска 1. Окрім цього потужність, яку треба витратити, щоб викликати обертання диска 1, буде меншою за відсутності газу.

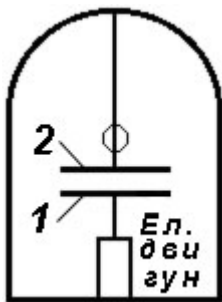


Рис. 4.1

Таким чином в'язкість газів – це властивість вирівнювання швидкостей руху різних шарів газу. Будь-який вітер – це потік повітря, тому з часом стихає завдяки наявності внутрішнього тертя в газах.

Сила тертя або імпульс, що переноситься, наприклад, уздовж осі  $x$  за одиницю часу через одиницю поверхні, перпендикулярної до осі  $x$ , пропорційні градієнту швидкості (рис. 4.2). Коефіцієнт пропорційності називають коефіцієнтом внутрішнього тертя:

$$F = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (4.10)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт внутрішнього тертя, або ще його називають коефіцієнтом динамічної в'язкості,  $i$  є тангенціальною силою, що діє на одиницю площі в шарі газу, якщо зменшення швидкості в цьому напрямі дорівнює одиниці (тобто градієнт швидкості дорівнює одиниці),  $v$  – швидкість переміщення газу.

Знак “мінус” показує, що перенесення імпульсу відбувається до області, де менша швидкість газу.

За причини внутрішнього тертя для забезпечення протікання газу через трубопровід необхідна різниця тисків,  $p_2 > p_1$ , причому, чим більший коефіцієнт внутрішнього тертя, тим більшою має бути ця різниця.

Коефіцієнт в'язкості дорівнює:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot v_{ca} \lambda_c = \frac{0,62}{d_m^2} \sqrt{\frac{mkT}{\pi^3}} \text{ [кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}] \quad (4.11)$$

має розмірність  $l^{-1}mt^{-1}$ , в системі СГС вимірюється в пуазах (П) ( $1\text{П}=0,1 \text{Па} \cdot \text{с}$ ) і залежить від природи газу. В довідниках часто наводять коефіцієнт  $\eta_k$ , який

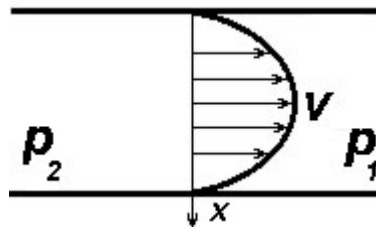


Рис. 4.2

називають коефіцієнтом кінематичної в'язкості ( $\eta_k = \eta / \rho$ ), його розмірність  $l^2t^{-1}$ , а одиниця має назву стокс (Ст, St),  $1 \text{Ст} = 10^{-4} \text{м}^2/\text{с}$ .

Між коефіцієнтом в'язкості і коефіцієнтом теплопровідності існує співвідношення:

$$\chi = \eta \cdot c_v.$$

### Запитання для самоперевірки

1. Що розуміють під теплопровідністю газів?
2. Сформулюйте і запишіть закон Фур'є.
3. Зробіть аналіз, від чого залежить коефіцієнт теплопровідності газу.
4. Що розуміють під дифузією в газі?
5. Сформулюйте і запишіть закон дифузії Фіка.
6. Яке співвідношення існує між коефіцієнтом в'язкості та теплопровідності в газі?
7. З чим пов'язане внутрішнє тертя в газі?



## Лекція п'ята

### ТЕЧІЯ ГАЗУ ЧЕРЕЗ ВАКУУМНІ МАГІСТРАЛИ

Маса газу, що знаходиться в даному об'ємі, незалежно від безперервного руху його молекул залишається нерухомою. Але газ як ціле можна переміщати. Наприклад, при течії через трубопровід маса газу переміщується відносно стінок. Течія газу відбувається за дії різних сил, а тому в залежності від параметрів газу і конструктивних розмірів вакуумпроводу має різний вид. Так в газі можуть виникати місцеві вихори, або ж буде поступово переміщуватися як ціле. Розрізняють такі течії газу, як турбулентна і ламінарна. Остання відрізняється від першої тим, що не супроводжується виникненням завихрень в газі. Для вакуумної техніки більш важливою є ламінарна течія, яку й будемо розглядати.

#### 5.1 Число Кнудсена

Оскільки молекули газу окрім зіткнень між собою будуть мати ще зіткнення зі стінками трубопроводу, то очевидно, що течія газу, як і ступінь вакууму залежатимуть від співвідношення цих зіткнень.

М. Кнудсен запропонував число, за яким можна оцінити ступені вакууму. Числом Кнудсена  $Kn$  називають відношення числа зіткнень молекул за одиницю часу зі стінками трубопроводу до числа зіткнень між собою:

$$Kn = \frac{N_{mc}}{N_{mm}}. \quad (5.1)$$

Число зіткнень молекул за одиницю часу зі стінками трубопроводу  $N_{mc}$  обернено залежить від характерного розміру вакуумпроводу, наприклад від діаметра  $D$ , якщо трубопровід є циліндричною трубою. Дійсно, чим більший радіус, тим менше це число.

Число зіткнень молекул за одиницю часу між собою  $N_{mm}$  обернено залежить від середньої довжини вільного пробігу  $\lambda_c$ . У зв'язку з цим, число Кнудсена визначають ще як

$$Kn = \frac{\lambda_c}{D}. \quad (5.2)$$

Дійсно, чим більша середня довжина вільного пробігу молекул, тим менше буде зіткнень молекул між собою, тобто чим вище вакуум, тим більше число Кнудсена. І навпаки, чим більший діаметр вакуумпроводу відносно середньої довжини вільного пробігу молекул, тобто нижчий вакуум, тим менше число Кнудсена.

#### 5.2 Ступені вакууму

Газ у стані з тиском нижче атмосферного, тобто вакуум, може мати багато ступенів. У вакуумній техніці розрізняють такі три головні ступені вакууму, як низький, середній і високий, а також додатковий – надвисокий вакуум.

Оскільки явища, що протікають у газовому середовищі, дуже залежать від співвідношення зіткнень молекул як між собою, так і зі стінками посудини, що утримує газ. Тому кількісно ступені вакууму можна характеризувати числом Кнудсена  $Kn$ , а якісно також ще за тиском або за середньою довжиною вільного пробігу молекул.

Вважають, що			
низький вакуум	$Kn \ll 1; 760 > p > 1$	<b>Торр;</b>	$\lambda_c < 47 \text{ мкм}$
середній	$Kn \sim 1; 1 > p > 10^{-3}$	<b>Торр;</b>	$47 \text{ мкм} < \lambda_c < 50 \text{ мм}$
високий	$Kn > 1; 10^{-3} > p > 10^{-7}$	<b>Торр;</b>	$50 \text{ мм} < \lambda_c < 0,5 \text{ км}$
надвисокий	$Kn \gg 1; p < 10^{-7}$	<b>Торр;</b>	$0,5 \text{ км} < \lambda_c \sim 50 \text{ км}$

Показником ступеня вакууму також може бути число молекул в одиниці об'єму (концентрація  $n$  в  $\text{м}^{-3}$ ). Так, низький вакуум відповідає  $n = 10^{25} \div 10^{22}$ , середній –  $n = 10^{22} \div 10^{19}$ , високий –  $n = 10^{19} \div 10^{13}$  і надвисокий –  $n < 10^{13}$ .

Слід пам'ятати, що ці ступені розрізняють умовно. Так, стан газу, який знаходиться в пористому твердому тілі (наприклад, у металі), відповідає високому вакууму навіть за атмосферного тиску газу, що знаходиться навколо металу, тому що число Кнудсена, у цьому випадку значно більше одиниці.

### 5.3 Режими течії газів. В'язкісний режим

За числом Кнудсена можна також визначати режими течії газу. У вакуумній техніці описання течії газу поділяють на три режими залежно від величини числа Кнудсена.

За великим тиском, коли середня довжина вільного пробігу молекул мала в порівнянні з діаметром трубопроводу (число Кнудсена мале), характер течії буде визначатися взаємодією між молекулами і газ можна розглядати як суцільне в'язке середовище, тому таку течію називають в'язкісною, а режим течії газу – в'язкісним.

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

Перехідний проміжок між в'язкісним і молекулярним режимом характеризують проміжними значеннями числа Кнудсена, при цьому обидва типи зіткнень впливають на характер течії, тому і режим називають молекулярно - в'язкісним.

В'язкісний режим ще називають режимом Пуазейля. Число Кнудсена відповідає нерівності

$$\lambda_c / D < 0,005. \quad (5.3)$$

Тобто у в'язкісному режимі течії середня довжина вільного пробігу молекул приблизно у тисячу разів менша за діаметр вакуумпроводу.

Межі режимів течії газу при розрахунку вакуумних систем зручно ще визначати за величиною добутку  $D \cdot p$ . Так, для повітря при  $25^\circ \text{C}$   $\lambda_c = 5 / p_{\text{мторр}}$  (тиск у міліторрах), тоді в'язкісний режим (діаметр вимірюють у сантиметрах) буде визначатися нерівністю:

$$D \cdot p_{\text{мторр}} > 1000 [\text{мТорр} \cdot \text{см}] \text{ або } D \cdot p_{\text{торр}} > 1 [\text{Торр} \cdot \text{см}]. \quad (5.4)$$

Знайдемо, як буде визначатися витрата газу, тобто кількість газу, що перетікає за одиницю часу через трубопровід під дією додатної різниці тисків  $p_2 - p_1$ . Для цього в трубопроводі, що має довжину  $l$  і радіус  $r_o$ , виділимо при

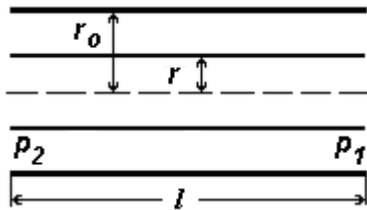


Рис. 5.1

осі симетрії малий елемент газового циліндра радіусом  $r$  рис. 5.1. За стаціонарної течії сили, що діють на цей елемент, будуть знаходитися в рівновазі.

Ці сили можна розділити на два види:

сили, що виникають від дії різниці тисків і дорівнюють добутку цієї різниці на площу поперечного перерізу елемента

$$f_1 = (p_2 - p_1)\pi \cdot r^2; \quad (5.5)$$

сили, що викликають гальмування і виникають під дією внутрішнього тертя, тобто

$$f_2 = -\eta \cdot S \frac{dv}{dr}, \quad (5.6)$$

де  $S$  - бокова поверхня газового елемента,  $v$  - швидкість переміщення газу, а  $dr$  відповідає  $dx$  в (4.10).

Рівновага встановиться при  $f_1 = f_2$ . Отже

$$(p_2 - p_1)r^2\pi = -2rl\pi\eta \frac{dv}{dr},$$

тобто

$$(p_2 - p_1)r = -2l\eta \frac{dv}{dr}$$

Після інтегрування отримаємо:

$$(p_2 - p_1)\frac{r^2}{2} = -2l\eta v + C.$$

Сталу інтегрування визначимо з умови, що при  $r = r_o$   $v = 0$ . Тоді

$$v = \frac{(p_2 - p_1)(r_o^2 - r^2)}{4l\eta}. \quad (5.7)$$

Можна побачити, що швидкість змінюється залежно від радіуса за параболічним законом (рис. 4.2). Тепер можна визначити об'ємну витрату газу - об'єм переміщеного газу за одиницю часу, який ще називають потоком газу, що вимірюється при середньому тиску в трубці  $p = (p_1 + p_2)/2$ , як

$$D_v = \int_0^{r_o} v 2\pi r dr = \frac{r_o^4 \pi}{8l\eta} (p_2 - p_1), \quad (5.8)$$

а масову витрату (в одиницях маси):

$$D_m = D_v \rho = \frac{r_o^4 \pi}{8l\eta} (p_2 - p_1) p \frac{\mu}{RT}. \quad (5.9)$$

#### 5.4 Молекулярний режим

Молекулярний режим ще називають режимом Кнудсена. Число Кнудсена відповідає нерівності  $\lambda_c / D > 1,5$ . Для повітря при  $25^\circ \text{C}$  молекулярний режим буде визначатися такою нерівністю:

$$D \cdot p_{\text{мтор}} < 7,5 [\text{м Торр} \cdot \text{см}]. \quad (5.10)$$

При молекулярному режимі середня довжина вільного пробігу молекул більша за діаметр трубопроводу. Тому сила, що виникає від дії різниці тисків, буде дорівнювати:

$$f_1 = (p_2 - p_1) \pi \cdot r_o^2,$$

а гальмуюча сила - імпульс, що переноситься до стінок за одиницю часу всіма молекулами, які будуть ударятися в стінку:

$$f_2 = n_t m v S.$$

Після підстановки виразів для  $n_t$  і  $S$  матимемо:

$$f_2 = \frac{r_o \pi}{2} l m n v_{ca} v. \quad (5.11)$$

Рівновага цих сил відповідає рівнянню:

$$(p_2 - p_1) \pi \cdot r_o^2 = \frac{r_o \pi}{2} l m n v_{ca} v,$$

за допомогою якого можна встановити, що швидкість переміщення газу не змінюється залежно від радіуса трубки, тобто стала в будь-якій точці поперечного перерізу:

$$v = \frac{2r_o}{l m n v_{ca}} (p_2 - p_1) = \frac{(p_2 - p_1) r_o}{pl} \sqrt{\frac{\pi \cdot RT}{2\mu}}. \quad (5.12)$$

При визначенні об'ємної витрати газу слід врахувати, що не всі молекули будуть ударятися в стінку тільки перпендикулярно, тоді

$$D_v = \frac{8(p_2 - p_1) r_o^3}{3pl} \sqrt{\frac{\pi \cdot RT}{2\mu}}, \quad (5.13)$$

а масова витрата (в одиницях маси):

$$D_m = D_v \frac{p\mu}{RT} = \frac{8(p_2 - p_1) r_o^3}{3 \cdot l} \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu}{2RT}}. \quad (5.14)$$

Цю формулу ще називають законом Кнудсена.

## 5.5 Порівняння двох режимів течії газу

В обох режимах масова витрата газу пропорційна різниці тисків і обернено пропорційна довжині трубки.

Між режимами існують такі відмінності:

а) за в'язкісного режиму потік газу пропорційний радіусу трубки у четвертому степені, тоді як за молекулярного режиму – у третьому степені;

б) залежність від середнього тиску спостерігається тільки за в'язкісного режиму, тобто потік газу за молекулярного режиму не залежить від середнього тиску в трубопроводі;

в) залежність від молекулярної маси і температури газу більша за в'язкісного режиму, ніж за молекулярного.

Отримані залежності використовують при розрахунках вакуумних систем.

## 5.6 Молекулярно-в'язкісний режим

У молекулярно-в'язкісному режимі число Кнудсена має проміжне значення, тобто таке, що більше за значення, яке відповідає в'язкісному і менше за значення, що відповідає молекулярному режиму:  $0,005 < \lambda_c / D < 1,5$ .

Для повітря при  $t^o = 25^o \text{ C}$  молекулярно-в'язкісний режим визначають такою нерівністю:

$$100 > D \cdot p_{\text{тор}} > 0,0075 [\text{Торр} \cdot \text{см}]. \quad (5.15)$$

## 5.7 Перепускна властивість вакуумпроводів

Витрата газу, як зазначено вище, завжди пропорційна різниці тисків, під дією якої виникає потік. Тому можна визначити коефіцієнт пропорційності як

$$U = \frac{D_v}{p_2 - p_1} [\text{м}^3/\text{с}],$$

де витрата газу виражена в одиницях  $pV/\text{с}$ .

Величину  $U$ , що характеризує витрату газу при одиничній різниці тисків, називають перепускною властивістю або провідністю трубопроводу. Очевидно, що провідність залежить від режиму течії газу і визначається геометричними характеристиками трубопроводу.

### 5.7.1 Провідність вакуумпроводів (в'язкісний режим):

- для довгого ( $l/r > 20$ ) циліндричного трубопроводу

$$U = 72,32 \frac{r^4}{l \cdot \lambda_c} \sqrt{\frac{T}{\mu}} [\text{м}^3/\text{с}]; \quad (5.16)$$

- для круглого отвору з площею  $S$  (газ - повітря при  $t^o = 20^o \text{ C}$ )

$$U = 200 \frac{Sp_2}{p_2 - p_1} [\text{м}^3/\text{с}]. \quad (5.17)$$

### 5.7.2 Провідність вакуумпроводів (молекулярний режим):

- для довгого циліндричного трубопроводу

$$U = 304,8 \frac{r^3}{l} \sqrt{\frac{T}{\mu}} [\text{м}^3/\text{с}]; \quad (5.18)$$

- для короткого ( $l/r < 20$ ) циліндричного трубопроводу (газ - повітря при  $t^o = 20^o \text{C}$ )

$$U = 968 \frac{r^3}{l + 2,66 \cdot r} [\text{м}^3/\text{с}]; \quad (5.19)$$

- для круглого отвору радіусом  $r$  (газ - повітря при  $t^o = 20^o \text{C}$ )

$$U = 364r^2 [\text{м}^3/\text{с}]. \quad (5.20)$$

### 5.7.3 Провідність вакуумпроводів (в'язкісно - молекулярний режим)

В'язкісно - молекулярний режим відповідає середньому вакууму. Для знаходження провідності в цьому режимі використовують провідності в'язкісного і молекулярного режимів, що входять до напівемпіричної формули, яку запропонував М. Кнудсен:

$$U = U_g + bU_m, \quad (5.21)$$

де коефіцієнт  $b$  залежить від тиску і змінюється в межах від 0,8 до 1.

На межі молекулярного режиму (з порівняно низьким тиском)  $b=1$ , а на межі в'язкісного режиму  $b=0,8$ .

Провідність для довгого циліндричного трубопроводу (газ - повітря при  $t^o = 20^o \text{C}$ ):

$$U = 968 \frac{r^3}{l} [0,9 + 3120 \cdot r \cdot p] [\text{м}^3/\text{с}]. \quad (5.22)$$

У наведених формулах довжина і радіус трубки подані в метрах.

#### Запитання для самоперевірки

1. За якими параметрами можна розрізнити ступені вакууму?
2. Що називають числом Кнудсена?
3. Які режими течії газу розрізняють?
4. Які відмінності мають в'язкісний і молекулярний режими течії газу?
5. Дайте визначення провідності вакуумпроводу, наведіть параметри, від яких вона залежить.

## Лекція шоста

### ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ЯВИЩ ЗА НИЗЬКИХ ТИСКІВ ОТОЧУЮЧИХ ГАЗІВ

#### 6.1 Визначення переходів між фізичними станами речовини. Тиск насиченої пари

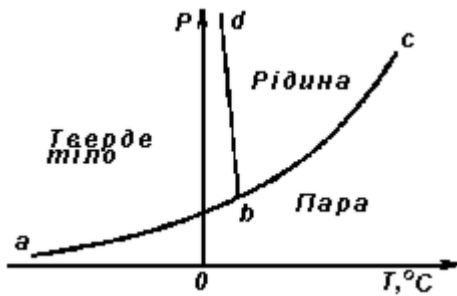


Рис. 6.1

Відомо, що речовина може бути в чотирьох різних агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному і як плазма. Перехід з одного стану в інший виникає за сумісної дії тиску та температури і має такі назви: *плавлення* - якщо тверда речовина перетворюється в рідину; *сублімація* - тверда речовина зразу перетворюється в пару; *пароутворення* або *випарювання* - речовина

перетворюється в пару; *затвердіння* - рідка речовина перетворюється в тверду; *скраплення* - газ перетворюється в рідину; *конденсація* - пара перетворюється в рідину; *десублімація* - пара перетворюється в тверду речовину. Ці перетворення ілюструють наведені на рис. 6.1 діаграми станів, які називають сім'єю кривих, що зображують фізичні перетворення речовини залежно від тиску і температури. На діаграмі крива *abc* зображує залежність тиску насиченої пари від температури, а пряма *bd* - залежність температури плавлення від тиску. Точку *c*, якою закінчується крива *abc*, називають *критичною точкою*, а температура, що їй відповідає, - *критичною температурою*; точку *b*, де обидві залежності сходяться, називають *триїчною точкою*. Як видно на рисунку, якщо тиск і температура речовини мають значення, що відповідають частині, обмеженій лініями *ab* і *bd*, то речовина знаходиться в твердому стані; в межах *bd* і *bc* - в рідкому; нижче *abc* - в газоподібному (пара); з температурою вище критичної - у стані газу. Таким чином, можна критичну температуру визначити як температуру, вище якої речовина завжди знаходиться в стані газу і ніяким тиском її неможливо перевести в інший будь-який стан. Слід відмітити такі особливості перехідних процесів:

а) підтримуючи відповідні температуру і тиск, можна здійснити невизначений стан одночасного існування речовини в двох станах, наприклад, в стані твердого тіла і пари, або рідини і пари.

б) якщо тіло розмістити в замкненому просторі, то воно буде випаровуватися доти, поки за визначеної температури тиск його пари не досягне величини на кривій *abc*. Починаючи з цього моменту тіло буде знаходитися у рівновазі зі своєю парою, яку в цьому випадку називають *насиченою*, а тиск - *тиском насиченої пари* ( $p_n$ ). Тиск насиченої пари ще називають пружністю пари. Пару, що не досягла тиску насичення, називають *сухою парою*.

в) у триїчній точці має місце невизначений стан існування речовини в

трьох станах одночасно;

г) можна так вибрати температуру і тиск, що тверда речовина перетвориться в пару (сублімується), або його пара конденсується, не перетворюючись у рідину. Останню властивість використовують у вакуумній техніці для отримання вакууму;

д) криву  $abc$ , тобто залежність тиску насиченої пари від температури можна описати таким приблизним рівнянням:

$$\lg p_n = A - \frac{B}{T}, \quad (6.1)$$

де  $A$  і  $B$  - сталі величини, характерні для даної речовини і мають табличні значення.

Залежність тиску насиченої пари, або, як ще кажуть, пружності пари різних речовин від температури часто наводиться графічно, як зображено на рис. 6.2.

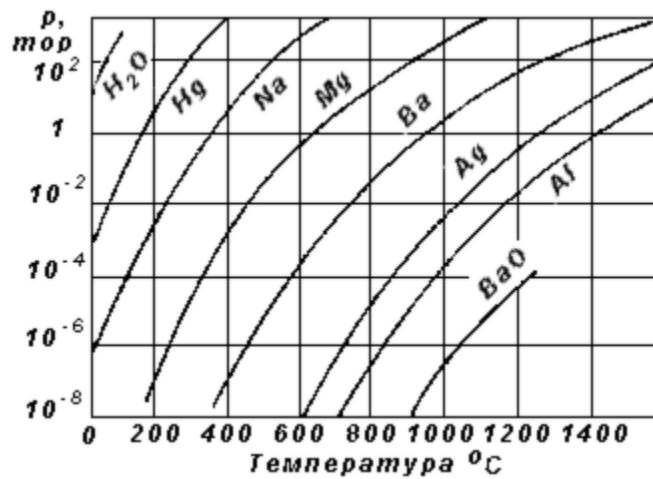


Рис. 6.2

Пружності насиченої пари різних речовин, що використовуються у вакуумній техніці, дуже відрізняються за однієї і тієї ж температури, як це видно з рис. 6.2. Пружність пари твердих тіл значно нижча, ніж у рідини, але для всіх речовин тиск пари з температурою зростає майже експоненціально, що є підтвердженням правомірності застосування емпіричної формули (6.1).

## 6.2 Швидкість випарювання або сублімації речовини

Насичення пари виникає, коли число молекул, які випарились буде дорівнювати числу молекул, що конденсувались, тобто настане рівновага. Але якщо над нагрітою речовиною створити і підтримувати вакуум, то рівновага порушиться, оскільки пара буде видалятися у міру її створення. Використовуючи рівняння для числа молекул, що бомбардують одиницю площі стінки за одиницю часу, а також вираз для середньої арифметичної швидкості молекул, можна визначити масу молекул, які випарюються з одиниці площі за одиницю часу. Тобто швидкість випарювання  $\varepsilon_e$ , буде дорівнювати:

$$\varepsilon_e = \frac{1}{4} n v_{ca} m = p_n \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}}. \quad (6.2)$$



Оскільки при створенні вакууму не завжди можливо досягнути того, щоб над речовиною не виникав залишковий тиск  $p_3$  її пари, то швидкість випарювання зменшиться і дорівнюватиме:

$$\varepsilon_v = (p_n - p_3) \sqrt{\frac{\mu}{2\pi RT}}. \quad (6.3)$$

За високого вакууму, використовуючи формулу (6.3), можна оцінити масу речовини, що випариться з одиниці площі за одиницю часу, якщо буде відома температура і тиск у стані рівноваги.

### 6.3 Закономірності насиченої пари

Поведінка насиченої пари не підлягає опису законами для ідеального газу і має такі закономірності:

а) тиск насиченої пари залежить тільки від температури і з її підвищенням зростає майже експоненціально;

б) у різних речовин тиск насиченої пари за однієї і тієї ж температури дуже відрізняється: леткі речовини (ефіри, спирти, вода, ... ) мають більший тиск пари, а тиск пари твердих речовин значно нижчий. Але, незважаючи на це, навіть низький тиск таких твердих речовин, як гума, вакуумна замазка та ін., які використовують як ущільнювачі, може значно погіршити можливість досягнення високого вакууму;

в) швидкість випарювання за даної температури буде меншою, якщо випарювання буде відбуватися не у вакуумі, а в середовищі іншого газу;

г) якщо над поверхнею речовини тиск її пари нижчий за тиск насиченої пари за даної температури, то явище випарювання буде відбуватися і припиниться лише тоді, коли ці тиски вирівняються, тобто коли настане динамічна рівновага між випарюванням і конденсацією.

### 6.4 Особливості конденсації

Явище, яке обернене випарюванню, тобто перетворення газу або пари в рідину, називають *скрапленням*, або *конденсацією*, відповідно. Ці два явища широко використовують у вакуумній техніці для нанесення тонких плівок на різні поверхні, для уловлювання небажаної пари різних речовин, для *дистиляції* (очищення) різних рідин.

Конденсація виникає тоді, коли тиск пари речовини буде більший за тиск її насиченої пари, тобто коли конденсуватися буде більше молекул, ніж випарюватися.

#### 6.4.1 Принцип холодної стінки

Якщо в замкнутому об'ємі, де знаходиться речовина і її насичена пара, проводити достатньо енергійне охолодження якоїсь частини стінки, де знаходиться пара, то на охолодженій ділянці ця пара буде конденсуватися, тобто відбудеться дистиляція. Це явище пояснюють тим, що молекули пари, які

потрапили на охолоджену ділянку, втрачають свою енергію і стають не в змозі відірватися від стінки, як відривалися тоді, коли стінка мала таку ж температуру, як і пара.

#### **6.4.2 Використання явищ випарювання і конденсації у вакуумній техніці. Запилення тонких плівок твердої речовини**

Випарювання різних матеріалів у вакуумі широко використовують у виробництві електровакуумних приладів, в оптичній промисловості і навіть для прикрашення різних речей. Цей спосіб має багато переваг у порівнянні з іншими. Плівка речовини, що запилюється на необхідну деталь виходить чистою і блискучою завдяки відсутності окислення. Товщина плівки може бути надзвичайно тонкою. Металеві покриття можна наносити на ізоляційні матеріали і навпаки.

#### **6.4.3 Дистиляція у вакуумі**

Дистиляцією називають перегонку рідини з метою очищення. Рідину спочатку перетворюють в пару, а потім пару скраплюють, тобто конденсують.

Дистиляцію використовують для очищення речовин шляхом фракційного (складового) розгону. Легкі фракції, що входять до складу речовини, після нагрівання випарюються першими і відкачуються вакуумними насосами, а очищену пару речовини конденсують пропусканням через охолоджувач і збирають у додатковому резервуарі.

#### **6.4.4 Дифузійні вакуумні насоси**

Пониження тиску газу, що знаходиться у вакуумній системі, можна досягти створенням струменя (поток) пари рідини, яку називають робочою, направленою до випускного патрубку насоса.

Пару робочої речовини, яку нагрівають до кипіння у випарювачі, випускають зі звуженого отвору - сопла в напрямі охолоджувача, де вона конденсується і як рідина стікає знову до випарювача, тоді як молекули газу, що потрапили в струмінь завдяки дифузії, не можуть сконденсуватися і збираються за напрямом струменя біля випускного отвору, розміщеного в нижній частині охолоджувача. Завдяки такому процесу перенесення струменем частини молекул газу, біля випускного патрубка створиться підвищений, а у вакуумній системі – понижений тиск. Після видалення газу з підвищеним тиском, що штучно створився в результаті такого перетікання з вакуумної камери до випускного отвору, іншим насосом, досягають значного зниження тиску у вакуумній системі.

#### **6.4.5 Лампи розжарювання**

Якщо колби ламп розжарювання наповнити відносно важким газом аргоном під тиском близьким до атмосферного, то випарювання нитки розжарювання зменшиться і таким чином зросте час використання ламп, або

можна буде підвищити температуру розжарення, тобто яскравість джерела світла без зменшення терміну використання.

#### **6.4.6 Відкачування електровакуумних приладів**

При виготовленні різних електровакуумних приладів (радіоламп, кінескопів, фотоелементів, фотопідсилювачів і ін.) у процесі їх відкачування з метою очищення від побічних газів, що розчинилися в металевих електродах, виникає необхідність нагрівання електродів струмом високої частоти або розпилення всередині поглиначів газів. Щоб металева плівка розпиленої речовини не утворювалась на робочих елементах приладу, охолоджують частину його колби, де розпилена речовина конденсується у вигляді плівки, яка замурує молекули побічних газів.

#### **Запитання для самоперевірки**

1. Які переходи стану речовини існують?
2. Яку пару називають “насиченою”?
3. Чи описується залежність тиску насиченої пари від температури законом Менделєєва - Клапейрона?
4. Запишіть рівняння, що описує залежність тиску насиченої пари від температури.
5. Від чого залежить швидкість випарювання речовини?
6. Які особливості має конденсація?
7. Як використовують явища випарювання і конденсації?

## Лекція сьома

### ХІМІЧНІ ЯВИЩА У ВАКУУМІ

Для забезпечення в робочому стані інтенсивної емісії електронів з катодів радіоламп або розрядних ламп у процесі їх виготовлення, застосовують відповідні хімічні реакції. Подібні реакції використовують і для збільшення терміну використання вольфрамових тіл розжарювання в теплових джерелах світла. У зв'язку з цим розглянемо деякі хімічні реакції, що протікають за понижених тисків оточуючих газів.

#### 7.1 Стійка і нестійка рівновага

Вважають, що хімічна система знаходиться в рівновазі, якщо реакція не відбувається. Але рівновага може порушитися за дії різних впливів, що змінюють початковий стан.

Рівновагу системи називають стійкою, якщо невеликі зміни початкових умов викликають лише слабкі зміни системи.

Рівновагу системи називають нестійкою, якщо невеликі зміни початкових умов викликають суттєві зміни системи.

#### 7.2 Види хімічних реакцій

Прикладом системи може бути хімічна система. Хімічні реакції можуть протікати з виділенням або поглинанням тепла.

Реакцію називають **екзотермічною**, якщо вона протікає з виділенням тепла. Прикладом такої реакції є отримання води об'єднанням молекул водню  $\text{H}_2$  і кисню  $\text{O}_2$ .

Реакцію називають **ендотермічною**, якщо вона протікає з поглинанням тепла. Прикладом такої реакції є отримання ацетелену  $\text{C}_2\text{H}_2$  об'єднанням вуглецю  $\text{C}$  і водню  $\text{H}_2$ .

#### 7.3 Закон Льо Шательє

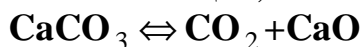
Хімічна система (втім, як і будь-яка), що знаходиться в стані стійкої рівноваги, завжди протидіє чинникам, що змінюють її початковий стан. Зміна температури і тиску в хімічній системі, що знаходиться в стійкій рівновазі, може викликати хімічну реакцію, яка буде протидіяти цим змінам, тобто викликати переміщення стану до стійкої рівноваги. Відповідно до закону, який сформулював А.Л.Шательє, якщо будемо змінювати початковий тиск і температуру так, що це викличе хімічну реакцію, то ця реакція буде протидіяти спричинюваній зміні.

##### 7.3.1 Перший наслідок (вплив зміни температури)

Так, підвищення температури викличе хімічну реакцію, що буде протікати з поглинанням тепла, якщо залишити її без будь-якого втручання,

тобто буде ендотермічною. Навпаки, зниження температури викличе хімічну реакцію, що буде протікати з виділенням тепла, якщо залишити її без будь-якого втручання, тобто буде екзотермічною.

**Приклад.** Вуглекислий кальцій при нагріванні стрімко розкладається (дисоціює) на двоокис вуглецю і окис кальцію, тобто забирає теплоту:



Підвищення температури вуглекислого кальцію викликає його дисоціацію.

При зниженні температури вуглекислий кальцій починає відновлюватися з тих складових, на які дисоціював.

### 7.3.2 Другий наслідок (вплив зміни тиску)

Якщо реакція допускає появу газової фази, то зниження тиску призводить до виникнення газової фази, а підвищення тиску діє у зворотному напрямі.

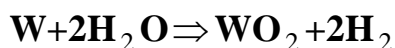
**Приклад.** Якщо вуглекислий кальцій розмістити у вакуумі (створити пониження тиску), то це викличе його дисоціацію і, навпаки, підвищення тиску викличе відновлення:



### Використання у джерелах світла. Кругова реакція нагрітого вольфраму

Якщо в лампі розжарювання з вольфрамовою ниткою залишити сліди водяної пари, то це призведе до швидкого руйнування нитки за роботи лампи, оскільки виникне кругова реакція нагрітого вольфраму в присутності водяної пари.

Дійсно, за робочої температури нитки в  $2600^\circ\text{K}$  водяна пара діє на вольфрам за реакцією:



Оскільки двоокис  $\text{WO}_2$  є більш летючий, ніж вольфрам за однієї і тієї ж температури, тому швидко випарюється в напрямі до стінок колби, де температура нижча, а там вступає з молекулами водню в реакцію, що призводить до відновлення вольфраму, який осідає на стінці, і утворена водяна пара знову починає кругову реакцію з вольфрамом розжареної нитки.

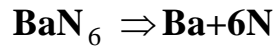
Очевидно, що нитка зруйнується значно швидше, ніж при випарюванні вольфраму у високому вакуумі.

#### 7.3.3.1 Дисоціація азидів лугоземельних металів

Відомо, що нагріті металеві катоди випромінюють електрони (термоелектронна емісія). Емісійна здатність залежить від роботи виходу електронів з металу. Чим більша робота виходу електронів (а така у тугоплавких металів), тим менша емісійна здатність.

Для зменшення роботи виходу електронів з нагрітих металевих катодів з метою збільшення електронної емісії використовують таку технологію виготовлення катодів: вольфрамову нитку, попередньо покриту шаром міді і окислену, занурюють у водяний розчин азиду барію  $\text{BaN}_6$ , після цього лампу прогрівають при температурі до  $400^\circ\text{C}$  одночасно з відкачкою газів.

Виникає реакція дисоціації азиду барія:



з виділенням азоту, який видаляють вакуумним насосом і на нитці залишається барій. Після відкачки азоту нитку прожарюють, що приводить до відновлення міді з її окисла барієм. У результаті отримують вольфрам, що покритий плівкою міді й окислом барію. Такий плівковий катод має меншу роботу виходу електронів, а отже, більшу емісійну здатність ніж вольфрамовий катод.

## Лекція восьма

### СОРБЦІЙНІ ЯВИЩА

#### 8.1 Сорбція і її види

Сорбцією називають процес поглинання газів або пари твердими тілами чи рідиною.

З досвіду відомо, що тверді тіла поглинають значну кількість газу. Сорбційні явища суттєво впливають на технологічні операції особливо у вакуумі. Для полегшення вивчення їх можна розділити на три такі види, як **фізична адсорбція, хемосорбція або хімічна адсорбція і абсорбція газів металами**. У зв'язку з цим речовину, яка поглинає газ, називають **сорбентом, адсорбентом або абсорбентом**, а речовину, яка поглинається - **сорбітом, адсорбітом або абсорбітом**.

##### 8.1.1 Фізична адсорбція і її головні закономірності

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

При фізичній адсорбції маса поглинутого газу пропорційна площі поверхні тіла, а не його об'єму. Вважається, що адсорбовані плівки газу є головним чином мономолекулярними. Слід мати на увазі, що пористі тіла мають дійсну площу поверхні значно більшу, ніж ту, що здається. Дійсно, наприклад, деревне вугілля має активну поверхню  $700 \text{ м}^2$  на грам маси, тому має виключно високу адсорбційну властивість. З цієї причини високу адсорбційну властивість мають порошкоподібні або подрібнені речовини.

Адсорбція є явищем екзотермічним з наявністю газової фази, а тому з підвищенням тиску або зниженням температури зростає. При нагріванні тіла з одночасним зниженням тиску поглинутий газ легко видаляється. Це повністю підтверджує дослід.

Адсорбовані молекули газу утримуються на поверхні речовини значними силами, що називаються силами Лондона - Ван-дер-Ваальса, які пропорційні  $r^{-7}$ , де  $r$  - дуже мала величина і є відстанню між молекулою, що адсорбує, і адсорбованою. При зіткненні молекул газу з поверхнею тіла тільки невелика кількість їх пружно відштовхується, а значно більша частина молекул затримується на поверхні в середньому протягом  $\sim 10^{-4} \text{ с}$ .

Адсорбція є зворотним явищем, якщо створені відповідні умови. Адсорбовані молекули безперервно залишають поверхню тіла, але також безперервно інші молекули газу знову адсорбуються. Виникає динамічна

рівновага, за якою відповідна кількість молекул завжди залишається адсорбованою на поверхні тіла. Таким чином, за відповідних умов адсорбовані молекули можуть виділитися тілом. Таке зворотне виділення речовиною адсорбованого газу називають десорбцією або газовіддачею. Очевидно, що для вивільнення тіл від адсорбованого газу необхідно їх нагрівати. Це широко використовують у вакуумній техніці для отримання і підтримки низького тиску у вакуумній системі.

Між молекулами речовини і молекулами газу при адсорбції існує спорідненість. Для відповідного тіла адсорбція залежить від природи газу, причому він не змінюється в результаті хімічно.

Фізична адсорбція з часом досягає насичення. Після покриття всієї поверхні тіла плівкою адсорбованого газу адсорбція припиняється. У зв'язку з цим перед використанням адсорбенти потребують активації, тобто очищення.

### 8.1.1.1 Приклади фізичної адсорбції

Дослідом встановлено, що скло утримує ряд газів і це утримання здійснюється головним чином на поверхні завдяки фізичній адсорбції. Серед адсорбованих газів завжди є водяна пара, вуглекислий газ (в невеликих кількостях кисень), азот і окис вуглецю.

Склад адсорбованих газів і його повна кількість залежать від хімічного складу скла і знаходяться в прямому співвідношенні до кількості соди (карбонат натрію –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) або поташу (карбонат калію –  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) в складі скла. Наприклад, для силікатного скла адсорбований газ на ~90% складається з водяної пари, на ~10% з вуглекислого газу і тільки ~1% – інших газів.

Боросилікатне скло має інше відсоткове відношення адсорбованих газів: водяної пари ~35%, вуглекислого газу ~40%, інших газів ~25%.

У вакуумній техніці інколи використовують деревне вугілля. Активоване деревне вугілля виготовляють зі шкаралупи кокосового горіха, яку нагрівають при  $650^\circ\text{C}$  на повітрі доки не припиниться виділення пари, а потім температуру збільшують до  $900^\circ\text{C}$ . Після цього проводять нагрівання протягом декількох годин, але вже у вакуумі і при  $440^\circ\text{C}$ . Активоване деревне вугілля поглинає як водяну пару, так і великий різновид газів, тому його іноді використовують і в протигазах для утримання (не пропускання) отрутих газів. Особливо ефективним поглиначем активоване деревне вугілля стає при охолодженні до температури зрідженого повітря:  $-180^\circ\text{C}$  і може використовуватися у спеціальних вакуумних уловлювачах.

Окрім деревного вугілля використовують ще таку пористу речовину, як шабазит (природний подвійний силікат кальцію і алюмінію), що зв'язує в п'ять разів більшу кількість газу за такої ж маси.

### 8.1.2 Хімічна адсорбція

При поглинанні газу поверхнею тіла іноді між ними виникає взаємодія у вигляді хімічної реакції, тобто діють сили хімічного зв'язку, які відрізняються



від сил Ван-дер-Ваальса і часто перевищують їх.

Явище поглинання газів поверхнею тіл у результаті хімічного реагування між молекулами тіла і молекулами газу називають хімічною адсорбцією. Оскільки кількість тепла, що виділяється при цьому, пропорційна тепловій дії хімічної реакції, то таку адсорбцію ще називають “хемосорбцією”.

Між фізичною і хімічною адсорбцією існує велика відмінність. Хемосорбція при недостатньо високих температурах зовсім не виникає і, навпаки, швидко зростає при збільшенні температури, тоді як фізична адсорбція значно ефективно діє при низьких температурах. При нагріванні тіла адсорбований газ видаляється дуже погано або не видаляється зовсім.

Хемосорбція, як правило, не зворотній процес і для видалення поглинутих газів потребує нагрівання до більш високих температур. Хімічний склад десорбованого (виділеного) газу може відрізнятись від адсорбованого. У результаті хімічної адсорбції можуть виникнути суттєві зміни властивостей поверхні тіла. Наприклад, кисень, що адсорбується на вольфрамі, в результаті хемосорбції знижує емісію електронів у сотні разів і для його видалення необхідно нагріти вольфрам до  $1700^{\circ}\text{C}$ .

### 8.1.3 Абсорбція газів металами

При поглинанні газів металом молекули газу можуть проникати всередину між його атомами, тобто виникає твердий розчин.

Розчинність газів металом називають абсорбцією. При абсорбції виникає поглинання газу повним об’ємом металу. Отже, абсорбція – це об’ємне поглинання газів.

Кількість абсорбованого газу зростає пропорційно об’єму тіла, залежить від природи металу і збільшується при зростанні його пористості.

Подібно до фізичної адсорбції абсорбція газів металами з часом досягає насичення.

За відповідних умов метал може поглинати гази в кількості за об’ємом, що в сотні разів перевищує його власний. Метали можна назвати губкою для газів. Наприклад, паладій за нормальних умов ( $20^{\circ}\text{C}$  і  $760\text{ Торр}$ ) поглинає до 900 об’ємів водню, цирконій - 1500, а титан - до 1800. Останні два метали використовують в якості газопоглиначів і за необхідності розміщують у середині електровакуумних приладів. Але такі метали, як золото, цинк і кадмій не абсорбують водень. У той же час кисень поглинається більшою частиною металів з виникненням окислів. З міддю кисень утворює суцільні зерна окислу, які за прожарення міді в атмосфері водню або у вакуумі відновлюються, що призводить до виникнення пористості й крихкості металу. Ось чому для електровакуумної промисловості дуже важливе використання безкисневої міді з високою провідністю, яку отримують плавкою у вакуумі. Відомо також, що срібло при плавленні поглинає велику кількість кисню, але при затвердінні виникає бурхливе виділення кисню, яке призводить до утворення раковин як всередині, так і на поверхні срібла.

Абсорбція газів металами потребує значно більше часу, ніж фізична

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

Об'єм газу, що абсорбується при досягненні насичення грамом або кілограмом металу, називають розчинністю. Об'єм вимірюють за нормальних умов. Розчинність газу може зростати або знижуватися при зростанні температури.

При абсорбції газів металами можуть виникати два види поглинання: поглинання з утворенням твердого розчину і поглинання з утворенням нової хімічної сполуки.

## 8.2 Дифузія газів через метали

Оскільки абсорбований газ проникає в середину металу, то протягом деякого часу, що буде залежати від природи і товщини металу, а також від тиску і природи газу, він почне проходити через метал. Прикладом може бути пропускання водню паладієм або повітря залізом. На рис. 8.1 зображені залежності швидкості дифузії для різних пар газ-метал.

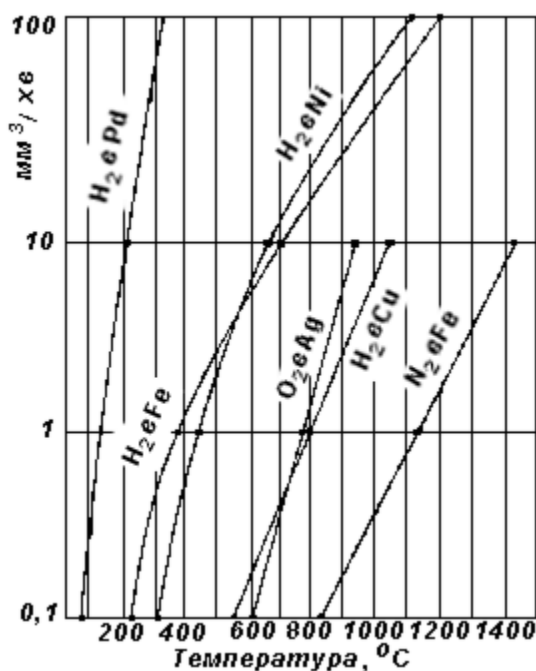


Рис. 8.1

Привертає увагу велика швидкість проходження водню через паладій у порівнянні з іншими металами. Так, при температурі  $\sim 220^{\circ}\text{C}$  через паладієву пластинку в 1мм товщини і площею  $1\text{см}^2$  за одну хвилину проходить  $10\text{мм}^3$  водню за тиском 760 Торр. Цю якість використовують для дозованого напуску водня до вакуумної системи, а також для виявлення негерметичностей у вакуумних системах.

### 8.3 Поглинання газів при електричному розряді

Газ за своєю природою є діелектриком, але під дією різних факторів, у тому числі електричного поля молекули можуть іонізуватися і газ починає проводити електричний струм. Протікання електричного струму через газ називають розрядом. Газовий розряд супроводжується рядом особливих фізичних і хімічних явищ. Одним із таких явищ є поступове зниження тиску газу з часом після виникнення тліючого розряду. Зниження відбувається за експоненціальним законом, і очевидно, що воно зв'язане з поглинанням газу.

Поглинання газу під дією розряду (ще називають жорщенням) відбувається в результаті виникнення іонізації газу. В іонізованому стані газ стає хімічно більш активним. Іонізовані молекули інтенсивно прискорюються електричним полем і направляються до електродів з протилежним знаком заряду, бомбардуючи їх, що призводить до полегшення адсорбції, а також виникнення хімічного поглинання. Бомбардування розпушує матеріал електродів, збільшуючи, таким чином, площу поверхні і, відповідно, сорбційні явища. Значна кількість іонів може адсорбуватися на стінках колби, де знаходиться газ. На досліді встановлено, що кількість поглинутого газу за сталої швидкості іонів прямо пропорційна силі розрядного струму і часу, протягом якого проходить цей струм. Поглинання газів відбувається і за відсутності розряду, але при розряді воно здійснюється значно швидше і в більшій кількості, що можна побачити на рис. 8.2 ( $p_0$ ,  $p_1$  і  $p_2$  - початковий при простій адсорбції і при розряді і найменший у колбі тиски відповідно; величини часу наведені умовно).

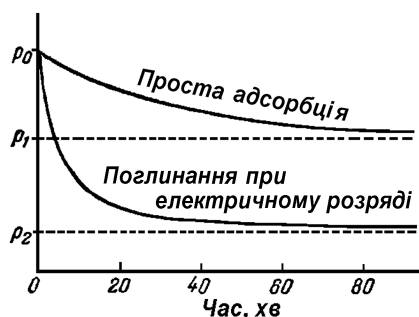


Рис. 8.2

Слід зауважити, що в герметизованих електровакуумних приладах, у тому числі розрядних джерелах світла, адсорбовані гази здатні знову виділитися при зростанні температури.

### 8.4 Закони газовиділення металами

Дослідним шляхом встановлені такі закономірності газовиділення металами або ще вживають вираз “десорбції”:

- 1) десорбція зростає з пониженням тиску, але навіть при дуже низькому тиску в металі ще залишається помітна кількість розчиненого газу;
- 2) десорбція зростає з підвищенням температури тіла, якщо одночасно з

нагріванням здійснюють зниження тиску. Дійсно, підвищення температури збільшує тепловий рух атомів металу і молекул розчиненого газу, що полегшує їх відрив і буде наближати розподіл молекул до рівноваги з тиском газу в оточуючому вакуумному середовищі;

3) на десорбцію впливає природа металу і газу (спорідненість їх молекул). Мала молекулярна маса водню сприяє легкості його дифузії і видалення з металу. У зв'язку з цим метали перед уведенням в електровакуумний прилад спочатку прожарюють в атмосфері водню при  $900^{\circ}\text{C}$  протягом 15-20 хв. Водень відновлює окисли, витісняє інші, важко видалювані абсорбовані газу, займаючи їх місця в металі, а потім абсорбований водень легко видаляється у процесі відкачки.

## 8.5 Газопоглиначі

Повністю звільнити метали і матеріали колб від газів майже неможливо. Тому слід чекати, що в електровакуумних приладах із часом тиск зросте через причину виділення газів деталями і стінкою. У зв'язку з цим виникає необхідність використовувати спеціальні матеріали, які називаються газопоглиначами.

Газопоглиначі при розміщенні їх усередині електровакуумного приладу підвищують вакуум, створений за відкачки, і поглинають газу, які виділяються при роботі приладу.

Газопоглиначі – це здебільшого метали, які поділяються на такі, що випарюються і не випарюються.

### 8.5.1 Газопоглиначі, що випарюються

Газопоглиначі, що випаровуються, виготовляють у вигляді маленьких клаптиків металу, які можна легко випарити, і розміщують на металевих утримувачах. Цей клаптик розігрівають після відкачування так, щоб після випарювання і конденсації він створив на стінці колби наліт (плівку) у вигляді дзеркальця, але не осідав на електродах і не погіршував ізоляційні властивості в середині приладу. Ці газопоглиначі мають мати високу поглинальну здатність, особливо відносно кисню при температурах, починаючи від кімнатної і до температури робочого нагріву колби приладу, але не більше  $200^{\circ}\text{C}$ , а також мати малу пружність пари ( $p < 10^{-7}$  Торр) за робочої температури.

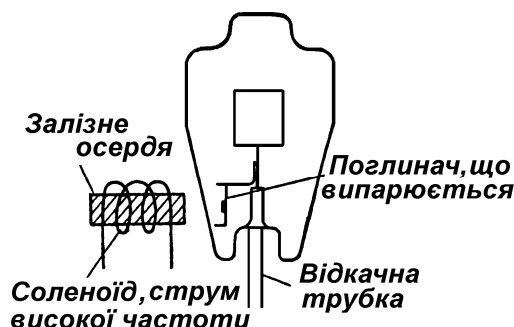


Рис. 8.3

Відповідним вимогам до таких газопоглиначів задовольняє невелика кількість металів, у першу чергу магній, барій, алюміній. Найкращим з них є барій, незважаючи на такий недолік, як низька хімічна стійкість.

Технологія випарювання зображена на рис. 8.3. У відповідний момент розпилення виконують місцевим нагріванням струмом високої частоти, що підводять до соленоїду із залізним осердям. Утримувач газопоглинача доводять до червоного розжарення, метал газопоглинача випарюється і одразу конденсується на ділянці стінки колби, що проти нього, утворюючи там дзеркальний наліт.

### **8.5.2 Газопоглиначі, що не випарюються**

Якщо випарювання є небажаним при побоюванні забруднення або зниження ізоляційних якостей електровакуумного приладу, використовують газопоглиначі, що не випарюються. В якості таких поглиначів застосовують листовий тантал, титан або цирконій порошковий, з яких виготовляється функціональний елемент приладу, наприклад, анод. Ще використовують спеціальний сплав церію і торію, який називається *цето*, він проявляє свої властивості в холодному стані, на відміну від перших. Робоча температура цих газопоглиначів знаходиться в межах 400 - 800° С.

### **8.6. Знегаження скла і металів**

Створення вакууму в будь-якому скляному електровакуумному приладі має починатися зі знегаження – операції вивільнення скла від газів. Як зазначалося вище, чим більше в склі лугів, тим більше в ньому міститься двоокису вуглецю і води. Пара останньої негативно впливає на розжарені вольфрамові деталі. Знегаження буде кращим, коли вища буде температура нагрівання. Але скло стає м'яким уже при порівняно низькій температурі. Тому І. Ленгмюр запропонував прогрівання виконувати в такій послідовності. Спочатку знегаження скла виконують при температурі, що на 50° С менша від температури м'якості скла, щоб краще видалялися гази з глибинних шарів скла. Потім продовжують процес знегаження скла при температурі на 100° С менше від першої, щоб більш ретельно гази видалялися з поверхні. Оскільки перша температура наближена до температури, коли скло стає м'яким, то до другої температури наближаються повільно, щоб швидке охолодження не викликало виникнення напружень, а потім і тріщин.

Велика кількість газів міститься в металах, куди гази потрапляють в результаті поглинання при виплавленні, розливі й обробці металів. За цих обставин плавлення металів часто виконують у вакуумі.

В електровакуумній техніці широко використовують такі метали, як мідь, вольфрам, нікель, залізо, титан та ін. Найбільше ці метали поглинають водень, азот, окис і двоокис вуглецю, кисень (у складі окислів), а в міді присутній ще сірчаний газ.

Кількість газів, яку містять метали, розраховують відповідно до 100

грамів металу і наводять в  $\text{см}^3$ , приведених до нормальних фізичних умов. Ця величина для молібдену і вольфраму не перевищує  $0,5 - 1 \text{ см}^3/0,1 \text{ кг}$ ; для кращих зразків нікеля -  $10 \text{ см}^3/0,1 \text{ кг}$ , а для гірших зразків заліза вона може досягати декількох сотень  $\text{см}^3$  на 100 грамів металу.

Знегаження металів здійснюють нагріванням у вакуумі або в атмосфері водню. З підвищенням температури швидкість виділення газів різко зростає.

Чим краще газ розчиняється в металі при поглинанні, тим швидше він може бути видалений при десорбції. Швидкість газовиділення залежить від гранично допустимої температури знегаження відповідного металу і може змінюватися для різних металів у межах від  $10^{-11}$  до  $10^{-8} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1})$ .

Оскільки видалити з металу всі поглинуті гази неможливо, то знегаження вважають задовільним, якщо в металевих деталях електровакуумних приладів залишкова кількість газів не перевищує  $1 \text{ см}^3/0,1 \text{ кг}$ .

### Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення стійкої та нестійкої рівноваги хімічної системи.
2. Як називають хімічні реакції, пов'язані зі зміною кількості теплоти?
3. Що стверджує закон Шательє і які наслідки він має?
4. Що називають "сорбцією", на які види її умовно поділяють?
5. Сформулюйте головні закономірності фізичної адсорбції.
6. Наведіть головні відмінності видів сорбції.
7. Як використовують явища сорбції?
8. Сформулюйте закони газовиділення металів.
9. Якого виду бувають газопоглиначі?

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ВІДКАЧКИ

Більшість сучасних електровакуумних приладів потребують створення і підтримування в середині високого вакууму на протязі всього терміну роботи. Наприклад, в електронних радіолампах тиск залишкових газів не має перевищувати  $\sim 10^{-6}$  **Торр**, оскільки термо-електронна емісія, яку використовують для їх роботи, дуже чутлива до збільшення тиску залишкових газів, які можуть призвести до зникнення емісії і, таким чином, перетворять прилад у непридатний до роботи; в лампах розжарювання тиск газів не має перевищувати  $\sim 10^{-4}$  **Торр**.

Нормальна робота розрядних ламп можлива лише за певно визначених у ній газах і тиску, тобто потрібно спочатку створити високий вакуум, а потім напустити відповідні гази за відповідного тиску.

### 9.1 Процес створення вакууму і головні параметри вакуумних систем

Для створення високого вакууму в приладі, що складається зі скляного або металевого корпусу, в якому герметично вмонтовані електроди, необхідно видалити з нього газ. З цією метою конструюють вакуумну систему.

Звичайна вакуумна система має таку скелетну схему (рис. 9.1).

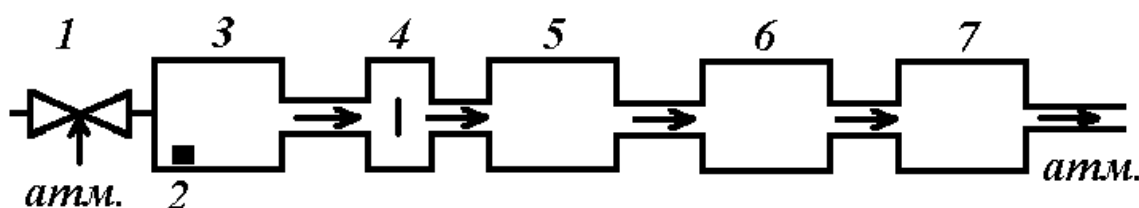


Рис. 9.1

До технологічної камери 3, де створюють необхідний вакуум і розміщують поглинач "шкідливих" газів 2, і приєднують дозатор повітря 1, а також пастку механічних частинок 4, через яку приєднують високовакуумний насос 5. Роботу цього насоса забезпечує обертовий насос середнього вакууму 7, а також форвакуумний балон 6. Останній дозволяє на деякий час відключати обертовий насос без впливу на процес відкачування, тобто на роботу високовакуумного насоса.

Видалення газу, тобто відкачування здійснюють вакуумними насосами, які приєднують за допомогою трубопроводів до приладу і які разом з іншим необхідним устаткуванням складають вакуумну систему.

Проста вакуумна система для отримання середнього вакууму (рис. 9.2) складається не менше, ніж з трьох елементів: вакуумного насоса 1, вакуумпроводу - трубки 2, що з'єднує насос з вакуумною камерою 3 - об'ємом, де необхідно створити відповідний вакуум. Вакуумний насос має впускний патрубок 4, через який газ потрапляє до насоса і випускний патрубок 5, через який газ видаляють в атмосферу.

До вмикання насоса газ у всій вакуумній системі знаходиться під одним тиском. При вмиканні насоса, робота якого складається з безперервного

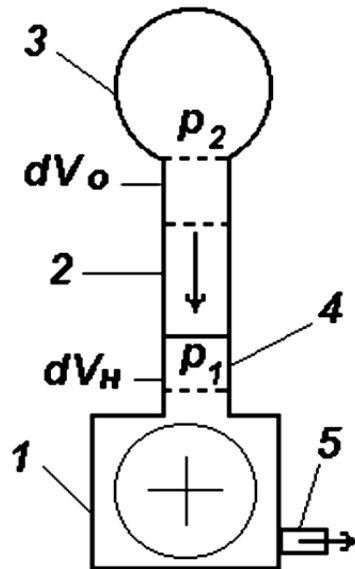


Рис. 9.2

видалення порцій газу з вакуумної системи через випускний патрубок до атмосфери, газ почне рухатися, безперервно потрапляючи з вакуумної камери до трубопроводу і з трубопроводу до насоса через впускний патрубок. У результаті кількість газу в системі буде безперервно зменшуватися. Оскільки об'єм системи і температура газу залишаються незмінними, то почне знижуватися тиск у вакуумній системі відповідно до газового закону Бойля-Маріотта. Для того, щоб газ переміщувався через трубку необхідно створити відповідну рушійну різницю тисків на її кінцях ( $p_2 - p_1$ ), яка пов'язана, як зазначалося вище, з потоком газу  $Q$  і провідністю трубопроводу  $U$ . Нагадаємо, що величина провідності залежить від режиму течії газу через трубопровід і від його геометричних розмірів.

### 9.1.1 Швидкодія насоса. Швидкість відкачування об'єкта

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

Швидкодією насоса називають об'єм газу, що потрапляє з вакуумпроводу за одиницю часу до працюючого насоса за тиском  $p_1$  на впускному патрубку. Оскільки за зміни тиску швидкодія насоса може змінюватися, то беруть нескінченно малий проміжок часу  $dt$ , і вважають, що тоді вказаний об'єм, вимірний за тиском  $p_1$ , теж буде нескінченно малим, тобто  $dV_n$ .

Отже можна записати, що швидкодія насоса буде виражатися як

$$S_n = \left. \frac{dV_n}{dt} \right|_{p_1} \quad (9.1)$$



Швидкістю відкачування об'єкта  $S_o$  називають об'єм газу  $dV_o$ , що потрапляє з вакуумної камери за одиницю часу до вакуумпроводу за тиском  $p_2$ , що буде в камері. Розмірковуючи як вище, запишемо, що швидкість відкачування об'єкта буде виражатися як

$$S_o = \left. \frac{dV_o}{dt} \right|_{p_2} \cdot \quad (9.2)$$

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

$$S = \left. \frac{dV}{dt} \right|_p, \quad (9.3)$$

що показує який об'єм газу, виміряний за тиском  $p$ , проходить через поперечний переріз вакуумпроводу за одиницю часу.

Розмірність швидкості відкачування газу за даним тиском визначають в одиницях об'єму за секунду. Наприклад,  $S_o = 0,5$  л/с або  $S_n = 1$  м<sup>3</sup>/с.

### 9.1.2 Потік газу

За відкачування вакуумних систем порції газу переносяться через вакуумпроводи з наступним видаленням до атмосфери. Для проведення розрахунків використовують поняття газового потоку.

Масу або кількість газу, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз вакуумпроводу, називають потоком газу в даному перерізі. При розрахунках вакуумних систем зручно виражати потік газу в одиницях  $pV/c$ . Якщо в даному місці вакуумної системи тиск газу дорівнює  $p$ , а швидкість відкачування дорівнює  $S$ , то величина потоку газу в цьому місці буде

$$Q = p \cdot S \text{ [pV/c]}. \quad (9.4)$$

Якщо газ на впускному патрубку насоса має тиск  $p_1$ , а швидкість його дії  $S_n$ , то потік газу  $Q_n$ , що проходить через впускний патрубок, буде дорівнювати добутку  $p_1 S_n$  і цей потік ще називають продуктивністю насоса за даним впускним тиском.

Потік газу через будь-який переріз нерозгалуженого вакуумпроводу є сталим, якщо  $Q = Q_n$ , тобто

$$pS = p_1 S_n = p_2 S_o = U(p_2 - p_1) = Q. \quad (9.5)$$

Рівняння (9.5) є умовою сталості газового потоку за відкачування вакуумної системи.

Будь-який процес, в якому з плином часу параметри, що його характеризують, не змінюються, тобто такі, що встановилися за часом і є сталим у будь-якій частині вакуумної системи, називають стаціонарним. Якщо ж параметри змінюються, то такий процес називають нестаціонарним.

За відкачування вакуумної системи потік газу, що проходить через вакуумпровід, зазвичай є нестаціонарним, але якщо процес відкачування

протікає повільно, то можна допустити, що незважаючи на змінність за часом, все-таки в будь-який момент він залишається сталим у будь-якому перерізі вакуумпроводу, тобто виконується умова (9.5). Тоді такий потік газу (або процес) називають квазістаціонарним. Як правило, у вакуумних системах за відкачування виконуються умови квазістаціонарності потоку газу через вакуумпроводи, а стаціонарний потік газу встановлюють зазвичай тільки в кінці відкачки, коли тиск як у вакуумній системі, так і на впускному патрубку насоса продовжує зберігатися сталим, незважаючи на роботу насоса.

З умови сталості газового потоку (9.5) випливають важливі наслідки. Якщо відома величина потоку, то можна визначити швидкість відкачки в будь-якому місці вакуумної системи за відомим тиском  $p$  у цьому місці:

$$S = \frac{Q}{p}; \quad (9.6)$$

якщо відомий тиск на впускному патрубку насоса, то швидкість його дії за даним тиском дорівнюватиме:

$$S_n = \frac{Q}{p_1}; \quad (9.7)$$

якщо відомий тиск у камері відкачки, то швидкість відкачки об'єкта за даним тиском дорівнюватиме:

$$S_o = \frac{Q}{p_2}. \quad (9.8)$$

З цієї ж умови випливає, що швидкість відкачки об'єкта завжди менша швидкодії насоса, якщо насос приєднують до об'єкта відкачки за допомогою вакуумпроводу, оскільки вакуумпровід здійснює опір відкачці, тому  $p_1 < p_2$ . У зв'язку з цим швидкість відкачки об'єкта ще називають ефективною швидкодією насоса  $S_{н.еф} = S_o$ .

## 9.2 Головне рівняння вакуумної техніки

Швидкість відкачки об'єкта, провідність вакуумпроводу і швидкодія насоса змінюються відповідно до зміни тиску за відкачування вакуумної системи. Визначимо, чи існує залежність між цими величинами. Для цього визначимо з умови (9.5) швидкодію насоса і швидкість відкачки об'єкта через провідність вакуумпроводу і відповідні тиски:

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

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

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

$$\frac{1}{S_o} - \frac{1}{S_n} = \frac{1}{U},$$

тобто

$$\frac{1}{S_o} = \frac{1}{S_n} + \frac{1}{U}, \quad (9.9)$$

або

$$S_o = \frac{S_n U}{S_n + U}. \quad (9.10)$$

Рівняння (9.10) або (9.9) називають головним рівнянням вакуумної техніки і воно зв'язує швидкість відкачки об'єкта з швидкодією насоса і провідністю вакуумпроводу, що з'єднує насос з об'єктом відкачки.

З головного рівняння вакуумної техніки випливають такі наслідки: якщо провідність вакуумпроводу дуже велика, тобто  $U \rightarrow \infty$ , то  $S_o \rightarrow S_n$ ; якщо провідність вакуумпроводу дуже мала, тобто  $U \rightarrow 0$ , то  $S_o \rightarrow 0$  і якщо  $S_n = U$ , то  $S_o = 0,5S_n$ .

Для характеристики ефективності використання вакуумного насоса іноді вводять величину  $K_u$ , яку називають коефіцієнтом використання насоса:

$$K_u = \frac{S_o}{S_n}. \quad (9.11)$$

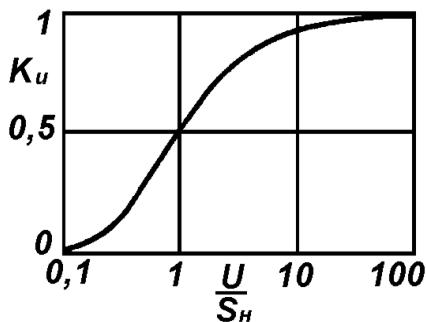


Рис. 9.3

Якщо ввести коефіцієнт використання насоса в головне рівняння вакуумної техніки, то отримаємо такі корисні співвідношення:

$$K_u = U / (S_n + U); \quad (9.12)$$

$$U = S_n K_u / (1 - K_u). \quad (9.13)$$

Максимальна величина коефіцієнта використання насоса дорівнює одиниці, що наочно видно з графічної залежності  $K_u = f(U / S_n)$ , яка наведена на рис. 9.2.

Головне рівняння вакуумної техніки і наведені співвідношення корисні при розрахунках і конструюванні вакуумних систем.

### Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення головних характеристик відкачки вакуумної системи.
2. Виведіть головне рівняння вакуумної техніки.
3. Які наслідки випливають з головного рівняння вакуумної техніки?
4. Що називають коефіцієнтом використання вакуумного насоса?
5. Запишіть головне рівняння вакуумної техніки, застосовуючи коефіцієнт використання насоса.

## Лекція десята

### ТЕХНІКА ОТРИМАННЯ ВАКУУМУ.

#### ВАКУУМНІ НАСОСИ

Вакуум різного ступеня отримують головним чином за допомогою вакуумних насосів.

Вакуумним насосом називають пристрій, що слугує для видалення газових молекул з будь-якого об'єму, тобто для відкачки газу. Деякі спеціальні вакуумні насоси призначаються для перекачки газів з одного об'єму до іншого.

Оскільки ступені вакууму дуже відрізняються за величиною тиску, то будова і принцип роботи вакуумних насосів для отримання вакууму відповідного ступеня мають суттєві відмінності. Але головні параметри, що характеризують насоси, загальні.

#### 10.1 Головні параметри вакуумних насосів

Для ефективної експлуатації насосів необхідно знати їх головні параметри. До головних параметрів насосів відносять: *початковий тиск, швидкодію насоса, найбільший випускний тиск, граничний тиск, робочий тиск, продуктивність насоса.*

**Початковим тиском насоса** називають тиск, при якому він починає нормально працювати. Для відкачки об'єму треба видалити з нього молекули газу в оточуючу атмосферу, тобто перебороти протидію зовнішнього тиску. Деякі насоси можуть видаляти газ безпосередньо в атмосферу і їх називають *форвакуумними*, а інші не можуть створити протидію атмосферному тиску і при нормальній роботі створюють протитиск, що значно менший від атмосферного. Зазвичай такі насоси створюють високий вакуум, але не можуть працювати самостійно, тому їх приєднують послідовно з форвакуумним. Початковий тиск ще називають тиском запуску насоса  $P_{зап.}$  (рис.10.1).

**Найбільшим випускним тиском насоса  $P_{вип.}$**  називають такий тиск на випускному патрубку, при перевищенні якого насос перестав нормально працювати, оскільки зовнішній газ у цьому випадку проривається з боку випускного патрубка до насоса. Очевидно, що у форвакуумних насосах цей тиск трохи більший за атмосферний, тоді як у інших насосів він значно менший.

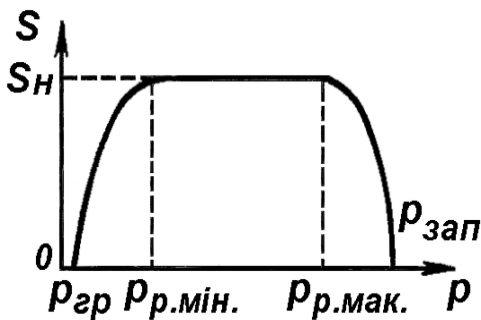


Рис.10.1

**Граничним тиском  $P_{гр.}$**  називають найменший тиск, який може створити насос за тривалої роботи. Слід відрізнити граничний тиск насоса, тобто найменший тиск, який створює насос за тривалої роботи на випускному патрубку, який від'єднано від вакуумної системи, і граничний тиск об'єкта, тобто

найменший тиск, який створюється у вакуумній камері за тривалого відкачування. Перший залежить від конструктивних особливостей і газовиділення матеріалів насоса, а другий - ще й від вакуумної системи.

**Робочий тиск насоса** поділяють на найменший і найбільший.

**Найменший робочий тиск**  $P_{p\ min}$  - це мінімальний тиск, за яким насос зберігає номінальну швидкість при тривалій роботі. Зазвичай, найменший робочий тиск приблизно на порядок більше граничного. Використання насоса для роботи в межах між граничним і найменшим робочим тиском економічно не вигідно. **Найбільший робочий тиск**  $P_{p\ max}$  - це максимальний тиск, за яким насос зберігає номінальну швидкість при тривалій роботі. Цей тиск менший за тиск запуску і з економічних міркувань використання насоса найбільш вигідне при роботі в межах робочого тиску.

**Продуктивністю насоса** називають величину потоку газу, що потрапляє до насоса за тиском на впускному патрубку, тобто добуток швидкості насоса на впускний тиск:

$$Q_n = S_n p_1. \quad (10.1)$$

## 10.2 Розрахунок швидкості вакуумного насоса

Як було вже зазначено, швидкість насоса визначають завжди за відповідним тиском. Для значної частини насосів швидкість дуже залежить від тиску газу, що відкачується. Але існують насоси, швидкість яких незначно змінюється в широких межах тиску.

Швидкість насоса можна знайти експериментально. Справді, розглянемо таку теоретичну вакуумну систему (рис.10.2), що складається з поршневого насоса і камери відкачки, об'ємом  $V$ , яка безпосередньо приєднана до впускного патрубка насоса і тиск газу в ній  $p$ . Будемо вважати, що температура газу не змінюється протягом відкачування, отже його стан можна описати за законом Бойля-Маріотта. При роботі насоса за проміжок часу  $dt$  з камери буде видалено газу об'ємом  $dV$ , що приведе до зниження тиску на  $dp$ . Оскільки  $pV = Const$ , то можна записати

$$pV = (p - dp)(V - dV) = pV - pdV - Vdp + dpdV.$$

Нехтуючи нескінченно малою величиною другого порядку, отримаємо диференціальне рівняння

$$pdV = -Vdp,$$

тобто

$$dV = -V \frac{dp}{p}.$$

Поділимо на  $dt$  обидві частини рівняння, тоді отримаємо

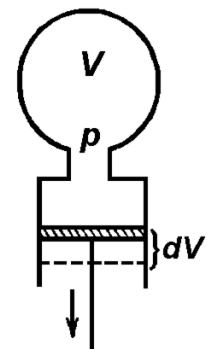


Рис.10.2

$$S_n = \frac{dV}{dt} = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt} . \quad (10.2)$$

Після розподілу змінних і проведення інтегрування в межах тисків від  $p_o$  до  $p_1$ , які відповідають моментам часу  $t_o$  і  $t_1$ , матимемо

$$S_n = \frac{V}{t_1 - t_o} \ln \frac{p_o}{p_1} . \quad (10.3)$$

Рівняння (10.3) називають формулою Геде, за допомогою якої можна розраховувати швидкодію насоса за умови, що  $S_n$  майже не змінюється в інтервалі  $(p_o t_o) - (p_1 t_1)$ .

Оскільки реальні насоси мають граничний тиск, що конструктивно обумовлений шкідливим простором і негерметичностями в місцях доторкання рухомих частин, то відлік тиску слід вести не від нуля, а від величини граничного тиску. Тоді, після внесення поправки, формула (10.3) буде більш точнішою:

$$S_n = \frac{V}{t_1 - t_o} \ln \frac{p_o - p_{zp}}{p_1 - p_{zp}} . \quad (10.4)$$

Слід зауважити, що газовиділення і натікання в (10.4) не враховуються.

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

$$p = (p_o - p_{zp}) e^{-(S/V) \cdot t} + p_{zp} . \quad (10.4)$$

Як видно з рис. 10.3, навіть за такої умови, як би тривало не працював цей теоретичний насос, тиск на впускному патрубку його не зменшується до нуля, а

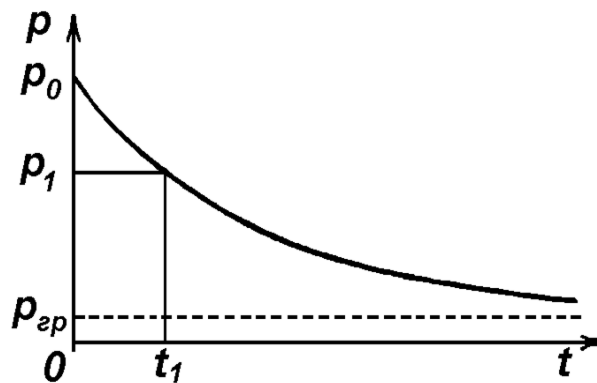


Рис. 10.3

наближається асимптотично до граничного.

### 10.3 Експериментальне визначення швидкодії насоса. Метод постійного об'єму

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

Метод постійного об'єму полягає в тому, що до насоса безпосередньо

приєднують вакуумну камеру (рис.10.4, а), об'єм якої  $V$ , і проводять відкачування при безперервному вимірюванні тиску манометром  $M$  для того, щоб побудувати криву відкачування, тобто залежність  $p = f(t)$  (рис. 10.3).

Швидкодію насоса для будь-якого проміжку часу і тиску визначають за формулою (10.4). Для цього криву відкачування (рис. 10.3) розділяють на відрізки  $\Delta t_{1c} = t_1 - t_0$ ,  $\Delta t_{2c} = t_2 - t_1$  і т.д., для яких знаходять відповідні значення  $\Delta p_{1c} = p_1 - p_0$ ,  $\Delta p_{2c} = p_2 - p_1$  і т.д.;  $\Delta t_{1c}$  – означає, що на цьому відрізку середнє значення  $t_{1c} = (t_1 + t_0) / 2$ . Кожне розраховане за формулою (10.4) значення швидкодії насоса буде відповідати середньому значенню тиску  $P_{ic}$ .

#### 10.4 Метод постійного тиску

Метод постійного тиску полягає в тому, що до впускного патрубку насоса приєднують манометр  $M$ , а до нього через мікрометричний кран довгий скляний капіляр  $K$ , діаметром  $d$ .

При працюючому насосі поступово регулюють мікрометричним краном (натікачем  $KH$ ) газовий потік з атмосфери так, щоб встановився і залишався

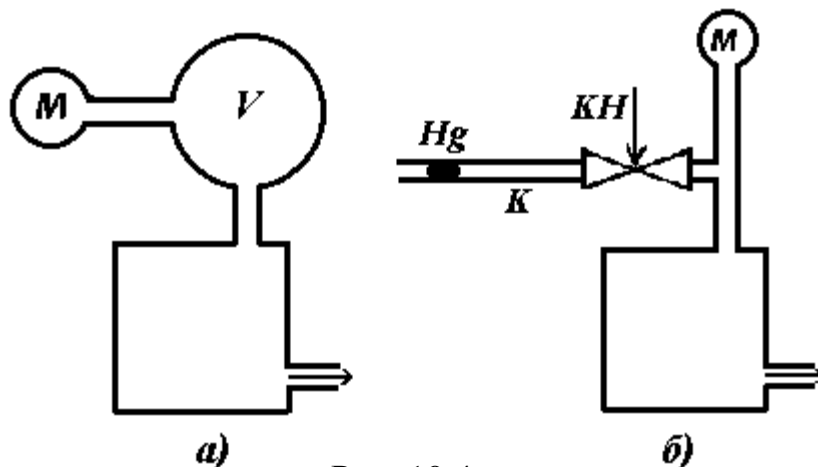


Рис. 10.4

незмінним робочий тиск  $p$ , що покаже манометр  $M$  (рис.10.4, б). Як тільки такий режим роботи застабілізується, у капіляр вводять краплю ртуті, яка буде показником її положення, і вимірюють проміжок часу  $t$ , за який крапля переміститься на довжину  $l$ . Оскільки діаметр капілярної трубки відомий, то можна визначити об'єм газу  $V$ , що буде видалений з трубки за час  $t$ :

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 l}{4}. \quad (10.5)$$

При незмінному тиску, що встановився за відкачування, потік газу також буде сталим, тобто

$$Q = pS_n = p_a \frac{V}{t}. \quad (10.6)$$

де  $p_a$  - атмосферний тиск.

Таким чином, швидкодію насоса, що вимірюється за тиском  $p$  **Торр**, можна розрахувати за формулою:

$$S_n = \frac{\pi \cdot d^2 l p_a}{4 \cdot t p} = \frac{\pi \cdot d^2 l 760}{4 \cdot t p}. \quad (10.7)$$

## 10.5 Класифікація вакуумних насосів

При конструюванні вакуумних насосів використовують різні фізичні явища і закони, що дозволяють здійснити видалення газів з об'єктів відкачки.

До насосів, в яких використовують **закон Бойля-Маріотта**, відносять:

- а) поршневий насос;
- б) насос Шпренгеля;
- в) обертовий ртутний насос Геде;
- г) пластинчаті й золотникові насоси;
- д) двороторні насоси Рутса.

До насосів, в яких використовують **в'язкість газу**, відносяться пароструминні ежекторні насоси.

До насосів, в яких використовують **молекулярну течію газу**, відносять:

- а) механічні молекулярні насоси Гольвека і Зігбана;
- б) дифузійні насоси.

Існують насоси, в яких використовують **іонізацію газів**, а також насоси, що створюють вакуум за допомогою **поглинання газів** (іонно-сорбційні, електророзрядні, криогенні).

### 10.5.1 Насоси, що працюють на основі закону Бойля-Маріотта.

#### Поршневий насос

Перші вакуумні насоси були поршневого типу. Такі насоси використовував О. фон Геріке ще в 1650 р. у своїх знаменитих дослідках з відокремленням півкуль. Цей насос складався з поршня і циліндра, з двома отворами, які мали клапани, що відкривалися: один - в атмосферу; другий - в середину циліндра (рис.10.5). За кожним рухом поршня вниз, а потім вгору повітря з вакуумної камери відкачується в атмосферу. Між поршнем, коли він знаходиться у верхньому положенні і торкається поверхні циліндра і клапаном  $k_2$ , завжди є простір, що виникає з конструктивних особливостей (нерівності поверхонь). Цей об'єм називають шкідливим простором, оскільки він впливає на граничний тиск насоса.

Дійсно, якщо позначимо шкідливий простір через  $v$ , а об'єм камери через  $V$ , то коли поршень почне рухатися вгору тиск у шкідливому просторі буде дорівнювати **760 Торр** і тоді, у відповідності з законом Бойля-Маріотта, можна записати, що

$$760 \cdot v = p_1 \cdot V, \quad (10.8)$$

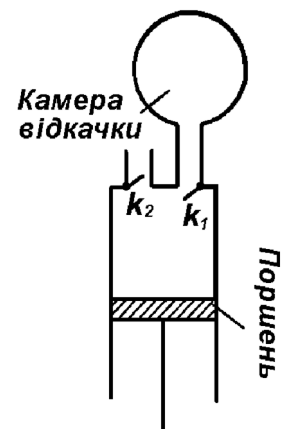


Рис.10.5



і знайти самий низький тиск, який може створити насос:

$$p_1 = \frac{V}{V} 760 \text{ Торр}. \quad (10.9)$$

Цей тиск дійсно буде самим низьким, оскільки клапан  $k_1$  відкривається тільки за умови, що тиск у камері відкачки буде більшим за  $p_1$ .

Швидкодія поршневого насоса за тиском  $p$  при  $n$  циклах відкачки за секунду дорівнюватиме:

$$S_n = n V \left( 1 - \frac{p_1}{p} \right). \quad (10.10)$$

Як видно з наведеної вище формули, швидкодія насоса буде наближатися до нуля, коли тиск досягне граничного значення.

У кінці XIX ст., після внесення різних удосконалень з метою підвищення герметичності, поршневі насоси використовували в промисловому виробництві освітлювальних ламп. Граничний тиск таких насосів знаходиться в межах від 0,1 до 1 **Торр**, тому вони були замінені пластинчатими обертовими насосами.

### 10.5.2 Крапельний ртутний насос



Рис. 10.6

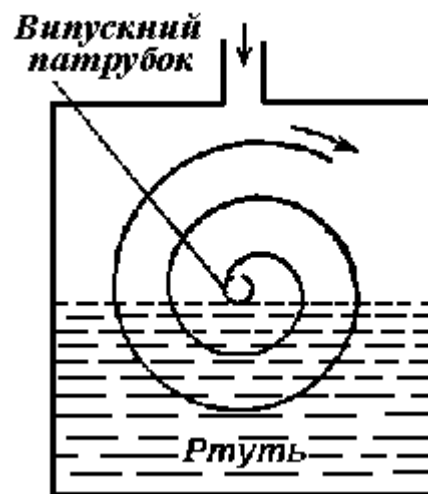


Рис. 10.7

Крапельний ртутний насос, який ще називають насосом Шпренгеля, є різновидом поршневого, в якому функцію поршня виконують краплі ртуті (рис.10.6), що падають у довгій трубці з малим діаметром ( $d \leq 2 \text{ мм}$ ). Краплі ртуті захоплюють порції повітря з об'єкта відкачки і виштовхують їх до атмосфери.

Слід зауважити, що загальна висота крапель ртуті має перебільшувати 760 мм. Тільки за такої умови рух крапель ртуті призведе до виникнення в довгій трубці "торрічелевої пустоти", яка й створить відкачку об'єкта. Оскільки діаметр трубки малий і швидкість дії насоса дуже мала, за цієї причини насоси Шпренгеля вийшли з використання, незважаючи на те, що граничний тиск, який вони створюють, досягає значення тиску насиченої пари ртуті при кімнатній температурі ( $10^{-3} \text{ Торр}$ ).

### 10.5.3 Обертовий ртутний насос Геде

Обертовий ртутний насос Геде широко застосовувався на початку ХХ ст. для відкачки колб освітлювальних ламп. Конструктивно насос складається з бака 1, наполовину заповненого ртуттю, і в якому розміщено спіралеподібний ротор. Спіралеподібний ротор — це лист заліза, вигнутий у вигляді спіралі, наполовину занурений у ртуть, який обертається навколо своєї осі у відповідному напрямі (рис. 10.7). При обертанні ротора газ, що потрапляє до насоса через упускний отвір, буде захоплюватися на кінці спіралі, а потім переміщуватися до осі обертання, де розміщений випускний отвір. До випускного отвору приєднують інший насос, який відкачує газ до атмосфери. Граничний тиск обмежується тільки тиском пари ртуті.

### 10.5.4 Пластинчато-роторний насос

Пластинчато-роторний насос, будова якого в розрізі, перпендикулярному

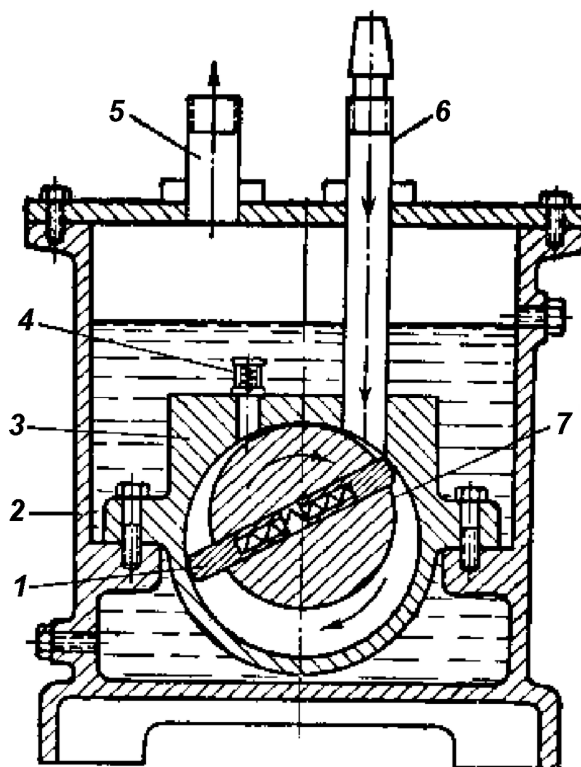


Рис. 10.8

осі статора, наведена на рис. 10.8, складається з нерухої циліндричної порожнини-статора 3, в якій розміщено з меншим діаметром циліндричний сталевий ротор 7, на діаметрі якого зроблений проріз, де розміщені рухливі пластини 1. Ротор обертається за допомогою потужного електродвигуна, а пластини щільно притискуються до поверхні статора за допомогою внутрішньої сталеві пружини і постійно ковзають уздовж прорізу в роторі, то наближуючись, то віддаляючись одна від одної. Вісь ротора паралельна осі статора, але зміщена так, що ротор щільно притискується до поверхні статора по твірній. У статорі є два отвори, через які газ потрапляє в об'єм статора (упускний

патрубок 6) і навпаки, виштовхується з об'єму статора (випускний патрубок 5). Випускний патрубок має клапан 4 (кульку, притиснуту до поверхні отвору сталеву пружиною). Зрозуміло, що отвори у статорі будуть відповідати наведеним назвам тільки при відповідному напрямі обертання ротора, тому цей напрям указують стрілкою, яку наносять на корпус насоса або на шків.

Простір між ротором і статором пластини розділяють на три порожнини: порожнина упуску відкачуваного повітря, порожнина переносу і випуску.

При обертанні ротора у відповідному напрямі об'єм упуску збільшується, що призводить до зниження тиску в камері відкачки, яка приєднується до упускного патрубка. Коли одна з пластин пройде місце щільного дотикання ротора до статора і упускний отвір, порожнина переносу перетвориться в порожнину випуску, а порожнина упуску - в порожнину переносу. Одночасно, газ почне стискуватися в порожнині випуску, оскільки випускний об'єм буде зменшуватися. Як тільки тиск зросте до величини, що трохи перебільшить значення атмосферного, випускний клапан відкриється і газ виштовхнеться до атмосфери. За подальшого обертання ротора процес відкачки почнеться знову.

На рис. 10.9 схематично пояснюються етапи роботи насоса. Римськими цифрами вказані чотири характерні положення ротора при його обертанні. Стрілками - напрям переміщення газу і обертання ротора.

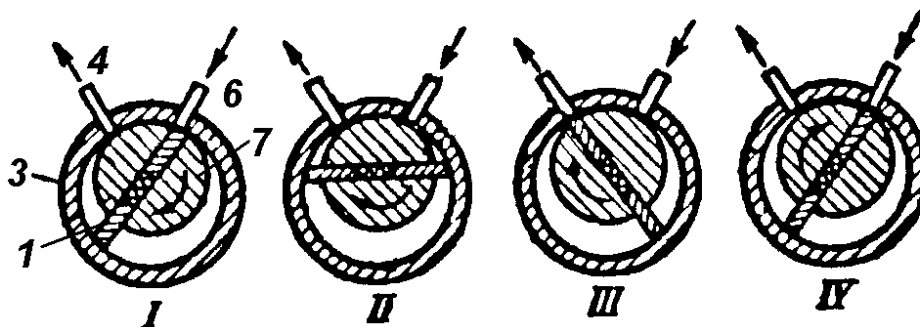


Рис. 10.9

Для зменшення тертя, яке виникає між щільно притиснутими рухливими деталями, в насос вводять певну кількість вакуумної оливи, а для охолодження при роботі його корпус занурюють і закріплюють в бак з вакуумною оливою. З цієї причини у відкачуваних об'ємах буде присутня насичена пара вакуумної оливи, яка впливатиме, таким чином, на граничний тиск.

Слід зауважити, що на граничний тиск буде впливати ще об'єм шкідливого простору (рис. 10.10), який є як біля випускного отвору, так і біля впускного, де тиск різниться за величиною. Різниця тисків може викликати витік газу через місце дотикання ротора до статора за твірною і також може привести до порушення герметичності ущільнення, якщо насос зупинити. Щоб зменшити об'єм шкідливого простору, його заповнюють невеликою кількістю вакуумної оливи, а наявність на випускному отворі клапана знижує середній тиск у випускній порожнині і зменшує загрозу проходження газу через спільну твірну.

Обертіві насоси поряд з позитивними якостями мають ряд недоліків, які погіршують наведені вище характеристики. Граничний вакуум залежить від тиску насиченої пари вакуумної оливи, а також від конструктивних

особливостей насоса (ступеня тиску пружини випускного клапану, об'єму шкідливого простору та ін.).

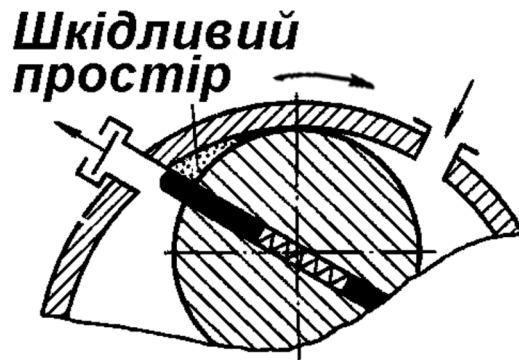


Рис. 10.10

### 10.5.5 Параметри пластинчато-роторних насосів

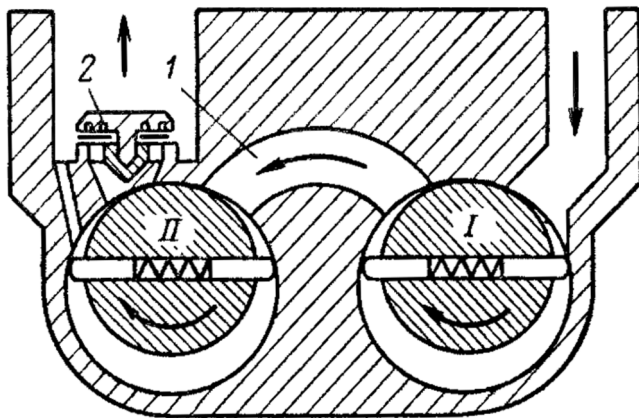


Рис. 10.11

Параметри пластинчато-роторних насосів залежать від конструктивних розмірів робочих об'ємів. Насоси малих розмірів мають швидкодію 0,6 л/с за тиском 0,1 Торр. Великі насоси за таким же тиском мають швидкодію до 600 л/с. Потужність електродвигуна коливається відповідно від 150 Вт до 10 кВт при швидкості обертання ротора - 300-500 об/хв. Одним добре налаштованим насосом можна

досягти граничного тиску  $10^{-2}$  Торр. Але, якщо з'єднати послідовно два насоси, то це ефективно поліпшить граничний тиск і можна отримати ще нижчий граничний тиск -  $10^{-3}$  Торр. Таке з'єднання виконують зазвичай в одному блоці, як показано на рис. 10.11, де з'єднувальний канал 1 зроблено у спільному статорному блоці з I і II роторами, які розміщені в окремих циліндричних порожнинах, і клапаном 2 на випускному патрубку. Такий насос називають двоступінчастим.

### 10.5.6 Пластинчато-статорний насос

З метою зменшення шкідливого простору і областей тертя (там, де може виникати негерметичність) були розроблені насоси, що мають рухома пластину 5, розміщену в циліндричному статорі I (рис. 10.12). У циліндричній порожнині статора обертається циліндричний сталевий барабан-ротор 2, який щільно притиснутий до поверхні статора, але на відміну від пластинчато-роторного насоса вісь обертання ротора не співпадає з віссю його симетрії, тобто він

обертається ексцентрично. Зауважимо, що вісь симетрії циліндричного статора співпадає з віссю обертання ротора. Під дією пружини 4 пластина щільно притискується до поверхні ротора і таким чином рухається тільки поступально-зворотно. У випускний отвір 3 вмонтовано клапан, а відкачування відбувається через упускний патрубок 6.

Обертання ротора призводить до його ковзання по внутрішній поверхні статора, тому їх поверхні мають бути добре притертими, а щоб не виникало биття від ексцентричного обертання, в роторі висвердлюють порожнини, доки вісь обертання не співпаде з центром маси. Пластина 5 розділяє упускний простір від випускного, а обертання ротора виконує дію, подібну до дії пластин в пластинчато-роторному насосі.

З метою підвищення герметичності, змащення місць тертя і охолодження під час роботи, корпус насоса розміщують в ємності з вакуумною оливою.

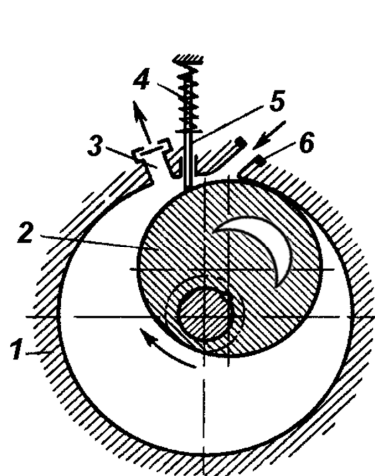


Рис. 10.12

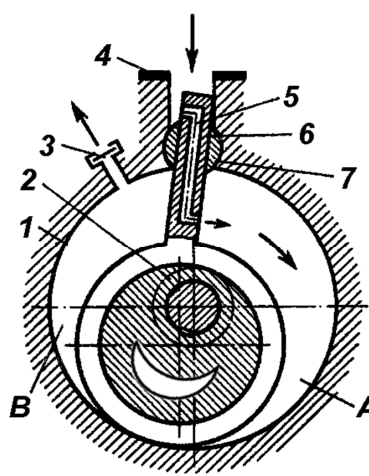


Рис.10.13

Оскільки за один оберт ротора пластинчато-статорного насоса об'єм видаленого газу такий же, як і в пластинчато-роторного насоса, то швидкодія у них однакова. Зазвичай такі насоси виготовляють двоступінчастими, що забезпечує граничний тиск  $10^{-4}$  Торр.

У порівнянні з пластинчато-роторним насосом розглянутий насос має такі позитивні якості, як зменшення небезпечних місць прориву газу через проріз до вакуумної частини.

### 10.5.7 Золотникові насоси

Золотниковий насос являє собою комбінацію поршневого насоса з пластинчато-статорним насосом (рис. 10.13) і складається з циліндричного корпусу-статора 1, в якому рухається ексцентричний ротор 2, але він не торкається поверхні статора, як в пластинчато-статорному насосі, оскільки щільно замкнений в спеціальній обоймі, яка фактично виконує роль поршня. Обойма (рис. 10.14) має вигляд циліндра, який доповнюється плоскою частиною у вигляді суцільного паралелепіпеда зі спеціальним порожнинним каналом 5. Плоска частина обойми розміщена в отворі упуску 4 і переміщується

як золотник в клапані-шарнірі 7, який щільно обтискує її.

При обертанні ротора обойма здійснює коливально-поступальний рух, що складається з коливань з боку в бік та ковзання в шарнірі зверху вниз і зворотно. Таким чином, циліндрична частина обойми немовби котиться поверхнею статора, завжди щільно притискуючись до неї. Такий рух обойми-поршня приводить до одночасного втягування газу до зростаючої за об'ємом камери упуску *A* через упускний патрубок і виштовхування під відповідним тиском зі зменшеної за об'ємом камери випуску *B* через випускний патрубок з клапаном 3.

Унаслідок меншого тертя між рухомими частинами золотникові насоси не потребують охолодження за допомогою занурення до бака з оливою, що значно зменшує витрати вакуумної оливи.

З метою покращення герметичності, а також для змащення поверхонь, між якими виникає тертя, оливу подають в невеликих кількостях через тоненькі трубки до сальників на осі насоса і до робочого простору.

Золотникові насоси мають більшу швидкість в порівнянні з іншими обертовими насосами завдяки попередньому розрідженню в камері упуску. Такі насоси широко використовують для створення попереднього вакууму у відкачувальних автоматах, де потрібна велика продуктивність насоса, а також в колекторах і централізованому вакуумпроводі, які підводять до відкачувальних автоматів та інших вакуумних установок для підтримання відповідного ступеня вакууму. У насосах з великою швидкістю вводять додаткове охолодження і в якості охолоджувача використовують проточну воду, яку вводять до охолоджувальної оболонки і виводять з неї через патрубки 1 і 2 (рис.10.15).

Граничний тиск, якого досягає золотниковий насос, має величину  $10^{-3}$  Торр, тобто трохи гірший, ніж в пластинчато-статорному насосі.

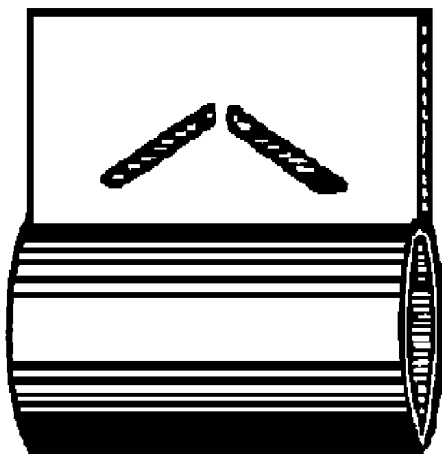


Рис. 10.14

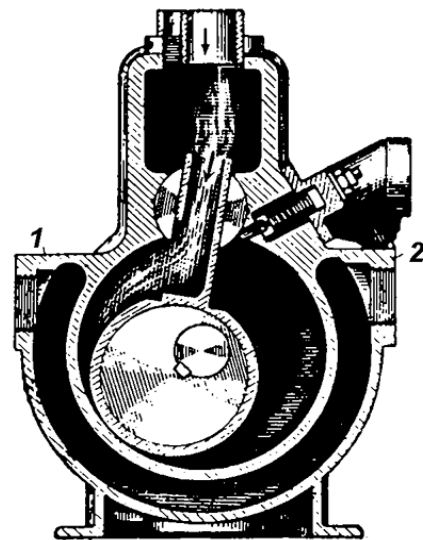


Рис. 10.15

### Запитання для самоперевірки

1. Дайте визначення головних параметрів вакуумних насосів.
2. Виведіть рівняння Геде.
3. Запишіть, за якою залежністю від часу відкачки змінюється тиск у

вакуумній системі.

4. Наведіть і проаналізуйте методи експериментального визначення швидкодії вакуумного насоса.
5. Як класифікують вакуумні насоси?
6. Поясніть, як працює поршневий вакуумний насос; наведіть формулу для визначення його швидкодії.
7. Поясніть, як працює ртутний насос Геде.
8. Поясніть будову пластинчато-роторного насоса; на які етапи поділяють його роботу?
9. Який простір у вакуумних насосах і чому його називають шкідливим?
10. Як конструктивно можна знизити граничний тиск пластинчато-роторного насоса?
11. Назвіть головні відмінності в будові й роботі пластинчато-статорного насоса від пластинчато-роторного.
12. Назвіть головні відмінності в будові й роботі золотникового насоса від пластинчато-статорного.

## Лекція одинадцята

### ОБЕРТОВІ НАСОСИ (продовження)

#### 11.1 Вакуумна олива для обертових насосів

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

Щоб у вакуумної оливи був низький тиск насиченої пари, в ній не має бути легколетючих фракцій.

В'язкість вакуумної оливи впливає як на роботу насоса, так і на граничний тиск. Якщо вона буде дуже великою, то і герметичність буде надійною, але рух ротора буде утруднений і олива буде перегріватись. Якщо в'язкість буде дуже малою, то вакуумне ущільнення буде ненадійним. Відомо, що в'язкість вакуумної оливи залежить від температури нагрівання, тому це потрібно враховувати при роботі насосів у літні чи зимові часи, якщо від них залежить температура приміщення, де працюють насоси. Крім цього, від в'язкості ще залежить властивість вакуумних олив осмолюватись і накопичуватись на стінках вакуумних об'ємів насоса, що утруднює їх роботу, навіть призводить до повної зупинки. На швидкість осмолення дуже впливають відкачувані гази такі як: хлор, фтор або пара кислот, до складу яких входять ці елементи. Оскільки вакуумна олива ще потрібна для охолодження нагрітих частин насоса, то його має бути не менше відповідної кількості для даного насоса. За місцевого перегріву пара оливи може спалахнути. Чим нижчий тиск насиченої пари оливи, тим вищою буде температура спалаху. Для вакуумних олив обертових насосів температура спалаху має бути вищою за 200° С. Тому для заливки обертових насосів застосовують виготовлену спеціальну вакуумну оливу VM-4, яка має тиск насиченої пари  $\sim 10^{-5}$  Торр, що цілком задовільно для обертових насосів. Але з часом роботи насоса вона не тільки забруднюється парою рідин, які можуть бути у відкачуваному об'ємі, а й змінює свій склад з причин місцевих перегрівів і в ній з'являються легколетючі фракції (виникає крекінг). Тому необхідно у відповідні терміни повністю замінювати відпрацьовану оливу свіжою. Перед цим необхідно старанно вимити внутрішні порожнини насоса відповідними розчинниками.

#### 11.2 Вказівки при роботі з обертовими оливними насосами та їх розміщення

Оскільки в обертових оливних насосів вакуумну оливу заливають у бак, в якому розміщено насос, в кількості, щоб випускний клапан насоса був занурений в ній і олива, хоча й в невеликій кількості присутня в робочому об'ємі насоса, то потрібно виконувати ряд вимог щодо запуску і експлуатації насосів при створенні відповідного вакууму в технологічних об'ємах вакуумної системи.



При встановленні (розміщенні) насосів необхідно потурбуватися про його надійне закріплення і про зручність підходів для підключення до електричної мережі живлення, нагляду за роботою насоса, а також заміни вакуумної оливи за необхідності. Щоб закріпити невеликий насос (з швидкістю до 300 л/с) достатньо розмістити його в жерстяному деку (для уловлювання вибризувань оливи), що знаходиться на гумовому килимку. Килимок буде знижувати акустичний шум, що виникає за роботи насоса, а також створювати велике тертя з підлогою, щоб насос не переміщувався від вібрацій. Великі насоси необхідно закріплювати на масивній спеціальній основі. Унаслідок вібрацій, що виникають за роботи насосів, приєднання їх до вакуумних систем треба виконувати за допомогою гумових або металевих гофрованих трубок (сильфонів), які будуть компенсувати малі зміщення.

### 11.3 Запуск насоса

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

За роботи будь-якого обертового насоса слід запобігати попаданню до його внутрішнього об'єма з вакуумної системи сторонніх предметів, особливо твердих (наприклад, скляних або металевих частинок). Тверді частинки можуть

**До атмосфери  
(чисте повітря)**

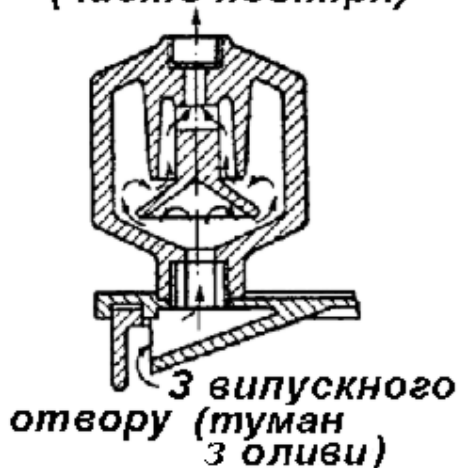


Рис. 11.1

викликати порушення ущільнень у насосі й вивести його з ладу. За цієї причини приєднувати насос до вакуумної системи необхідно через спеціальні механічні уловлювачі твердих частинок.

Слід пам'ятати, що обертові насоси можуть нормально працювати, тільки якщо вони заповнені необхідною кількістю вакуумної оливи, яку вказують у паспорті насоса. У процесі роботи кількість вакуумної оливи зменшується і якщо витрати її не поповнювати, то насос перестане працювати, що проявиться недопустимим погіршенням граничного вакууму. Залежно від конструкції насоса використовують різні покажчики (оглядове віконце, зливний отвір і т.п.) достатньої

кількості оливи в ньому. Загальним правилом для всіх обертових насосів є підтримання такого рівня оливи, щоб клапанний пристрій на випускному патрубку був занурений у оливу.

Найбільш швидко витрачається олива при вмиканні насоса і роботі за

підвищених упускних тисках. Вакуумна олива викидається з випускного патрубку у вигляді бризок (крапель) і як оливний туман.

З метою запобігання забрудненню повітря у приміщенні і витрат оливи деякі насоси забезпечують пристроєм, що називають оливовідштовхувачем, який повністю затримує вакуумну оливу, але пропускає повітря з випускного отвору до зовнішнього середовища. Будова і принцип роботи такого оливовідштовхувача зображені на рис. 11.1. Останній може бути й іншої конструкції.

#### 11.4 Вимикання обертового насоса

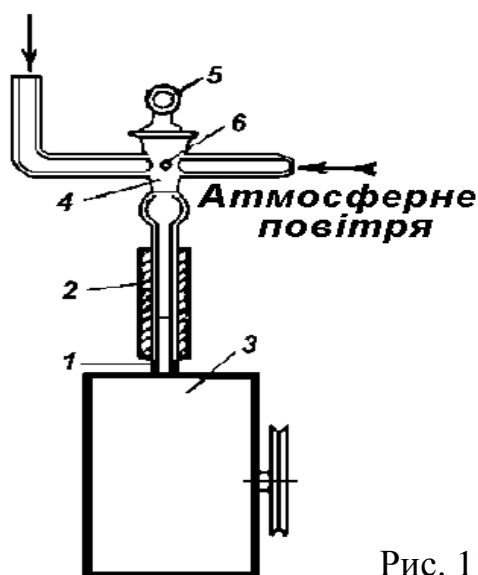


Рис. 11.2

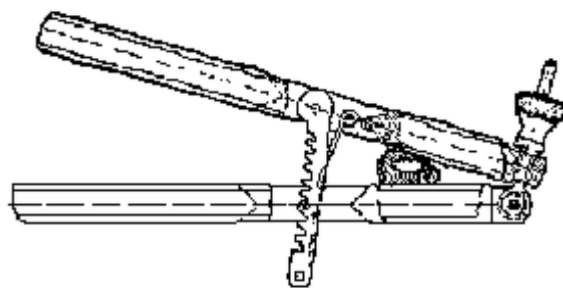


Рис. 11.3

Вимикання обертового насоса потребує уваги й обережності, оскільки за його безпосередньої зупинки може виникнути загроза забруднення вакуумної системи оливою. За дії атмосферного тиску вакуумна олива, що охолоджує насос, починає проходити через випускний клапан до робочого об'єму насоса, заповнюючи його, а потім через місця притискання рухомих частин насоса потрапляє через упускний патрубок і піднімається до вакуумної системи. Щоб запобігти виникненню такої загрози, необхідно приєднати за допомогою гумової трубки 2 між упускним патрубком 1 насоса 3 і вакуумною системою скляний триходовий кран (трійник) 4 (рис. 11.2). Пробка 5 має на боковій поверхні й всередині отвір 6 і при повороті отвору до вакуумної системи з'єднує її з упускним патрубком насоса, а при повороті в зворотному напрямі з'єднує насос з атмосферою.

Перед зупинкою насоса необхідно від'єднати його упускний патрубок від вакуумної системи, а потім зупинити насос. Зразу ж після зупинки насоса, кран на упускному патрубку необхідно повернути на атмосферу, тобто з'єднати впускний патрубок з атмосферою, але не з вакуумною системою. Тоді тиск збоку упускного патрубку зрівняється з тиском на випускному патрубку і вакуумна олива не буде проникати до вакуумної системи. Триходовий кран можна замінити механічними затискачами (рис. 11.3) за гумового з'єднання насоса з вакуумною системою, які надійно перетискають гумову трубку.

## 11.5 Обертові газобаластні насоси

Звичайні обертові оливні насоси створюють вакуум на основі закону Бойля-Маріотта і для ефективної відкачки об'ємів, в яких знаходиться або виділяється значна кількість водяної пари вони непридатні. Пара за стискання конденсується у воду, яка змішується з оливою, створюючи емульсію.

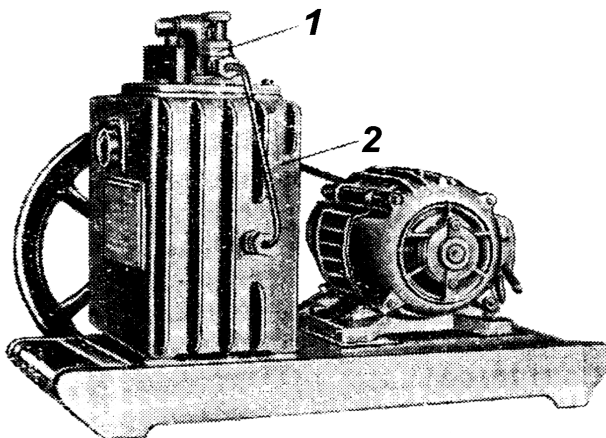


Рис. 11.4

У результаті тиск газу, що створюється у випускному об'ємі, буде недостатнім для відкриття випускного клапана і насос буде працювати вхолосту. Водяні крапельки разом з вакуумною оливою, що зменшує тертя рухомих частин, будуть проникати з випускного простору до упускного з низьким тиском, де швидко випарюються і водяна пара знову потрапляє до вакуумної системи. Для відкачування водяної пари з вакуумних систем були створені газобаластні насоси.

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

Загальний вигляд газобаластного насоса ВН-461МГ з дозувальним вентиляем 1 і трубкою для напускання баластного газу 2 наведений на рис.11.4.

## 11.6 Багатошарові насоси

За необхідності відкачування великих об'ємів до низького вакууму або заводських централізованих вакуумпроводів технологічних систем до попереднього вакууму використовують багатошарові обертові насоси великої швидкодії (рис. 11.5). Насос має циліндричний ротор, що обертається навколо своєї осі, паралельно зміщеної відносно вісі статора. У роторі зроблені

прорізи, в яких вільно вставлені сталеві пластини.

За обертання ротора пластини щільно притискаються до поверхні статора відцентровою силою і розділяють серпоподібний робочий простір між поверхнями статора і ротора на багато камер. Газ, що потрапляє з вакуумної системи до упускного отвору, заповнює камери і переноситься з поступовим стисканням, до випускного отвору. Щоб запобігти виникненню небезпечно високих тисків за стискання газу, в статорі передбачені захисні випускні клапани 1, 2, 3.

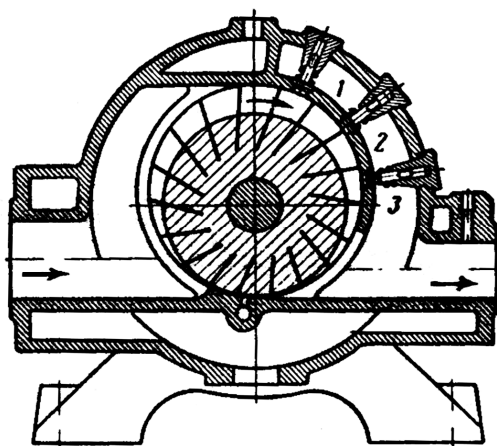


Рис. 11.5

Для зменшення тертя до робочого простору вводять невелику кількість компресорної оливи (марки М). Корпус насоса і торцеві кришки охолоджують від перегрівання проточною водою. Число обертів ротора досягає 25 об/с, а потужність електродвигуна може бути 100 кВт.

Граничний тиск багатопластинчастих обертювих насосів не зменшується нижче 10 Торр. У той же час вони мають велику швидкодiю (до 1000 л/с).

### 11.7 Двуроторний насос Рутса

Велику швидкість дії за невеликих ступенів стискання газу, що відкачується, досягають за допомогою насоса, що виготовляла фірма братів Рутс і який має два ротори з профілями у вигляді лемніскати (рис. 11.6). За синхронного обертання роторів в протилежних напрямках, що забезпечують за допомогою зубчатої передачі, між поверхнями роторів, а також поверхнею статора постійно зберігається невеликий проміжок (0,1—0,15 мм), який не ущільнюють оливою. Газ, що потрапляє в об'єм між поверхнями роторів і статора, від упускного отвору переноситься до випускного.

Наявність у насосі неущільнених проміжків вносить в роботу насоса багато особливостей, які відрізняють його від розглянутих обертювих насосів.

По-перше, проміжки дозволяють обертати ротори з великою швидкістю (до 50 об/с) без загрози заклинення, що дає змогу досягти великої швидкодiї насоса.

По-друге, за низьких тисків принцип відкачки стає подібним до молекулярних насосів.

По-третє, під дією різниці тисків на випускному і упускному отворах, виникає негативне явище таке, як зворотний потік газу. Величину цього потоку визначають за формулою:

$$Q_{зв} = U_{зв} (p_{вип} - p_{ен}), \quad (11.1)$$

де  $U_{зв}$  - провідність проміжків (зазорів).

Граничний тиск двороторних насосів досягає  $10^{-4}$  **Торр**, а швидкодія в залежності від конструкції може бути 50 — 5500 л/с за тиском  $10^{-2}$  **Торр**. Особливо широкого застосування ці насоси отримали в технології вакуумного виплавлення металів.

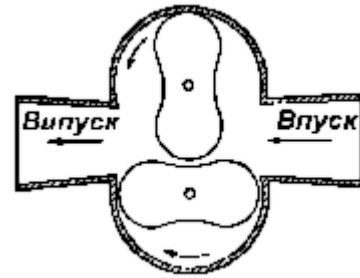


Рис. 11.6

### 11.8 Молекулярний обертовий насос

Роботу молекулярних насосів можна пояснити тільки на основі молекулярно-кінетичної теорії газів. Окремі молекули газу направляються до випускного отвору в результаті отримання імпульсу від стінки, що швидко обертається. Молекули газу, що рухаються хаотично, при зіткненні з поверхнею твердого тіла на деякий час утримуються на ній за дії міжмолекулярних сил, після чого випарюються з неї у випадковому напрямі незалежно від кута, під яким виникло зіткнення. Якщо поверхня буде рухатися, то молекули газу, що випарюються з неї після зіткнень, завжди матимуть складову швидкості, яка дорівнює як за величиною, так і за напрямом, швидкості руху поверхні.

Розглянемо принцип молекулярної відкачки на прикладі роботи простого молекулярного насоса, що зображений на рис. 11.7.

Насос складається з ротора, який обертається з великою швидкістю, має старанно відполіровану поверхню і розміщений з малим зазором співвісно в нерухомому циліндричному статорі. Між упускним і випускним отвором по дузі кола, довжиною  $l$  в статорі зроблено відносно більший зазор. При обертанні ротора, газові молекули після зіткнення з поверхнею ротора будуть отримувати імпульс у напрямі до випускного отвору, тобто газ буде переміщуватися в статорі по каналу довжиною  $l$  і в результаті між упускним і випускним отвором виникне різниця тисків, що створена обертанням ротора.

Німецький фізик В. Геде визначив, що за низьких тисків відношення тиску на випускному до тиску на упускному отворах дорівнює:

$$\frac{p_{вип}}{p_{ен}} = e^{av}, \quad (11.2)$$

де  $a$  - коефіцієнт, що залежить від природи газу й від провідності каналу в статорі;  $v$  - лінійна швидкість обертання ротора.

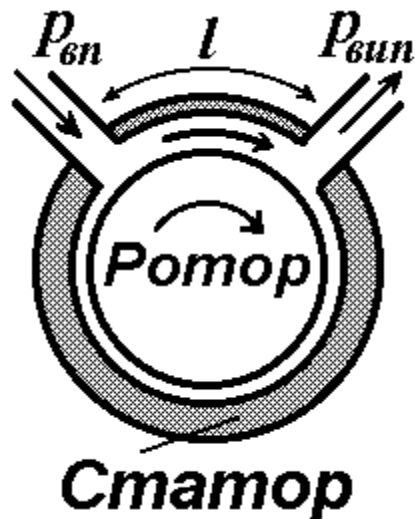


Рис. 11.7

З наведеного виразу видно, що відношення тисків зростає при збільшенні швидкості обертання ротора, а граничний тиск можна зменшити пониженням випускного тиску за допомогою попереднього розрідження. Насос починає задовільно працювати вже при  $v=100$  м/с і з тим більшою ефективністю, ніж число зіткнень молекул зі стінкою каналу буде більшим за число зіткнень між молекулами. Необхідно, щоб середня довжина вільного пробігу молекул була великою в порівнянні з висотою каналу, тобто потрібно здійснювати попереднє розрідження. Наведене відношення тисків залежно від конструкції насоса і швидкості обертання ротора може коливатися в межах  $10^5 \div 10^7$ , тобто граничний тиск буде за порядком  $10^{-6}$  Торр, якщо попередній вакуум забезпечити в 1 Торр.

Середня енергія молекул залежить тільки від температури, тому за однакових температур для двох різних газів можна записати, що

$$m_1 v_{1кв}^2 = m_2 v_{2кв}^2. \quad (11.3)$$

Оскільки механічний молекулярний насос працює в результаті передачі молекулам додаткового імпульсу руху, то

$$S_2 / S_1 = v_{1кв} / v_{2кв} = (m_2 / m_1)^{1/2} = (M_2 / M_1)^{1/2}, \quad (11.4)$$

де  $S_1$  і  $S_2$  - швидкодії насоса для кожного газу.

Таким чином, швидкодія такого молекулярного насоса змінюється пропорційно квадратному кореню з молекулярної маси. Цю властивість можна використовувати для розділення ізоотопів (збагачення елементів).

### 11.9 Молекулярний насос Гольвека

Перші молекулярні насоси Геде були пізніше суттєво удосконалені. У 1922 р. Ф. Гольвек сконструював насос (рис. 11.8), що складався з ротора 1, поверхня якого була добре відполірована, і статора 2. Проміжок між ротором і статором не перевищував 0,03 мм. У статорі були зроблені гвинтові канали прямокутної форми, глибина яких поступово зростала від кінців, де вона дорівнювала 0,5 мм., до центра з глибиною 12 мм. Канали являють собою дві

спіралі з взаємно зворотним напрямом і розходяться від середини насоса в протилежні боки. Ротор насоса розміщений на одній осі з ротором 3 електродвигуна, герметизованого від зовнішнього середовища газонепроникною камерою 4 і приводився до руху магнітним полем статора – індуктора 5.

За обертання ротора високий вакуум створюється на упускному отворі 6, що розміщений у центральній частині статора, а підвищений тиск - на випускному отворі 7 з кінців ротора.

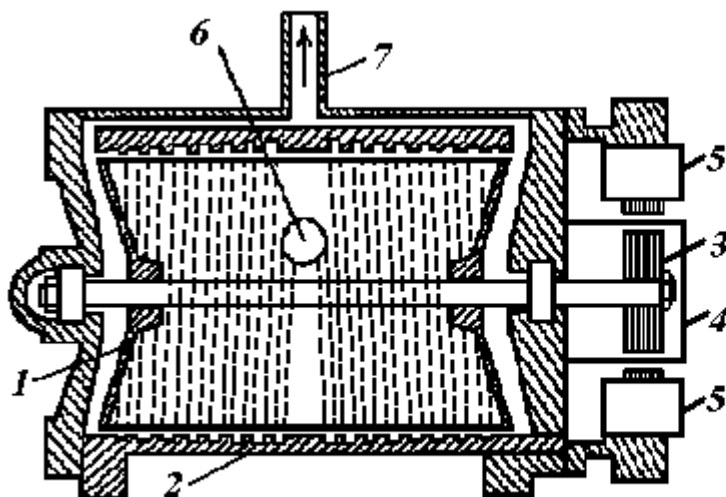


Рис. 11.8

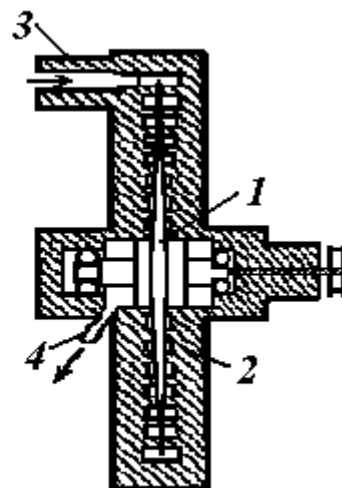


Рис. 11.9

При довжині ротора 220 мм і діаметрі 150 мм, насос приводився до руху електродвигуном, що мав потужність 10 Вт і швидкість обертання 75 об/с. При цьому швидкодія насоса була майже постійною в межах від 0,1 Торр до 0,001 Торр і складала 2,5 л/с; граничний тиск  $\sim 10^{-6}$  Торр; необхідне попереднє розрідження – 20 Торр.

### 11.10 Насос Зігбана

Пізніше (1926 – 1946 рр.) М. Зігбаном був розроблений та вдосконалений Г. Гонде насос, ротор якого був у вигляді полірованого диска 1, розміщеного між вузькими прямокутними каналами для газу, що мали вигляд спіралей на поверхні статора 2 з обох боків ротора (рис. 11.9). Високий вакуум створювався за роботи насоса на упускному отворі 3, а підвищений тиск – на випускному 4. Насос мав значно більшу швидкодію, ніж розглянутий вище.

### 11.11 Турбомолекулярні насоси

Широкого розповсюдження набули молекулярні насоси, в яких потік відкачуваного газу і зворотний потік рухаються у взаємно перпендикулярних напрямках. Конструктивно такий насос нагадує турбіну.

Турбомолекулярний насос (рис. 11.10 а) складається з циліндричної камери, в якій закріплені нерухомо елементи статора у вигляді тонких дисків 1, що мають товщину в декілька міліметрів. Ряд таких же дисків 2 паралельно розміщено на валі ротора, причому як між кожними паралельними поверхнями

роторних і статорних дисків, так і в радіальному напрямі між статором і ротором існує зазор в 1 мм.

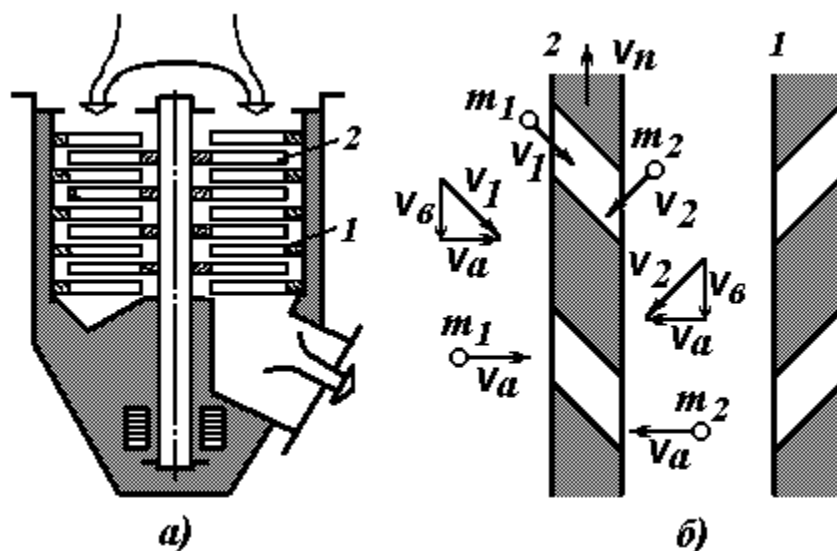


Рис. 11.10

Такий достатньо широкий зазор дозволяє задати значно більшу швидкість обертання ротора турбомолекулярного насоса, ніж звичайного молекулярного без заїдання.

Усі диски мають косо направлені радіальні прорізи, розміщені таким чином, що прорізи статорних дисків являють немовби дзеркальне відображення роторних (рис. 11.10 б), завдяки чому між косими поверхнями прорізів одного диска і поверхнею сусіднього диска створюються клиноподібні канали. Таких каналів зроблено до 40, в кожній системі розміщено до 19 пар статорних і роторних дисків.

Молекулярна відкачка відбувається в результаті залежності провідності похилого каналу, що рухається зі швидкістю  $v_n$  перпендикулярно до газового потоку, від напрямку течії газу. У результаті теплового руху молекули газу з середньоарифметичною швидкістю  $v_a$  будуть бомбардувати з обох боків пластини з похилими каналами (рис. 10.10, б). Можна вважати, що за обертання ротора рух каналу роторної пластини зі швидкістю  $v_n$  відносно умовно нерухомої молекули – це такий же рух молекули (наприклад  $m_1$ ) зі швидкістю  $v_g = v_n$  відносно умовно зупиненого каналу. Після векторного додавання складових швидкостей молекули  $m_1$  отримаємо, що напрям її руху зміниться і вона з результируючою швидкістю  $v_1$  буде рухатися паралельно осі каналу. У сукупності з іншими подібними молекулами створиться газовий потік, тобто примусове перетікання газу через рухомий канал на інший бік пластини 2. Таке перетікання газу створить підвищений тиск на одному боці нерухомої статорної пластини 1, тоді як перетікання газу через канали наступної роторної пластини створить понижений тиск на другому боці нерухомої пластини 1. Різниця тисків,



що виникла, викличе потік газу через канали нерухомих стартерних пластин 1 у напрямі до випускного отвору насоса. Одночасно потік молекул через канали рухомої пластини 2 у зворотному напрямі, наприклад, молекул, подібних до  $m_2$ , буде направлений перпендикулярно до подовжньої осі рухомого каналу, тобто перетікання газу на інший бік пластини 2 буде утруднено. Отже за роботи насоса виникає молекулярна відкачка газу від упускного отвору до випускного через похилі канали – отвори в пластинах турбіни.

### **11.12 Переваги та недоліки механічних молекулярних насосів**

#### *Переваги:*

1. Відкачка газу починається з моменту запуску.
2. Насоси не потребують виморожуючих пасток, оскільки в насосі немає речовин, які могли б забруднити відкачувані об'єми.
3. Можна відкачувати будь-які гази і пару рідин.

#### *Недоліки:*

Наявність відповідних зазорів між рухомими і нерухомими частинами викликає необхідність захисту від твердих частинок (скла, металів та ін.), що можуть потрапити з вакуумної камери до робочого об'єма насоса.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Яке призначення має вакуумна олива в обертових насосах?
2. Яким вимогам має задовольняти вакуумна олива?
3. Яку послідовність дій необхідно виконувати для правильного і безпечного запуску й зупинки вакуумного насоса?
4. Які насоси використовують і чому для відкачки пари?
5. Як побудований і працює двороторний насос Рутса?
6. Як побудований і працює молекулярний обертовий насос?
7. Наведіть головні відмінності між молекулярними насосами Гольвека і Зігбана.
8. Як побудований і працює турбомолекулярний вакуумний насос?
9. Назвіть переваги і недоліки молекулярних обертових насосів.

## Лекція дванадцята

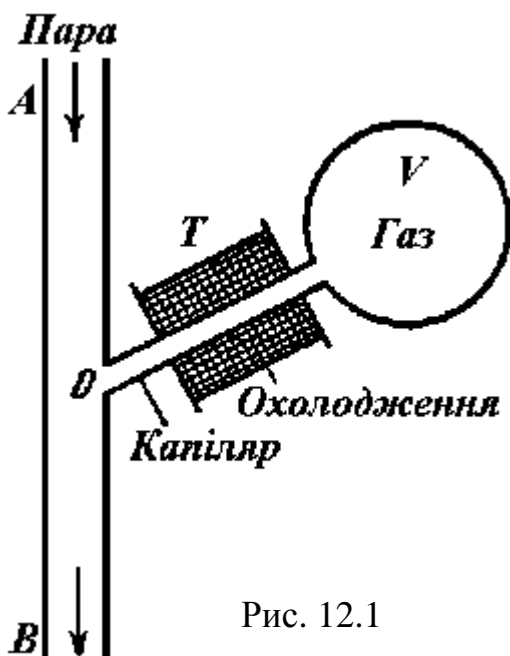
### ПАРОСТРУМИННІ НАСОСИ

#### 12.1 Пароструминний насос Геде

Пароструминні насоси відносять до молекулярних насосів. Для їх роботи необхідно створити струмінь пари відповідної рідини. Відкачувальна дія виникає завдяки дії молекул струменя пари робочої рідини на молекули газу, що надходять до насоса з вакуумної системи через упускний отвір і тому виштовхуються до випускного отвору. Слід мати на увазі, що пароструминні насоси не можуть працювати самостійно, а завжди входять до вакуумної системи з насосом попереднього вакууму, оскільки потребують попереднього розрідження.

В якості насосів попереднього вакууму використовують головним чином обертові насоси, при цьому необхідно вибирати насос попереднього вакууму, який упускним патрубком приєднують до випускного патрубка пароструминного насоса так, щоб випускний тиск пароструминного насоса хоча й незначно, але перевищував упускний тиск обертового насоса.

Перший парортутний насос сконструював В. Геде в 1915 р. Це був пароструминний насос, робочою рідиною в якому була ртуть і який працював наступним чином. Об'єм  $V$ , в якому знаходиться газ, який необхідно відкачати, через капілярну трубку приєднують до трубки  $AB$ , через яку проходить пара робочої рідини (рис. 12.1).



Через отвір  $O$  капіляра виникає дифузія газу і пари один в одного. Щоб пара не проникла в об'єм  $V$  і газ швидко дифундував у пару, капіляр охолоджують до температури  $T$ , достатньої для конденсації тільки пари робочої рідини. У результаті газ буде захоплюватися паром і видалятися з об'єма  $V$  у напрямі стрілки, а пара при стиканні з охолодженою стінкою капіляра перетвориться в робочу рідину в результаті конденсації. У зв'язку з чим тиск газу в об'ємі  $V$  буде знижуватися до тиску пари, що відповідає температурі охолодження  $T$ . Трубка, що приєднує об'єм  $V$  до трубки  $AB$  має бути капілярною, щоб молекули пари мали більшу ймовірність стикання зі стінкою для

конденсації ніж проникнення до об'єму  $V$ . Тобто, діаметр капіляра має бути меншим за середню довжину вільного пробігу молекул пари. Ця умова відповідає молекулярному режиму течії газу, а тому можна зробити такі висновки:

а) швидкість відкачування за досягнення молекулярного режиму буде

постійною, тобто не залежати від тиску;

б) швидкість відкачування буде дуже малою, оскільки малий діаметр капіляра;

в) діаметр капіляра можна збільшити, якщо попередньо знизити тиск, оскільки із зниженням тиску збільшується середня довжина вільного пробігу;

г) теоретично граничний тиск буде нульовим, оскільки швидкодія не залежить від тиску, але в дійсності швидкодія такого насоса обмежена тиском насиченої пари за температури охолоджувача, а також зворотною дифузиею молекул пари до об'єму  $V$ , яку неможливо виключити повністю, оскільки відповідно до молекулярно-кінетичної теорії газів завжди є ймовірність проходження деякої кількості молекул пари через капіляр без конденсації.

Наявність капіляра, що значно знижує швидкодію, робить насос Геде непридатним для практичного застосування.

## 12.2 Дифузійно-конденсаційний насос Ленгмюра

I. Ленгмюр в 1916 р. суттєво поліпшив конструкцію насоса Геде, виключивши

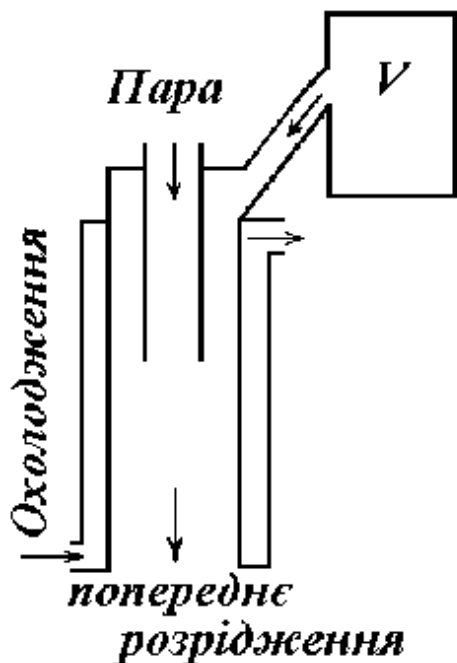


Рис. 12.2

капіляр і зробивши так, що газ з об'єму  $V$  видалявся парою за більш швидкої взаємної дифузії молекул пари і газу. Його насос, який отримав широкого розповсюдження та розвиток, складався з двох коаксіально розміщених трубопроводів (рис. 12.2), причому середня довжина вільного пробігу молекул пари на виході з внутрішнього трубопроводу була за порядком такою ж, що і проміжок між трубопроводами. За такої умови пара конденсується на внутрішній стінці зовнішнього трубопроводу, що інтенсивно охолоджується, раніше, ніж вона зможе піднятися до відкачуваного об'єму  $V$ . В той же час взаємна дифузія молекул газу з об'єму  $V$  і пари, буде протікати до конденсації пари, потоком якої газ буде захоплюватися і направлятися до випускного отвору.

Після конденсації пари, захоплений з об'єму  $V$  газ видаляють насосом попереднього розрідження.

Умова відносно довжини проміжку між трубопроводами є важливою:

а) якщо пара буде з низьким тиском, то за молекулярного режиму течії газу (рис.12.3, а ) число взаємних зіткнень між молекулами пари і газу буде незначним і газ буде мало видалятися або зовсім не видалятися;

б) навпаки, за високого тиску пари, коли середня довжина вільного пробігу її молекул дуже мала (рис.12.3,в), велике число зіткнень між молекулами пари призведе до розповсюдження за всіма напрямками, відповідно і догори, де їх більша кількість не буде конденсуватися і потрапить до об'єму  $V$ ,

забруднюючи відкачуваний газ;

в) тільки за такого тиску, що середня довжина вільного пробігу молекул буде мати такий же порядок, як проміжок між внутрішнім і зовнішнім циліндрами (рис. 12.3,б), тоді молекули пари будуть швидко конденсуватися на охолодженій стінці і не будуть розповсюджуватися догори, а число взаємних зіткнень між молекулами пари і газу буде достатньо великим, щоб була ефективною дифузія, захоплення газу з об'єму  $V$  і направлення його до насоса попереднього розрідження.

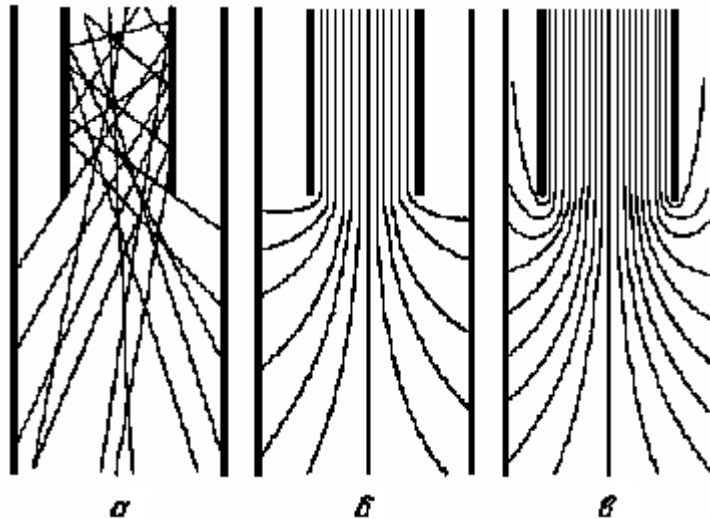


Рис. 12.3

Таким чином, умовою ефективної роботи насоса Ленгмюра буде:

а) за взаємних зіткнень молекул пари і газу необхідно, щоб останні отримували основний напрям – у бік до попереднього розрідження;

б) до об'єму  $V$  має потрапляти за можливістю якомога менша кількість молекул пари робочої рідини;

в) для ефективної відкачки число взаємних зіткнень між молекулами пари робочої рідини і молекулами газу, що відкачується з об'єму  $V$ , має бути якомога більшим.

Насоси Ленгмюра мають такі головні характеристики:

а) при різниці радіусів зовнішнього й внутрішнього циліндрів за порядком одного міліметра й діаметрі внутрішнього циліндра порядку 10 мм. швидкодія дорівнює 1 л/с, що приблизно в 100 раз більше, ніж у насоса Геде;

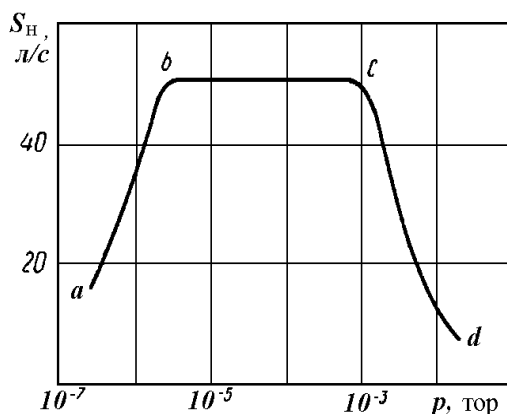


Рис. 12.4

б) швидкодія постійна лише у вузьких межах тиску, що відповідає середній довжині вільного пробігу молекул пари, що має такий же порядок, як різниця радіусів зовнішнього й внутрішнього циліндрів і зменшується по обидва боки від цієї межі;

в) початковий тиск на порядок

більше, ніж у насоса Геде і дорівнює приблизно 1 **Торр**.

Типова залежність швидкодії дифузійного насоса від тиску наведена на рис.12.4.

Процес дифузії газу в струмінь пари не залежить від тиску на випускному патрубку, тому швидкодія насоса в широких межах залишається постійною. Зменшення швидкодії за низького тиску (відрізок *ab*) обумовлене головним чином зворотною дифузією газу через струмінь пари, а за високого тиску (відрізок *cd*) – відривом струменя від стінок насоса, що супроводжується перетіканням газу від випускного патрубка до вакуумної камери.

### 12.3 Парортутні дифузійні насоси

Спочатку в дифузійних вакуумних насосах робочою рідиною була ртуть,

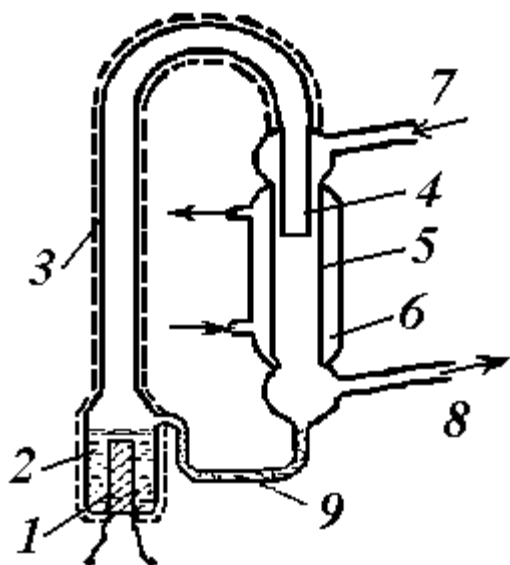


Рис. 12.5

яка має велику теплопровідність, а тому швидко нагрівається до кипіння. Її пара легко конденсується при охолодженні до 20°С і тиск пари за цією температурою, тобто граничний тиск насоса, є досить низьким  $\sim 10^{-3}$  **Торр**.

Першим пароструминним насосом зі ртуттю в якості робочої рідини був скляний парортутний дифузійний насос. Він був виготовлений зі скла (рис.12.5), яке є одним з широко розповсюджених вакуумних матеріалів, і добре забезпечував повну герметичність насоса, який міг мати різні розміри й форму і складався з електричного нагрівача 1 ртуті до температури кипіння, що не перевищувала 120°С, випарювача зі

ртуттю 2, паропроводу 3, за допомогою якого пара ртуті надходила через сопло 4 (внутрішній циліндр) до зовнішнього циліндра-охолоджувача 5, стінка якого безперервно охолоджувалась проточною водою, що надходила до водяної оболонки 6 через нижній і виходила через верхній отвори відповідно. Газ, який необхідно відкачати, внаслідок теплового руху молекул надходить до насоса через упускний патрубок 7 і після дифузії в струмінь пари, що вилітає з сопла, виноситься в напрямку струменя до випускного патрубка 8, а пара ртуті після зіткнення з холодною стінкою конденсується (перетворюється в рідину) і стікає донизу через трубку 9 до випарювача. Рідинна ртуть у трубці 9 здійснює ртутний затвор, завдяки якому ртутна пара з випарювача не може надходити до охолоджувача іншим шляхом, ніж тільки через сопло. Вигнута форма трубки 9 завдяки кращим пружним якостям запобігає деформаціям насоса, що виникають за різниці температур охолоджувача і випарювача.

Вітчизняна промисловість серійно не випускає скляні парортутні насоси, оскільки вони мають багато недоліків, що пов'язані головним чином з низькою міцністю скла як щодо механічних, так і термічних впливів.

## 12.4 Металеві парортутні дифузійні насоси

Металеві дифузійні насоси міцніші і можуть мати значно більші розміри,

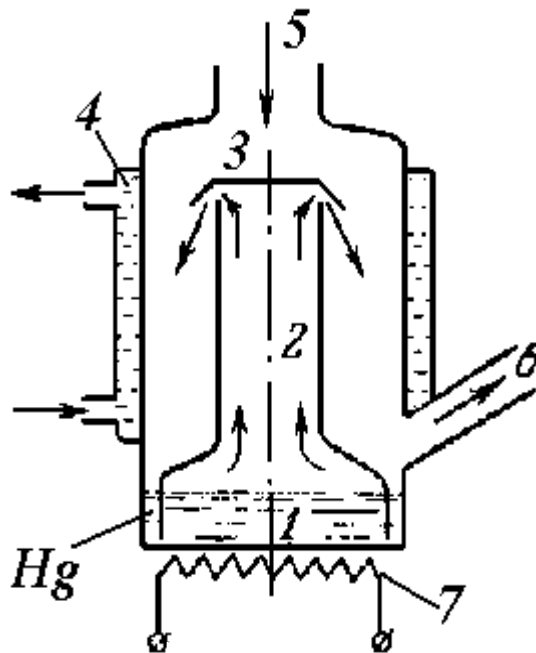


Рис. 12.6

а відповідно і більшу швидкодію. Вони дозволяють використовувати потужніші нагрівачі, за допомогою яких можна досягати більших динамічних тисків пари і працювати за значно меншого попереднього розрідження.

Принципово будова металевих дифузійних насосів (рис. 12.6) не дуже відрізняється від скляного. Він має такі ж складові елементи, як випарювач 1 зі ртуттю, паропровід 2, парасольчаті кільцеві сопла 3, водяний охолоджувач 4, упускний 5 і випускний 6 патрубки і електричний нагрівач 7. Різняться вони тільки конструкцією сопла, яке у металевих парортутних насосів має форму парасольки і направляє струмінь пари ртуті донизу.

## 12.5 Течія газів через трубопровід змінного діаметра. Рівняння Бернуллі

Відкачувальна дія дифузійних парортутних насосів виникає в результаті взаємної дифузії молекул газу, що відкачується та молекул пари і протікає за молекулярного режиму течії газу. Однак відкачувальна дія при протіканні струменя пари може виникати і за в'язкісного режиму течії газу.

Якщо робочу речовину (рідину, чи її пару) переміщують через трубку зі змінним поперечним перерізом, подібно до сопла (рис.12.7), то виникає різниця тисків, яку можна визначити за **рівнянням Бернуллі**:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (U_2^2 - U_1^2), \quad (12.1)$$

де  $\rho$  – густина робочої речовини,  $U_1$  та  $U_2$  – швидкості в перерізах  $S_1, S_2$ , відповідно.

Як видно із залежності тиску уздовж трубки (рис.12.7), у місці звуження

тиск знижений.

Якщо приєднати до цього місця вакуумну камеру, то газ, що знаходиться там, почне рухатись разом з рідиною в результаті захоплення струменем робочої речовини за причини внутрішнього тертя; імпульс від молекул, що знаходяться в більш рухливому шарі струменя, передається молекулам шару, який рухається повільніше, а тепловий рух призводить до змішування молекул сусідніх шарів.

## 12.6 Водоструминні та пароструминні насоси

Робочою речовиною може бути вода або її пара, чи пара ртуті або спеціальної вакуумної оливи. Насоси, в яких робочою рідиною є вода, називають водоструминними (рис.12.8). Вони мають такі головні елементи: струменепровід 1, ежекторне сопло 2 і дифузор 3.

Воду за тиском порядку атмосферного подають до патрубку 1. Через звуження 2, яке називають соплом, вона виходить зі збільшеною швидкістю в напрямі до трубки 3, яка має розширення у вигляді лійки, що оточує сопло, щоб

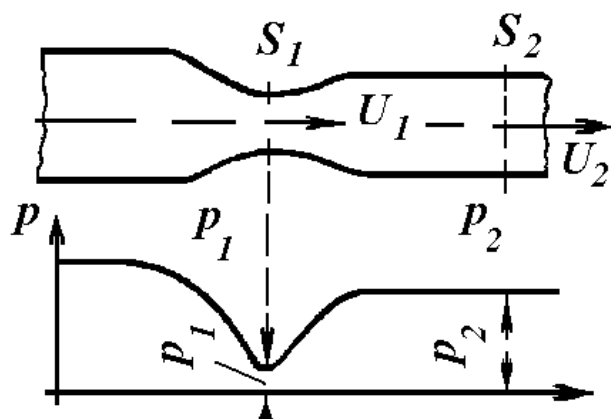


Рис. 12.7

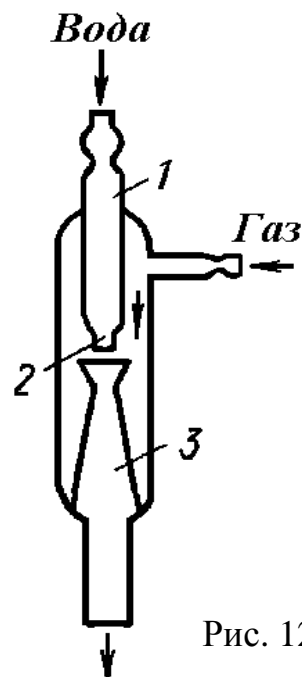


Рис. 12.8

запобігти розбризкуванню. Молекули газу з вакуумної камери за дії внутрішнього тертя (в зоні сопла створюється понижений тиск) захоплює струмінь води і переносить їх на вихід з трубки 3 до атмосфери. Отже у вакуумній камері тиск буде поступово знижуватися.

Водоструминні водяні насоси мають граничний тиск  $\sim 17$  Торр (тиск насиченої пари води за  $20^\circ\text{C}$ ). Це високий тиск, що відповідає низькому вакууму, але позитивною якістю таких насосів є велика швидкодія  $\sim 0,1$  л/с і проста конструкція. Водоструминні насоси широко використовують в лабораторних умовах.

## 12.7 Ежекторні насоси

Для отримання більш високого вакууму і великої швидкодії використовують пароежекторні насоси. Одним з головних елементів цих насосів є ежектор.

**Ежектор** – це пристрій, що створює потік газу з підвищеним тиском завдяки дії струменя робочої рідини або робочої пари, або іншого (робочого) газу, що виходять з надзвуковою швидкістю з сопла. Надзвуковий рух струменя створює турбулентності, де відбувається змішування молекул струменя і газу, який відкачують. Ежектор складається з сопла 1, що розширюється вповодж, змішувальної камери 2 і дифузора 3 (див. рис. 12.9).

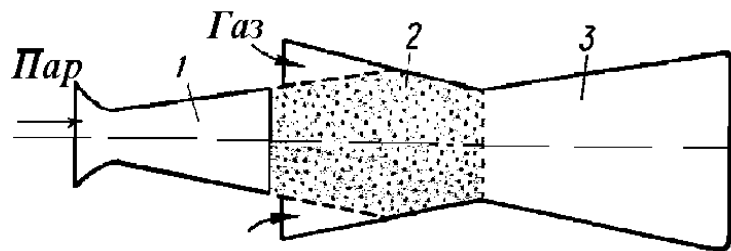


Рис. 12.9

Струмінь пари, що виходить з надзвуковою швидкістю з сопла, потрапляє до змішувальної камери 2, де розширюється. Форму сопла вибирають таку, щоб пара, яка витікає з нього, мала швидкість більшу за швидкість звука. На межі струменя виникає турбулентний шар, де молекули пари інтенсивно перемішуються з молекулами газу відкачувальної камери і отримують імпульс у напрямі руху струменя. Парогазова суміш з камери змішування 2 потрапляє до дифузора 3, що розширюється вповодж, де швидкість потоку суміші зменшується, а тиск збільшується.

Дійсно, з рівняння Бернуллі випливає, що

$$p_2 = p_1 + \frac{1}{2} \rho_2 U_2^2 \left( \frac{U_1^2}{U_2^2} - 1 \right). \quad (12.2)$$

Насос з ежектором має велику швидкодію (50 – 1000 л/с) в межах тиску  $10^{-1} - 10^{-2}$  Торр, тобто в діапазоні, де обертові пластинчаті насоси мають граничний тиск. У зв'язку з цим ежекторні насоси розміщують між високовакуумним і насосом попереднього вакууму, а для отримання ще меншого тиску їх роблять багатоступінчастими. Тоді граничний тиск знижується до  $10^{-3} - 10^{-4}$  Торр. До недоліків слід віднести залежність швидкодії насоса від тиску газу.



## 12. 8 Двоступінчасті металеві парортутні насоси

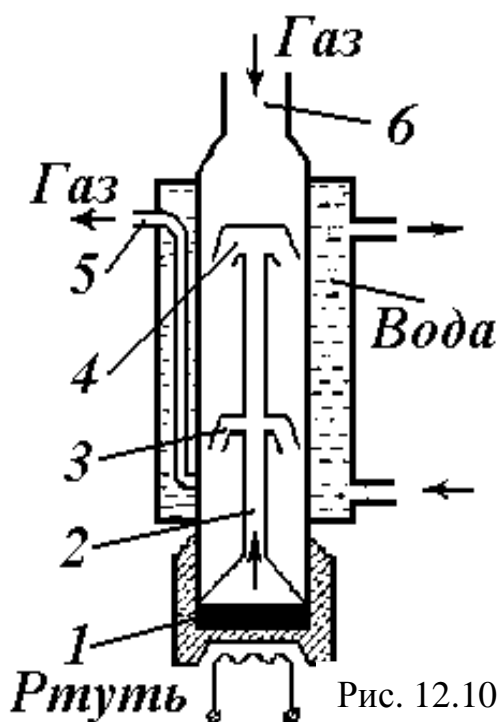


Рис. 12.10

Металеві парортутні насоси виготовляють, головним чином, багатуступінчастими від двох до трьох ступенів; у них використовують як ежекторні, так і дифузійні сопла.

На рис. 12.10 наведена будова циліндричного двоступінчастого парортутного насоса для отримання високого вакууму.

Насос складається з камери-випарювача 1 зі ртуттю, що знаходиться в нижній частині і нагрівається електричною плиткою, паропроводу 2, через який пара ртуті потрапляє до парасольчатих сопел 3 і 4, випускного патрубку 5, що охолоджується водою, як і сам насос, та упускного патрубку 6, що має відносно великий поперечний переріз і розміщений у верхній частині. Великий поперечний переріз упускного

патрубку знижує його опір молекулярному потоку газу, що відкачується і збільшує швидкодію насоса.

Пара ртуті після конденсації на стінці охолоджувача перетворюється в рідину ртуть і стече до випарювача, який відокремлений від верхньої частини насоса спеціальною перегородкою.

Дифузійне сопло 4 розраховане на роботу з більшою швидкістю, ніж ежекторне сопло 3 (в місці звуження насоса), але на менший випускний тиск. Оскільки верхнє сопло знаходиться на більшій відстані від випарювача і частина пари вийде через сопло 3, то густина пари, що виходить з нього, буде меншою, ніж пари біля сопла 3. Швидкість же пари, що виходить з нижнього ежекторного сопла, буде більшою, ніж з дифузійного верхнього, тому випускний тиск біля випускного патрубку буде більшим, що й потрібно досягти.

Завдяки високому випускному тиску ( $\sim 20$  Торр), але зменшій швидкодії такі вакуумні насоси застосовують як допоміжні (бустерні) і використовують спільно з високовакуумним і обертовим попереднього розрідження насосом, якщо необхідно відкачувати велику кількість газу.

Насоси малих розмірів мають висоту 30 см і діаметр 7 см. Швидкодія таких насосів може досягати  $\sim 5$  л/с за тиском  $10^{-2}$  Торр. Якщо ж розміри насоса збільшити приблизно в десять разів, то можна досягти швидкодії 10 000 л/с.

Щоб досягти граничного тиску  $10^{-9}$  Торр, тобто значно нижчого за  $10^{-3}$  Торр, необхідно між насосом і вакуумною камерою розміщувати охолоджувальну пастку для ртутної пари з охолодженням до  $-78^{\circ}\text{C}$  (наприклад, твердою вуглекислою).

## 12. 9 Переваги й недоліки парортутних насосів

В якості робочої рідини парортутних дифузійних насосів використовують чисту ртуть марок Р-1 та Р-2. Оскільки ртуть є хімічним елементом (без складових), то температура кипіння залишається постійною, що забезпечує постійний тиск насиченої пари. Вона не змочує стінок як зі скла, так і сталі, що дозволяє робити проміжок між внутрішнім і зовнішнім циліндрами малим, без побоювань щодо його злипання. Навіть за прориву повітря до працюючого насоса ртуть залишається хімічно неактивною і може використовуватися для подальшої роботи. Завдяки цьому парортутні насоси довговічні.

У той же час до їх суттєвих недоліків слід віднести шкідливість пари ртуті для організму людини. Вона хоча і в невеликій кількості потрапляє через насос попереднього розрідження до оточуючого середовища. Окрім цього, щоб пара ртуті не потрапляла до вакуумної системи, необхідно додатково використовувати виморожуючі пастки.

Шкідливість пари ртуті викликала необхідність пошуку її замінників.

## 12. 10 Парооливні насоси

Довготривалі пошуки заміни ртуті привели до розробки парооливних вакуумних насосів, тобто насосів, робочою рідиною в яких було спеціальна вакуумна олива. Такі оливи застосовують і сьогодні, але на відміну від ртуті вони не однорідні, а є сумішшю великої кількості фракцій, які мають як різні температури кипіння, тиск насиченої пари, так і інші якості. У зв'язку з цим ці оливи за нагрівання розкладаються на легкі та важкі фракції. Утворення легких фракцій збільшує пружність пари і якщо їх безперервно не видаляти, то це призведе до зростання граничного тиску, тобто до погіршення роботи насоса.

### 12. 10. 1 Робочі рідини для парооливних насосів

Вакуумні оливи, які можна використовувати для забезпечення роботи парооливних насосів, мають задовольняти наступним вимогам:

- 1) мати низький тиск насиченої пари при кімнатній температурі, щоб можна було відмовитися від виморожуючих пасток;
- 2) мати якомога більшу термічну стійкість, тобто не розкладатися на фракції при нагріванні до високих температур;
- 3) мати якомога більшу термоокислювальну стійкість при прориві до нагрітого масла атмосферного повітря;
- 4) мати низьку поглинальну властивість відносно газів;
- 5) мати малу теплоту пароутворення для зменшення витрат на нагрівання.

Таким вимогам добре задовольняють високомолекулярні синтетичні рідини, що називаються кремнійорганічним або силіконовими оливами, до складу яких входять вуглеводні й окис кремнію.

Широкого розповсюдження отримала вакуумна кремнійорганічна рідина ВКР-94А. Тиск її насиченої пари  $5 \cdot 10^{-8}$  Торр при  $20^{\circ}\text{C}$ , хоча вона має

порівняно високу вартість.

Для насосів спеціального призначення використовують поліфенілметилсилоксанові суміші марок ПФМС-1, ПФМС-2 та ПФМС-3, які мають ще більш високу термоокислювальну стійкість.

Широкого застосування отримали менш вартісні рідини у вигляді складних ефірів та олив, які отримують шляхом дистиляції нафти і називають відповідно октоїлями ОФ і ОС та мінеральною вакуумною оливою марки ВМ-1 або ВМ-2.

Октоїл ОФ – фталат октилу  $C_6H_4(COOC_8H_{17})_2$  і октоїл ОС – себакат октилу  $C_8H_{16}(COOC_8H_{17})_2$  мають низький тиск насиченої пари, хоч і більший на один порядок за тиск рідини ВКР-94А, але їх термічна й термоокислювальна стійкість низька. За прориву до працюючого насоса атмосферного повітря, вони стають непридатними для подальшої роботи.

Мінеральну вакуумну оливу ВМ-1 або ВМ-2 отримують у результаті розгонки під вакуумом медичного вазелінового масла. За нагрівання легкі фракції починають випарюватися вже при  $80^\circ C$  одночасно з видаленням повітря та вологи, які були розчинені в маслі. Подальше нагрівання до  $220-230^\circ C$  призводить до випарювання більш важких фракцій, які збирають і використовують для роботи парооливних насосів. Тиск насиченої пари цих олив такий же, як тиск насиченої пари рідини ВКР-94А, але термічна та термоокислювальна стійкість низька.

### 12. 10. 2 Металевий розгінний парооливний насос

Оскільки за нагрівання вакуумної оливи спочатку випарюються легкі фракції, а потім важкі, то доцільно використати це, тобто розгонку, в дифузійних насосах. У розгінних парооливних насосах відбувається автоматичне розділення вакуумної оливи на фракції. Через деякий час після початку його роботи важкі фракції оливи концентруються у паропроводі, що зв'язаний з високовакуумним соплом. Автоматична розгонка дозволяє досягти стійкого граничного тиску не нижче ніж  $10^{-6}$  Торр.

Розглянемо будову і принцип роботи високовакуумного парооливного насоса ММ-40А, який є розгінним і двоступінчастим. Поздовжній розріз дифузійного насоса ММ-40А наведено на рис. 12.11.

Конструктивно насос складається з трьох коаксіально розміщених металевих циліндричних паропроводів. Два внутрішніх циліндри з одного кінця мають кільцеве парасольчате сопло, а другий кінець занурений у резервуар з робочою рідиною (вакуумною оливою). Зовнішній циліндр приєднаний відкритим кінцем до вакуумної камери, частина його поверхні охоплена камерою водяного охолодження. Пара, що утворюється за нагрівання робочої рідини (вакуумної оливи) в резервуарі 1, який ще називають загальним випарювачем, потрапляє до дифузійних сопел 12, 13 через самостійні канали.

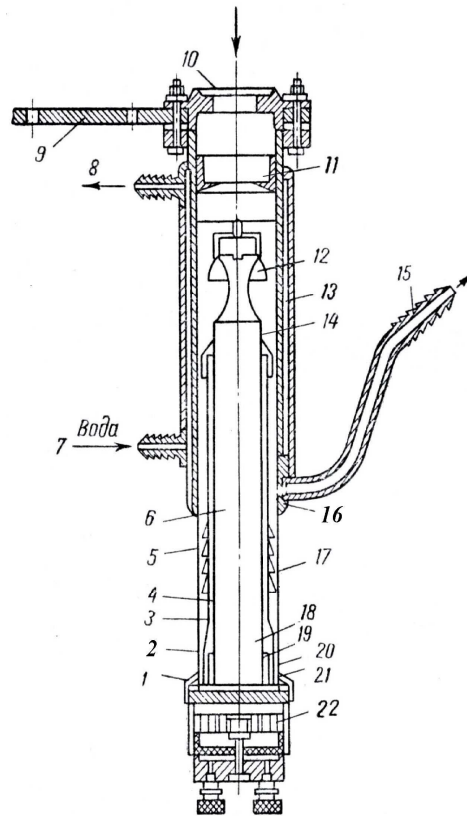


Рис. 12.11

До верхнього сопла вона потрапляє через перший внутрішній циліндр-паропровід 6, а до нижнього – через другий циліндр 3, до якого пара потрапляє через кільцеву щілину, що створена між ними в розширенні циліндра 3. Між корпусом насоса (зовнішній циліндр) 5 і другим циліндром у нижній частині створена камера 20 у вигляді вузької кільцевої щілини, куди стікає олива після конденсації на внутрішній поверхні охолоджувача 13. Насос охолоджують водою, яку підводять під тиском обов'язково до нижнього патрубку 7 і відводять через верхній патрубок 8. Вода має бути чистою, щоб при експлуатації не засмічувати осадами охолоджувач, який є вузьким проміжком між корпусом насоса і водяною оболонкою. З камери 20 масло перетікає через невеликі отвори до камери 21, а потім таким же чином до камери 19 і, нарешті, до центральної камери 18 загального для усіх камер – випарювача резервуара 1. Камери 19, 21 відокремлені між собою спеціальним розподільним циліндром 2 у вигляді стакана з невеликими отворами в нижній частині для перетікання оливи. За такої будови насоса при нагріванні виникає розгонка оливи, тобто відокремлення та використання пари легких фракцій оливи.

Спочатку розрідження газу у вакуумній камері буде створювати перший ступінь насоса за дії струменя пари легких фракцій оливи з сопла 14, які почнуть випарюватися за нижчої температури ( $> 180^{\circ} \text{C}$ ), а потім другий ступінь за дії струменя пари більш важких фракцій оливи з верхнього сопла 12, які почнуть випарюватися за вищої температури ( $< 220^{\circ} \text{C}$ ). Такий насос може працювати з менш стійкою оливою і забезпечувати порівняно низький

граничний тиск ( $3 \cdot 10^{-6}$  **Торр**).

Щоб зменшити зворотній потік пари оливи, яку нагрівають в камері 20, над нею установлені манжети 17 і розміщуються дещо нижче отвору 16 випускного патрубку 15. Для зменшення граничного тиску між упускним отвором насоса 10 і високовакуумним соплом 12 розміщується дефлектор 11. Потік пари масла, що потрапляє на поверхню дефлектора, віддзеркалюється, а також частково конденсується, що зменшує проникнення його до вакуумної системи.

Нагрівання оливи здійснюють приєднанням до насоса плоского нагрівача-електроплитки 22 з відкритою спіраллю. Центральна частина випарювача, де скупчуються найбільше важкі фракції оливи, має нагріватись більше, ніж інші частини. З цією метою у випарювачі розміщують металеву шайбу, що має виїмку посередині. Закріплюють насос спеціальною полицкою 9.

Насос створює найбільший випускний тиск у межах 0,05-0,1 **Торр**, і має швидкодію 30-40 л/с у межах робочого тиску  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  **Торр**.

Розігрівається насос, тобто виходить на робочий режим через 20-25 хв. після підключення нагрівача. На початку роботи може виникати інтенсивне газовиділення з вакуумної оливи газів, що поглинула олива після приєднання насоса до вакуумної системи, але через 20-40 хв. насос починає працювати на повну потужність. Щоб запобігти газопоглинанню за завершення роботи насоса, необхідно після вимикання нагрівача утримувати насос під створеним вакуумом.

## 12. 11 Зауваження до роботи з парострумними насосами

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

**Парортутні насоси** треба використовувати лише:

а) для відкачки приладів, в яких використовують ртутну пару, наприклад таких, як люмінесцентні лампи, ртутні випрямлячі змінного струму і т.п.;

б) для відкачки пари, що хімічно діє на органічні рідини;

в) для відкачки приладів з емітерами, які мають високу емісійну стабільність, тобто фото- або вторинно-емітуючі поверхні;

г) для відкачування приладів, що призначені для аналізу газів, тобто коли виникає загроза, що пари органічних речовин або продукти їх розкладу можуть затемнити результати аналізу.

**Парооливні насоси** можна використовувати:

а) для відкачування вакуумних систем, що призначені для нанесення тонких покриттів;

б) для відкачки приладів, присутність пари оливи з низьким тиском в яких не викликає загрози його роботі, наприклад таких, як електронно-променеві трубки, електронні лампи і т.п.;

в) для вакуумних печей, в яких проводять знегаження, плавлення або спікання.

Таким чином, парооливні насоси слід використовувати завжди, якщо відсутні

спеціальні причини, що обумовлюють використання тільки ртутних насосів.

Оскільки пароструминний насос не може працювати без насоса, що створює попереднє розрідження, то останній вибирають на основі параметрів пароструминного насоса. Насос попереднього розрідження розміщують за можливістю найближче до пароструминного насоса, щоб випускний тиск цього насоса можна було вважати таким же, як і упускний тиск першого. Насос попереднього розрідження має надійно справлятися з потоком газу, що створює пароструминний насос, тому для їх вибору має задовольнятися наступна **умова щодо продуктивності насосів:**

$$(S_n p_{вн})_{нпр} \gg (S_n p_{вн})_{прс}, \quad (12.3)$$

де  $p_{вн}$  і  $S_n$  - упускний тиск і швидкодія насосів за цим тиском, відповідно, для насоса попереднього розрідження ліворуч і для пароструминного насоса праворуч знака нерівності. При цьому необхідно, щоб упускний тиск насоса попереднього розрідження не перевищував найбільший тиск, що створює пароструминний насос.

## 12. 12 Порядок запуску і зупинки парооливних насосів

Запуск і зупинка пароструминних насосів, що входять до вакуумних систем, потребує відповідної послідовності. Спочатку вмикають насос попереднього розрідження і у вакуумній системі створюють знижений тиск, щоб перевірити її на відсутність натікання повітря. Якщо система герметична, подають водяне охолодження парооливного насоса і тільки після цього вмикають електричний підігрівач, який необхідно попередньо приєднати до насоса. За перші декілька хвилин після вмикання підігрівача внаслідок інтенсивного виділення газів, що розчинилися в робочій рідині (вакуумній оливі), відбудеться зростання тиску порівняно з тим, що був досягнутий попереднім розрідженням. Газовиділення буде особливо інтенсивним, якщо парооливний насос довгий час був з'єднаний з атмосферою.

Парооливний насос залежно від його розмірів почне здійснювати відкачку тільки через 20-30 хв. після введення нагрівача на необхідну потужність для доведення робочої рідини до кипіння.

Для **припинення роботи** парооливного насоса треба дотримуватися такої послідовності. Спочатку треба вимкнути електричний нагрівач і відокремити його від насоса (якщо він не об'єднаний з останнім як одне ціле) і зачекати, поки температура робочої рідини знизиться до 60-70° С. Насос попереднього розрідження (обертвий насос) при цьому не вимикають. Тільки після охолодження вакуумної оливи до вказаної температури дозволяється вимкнути насос попереднього розрідження, інакше пара нагрітої оливи потрапить до вакуумної системи і забруднить її. Зупиняти подачу води, що охолоджує насос, необхідно через 5- 7 хв. після вимкнення нагрівача, а для прискорення охолодження оливи використовують іноді ще й примусове водяне охолодження нижньої частини насоса.

### Запитання для самоперевірки

1. Поясніть будову і принцип роботи водоструминного насоса.
2. Поясніть будову і принцип роботи пароструминного насоса.
3. Поясніть будову і принцип роботи дифузійного насоса.
4. Які умови ефективної роботи пароструминних і дифузійних насосів?
5. Яким вимогам має задовольняти робоча рідина пароструминних насосів?
6. Назвіть позитивні й негативні якості пароструминного і дифузійного насосів ?
7. Напишіть рівняння Бернуллі і поясніть його використання?
8. Що називають ежектором?
9. Поясніть будову, принцип роботи й призначення ежектора?
10. Які правила запуску й зупинки високовакуумної установки?

## Лекція тринадцята

### НАСОСИ ВИСОКОГО ВАКУУМУ

#### 13.1 Іонні насоси

Розробка іонних насосів була викликана бажанням отримувати високий вакуум, в якому була б відсутня пара робочої, що завжди присутня за використання парооливних насосів.

Якщо молекули газу, що за визначенням є електрично-нейтральними найменшими частинками речовини, перетворити в додатні іони за допомогою, наприклад, ударної іонізації, то під впливом прикладеного зовнішнього електричного поля їх можна спрямувати до випускного патрубку, де вони створять збільшену ніж на упускному патрубку концентрацію. Якщо на випускному патрубку такого насоса створити зовнішній необхідний попередній вакуум механічним або паромасляним насосом, то отримаємо іонну відкачку.

Принцип роботи іонного насоса можна зрозуміти, розглянувши таку найпростішу конструкцію, як скляна циліндрична трубка з двома металевими

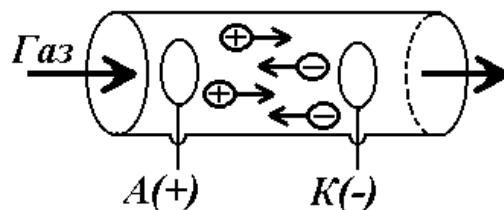


Рис. 13.1

кільцями-электродами (анодом і катодом) всередині (рис.13.1). Катод розміщено в кінці трубки, де розташований випускний отвір, на якому створюють попереднє розрідження за допомогою насоса попереднього вакууму, а анод – на іншому кінці трубки, через який газ буде потрапляти до насоса, тобто на упускному отворі. Якщо між електродами створити електричне поле, то за пониженого тиску газу в трубці виникне газовий розряд (проходження електричного струму) в результаті ударної іонізації молекул електронами, прискореними зовнішнім електричним полем. Тоді додатно заряджені іони, окрім хаотичного руху, почнуть направлено рухатися (дрейфувати) за дії електричного поля в напрямі катода, де, таким чином, створять більший тиск ніж на упускному кінці трубки. При стиканні з катодом ці іони віддають свій заряд і перетворюються в нейтральні молекули, які, продовжуючи свій направлений рух, потрапляють до насоса попереднього вакууму і будуть видалені останнім з вакуумної системи.

Такий процес буде повторюватися з наступними молекулами, які будуть надходити завдяки хаотичному руху з вакуумної системи до трубки через упускний отвір. Це призведе до зниження тиску у вакуумній системі, тобто виникне за дії розряду іонна відкачка.

Продуктивність такого насоса дуже низька, оскільки ймовірність актів



іонізації мала, тому і число створених іонів дуже мале. Проте її можна підвищити, якщо перед анодом розмістити іонізаційну камеру, де іони додатково буде створювати, наприклад, іонізуюче випромінення. Але, крім цього, скляна (діелектрична) стінка в таких іонних насосах заряджається від'ємно, тому частина додатних іонів відхиляється від напряму руху до катода.

### 13.2 Металеві іонні насоси

У металевих іонних насосах (рис.13.2) скляна трубка замінена на металеву 1, що є одночасно як корпусом насоса, так і заземленим анодом. Це дало можливість знизити напругу між анодом і катодом до 300 – 400 В, за якої збільшується ймовірність іонізації. Насос має два порожнисті вольфрамові катода 2,3, з яких перший (2) “гарячий”, тобто спеціально підігрівають для здійснення термоелектронної емісії, тобто для збільшення в газі наявності вільних електронів, тоді як другий (3) - холодний і слугує для віддзеркалення потоку електронів. Відстань між ними складає 2, 75 м.

Біля катодів розміщені випускні патрубки 4 насоса, а упускний отвір 5 знаходиться посередині трубки. Газ із вакуумної системи спочатку надходить до центральної зони насоса, а потім розповсюджується до обох бокових зон.

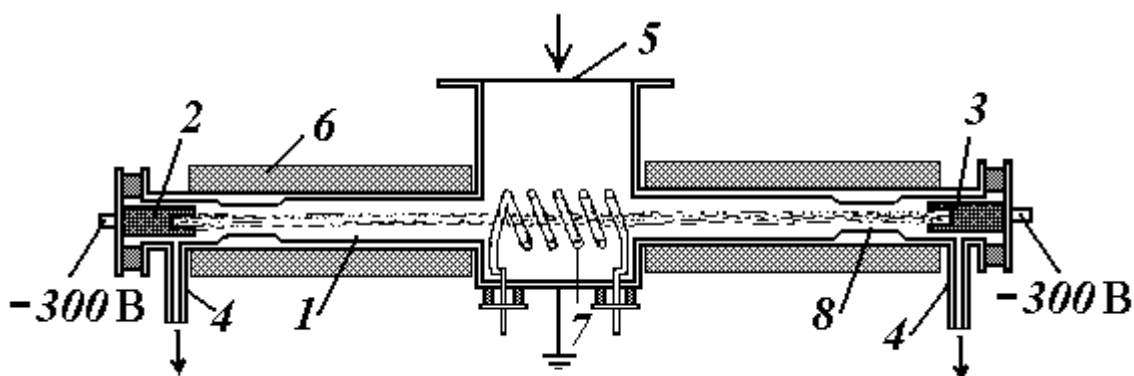


Рис. 13.2

Щоб підвищити число актів іонізації молекул, насос розміщено в соленоїді 6, за допомогою якого створюють постійне магнітне поле. У центральній зоні вмонтовано внутрішній соленоїд 7.

За дії електричного поля, яке створюють між катодами і анодом, електрони, емітовані гарячим катодом, здійснюють коливальний рух у центральній зоні. Спочатку вони будуть прискорено рухатися до центральної зони, але після її проходження потрапляють до гальмуючого електричного поля, а тому віддзеркалюються в зворотному напрямі. Поступово частина їх потрапляє на анод, тобто стінку насоса. Але завдяки постійній емісії ці витрати будуть скомпенсовані. Коливальний рух електронів подовжує їх шлях, що сприяє зростанню ймовірності іонізації.

Магнітне поле соленоїдів примушує електрони рухатися уздовж насоса за гвинтоподібною траєкторією, тому довжина шляху електронів значно зростає, що різко збільшує ймовірність іонізації молекул газу. За величиною електричне і магнітне поле добирають так, щоб іонізація відбувалась головним чином у

центральної зоні. За дії електричного поля додатні іони будуть рухатися до катода, після зіткнення з яким вони віддають свій заряд і перетворюються в молекули. Якщо тиск, створений на випускному патрубку приєднаним насосом попереднього розрідження, буде підтримуватися нижче за тиск скупчених нейтральних молекул, то вони видаляться з вакуумної системи. Таким чином відбудеться іонна відкачка. Для зменшення можливої зворотної дифузії нейтральних молекул до вакуумної камери створені звуження 8 трубки насоса.

Швидкодія такого насоса може досягати 7 000 л/с, а створений вакуум має тиск  $(0,8 - 6) \cdot 10^{-6}$  Торр - за умови, що насосом попереднього розрідження підтримують тиск  $(3 - 5) \cdot 10^{-4}$  Торр.

Для створення електричного і магнітного поля, а також термоелектронної емісії в таких насосах витрачають значну електричну потужність (приблизно 40 кВт).

У зв'язку з тим, що нагрівання катода викликає випарювання вольфраму і катод швидко руйнується, більш широке практичне застосування отримали іонно-сорбційні насоси.

### 13.3 Скляний іонно-сорбційний насос

Випарювання вольфраму в металевих іонних насосах, а потім наступна його конденсація на холодних стінках, викликали поглинання молекул газу тонким шаром осадженого металу, тобто створили додаткове зниження тиску. Це явище дало поштовх для створення нових вакуумних насосів, які знижували тиск не здійсненням стискання газу на випускному патрубку, а з використанням явища поглинання газів металами. У таких насосів випускний патрубок відсутній, називаються вони сорбційними.

Скляний іонно-сорбційний насос (рис.13.3) складається з випарювача металу 1, іонізаційного пристрою 2 і магнітного пристрою 3, що створює магнітне поле, яке направлене так, щоб збільшувати імовірність іонізації молекул, тобто паралельно напрямку руху емісійних електронів.

До іонізаційного пристрою входить катод 4, який нагрівають до температури електронної емісії, і два кільцевих аноди, що розміщені симетрично відносно катода. На аноди і катод подають напругу для створення електричного поля, що прискорює емітовані електрони. Магнітне поле примушує електрони рухатися за гвинтоподібними траєкторіями і значно збільшує, таким чином, ймовірність іонізації молекул.

Випарювач 1 – це вольфрамовий дріт, на який навита спіраль з титану. За нагрівання вольфрамового дроту електричним струмом титан починає випарюватися і тонким шаром осаджуватися на холодній стінці, замуруючи шар за шаром поглинуті молекули газів. Титан добре поглинає молекули таких активних газів, що часто відкачують з вакуумних систем, як кисень, водень, азот, окис вуглецю та пари води.

Примусова іонізація молекул підвищує дієвість поглинання титаном активних газів, а також сприяє зв'язуванню молекул інертних газів, що важливо при відкачуванні аргону.

Відкритим кінцем насос приварюють до скляних приладів, де потрібно створити відповідний вакуум. Після кожного знаходження в атмосферному повітрі необхідно попередньо проводити прожарення випарювача з метою старанного його знегаження (вивільнення від поглинутих газів).

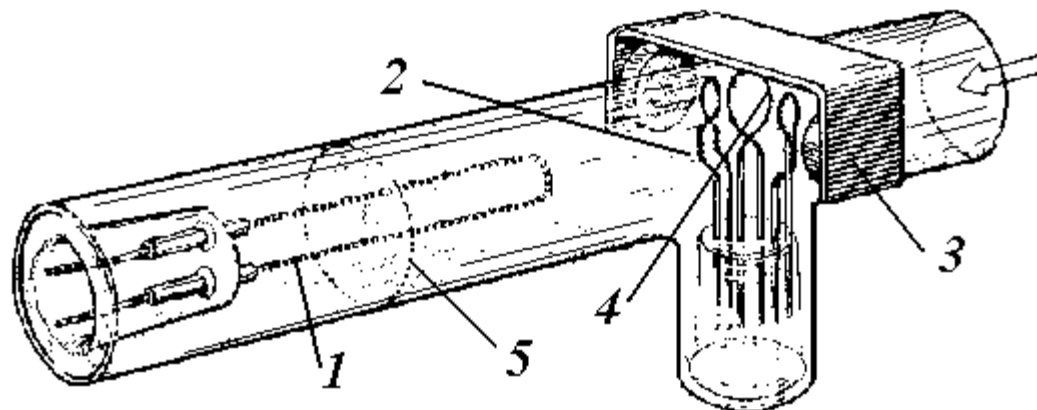


Рис. 13.3

До особливостей використання такого насоса відносять необхідність поновлення витраченого титану. Випарювач відрізають по колу 5 трубки і після навивки нової титанової спіралі приварюють знову. Насос має запускатися до роботи тільки після створення тиску не менше ніж  $10^{-4}$  **Torr** насосом попереднього розрідження, який потім відокремлюють, щоб вакуумна система відкачувалась лише іонно-сорбційним насосом.

Швидкодія таких насосів залежить від складу газів, поглинача та швидкості його випарювання, від конструктивних розмірів і для розглянутого випадку досягає декількох літрів за секунду для водню, азоту і пари води та частини літра за секунду для аргону. Граничний тиск може сягати району надвисокого вакууму ( $10^{-9}$  **Torr**). Але для цього треба провести старанне знегаження усіх елементів вакуумної системи, включно з іонно-сорбційним насосом.

### 13.4 Магніторозрядний іонно-сорбційний насос

Розпилення металів, що будуть поглинати гази, можна здійснювати не тільки за допомогою додаткового нагрівання до температури випарювання, але й – електричного розряду в залишковому газі. Насоси, в яких розпилення поглинача здійснюють за допомогою електричного розряду в магнітному полі, називаються магніторозрядними. Прикладом такого насоса може бути один з перших, який було розроблено в 1958 р. (рис.13.4). У цьому насосі використовувались одночасно два явища поглинання газів: розчинність газів металом за дії електричного поля і поглинання газів тонкими металевими плівками. Насос складається з корпусу, зробленого з листової нержавіючої сталі, двох катодів *K* у вигляді пластини з чистого титану (верхня пластина не відтворена на рисунку) і розміщеного між катодами анода *A* з великою площею поверхні завдяки виготовленню його у вигляді чарунок.

На анод подають високу напругу, що викликає ударну іонізацію. Подібно до скляного іонно-сорбційного насоса постійний магніт використовують і в цьому насосі. Постійне магнітне поле напруженістю  $\sim 1000 \text{ Е}$ , що направлене паралельно до осі електродної системи, створюють оксидно-барієвими магнітами. Воно буде примушувати електрони, які здійснюють коливальний рух навколо чарункового анода, за дії гальмуючого електричного поля катодів і прискорюючого поля анода, рухатися за гвинтоподібними траєкторіями, значно збільшуючи довжину свого шляху і таким чином значно підвищувати ймовірність ударної іонізації молекул навіть за дуже низького тиску залишкових газів.

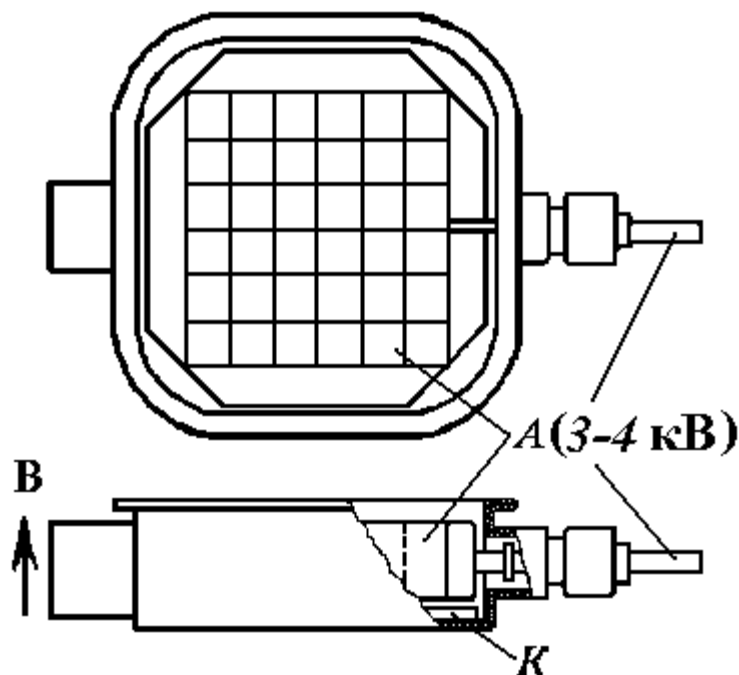


Рис. 13.4

Створені іони, які значно важчі за електрони, за дії прискорюючого для них поля катодів будуть з великою кінетичною енергією бомбардувати титанові пластини, викликаючи катодне розпилення, тобто відрив атомів титану з поверхні пластин. “Вибиті” атоми будуть прямолінійно рухатися за всілякими можливими напрямками. Але оскільки анод розміщений близько до катодів, то ці атоми будуть осаджуватися на поверхні його чарунок, створюючи свіжий шар за шаром титану, в якому будуть безперервно поглинатися і замуруватися наступним шаром газові молекули. Високоенергетичні іони, а також нейтральні молекули, що проникають в катоди на достатню глибину, розчиняються серед атомів титанових пластин.

Якщо концентрація розчиненого газу буде більшою за максимальну, що можливо за відповідних умов у металі, то поглинутий газ при об’єднанні створює бульбашки, які розривають метал. Це явище називають блистер-ефектом.

Знегаження насоса, тобто вивільнення поглинутих газів і викид їх в атмосферу проводять прогріванням до температури  $400 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

До позитивних властивостей електророзрядних насосів слід віднести

можливість створення високого й надвисокого вакууму без загрози забруднення вакуумної камери будь-якою конденсованою парою; насос не має рухомих і гарячих елементів; з ростом розрідження розрядний струм і, відповідно, потужність, яку споживає насос, автоматично зменшуються.

Останню властивість – залежність іонного струму від тиску залишкових газів можна використовувати для оцінки ступеня вакууму в насосі.

Промислові зразки електророзрядних насосів називають “вакіонами”. Швидкодія насосів залежно від конструктивних параметрів може бути від 1 л/с до десятків тисяч за секунду (відносно повітря) в широкому ряді тисків, включно з надвисоким вакуумом.

Швидкодію магніторозрядних насосів відносно різних газів ілюструє таблиця 13.1.

Іонно-сорбційні насоси мають широке застосування в лабораторних установках при виробництві електровакуумних приладів і напівпровідників; для тривалого підтримання вакууму в замкнених вакуумних системах і приладах; для відтворення космічних умов у спеціальних камерах.

Таблиця 13.1

Газ	Швидкодія, %	Газ	Швидкодія, %
Водень	270	Окис вуглецю	85
Метан	270	Двоокис вуглецю	85
Аміак	170	Кисень	55
Пара води	130	Гелій	11 - 20
Повітря	100	Аргон	1 - 4
Азот	100		

### 13.5 Кріогенні адсорбційні насоси

Високий вакуум, як і низький, без загрози забруднення вакуумної камери парою робочої рідини можна створити за допомогою адсорбційних насосів, в яких використовують явище фізичної адсорбції газів.

Як приклад, розглянемо цеолітовий кріогенний адсорбційний насос. Цеоліти (алюмосилікати  $\text{SiO}_2$  і  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) є найкращими адсорбентами для використання в адсорбційних насосах завдяки можливості надання їм тонкої та рівномірної пористості.

Насос має дуже просту будову (рис.13.5). Він являє собою металевий або скляний циліндричний стакан 1, в якому розміщено фільтр 2, наповнений активованим (попередньо зневодненим) цеолітом 3, наприклад, марки СаА-4В. Для регенерації адсорбента і наступного використання насоса після насичення газами, що відкачуються, застосовують електричний нагрівач 4. Для забезпечення охолодження адсорбента до низької температури, насос

занурюють у посудину Дьюара 5 з кріоагентом 6 (такі зріджені гази, як азот, водень і т.п.).

Відкритим кінцем насос приєднаний до вакуумної камери і після охолодження до низької температури, наприклад, температури рідкого азоту ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), адсорбент починає інтенсивно адсорбувати гази, що надходять з вакуумної камери. Для роботи при низькому вакуумі використовують насоси занурюючого типу (рис.13.5, а) – посудину Дьюара можна від'єднати від насоса, а для роботи при високому вакуумі – насоси заливного типу (рис. 13.5, б), з невід'ємною посудиною Дьюара.

В якості металу, з якого виготовляють стакан насоса, використовують неіржавіючу сталь або сплав з нікеля. Ці метали мають низьку газовіддачу і добру теплопровідність, яка сприяє швидкому охолодженню цеоліту. Для досягнення цієї ж мети стакан має довжину значно більшу за його діаметр.

Оскільки адсорбції властиве насичення, то насос, який досяг насичення після поглинання відповідної кількості газів, перестає працювати, тому має бути від'єднаний від вакуумної камери і підданий регенерації, тобто видаленню поглинутих газів і водяної пари. Після регенерації насос знову можна використовувати після приєднання до вакуумної камери. Щоб не порушувалась безперервність процесу відкачки, використовують декілька таких насосів, що будуть працювати у відповідній послідовності – за від'єднання для регенерації одного насоса вакуумну камеру перемикають на наступний і т. д.

Охолодження насоса знімають при регенерації і цеоліт починає активно виділяти адсорбовані гази, тому для виходу цих газів насос з'єднують з атмосферою за допомогою крана, або застосовують запобіжний клапан, що автоматично відкривається за виникнення загрозовано надмірного тиску.

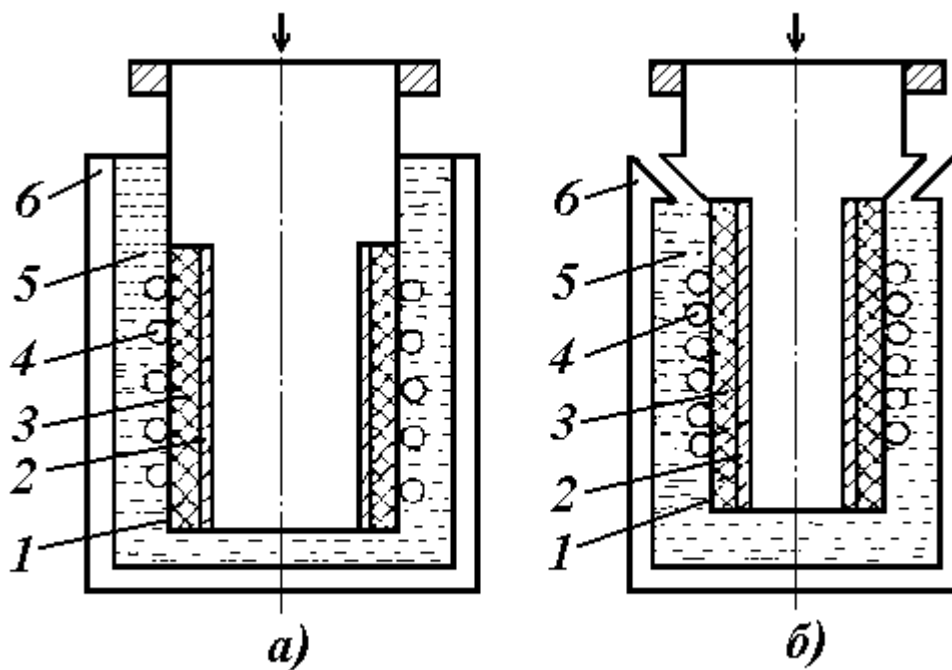


Рис. 13.5

Оскільки за кімнатної температури цеоліти інтенсивно поглинають пару

водяну, то регенерацію проводять з використанням примусового нагрівання до температури не нижче 350 °С. Повна регенерація відбудеться тільки через 1-2 год., після чого насос старанно ізолюють від атмосфери.

### **Запитання для самоперевірки**

1. Поясніть будову і принцип роботи іонного насоса.
2. Поясніть будову і принцип роботи металевого іонного насоса.
3. Поясніть будову і принцип роботи скляного іонно-сорбційного насоса.
4. Поясніть будову і принцип роботи електро-магнітнорозрядного іонно-сорбційного насоса.
5. Чи залежить швидкодія електро-магнітнорозрядного іонно-сорбційного насоса від роду газу?
6. Поясніть будову і принцип роботи кріогенного насоса.

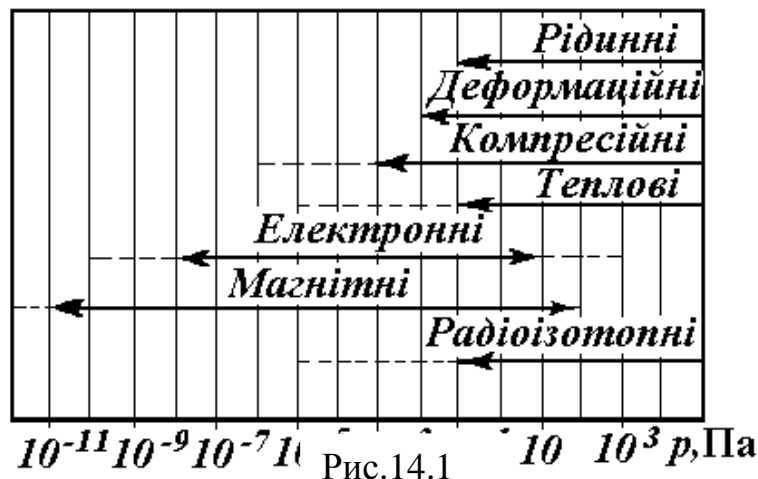
## Лекція чотирнадцята

### ВИМІРЮВАННЯ НИЗЬКИХ ТИСКІВ

#### 14.1 Класифікація манометрів

Сучасна вакуумна техніка дозволяє отримати тиск у вакуумній камері  $\sim 10^{-14}$  **Торр**. Діапазон тиску від цього значення до величини атмосферного тиску ( $\sim 10^3$  **Торр**) складає 18 порядків. Забезпечити вимірювання тиску якимось одним універсальним приладом у такому широкому проміжку значень неможливо.

Прилади, за допомогою яких вимірюють тиск, називаються манометрами. Слово *manos* у перекладі з грецької означає негустий, тобто манометр – прилад,



що вимірює ступінь розрідженості. Манометри для вимірювання низьких тисків ще називають вакуумметрами, хоча взагалі останні складаються з двох частин: манометричного перетворювача і вимірювального блока, тобто є приладами непрямих вимірювань тиску. Абсолютним манометром називають такий, яким тиск вимірюють безпосередньо, а не опосередковано, тобто шкала якого може бути математично розрахована. Більшість манометрів не є абсолютними, а є приладами непрямих вимірів, тобто тиск визначають на основі того чи іншого фізичного явища за допомогою відповідного перетворювача, що реагує на розрідження.

За принципом роботи манометри (вакуумметри) розділяють на такі типи: рідинні, деформаційні, компресійні, теплові та іонізаційні; останні, в свою чергу, поділяють на електронно-іонізаційні, магнітні електророзрядні та радіоізотопні. На рис. 14.1 наведені межі тисків, в яких можна проводити вимірювання манометром того чи іншого типу. Найбільший діапазон вимірювання в зоні високого вакууму мають електронні та магнітно-електророзрядні манометричні перетворювачі.



## 14.2 Деформаційні манометри

Деформаційні манометри вимірюють різницю тисків між опорним і надлишковим, що викликає деформацію пружного чутливого елемента за дії з одного боку надлишкового тиску.

Пружні чутливі елементи за типом поділяють на трубчаті, мембранні й сильфонні.

Прикладом трубчатого манометра є деформаційний манометр, головний елемент якого – це спіральна трубка – трубка Бурдона (рис.14.2). Спіральну порожнисту трубку 1, відкритим кінцем через штуцер 2 приєднують до вакуумної системи, таким чином, на зовнішній бік трубки завжди діє атмосферний тиск. При відкачуванні повітря з трубки вона починає скручуватися під дією атмосферного тиску, оскільки за різних радіусів кривизни площі її зовнішньої і внутрішньої поверхонь будуть різними. Рухомий запаяний кінець трубки почне переміщуватися ближче до нерухомого, що викличе від дії зубчастого механізму 3 поворот індикаційної стрілки проти напрямку руху годинникової стрілки. Число  $n$  поділок шкали, де зупиниться стрілка, покаже різницю між атмосферним тиском  $p_a$  і тиском  $p$  всередині трубки, тобто тиск у вакуумній системі буде:  $p = p_a - n$ . Шкала таких манометрів проградуєвана у відносних одиницях. Якщо у вакуумній системі тиск буде дорівнювати атмосферному, то стрілка буде вказувати на нульову поділку.

Чутливим елементом може бути також тонка пружна мембрана або сильфон, що виконує таку ж функцію, як і мембрана. У мембранному манометрі (рис. 14.3) мембрана 1 герметично ділить об'єм манометра на дві

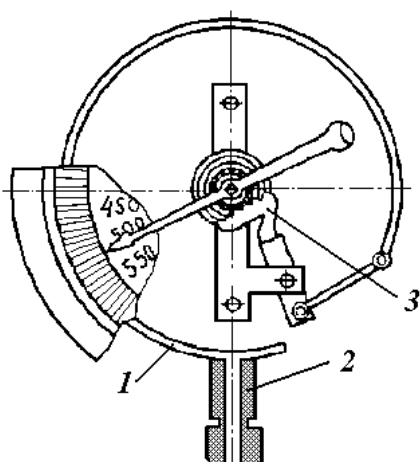


Рис.14.2

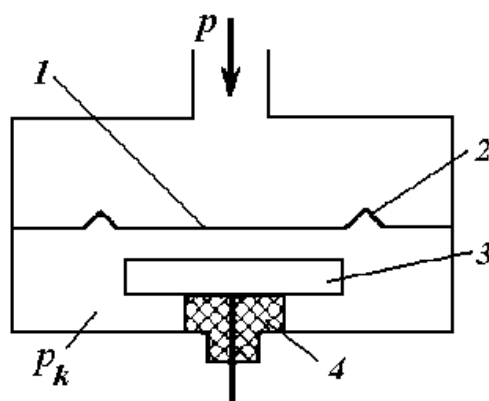


Рис.14.3

частини, одна з яких приєднується до вакуумної системи, а в другій створено опорний постійний низький тиск:  $p_k = 10^{-4}$  Торр. З метою збільшення чутливості і зменшення впливу коливань зовнішньої температури мембрану виготовляють з гофрами 2. Для здійснення вимірювань використовують ємнісний збалансований міст Уїтстона, одним з пліч якого буде ємність між мембраною і нерухомою пластиною-електродом 3, відділеним від корпусу

манометра (другий електрод), герметизованим ізолятором 4.

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

### 14.3 Рідинні манометри

Тиск у межах  $1 \dots 760$  **Торр** можна вимірювати дуже простими манометрами такими, як барометрична трубка. Щоб визначити тиск у вакуумній системі, необхідно спочатку визначити атмосферний тиск допоміжним манометром, а потім установити різницю  $h$  між рівнями рідини (рис. 14.4, а). Різниця тисків атмосферного і у вакуумній системі дорівнює

$$(p_{am} - p) = g\rho h, \quad (14.1)$$

де  $g$  – прискорення земного тяжіння;  $\rho$  – густина рідини: якщо рідиною буде ртуть, то тиск отримаємо безпосередньо в одиницях **Торр**.

Очевидно, що виміри такого манометра залежать від атмосферного тиску. Щоб позбавитися такої залежності, використовують укорочений U – подібний манометр (рис.14.4, б), один з кінців якого заварений. Якщо такий манометр наповнити ртуттю і приєднати до вакуумної системи, то тиск у ній буде визначатися різницею рівнів  $h$  за формулою:

$$p = h \text{ [Торр]}. \quad (14.2)$$

Чутливість такого манометра можна підвищити у  $1/\sin \beta$ , якщо одне з колін зробити нахиленим (рис. 14.4, в). Якщо ж використати не ртуть, а оливу, питома вага якої у 15 разів менша ніж у ртуті, то чутливість зросте у 15 разів.

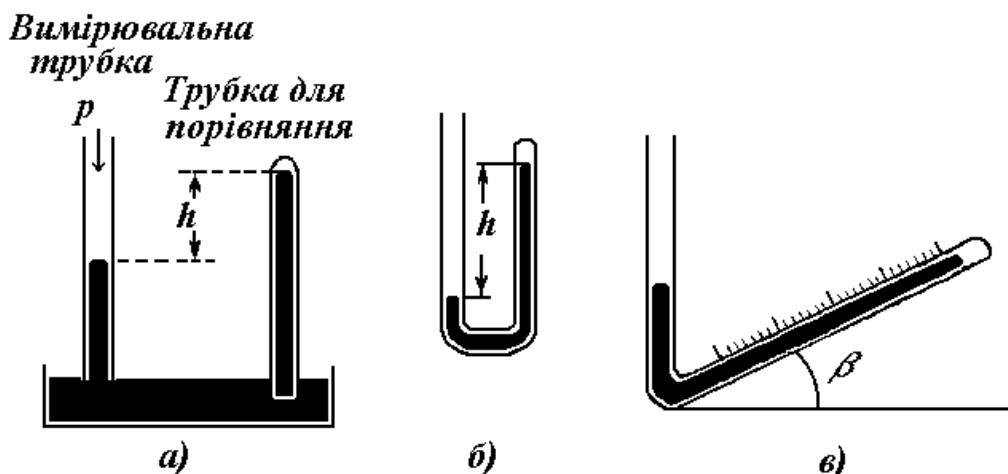


Рис. 14.4

До позитивних якостей таких манометрів відноситься можливість безперервних вимірювань і конструктивна простота, а до негативних – крихкість скла і громіздкість.

#### 14.4 Компресійний манометр Мак-Леода

Серед рідинних манометрів особливо цікавим є манометр Мак-Леода (рис. 14.5), оскільки його часто використовують як еталонний. Манометр працює за законом Бойля – Маріотта. Газ вакуумної камери з низьким тиском  $p$ , що вимірюється, ізотермічно стискають до високого тиску за допомогою ртуті, а потім вимірюють різницю рівнів зрівноваженого стану.

Конструктивно він виготовлений зі скла, складається з трубки 1, через яку підводиться ртуть до балона 2, з відомим об'ємом  $V_o$ , що зверху має капілярну трубку 3 (трубку стискання), діаметром  $d$ , верхній кінець якої заварений. Трубка 1 має відгалуження, що складаються з трубки порівняння 4, розміщеної паралельно до трубки стискання і такого ж діаметра, та трубки 5, яка з'єднує манометр з вакуумною системою. На трубку стискання нанесена позначка L, а на трубку порівняння – позначка K.

Вимірювання тиску починають завжди зі сполучення об'єму балона з вакуумною системою через трубку 5, тобто спочатку ртуть має знаходитися нижче місця з'єднання балона і трубки 5. Потім знизу поступово вводять ртуть тим чи іншим способом з резервуару (на рисунку не показано), де вона постійно знаходиться, поки рівень ртуті не досягне позначки L. Газ, що знаходився у балоні, мав такий же тиск  $p$ , що і газ вакуумної системи, який необхідно визначити, але після стискання його тиск зросте до величини  $p_1$ , а об'єм зменшиться до  $V_1$ . Тепер (відповідно до закону Бойля – Маріотта) можна записати, що

$$p = p_1 \frac{V_1}{V_o}. \quad (14.3)$$

Очевидно, що різниця тисків урівноважується тиском стовпчика ртуті висотою  $h$ . Якщо тиски виразити в міліметрах ртутного стовпчика, тобто в одиницях **Торр**, то

$$p_1 - p = h, \quad (14.4)$$

тобто

$$p_1 = p + h. \quad (14.5)$$

Оскільки  $p \ll h$ , то нехтуючи величиною  $p$  у виразі для  $p_1$ , отримаємо, що

$$p = h \frac{V_1}{V_o}. \quad (14.6)$$

Відношення об'ємів  $V_1/V_o$ , що легко визначається через геометричні розміри манометра, називають мірою стискання.

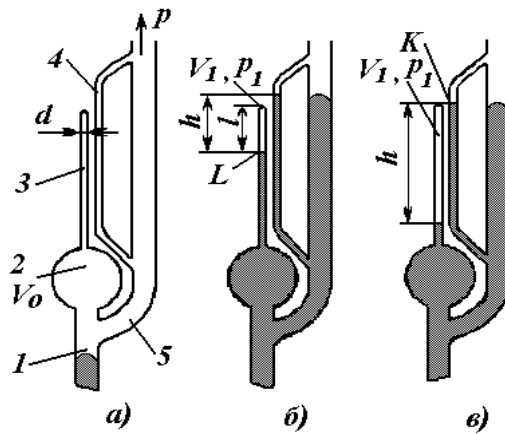


Рис. 14.5

Тепер тиск  $p$  газу у вакуумній системі можна знайти звичайним обчисленням.

#### 14.4.1 Методи градуювання манометра Мак-Леода

Визначення об'єму  $V_1$  залежить від того, як балон буде наповнюватися ртуттю:

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

Тоді

$$p = h \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi d^2}{4V_0} l h = c_1 h. \quad (14.7)$$

Величину

$$c_1 = \frac{\pi d^2}{4V_0} l \quad (14.8)$$

називають сталою компресійного манометра з лінійною шкалою. У цьому випадку міра стискання не змінюється і тиск, що вимірюється, прямо пропорційний різниці рівнів  $h$ . Для розширення діапазону вимірювань вибирають декілька значень  $l$ , для кожного з яких існує своя стала  $c_1$ . Трубка стискання в цьому випадку має декілька відрізків з різним діаметром, а трубок порівняння теж буде декілька.

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

Тепер

$$p = h \frac{V_1}{V_0} = \frac{\pi d^2}{4V_0} h h = c_2 h^2. \quad (14.9)$$

Величину

$$c_2 = \frac{\pi d^2}{4V_0} \quad (14.10)$$

називають сталою компресійного манометра з квадратичною шкалою. У цьому випадку тиск, що вимірюється, пропорційний квадрату різниці рівнів  $h$ ; звідки і назва методу квадратичного градування. Міра стискання манометра з квадратичною шкалою змінюється і це дозволяє проводити виміри в більш широкому діапазоні тисків.

Ртуть, що застосовують в компресійних манометрах, піддається дії високого тиску, тому вона має бути абсолютно чистою. Перед використанням вона підлягає хімічному і електролітичному очищенню і вакуумній дистиляції.

Для вимірювання низьких тисків виготовляють манометри з великими об'ємами балона (але зважаючи на крихкість скла, не більше  $1300 \text{ см}^3$ , зазвичай  $V_0 \sim 500 \text{ см}^3$ ) і діаметром капіляра  $d$  не менше  $0,8 \text{ мм}$ . Зменшення діаметра призводить до зростання ефекту капілярної депресії (ртуть починає прилипати до стінок трубки, що викликає можливість розділення неперервного стовпчика ртуті, виникає електризація скла). Як приклад граничного випадку можна вказати на манометр з об'ємом  $V_0 = 1300 \text{ см}^3$  (необхідна маса ртуті  $18 \text{ кг}$ ) і діаметром капіляра  $d = 0,8 \text{ мм}$ . Постійна цього манометра  $c_2 = 3,86 \cdot 10^{-7}$ , що дозволяє при  $h = 2 \text{ мм}$  виміряти тиск  $10^{-6} \text{ Торр}$ .

Для вимірювання високих тисків (але не більше  $10 \text{ Торр}$ ) використовують прилади, що мають невеликий об'єм балона ( $V_0 < 200 \text{ см}^3$ ) і капіляр з більшим діаметром.

До позитивних якостей компресійних манометрів відноситься можливість його повного розрахунку, що дозволяє використовувати такі манометри як еталонні.

До негативних якостей відноситься неможливість виконання безперервних вимірів (завжди перед вимірюванням необхідно звільнити балон від ртуті), використання ртуті (треба приєднувати манометри до вакуумної системи через азотні пастки), крихкість скла, а також неможливість вимірювань парціальних тисків пари речовин (наприклад,  $H_2O$ ,  $CO_2$ , ...), які легко конденсуються під дією сильного ( $u \sim 10^6$  разів) стискання.

### Запитання для самоперевірки

1. Наведіть класифікацію манометрів.
2. Поясніть будову і принцип роботи деформаційних манометрів.
3. Поясніть будову і принцип роботи рідинних манометрів у вигляді U-коліна.
4. Поясніть будову і принцип роботи манометра Мак-Леода.
5. Яку шкалу манометра Мак-Леода називають лінійною?
6. Яку шкалу манометра Мак-Леода називають квадратичною?
7. Який порядок визначення тиску манометром Мак-Леода з лінійною шкалою вимірювання?
8. Назвіть позитивні і негативні властивості манометра Мак-Леода.

## Лекція п'ятнадцята

### ТЕПЛОВІ МАНОМЕТРИЧНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

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

Відомо, що при в'язкісному режимі теплопровідність газу не залежить від тиску, оскільки

$$\chi = \eta c_v, \quad (15.1)$$

де  $\chi$  - коефіцієнт теплопровідності газу;  $\eta$  - коефіцієнт внутрішнього тертя;  $c_v$  - питома теплоємність за постійним об'ємом.

Але при молекулярному режимі течії газу з'являється залежність коефіцієнта внутрішнього тертя від тиску; він зменшується при зменшенні тиску і в першому наближенні можна записати, що

$$\chi = k p. \quad (15.2)$$

Отже, чим меншим буде тиск газу, тим менше буде охолоджуватися нагріта нитка і її температура буде зростати як обернено пропорційна функція тиску.

#### 15.1 Манометр опору

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

Манометричний перетворювач опору має просту будову - це циліндрична скляна трубка, яка відкритим кінцем з'єднується з вакуумною системою там, де потрібно вимірювати тиск, а закритим кінцем відповідним цоколем через кабель - з вимірювальною частиною. У цоколь вмонтовані два електроди, до яких приварена платинова нитка, що служить електричним опором  $R$  (рис. 15.1).

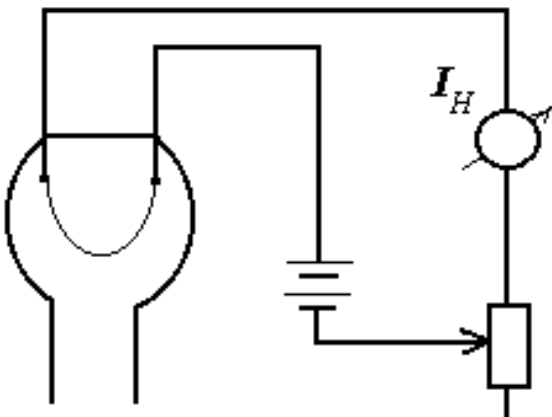


Рис. 15.1



Рис. 15.2

Електричну потужність ( $I_H^2 R$ ), яку витрачають на нагрівання платинової нитки, витрачають не тільки на нагрівання безпосередньо нитки, й на нагрівання електродів ( $P_3$ ), до яких приєднана нитка, на випромінення

відповідно до закону Стефана - Больцмана ( $P_2$ ) і на нагрівання стінок трубки газом унаслідок теплопровідності газу ( $P_1$ ).

Таким чином, рівняння балансу потужності матиме такий вигляд:

$$I_H^2 R = P_1 + P_2 + P_3, \quad (15.3)$$

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

$$P_1 = k_1(T_1 - T_2)p; P_2 = k_2(T_1^4 - T_2^4); P_3 = k_3(T_1 - T_3); \quad (15.4)$$

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

Потужності  $P_2$  і  $P_3$  не залежать від тиску газу, коли тиск є більшим за  $10^{-3}$  **Торр**. Якщо їх зробити значно меншими за потужність  $P_1$ , то ними можна буде знехтувати. Для того, щоб потужність  $P_3$  була відносно малою, достатньо вибрати тонку нитку з малим коефіцієнтом теплопровідності (платина). Від величини потужності  $P_2$  залежить чутливість манометра за різних тисків. Для підвищення чутливості манометра до зміни температури нитки внаслідок дії теплопровідності газу, необхідно, щоб потужність  $P_1$  була якомога більшою за  $P_2$ . У той же час, щоб манометр опору мав високу чутливість при вимірюваннях низьких тисків, нитку необхідно нагрівати до відносно низької температури. У цьому разі теплопровідність газу стає дуже малою і за низької температури нагріву випромінювана потужність теж зменшиться. Навпаки, за більших тисків вимірювання вигідно виконувати за вищої температури нагріву нитки, тобто за більшої величини струму  $I_H$ .

Таким чином, величина вимірюваного тиску і чутливість перетворювача залежать від величини вибраного струму  $I_H$  і температури нагріву нитки  $T_1$ .

Вимірювання тиску за допомогою манометра опору виконують таким чином:

1) за якомога низького тиску в лампі ( $10^{-5}$  **Торр**) встановлюють робочий струм  $I_0$ , тобто струм, якому відповідає температура нагріву нитки  $T_1$  за тиском  $10^{-5}$  **Торр**;

2) газ, який напускають у лампу, буде охолоджувати нитку і її електричний опір зменшиться; це призведе до зростання струму  $I_H$ , який вимірюють.

З метою збільшення чутливості вимірювань, манометричний перетворювач підключають до урівноваженого містка Уїтстона для вимірювання опору, як одне з плечей. Зменшення тиску з початком відкачки призводить до зростання температури нагрівання нитки і, отже, до збільшення її опору. Місток

розбалансується і для приведення його до зрівноваженого стану необхідно буде зменшити струм  $I_H$ . Оскільки вимірюють струм, а знати треба тиск, то використовують градуювальну криву (залежність тиску від величини струму) манометра опору (рис. 15.2), за якою за виміряними величинами струму і знаходять відповідні тиски.

## 15.2 Термопарний манометричний перетворювач ЛТ - 2

Другим прикладом використання залежності теплопровідності газу від його тиску є термопарний манометр.

Термопарний манометричний перетворювач ЛТ - 2 – це лампа зі скляним або металевим балоном (ЛТ - 4), в який вмонтовано чотири електроди. Як і в манометрі опору, до двох з них приєднана платинова нитка (дротик)  $I$  (рис. 15.3), яку нагрівають електричним струмом від батареї  $BT$ . До середини платинової нитки приварена термопара  $2$ , вільні кінці якої приєднані до останніх двох електродів, до яких через кабельний рознімач підключають мілівольтметр. Величину робочого струму  $I_p$ , що нагріває нитку, контролюють міліамперметром  $3$  і встановлюють до відповідного значення реостатом  $R$ .

Термопара – це два дротики з різних металів, які з одного кінця з'єднані за допомогою зварювання у вигляді краплі. Особливістю такої пари є таке явище: якщо краплю зварення нагрівати до температури, наприклад,  $T_1$ , то на вільних кінцях, що охолоджують до  $T_0$ , з'явиться термопарна електрична рушійна сила ( $T.E.P.C.$ )  $E_t$ , величина якої залежить від різниці температур ( $T_1 - T_0$ ) – чим більша ця різниця, тим більшою буде  $T.E.P.C.$ ;  $E_t = b(T_1 - T_0)$ , де  $b$ –

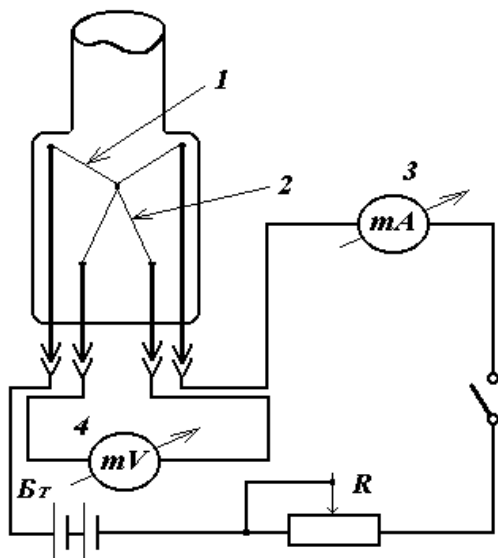


Рис. 15.3

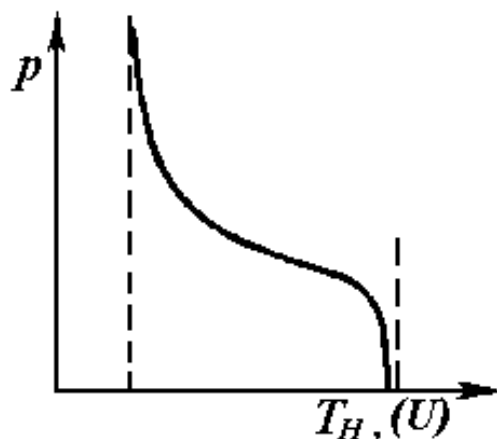


Рис. 15.4

термопарна стала, що залежить від вибраних металів. Вибором відповідних металів пари можна збільшити цю  $T.E.P.C.$ . У поданій на розгляд лампі використовують термопару з металів хромеля (90 % Ni + 10 % Cr) і копеля (56 % Cu + 44 % Ni).



Відкритим кінцем лампу приєднують герметично до вакуумної системи. Поки тиск у вакуумній системі атмосферний, мілівольтметр буде показувати *T.E.P.C.*, близьку до нуля при струмі  $I_p$ , заданому для даної лампи за її виготовлення. За достатнього зниження тиску мілівольтметр *4* почне показувати зростаючу *T.E.P.C.*, тому що теплопровідність газу із зниженням тиску зменшиться і це призведе до підвищення температури нитки, а отже й місця зварених кінців термопари. Коли тиск знизиться настільки, що теплопровідність стане дуже малою і не впливатиме на відвід тепла, температура нитки перестане зростати, стрілка мілівольтметра зупиниться на граничній (максимальній) позначці, зазвичай **10 мВ**, за умови що струм  $I_p$  буде попередньо вірно виставлений і постійно залишається незмінним; у цей момент витрати тепла ниткою і термопарою будуть зумовлені практично тільки теплопровідністю самих дротиків і тепловим випроміненням.

Термопарну манометричну лампу виготовляють у запаяному вигляді з вакуумом у середині  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  **Торр**. Щоб вірно визначити робочий струм запаяної лампи, необхідно дуже старанно підібрати величину  $I_p$  реостатом **R** так, щоб стрілка мілівольтметра, який показує величину *T.E.P.C.*, установилась при цьому струмі незмінно на поділці **10 мВ**. Цей струм і є робочим для даної лампи, тобто струмом відповідно високому вакууму, за яким виконують усі вимірювання після приєднання попередньо відкритої лампи до вакуумної системи.

За допомогою термопарної лампи вимірюють фактично не тиск, а *T.E.P.C.*, тому для визначення тиску використовують градуювальну криву – залежність величини *T.E.P.C.* від тиску (рис. 15.4).

Тепловими манометричними перетворювачами можна проводити вимірювання для різних газів і пари, вести безперервні спостереження за зміною тиску у вакуумній системі; вони не складні для виготовлення. Усе це є їх позитивними якостями. Але вони мають і недоліки, головними з яких є: вузький діапазон вимірювання тиску ( $5 \cdot 10^{-1}$  –  $10^{-3}$ ) **Торр**, оскільки чутливість манометра поза межами діапазону, як видно з градуювальної кривої (рис. 15.4), різко знижується і виміри стають неточними; залежність градуювальних кривих від виду газу і зміни робочого струму  $I_p$  з часом. Останній недолік виникає тому, що змінюється електричний опір платинової нитки – її поверхню з часом забруднює пара вакуумних олиф та ін. У зв'язку з цим за використання теплових манометричних перетворювачів необхідно періодично перевіряти (визначати) робочий струм. Очевидно, що для цього з вакуумної системи необхідно попередньо видалити гази до тиску не меншого за  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  **Торр**.

### 15.3 Іонізаційні манометричні перетворювачі

За допомогою цих манометрів вимірюють тільки значно низький тиск, на основі попередньої іонізації залишкового газу і визначення іонізаційного струму, що й буде мірою молекулярної концентрації, тобто тиску газу.

Очевидно, що збільшення струму буде відповідати зростанню тиску.

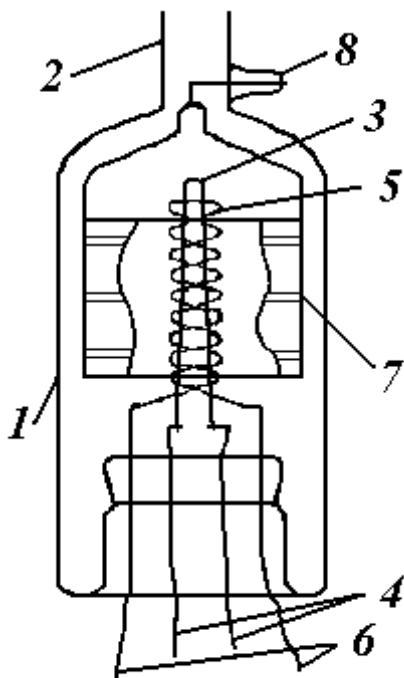


Рис. 15.5

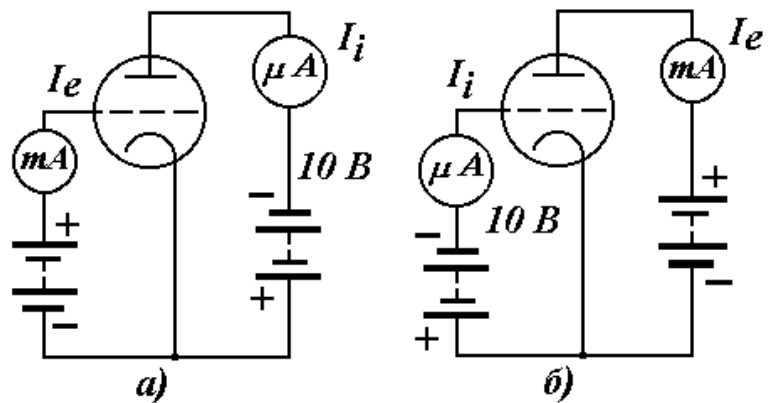


Рис. 15.6

Іонізаційний манометр, як і термопарний, складається з двох частин: вимірювальної і датчика. Датчик – це скляна лампа-перетворювач манометрична іонізаційна (ПМІ – 2), має вигляд (рис. 15.5) скляної колби 1, що закінчується трубкою 2, через яку її приєднують до вакуумної системи. У середині колби впаєні три електроди: вольфрамовий катод 3, розміщений на осі колби у вигляді петлі з двома відводами 4, анод – молибденова сітка у вигляді біфілярної спіралі 5, що охоплює катод і також має два відводи 6, і нікелевий колектор іонів 7 у вигляді циліндра, що охоплює ці електроди і має відвід 8. Два відводи у сітки-анода необхідні для розжарювання її електричним струмом, щоб попередньо викликати виділення поглинутих газів як з неї, так і з інших елементів лампи.

Електрони, що емітує нагрітий катод, спрямовують до анода прикладеною напругою. Вони створюють електронний струм, а іони, що створилися за дії ударної іонізації, збирає колектор іонів – це створений іонний струм, який вимірюють мікроамперметром (рис.15.6, а). Оскільки сітка має великий період намотки, то значна частина електронів не зразу досягає її поверхні, а пролетівши повз неї, опиняється в гальмуючому електричному полі анода і починає коливальний рух навколо сітки перед тим, як потрапить до неї. Збільшення довжини траєкторії руху електронів перед тим, як вони потраплять на поверхню сітки, збільшує ймовірність іонізації і значно підвищує чутливість манометра. З цією ж метою відстань між сіткою-анодом і колектором іонів роблять відносно великою. Для створення іонного струму достатньо до колектора іонів прикласти від'ємну напругу приблизно до - 10 В, але для прискорення емісійних електронів необхідна позитивна напруга до + 250 В.

Підключення іонізаційного датчика можна здійснювати також за схемою рис. 15.6, б, де функцію анода виконує колектор іонів, а іони збирає сітка 5. Але чутливість манометра за такого підключення нижча, тому схема за рис. 15.6, а має широке застосування.

З експериментів відомо, тільки якщо тиск газу буде нижчий за  $10^{-3}$  **Торр**, то відношення іонного струму до електронного буде прямо пропорційним до тиску в манометричній лампі:

$$\frac{I_i}{I_e} = kp. \quad (15.5)$$

Коефіцієнт пропорційності  $k$  визначає чутливість манометра і якщо електронний струм підтримувати завжди на постійній величині, то можна вважати, що

$$I_i = Ap, \quad (15.6)$$

де коефіцієнт  $A = I_e k$  називають сталою манометра.

Величина сталої манометра залежить від роду газу, електричної схеми

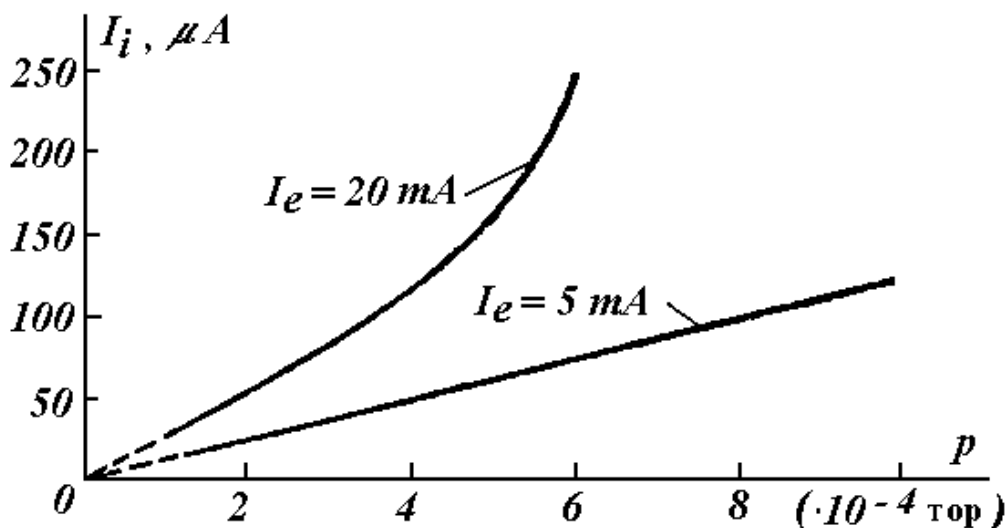


Рис. 15.7.

підключення і режиму роботи, конструкції датчика, тому її визначають геометрично з градувального графіка, який будують при градуванні іонізаційного манометра за допомогою іншого манометра. Очевидно, що за збільшення величини електронного струму іонний струм також зростатиме.

Градувальний графік має в головному лінійну залежність (рис. 15.7); тангенс кута нахилу і є сталою манометра, але можна бачити, що за підвищених тисків ( $>10^{-4}$  **Торр**) за збільшеного електронного струму (20 **мА**) іонний струм зростає швидше ніж тиск. Це пояснюється виникненням додаткової лавинної іонізації.

Завдяки лінійній залежності іонізаційного струму від тиску іонізаційні манометри мають високу точність вимірювань у діапазоні тисків  $10^{-6}$  -  $10^{-3}$  **Торр**.

До їх недоліків слід віднести можливе руйнування розжареного катода за раптового проникнення в колбу атмосферного повітря, тобто зростання тиску. Руйнування відбувається завдяки інтенсивному бомбардуванню іонами, що будуть утворюватися вже й біля катода. Окрім цього, приєднувати манометр до вакуумної системи треба через трубку великого діаметра, в супротивному разі газовий розряд, що протікає в манометрі, призведе до поглинання газу електродами, тобто до помітного зниження тиску в ньому в порівнянні з вакуумною системою. Тому перед кожним вимірюванням необхідно провести знегаження елементів манометра інтенсивним електронним бомбардуванням, яке створюють попереднім розжаренням спіралі анода.

При вимірюванні низьких тисків ( $<10^{-7}$  **Торр**) з'являються помітні неточності, пов'язані з появою фотоелектронної емісії з колектора іонів, що виникає за дії рентгенівських променів, які випромінює анод унаслідок бомбардування його прискореними електронами. Останній недолік частково усувають зміною конструкції.

#### 15.4 Іонізаційний манометр Байярда – Альперта

Щоб точно вимірювати значно низькі тиски, Р. Байярд і Д. Альперт створили манометр, в якому колектором іонів служить тонкий вольфрамовий дротик 1, оточений сіткою – анодом 2, а катод 3 розміщений зовні сітки (рис. 15.8). Анодну напругу було знижено до +100 В. Усе це було зроблено з метою зниження рентгенівського випромінювання і його дію на колектор іонів.

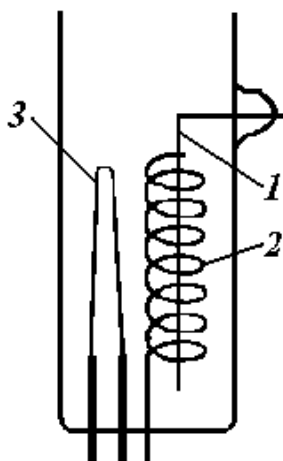


Рис. 15.8

Дійсно, чутливість цього манометра зросла в 100 і більше разів. Манометр Байярда – Альперта дає точні виміри тисків до  $\sim 10^{-10}$  **Торр**. Розміщення колектора іонів усередині сітки зменшило число іонів, що потрапляли на стінку колби, а не на колектор, тобто при такому розміщенні відповідність іонного струму  $I_i$  числу утворених іонів вища. Вимірювання тисків нижчих  $10^{-10}$  **Торр**, обмежене тиском пари вольфраму, що з'являється

за температури розжарення нитки катода  $\sim 2300^\circ\text{C}$ , а також помітному проникненню до колби атмосферного гелію через скло. Градування манометрів виконують шляхом порівняння вимірів з показаннями компресійного манометра.

Принцип роботи іонізаційних манометрів використовують для перевірки ступеня вакууму в запаяних вакуумних приладах з не меншим числом електродів.

До загального недоліку іонізаційних манометрів слід віднести чутливість до впливу на виміри тиску наявності зовнішніх електричних і магнітних полів.

## 15.5 Радіоактивний манометр ( альфатрон )

Іонізацію молекул газів можна створювати не тільки потоком емісійних електронів, а за допомогою радіоактивної речовини,  $\alpha$  - випромінення якої має постійну інтенсивність і достатнє за величиною (тому друга назва такого манометра – альфатрон). Спрощена схема вимірювання і будова радіоактивного манометра (альфатрона) наведені на рис. 15.9.

В якості радіоактивного джерела 1 зазвичай використовують радіоактивний елемент кобальт-60, який розміщують в герметизованому металевому корпусі 2, який приєднують відкритим кінцем до вакуумної

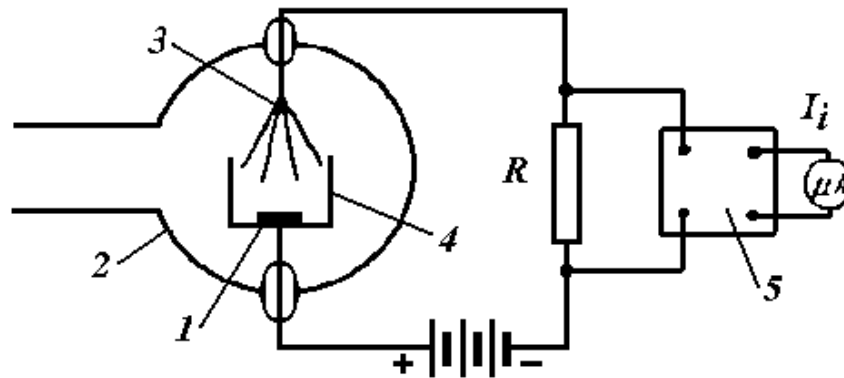


Рис. 15.9

системи. Колектор іонів 3 через герметизований та ізольований відвід приєднують до резистора великого опору, який є навантаженням для кола іонного струму. Іншим електродом слугує металевий циліндр 4, який через герметизований та ізольований відвід приєднують до позитивного полюса джерела постійної напруги величиною  $\sim + 200 \text{ В}$ . З резистора знімають різницю потенціалів, що створена іонним струмом ( $I_i \sim 10^{-10} \text{ А/Торр}$ ) і оскільки вона мала, то перед вимірюванням подають на підсилювач 5 і мікроамперметр.

Іонний струм альфатрона прямо пропорційний тиску, але дуже залежить від природи газу, тому для кожного газу необхідно мати окремий відповідний градуовальний графік (залежність іонного струму від тиску). Діапазон вимірювань такий же, як і у манометра опору:  $(10 - 10^{-3}) \text{ Торр}$ .

До позитивних якостей відносять: відсутність розжареного катода, висока міцність конструкції, до негативних – необхідно виконувати запобіжні заходи захисту від дії радіоактивного випромінювання.

## 15.6 Груба оцінка вакууму

Ступінь вакууму можна оцінити за видом свічення газового розряду в розрядній трубці.

Найбільш зручною для цього є скляна розрядна трубка 1 з двома електродами 2, що розміщені на відстані приблизно 15 мм один від одного всередині захисних скляних трубок 3 (рис. 15.10). До електродів підключають високовольтну напругу від високочастотного трансформатора (котушки

Румкорфа), яка призводить до виникнення розряду, оскільки в трубці буде знаходитися газ після приєднання її до вакуумної системи.

Розряд стає помітним за тиску, який менший за **10 Торр** і має вигляд “шнура”, що розміщений на осі трубки і випромінює світло.

Більше зниження тиску приводить до просторового розширення шнура і при тиску в **1 Торр** він заповнює весь поперечний переріз трубки, але яскравість свічення зменшується. Трубка випромінює слабе дифузне світло.

Якщо тиск ще більше зменшується і стає рівним **0,1 Торр**, то розряд стає дуже блідим і з’являються світні поперечні смуги (страти).

Свічення газу стає майже непомітним за тиску **0,01 Торр**, але за дії бомбардування стінки трубки швидкими іонами та електронами з’являється зеленувата або блакитна флуоресценція (свічення) скла (залежно від його складу).

Наступне зниження тиску до **0,001 Торр** приводить до зникнення будь-якого свічення і кажуть, що в системі створено “чорний вакуум”.

Колір свічення розряду залежить від природи газу. Розряд у повітрі має фіолетовий колір за високих тисків і змінюється на трояндово-фіолетовий за низьких тисків. Неон має жовтогарячо-червоне свічення, ртутна пара – блідо-блакитне, а двоокис вуглецю – темно-блакитне.

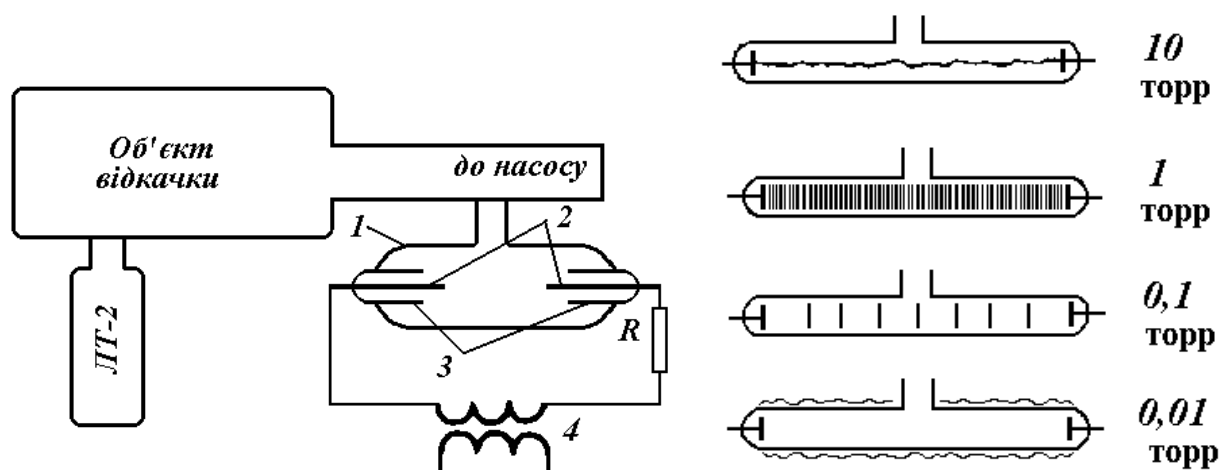


Рис. 15.10

Залежність кольору свічення від природи газу дозволяє використовувати розрядні трубки для аналізу газів, що знаходяться у вакуумній системі.

### Запитання для самоперевірки

1. Поясніть будову і принцип роботи манометра опору.
2. Проаналізуйте рівняння балансу потужностей манометра опору.
3. Поясніть будову і принцип роботи терморного манометра.
4. Поясніть будову і принцип роботи іонізаційного манометра.
5. Поясніть будову і принцип роботи іонізаційного манометра Байярда-Альперта.
6. Які недоліки теплових та іонізаційних манометрів?
7. Поясніть будову і принцип роботи радіаційного манометра.
8. Як оцінюють ступінь вакууму за допомогою газового розряду?

## Лекція шістнадцята

### ВИМІРЮВАННЯ ПАРЦІАЛЬНИХ ТИСКІВ

На роботу вакуумних приладів, у тому числі газорозрядних джерел світла, дуже впливає не тільки ступінь вакууму, створеного в них, але також склад залишкових газів.

Від того, які гази і їх кількість залишилися в електронному вакуумному приладі, залежить якість та надійність його роботи. Тому виникла необхідність аналізу залишкових газів і оцінки їх парціальних тисків при виготовленні таких приладів. Визначити молекулярний склад залишкової суміші газів і оцінити тиск окремої складової можна за допомогою мас-спектрометричних аналізаторів. Принцип роботи таких газоаналізаторів базується на іонізації газів залишкової суміші в приладі та наступного розподілу отриманих іонів за їх масою. Залежно від фізичних ефектів, які використовують, такі аналізатори поділяють на:

а) мас-спектрометри з магнітним розподілом іонів – використовують залежність радіуса кривизни траєкторії позитивних іонів, що рухаються в постійному магнітному полі, від співвідношення заряду іона  $e$  до його маси  $m$ ;

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

в) хронотрони – газоаналізатори, в яких використовують залежність тривалості прольоту іонів однакової відстані від їх маси, – а також інші.

#### 16.1 Мас-спектрометри з магнітним розподілом іонів

Мас-аналізатори газів з магнітним розподілом іонів виготовляють з кутом

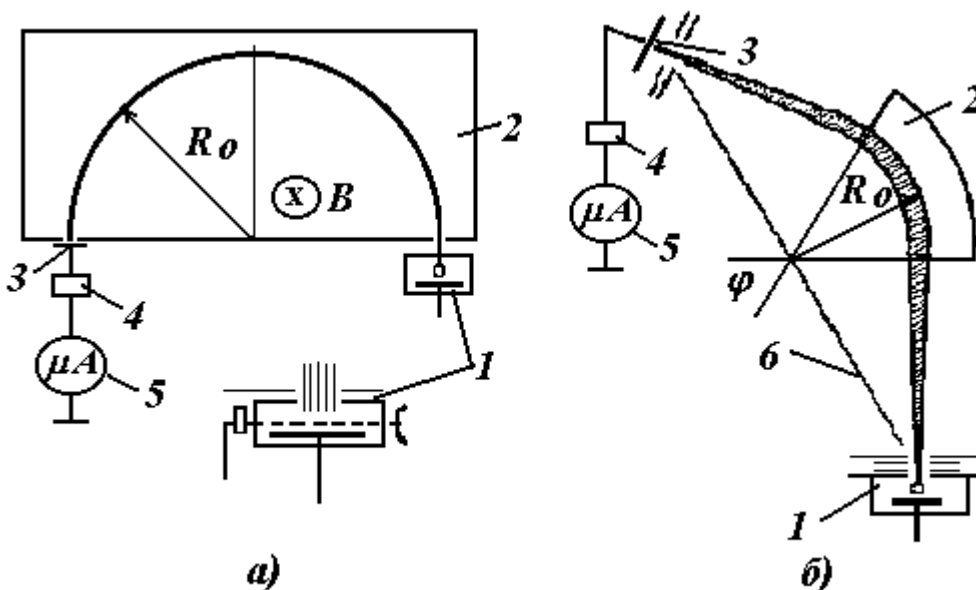


Рис. 16.1

відхилення  $180^\circ$  (рис. 16.1, а) або меншим (рис. 16.1, б). Прилад складається з таких головних елементів, як джерело іонів 1, камера аналізатора 2, на яку діє

однорідне магнітне поле з індукцією  $\mathbf{B}$ , і колектор іонів 3.

Герметизовану камеру мас-аналізатора спочатку ретельно знегажують прогріванням з одночасним здійсненням відкачки газу до тиску не вище  $10^{-5}$  Торр, а потім напускають до неї залишкові газу, які необхідно проаналізувати.

Іонізацію молекул залишкових газів здійснюють емітованими розжареним катодом та прискореними до енергії в декілька сотень електрон-вольтів електронами. Створені позитивні іони, що мають заряд, наприклад  $q$ , за дії прикладеного електричного поля прискорюють до швидкості  $u$  і виштовхують через поздовжню щілину з камери 1 до камери 2, де електричне поле на них уже не діє, але вони потрапляють під дію постійного магнітного поля. Оскільки магнітне поле направлене перпендикулярно до напрямку вильоту іонів (перпендикулярно до площини рисунка), то за дії сили Лоренца  $F_L = q \cdot u \cdot \mathbf{B}$  вони матимуть колові траєкторії з різними радіусами кривизни  $R$  залежно від їх маси  $m$ . Величину радіуса кривизни визначають за умови рівності сили Лоренца і відцентрової сили інерції  $F_u = mu^2/R$ , що діють на іони, які рухаються зі швидкістю  $u$ , перпендикулярною до напрямку вектора магнітної індукції  $\mathbf{B}$ . Оскільки швидкість іонів залежить від величини прискорюючого електричного поля, створеного різницею потенціалів  $U$ , як  $u = \sqrt{2qU/m}$ , то з рівності  $F_L = F_u$  знаходимо, що радіус траєкторії іона за постійними значеннями  $U$  та  $\mathbf{B}$  прямо пропорційний квадратному кореню з їх маси  $R = (\sqrt{2mU/q})/B$ . Відношення  $m/q$  називають масовим числом іона  $M$  і

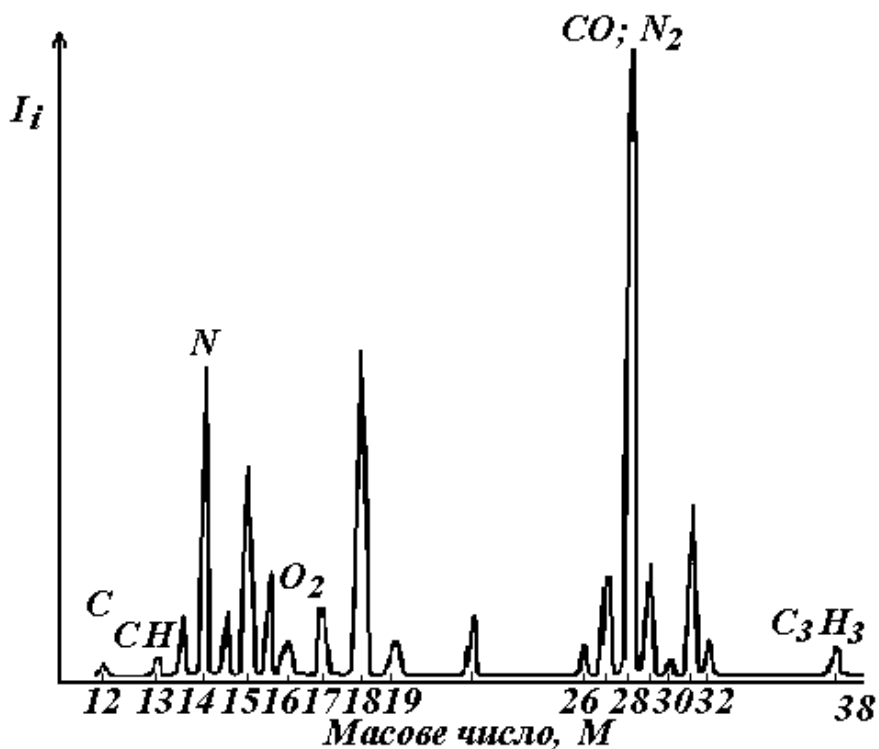


Рис. 16.2

вимірюють в атомних одиницях маси (а.о.м.). Якщо, залишити величину  $B$  незмінною, але змінювати різницю потенціалів  $U$ , то створимо умови, за яких до колектора іонів 3 будуть потрапляти тільки ті іони, що мають радіус



траєкторії  $R = R_0$ . Ці іони створять колекторний струм, який після підсилення пристроєм 4 вимірюють мікроамперметром 5 (рис. 16.1). Сукупність піків іонного струму (рис. 16.2), яку створюють іони з тим чи іншим масовим числом, являє собою спектр мас іонів, за яким аналізують склад газової суміші. Дійсно, якщо на вісі  $U$  відкладати попередньо визначені іонні масові числа, що відповідають заданій напрузі  $U$ , то за амплітудою іонного струму можна визначити парціальний тиск складових суміші газів або пари.

На рис. 16.1, б наведено мас-аналізатор із секторним магнітним полем (кут відхилення  $\varphi$  дорівнює  $60^\circ$  або може бути  $90^\circ$ ), в якому пучок іонів фокусують завдяки розміщенню вихідної щілини джерела іонів 1, вершини секторного поля та вхідної щілини колектора 3 на одній прямій б, а головний іонний промінь падає перпендикулярно до межі секторної зони 2. Мас-аналізатори можуть мати кут відхилення також більше ніж  $180^\circ$ .

Робота з мас-аналізаторами потребує відповідного досвіду, щоб упевнено розрізняти складові суміші, які можуть мати однакові іонні масові числа; наприклад, такі гази як CO (окис вуглецю) і  $N_2$  (азот) мають однакове масове число 28 а.о.м. Розрізнення проводять за допомогою аналізу додаткових супровідних невеликих піків струму, що створюють дисоційовані іони цих речовин і які вже не співпадають.

Для застосування мас-аналізаторів у високовакуумних системах необхідно, щоб вони мали: а) можливо більшу чутливість, тобто помітний іонний струм за даним парціальним тиском; б) достатню розрізнявальну здатність – відношення  $M/\Delta M$ , де  $\Delta M$  – ширина піка (в одиницях масових чисел) на половині його висоти; в) зручну можливість приєднання до відповідного місця у вакуумній системі. Для використання розглянутого мас-спектрометра необхідно застосовувати досить складне технічне оформлення, тому були розроблені більш прості й зручні пристрої, що отримали назву динамічних мас-аналізаторів, до яких належать омегатрон і тропатрон.

## 16.2 Омегатрон

Омегатрон ще називають циклотронним газоаналізатором. Схематично будова омегатрона наведена на рис. 16.3. Сфокусований магнітним полем  $B$  пучок електронів, які емітує розжарений катод 1, проходить через протилежні отвори камери іонізації на анод 2. У камері іонізації відбувається ударна іонізація молекул аналізованого газу прискореними емісійними електронами. Над і під пучком електронів розміщені паралельно дві металеві пластини 3, до яких прикладена високочастотна напруга.

Принцип роботи омегатрона базується на особливості руху іонів, що мають різні маси  $m_i$  і знаходяться одночасно під дією взаємно перпендикулярних статичного магнітного  $B$  і змінного високочастотного електричного  $E$  полів. Електричне високочастотне поле примушує іони здійснювати коливальний рух між пластинами 3, а магнітне поле примушує їх обертатися навколо магнітних силових ліній, тобто рухатися коловими

траєкторіями. Якщо частота обертання іонів у магнітному полі (циклотронна частота)  $\omega_i = qB/m_i$  співпадає з частотою електричного поля  $\omega$ , то виникне циклостронний резонанс, який приведе до розділення іонів за їх масою. “Резонансні” іони будуть рухатися спіральними траєкторіями 4, все більше віддаляючись від центру іонізаційної камери, і за відповідних умов будуть потрапляти на колектор іонів 5, створюючи іонний струм тільки відповідними іонами, тобто іонами, що мають однакову масу. Іони, що мають іншу масу, не задовольняють умові циклостронного резонансу, а тому будуть рухатися без прискорення і не потраплять на колектор іонів 5, і не будуть додатково створювати іонний струм, а рекомбінують. Іонний струм після підсилення реєструють вимірювальним приладом.

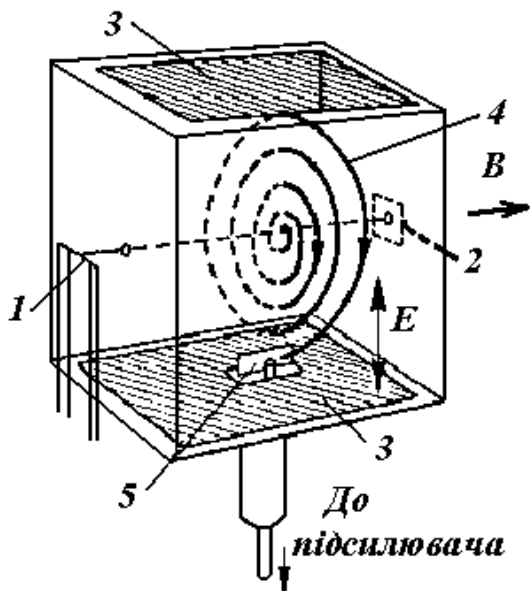


Рис. 16.3

спектра мас. Спектрограма подібна до наведеної на рис. 16.2, тільки тепер вісь частоти електричного поля (вісь абсцис) градується відповідно до масових чисел. За допомогою омегатрона можна вимірювати парціальні тиски в діапазоні  $10^{-5} - 10^{-10}$  Торр і масових числах від 2 до 100 а.о.м.

### 16.3 Тропатрон

Тропатрон належить до радіочастотних мас-спектрометрів, за допомогою яких можна вимірювати не тільки парціальні тиски складових суміші газів, але й загальний тиск цієї суміші.

Ці газові аналізатори за принципом роботи ще називають хронопролітними. Їх виготовляють у вигляді лампи-датчика (рис. 16.4), відкритої з одного боку для приєднання до вакуумної системи і з вмонтованими в ній у відповідній послідовності електродами, такими як вольфрамовий катод, що служить для створення емісії електронів, які після прискорення позитивним електричним полем анода (А) у вигляді сітки будуть створювати іонізацію залишкових газів, що надходять до простору між катодом і анодом через відкриту частину. Іони, що створилися поблизу анода, прискорюють від’ємним електричним полем першої сітки ( $C_1$ ) у напрямі до наступних трьох сіток, на які подають регульовану високочастотну напругу. Ці сітки вмонтовані так, що відстань між ними однакова. Оскільки ці три сітки мають однаковий потенціал, то іони, що потрапляють до зони їх розміщення, будуть рухатися рівномірно і матимуть постійні швидкості, що залежать тільки від їх масових чисел і від

однакової для них прискорюючої напруги сітки  $C_1$ . Таким чином, різниця у швидкостях іонів залежатиме лише від їх масових чисел. Більш важкі іони будуть рухатися повільніше, ніж менш важкі, але всі вони матимуть однакову кінетичну енергію. Якщо подати на ці сітки високочастотну напругу навіть з невеликою амплітудою, то найбільшу енергію отримають іони, період прольоту трисіткового простору яких співпадатиме з періодом високочастотної напруги, тобто резонансні іони. Інші іони після прольоту сітки  $C_4$  будуть мати меншу енергію і не зможуть подолати гальмуючий бар'єр, створений від'ємною

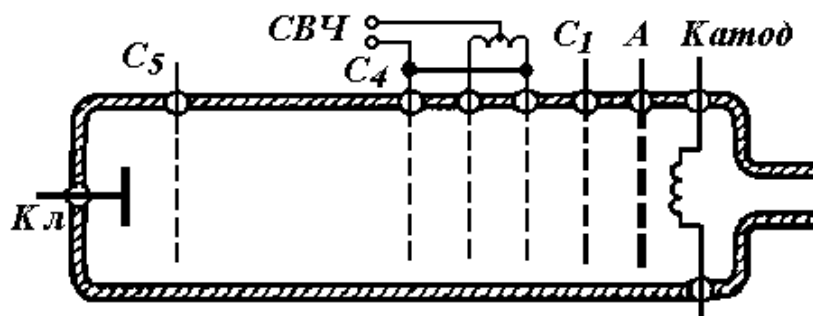


Рис. 16.4

напругою сітки  $C_5$ , розміщеної поблизу останнього електрода, який називають колектором іонів (Кл). Іони, що подолали гальмуючий бар'єр сітки  $C_5$ , створюють пік іонного струму. Шляхом регулювання частоти коливань високочастотної напруги можна отримати піки струмів для іонів з масовими числами від 2 до 100 а.о.м.

Іони, які після виникнення в іонізаційному просторі потрапили на сітку  $C_1$ , створюють іонний струм, величина якого пропорційна загальному тиску суміші газів, що потрапили з вакуумної системи до аналізатора. За допомогою тропатрона можна вимірювати тиски в діапазоні  $10^{-3} - 10^{-7}$  Торр.

У наш час існують й інші конструктивно різноманітні типи газоаналізаторів – вимірювачів парціальних тисків, але принцип їх роботи в загальному подібний до роботи розглянутих вище мас-спектрометрів.

### Запитання для самоперевірки

1. Який тиск називають парціальним?
1. Як поділяються газоаналізатори залежно від фізичних ефектів, що в них використовуються?
2. Поясніть будову і принцип роботи мас-аналізатора з магнітним розподілом іонів.
3. Що називають масовим числом?
4. Поясніть будову і принцип роботи омегатрона.
5. Поясніть будову і принцип роботи тропатрона.

## Лекція сімнадцята

### ВАКУУМНІ СИСТЕМИ І ЕЛЕМЕНТИ ЇХ РОЗРАХУНКУ

#### 17.1 Основні елементи вакуумних систем

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

Вакуумною системою називають систему взаємозв'язаних за допомогою вакуумпроводів приладів і пристроїв для створення, вимірювання ступенів вакуума і комутації газових потоків. Вакуумні системи можуть мати різне призначення – їх використовують як з метою знегаження електровакуумних приладів, до яких відносять і джерела світла, так і в різних технологічних установках промислового виробництва (металургії, хімії та ін.).

До основних елементів вакуумних систем належать вакуумні насоси, вакуумні камери (наприклад, з герметичним ущільнювачем 1, рис. 17.1,а), конденсаційні або виморожуючі (кріогенні) уловлювачі пари різних рідин (кріогенна, рис. 17.1, б) і такі комутаційні пристрої, як клапани (керований

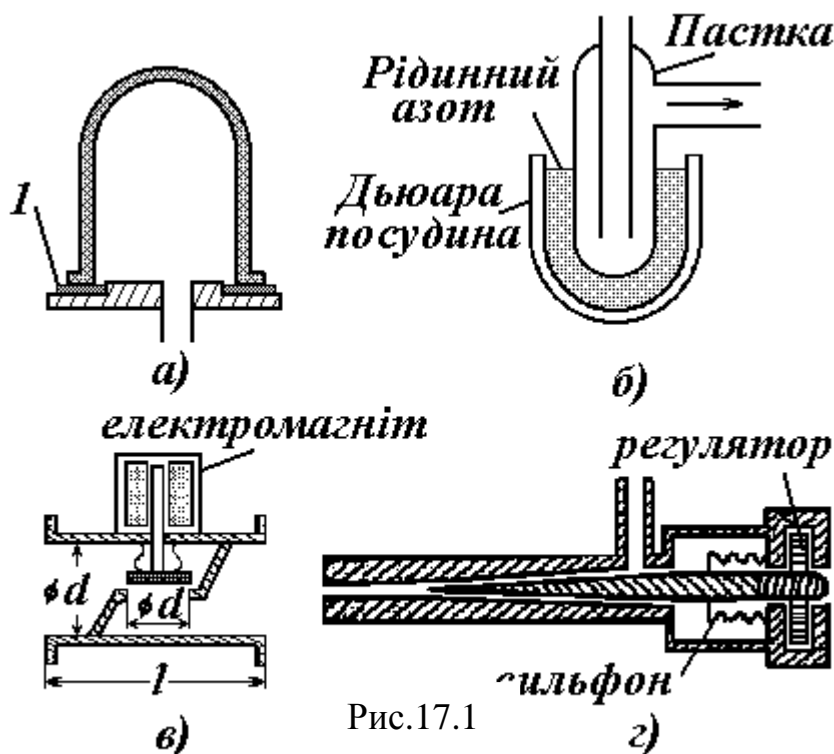


Рис.17.1

електромагнітом та з сильфоном, що служить як для герметизації, так і для передачі механічних переміщень до вакууму, рис. 17.1, в), вакуумні крани, вентилі, затвори, дозатори газових потоків (натікувачі) (голчатий дозатор, рис. 17.1, г), вакуумні уводи переміщень (сильфони), вакуумні оглядові вікна і вакуумні з'єднання.

## 17.2 Типові вакуумні системи

Численні вакуумні системи можна розподілити за ступенем отриманого вакууму на низько-, середньо-, високовакуумні й надвисокого вакууму.

Низьковакуумні систем мають в основному один низьковакуумний насос і робочий тиск, що створюється у них, не нижчий за  $\sim 7 \cdot 10^{-2}$  Торр.

Середньовакуумні системи мають два насоси, один з яких створює низький (попередній) вакуум, а інший – середній вакуум, тому такі системи ще називають системами низького й середнього вакууму. Робочий тиск у таких системах можна знизити до  $\sim 7 \cdot 10^{-5}$  Торр.

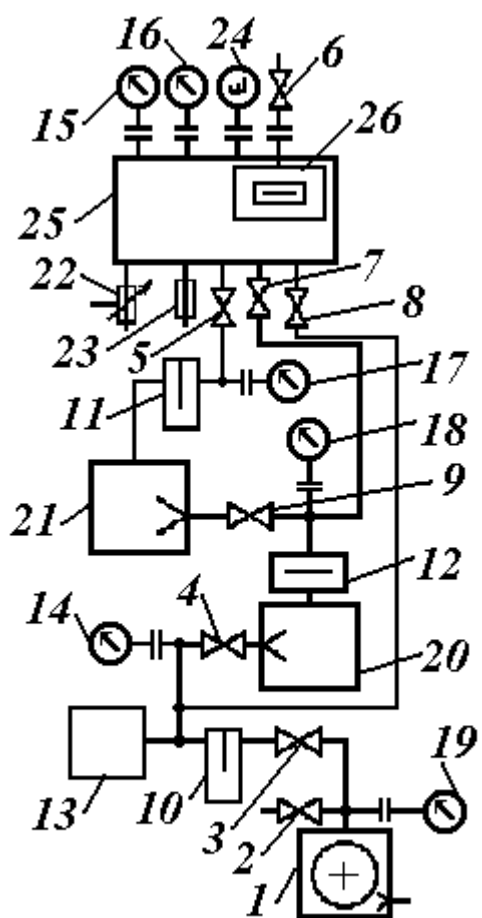


Рис. 17.2

Високовакуумні системи дозволяють створювати як високий вакуум, так і попередні ступені вакууму. Вони мають додатково до всіх елементів середньо-вакуумних систем ще високовакуумний насос і дозволяють знизити тиск до  $\sim 7 \cdot 10^{-7}$  Торр. Прикладом такої вакуумної системи може бути наведена на рис. 17.2. До її складу входять такі елементи: обертовий насос низького вакууму 1, комутаційні клапани 2 - 9, уловлювачі пари 10, 12, форвакуумний балон 13, манометричні перетворювачі 14 - 19, насоси для отримання середнього 20 і високого 21 вакууму, увід переміщень 22, електричний увід 22, газоаналізатор 24, технологічна вакуумна камера 25 і криогенний уловлювач 26. Уловлювач пари 10 запобігає потраплянню пари робочої рідини насоса 20 до обертового насоса 1, уловлювач 11 запобігає потраплянню пари робочої рідини насоса 21 до вакуумної камери, а уловлювач 12 запобігає як потраплянню пари робочої рідини насоса 20 до вакуумної камери, так і пари робочої рідини насоса 21 до насоса 20. Криогенний уловлювач 26 дозволяє підвищити ступінь вакууму. Манометричні перетворювачі 14 - 19 необхідні як для перевірки і контролю роботи вакуумних насосів, так і для визначення тиску у форвакуумному балоні та вакуумній камері, відповідно. За допомогою комутаційних клапанів можна використовувати вакуумну систему для отримання у вакуумній камері окремо відповідного ступеня вакууму, тобто або низького, або середнього, або високого, підключаючи до роботи той чи інший вакуумний насос. При створенні середнього вакууму наявність форвакуумного балона запобігає порушенню роботи системи при виникненні короточасної зупинки в роботі низьковакуумного насоса.

Вакуумні системи, в яких можна створювати тиск, що нижчий за тиск

високовакуумних відносяться до систем надвисокого вакууму. Вони обов'язково мають вакуумні камери, які можна прогрівати з метою зменшення газовиділення конструктивних елементів.

### 17.3 Розрахунок тривалості відкачки вакуумної системи

Спочатку отримаємо загальну формулу розрахунку тривалості відкачки. Для цього позначимо об'єм вакуумної системи, в якій буде створюватися вакуум, як  $V$ , а швидкість її відкачки за тиском  $p_1$ , як  $S_o$ . Будемо вважати, що натікання та газовиділення відсутні, а зниження тиску в процесі відкачки відбувається за політропним законом, тобто

$$p_1 V^n = \text{Const}, \quad (17.1)$$

де  $n$  – показник політропи. Після диференціювання цього рівняння і наступного розділення на проміжок часу  $dt$  отримаємо, з урахуванням, що  $dV/dt = S_o$ ,

$$dt = -\frac{V}{S_o n} \frac{dp_1}{p_1} = -\frac{V_{np}}{S_o} \frac{dp_1}{p_1}; \quad (17.2)$$

$V_{np}$  – приведений об'єм.

Оскільки швидкість відкачки  $S_o$  пов'язана з провідністю вакуумпровода  $U$  і швидкодією насоса  $S_n$  головним рівнянням вакуумної техніки, то для визначення тривалості відкачки можна використовувати формулу:

$$dt = -V_{np} \left( \frac{S_n + U}{S_n U} \right) \frac{dp_1}{p_1}. \quad (17.3)$$

Залежно від співвідношення провідності вакуумпровода і швидкодії насоса, формула може мати різні варіанти:

**а) тривалість відкачки, якщо провідність вакуумпровода значно більша за швидкодію насоса ( $U \gg S_n$ ).**

Це може бути, якщо вакуумпровід короткий і має великий діаметр. Тоді величиною  $1/U$  можна знехтувати і визначати тривалість відкачки за формулою:

$$dt = -\frac{V_{np}}{S_n} \frac{dp_1}{p_1}. \quad (17.4)$$

Після інтегрування в межах  $(t_1', p_1')$ ;  $(t_1'', p_1'')$ , де швидкодія насоса має середнє значення  $S_n'$  отримаємо:

$$t' = t_1'' - t_1' = 2,3 \frac{V_{np}}{S_n'} \lg \frac{p_1'}{p_1''}. \quad (17.5)$$

Очевидно, для зменшення похибки підрахунку залежно від вибору середнього значення  $S_n'$ , необхідно розділити межі інтегрування на декілька послідовних відповідно менших відрізків з окремим вибраним середнім

значенням залежно від змінення швидкодії насоса. Тоді загальна тривалість відкачки дорівнюватиме сумі відповідно окремо знайдених. Щоб знати як змінюється швидкодія насоса залежно від тиску, необхідно використовувати паспортні дані вибраного насоса.

Слід зазначити, що в міру зниження тиску у вакуумній системі він може наблизитися до граничного тиску  $p_{zp}$  насоса. Тому на останньому  $n$  - відрізьку, якщо  $p_1 < 10 p_{zp}$ , під знаком логарифма слід брати відношення:  $(p_1^{(n-1)} - p_{zp}) / (p_1^{(n)} - p_{zp})$ ;

**б) тривалість відкачки, якщо провідність вакуумпровода значно менша за швидкодію насоса ( $U \ll S_n$ ).**

У цьому випадку можна знехтувати величиною  $1/S_n$ , і тоді

$$dt = - \frac{V_{np}}{U} \frac{dp_1}{p_1}. \quad (17.6)$$

Оскільки провідність вакуумпровода залежить від режиму течії газу, то це треба враховувати, і тоді:

1) тривалість відкачки при **молекулярному режимі** (провідність  $U_m$  не залежить від тиску) визначається за формулою:

$$t = 2,3 \frac{V_{np}}{U_m} \lg \frac{p_1'}{p_1''}, \quad (17.7)$$

якщо  $p_1 < 10 p_{zp}$ , то під знаком логарифма слід також брати зазначене вище відношення;

2) при **молекулярно-в'язкісному режимі** провідність вакуумпровода залежить від середнього тиску у вакуумпроводі і її можна визначити за формулою:

$$U_{m-в} = U_m b + U_в = b \cdot 122 d^3 / l + 1,36 \cdot 10^3 \cdot p_{cp} \cdot d^4 / l = U_m b + a p_{cp}, \quad (17.8)$$

де значення  $b$  можна прийняти рівним 0,8 на межі в'язкісного режиму до 1 на межі молекулярного режиму;  $l$  – довжина,  $d$  – діаметр вакуумпровода (м), відповідно;  $p_{cp}$  **Па**, і тоді тривалість відкачки буде визначатися за формулою:

$$t = 2,3 \frac{V_{np}}{U_m \cdot 0,9} \left( \lg \frac{p_1'}{p_1''} - \lg \frac{U_m \cdot 0,9 + a p_1'}{U_m \cdot 0,9 + a p_1''} \right). \quad (17.9)$$

Оскільки визначення провідності вакуумпровода при цьому режимі течії газу включає і проміжні режими, то тривалість відкачки за наведеною вище формулою можна визначати також окремо для молекулярного або в'язкісного режиму.

За в'язкісного режиму провідність вакуумпровода діаметром  $d$  (м) і довжиною  $l$  (м) за середнім тиском  $(p_1 + p_2) / 2 = p_1 / 2$  (**Торр**) визначають за простішим виразом:  $U_в = a p_1$ , де

$$a = 2,81 \frac{d^4}{2l \lambda_{co}} \sqrt{\frac{T}{\mu}}; \quad (17.10)$$

$\lambda_{co}$  - середня довжина вільного пробігу молекул газу, визначена за тиском в 1 **Торр**.

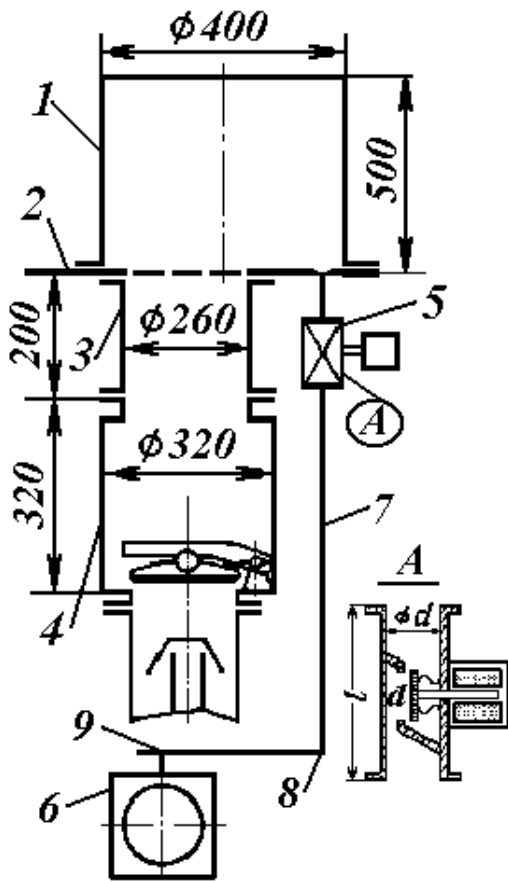


Рис. 17.3

підтримуючій плиті 2, з'єднувального перехідного циліндричного патрубку 3 відповідних розмірів, корпуса вакуумного затвора 4, через який приєднується високовакуумний насос, електромагнітного клапана 5, обертового вакуумного насоса 6 та вакуумного трубопроводу 7, що має два коліна 8 і 9 з кутом згину  $90^\circ$ . Вакуумний трубопровід має діаметр 3, 2 см і загальну довжину 1, 04 м.

Вказаний необхідний тиск може бути створений за допомогою механічного обертового насоса ВН-2 МГ попереднього вакууму. За паспортними даними залежність швидкодії цього насоса має вигляд, зображений на рис. 17.4.

Будемо вважати, що газовиділення зі стінок вакуумної камери є постійною величиною і дорівнює  $Q = 1, 88 \cdot 10^{-3}$  л. **Торр** /с ( $2, 43 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> Па/с).

Спочатку визначимо межі за тиском режимів течії газу, за якими буде відбуватися відкачка:

- 1) межа між в'язкісним і молекулярно-в'язкісним режимами

$$p_{в.м-в} = \frac{1}{3,2} = 0, 312 \text{ Торр (41, 6 Па) ,}$$

- 2) межа між молекулярно-в'язкісним і молекулярним режимами

У цьому випадку, використовуючи загальну формулу (17.3), після інтегрування отримаємо, що тривалість відкачки при в'язкісному режимі:

$$t = V_{np} \int_{p_1}^{p_1'} \frac{(S_n + ap_1) dp_1}{(S_n ap_1) p_1} = \frac{V_{np}}{a} \left( \frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_1'} \right) + 2, 3 \frac{V_{np}}{S_n} \lg \frac{p_1'}{p_1} . \quad (17.11)$$

Як приклад розрахунку вакуумних систем розглянемо розрахунок тривалості відкачки повітря при температурі  $20^\circ\text{C}$  від атмосферного тиску 760 **Торр** ( $1, 01 \cdot 10^5$  Па) до необхідного тиску  $4 \cdot 10^{-2}$  **Торр** (5, 32 Па) у вакуумній системі, що наведена на рис. 17.3. Ця вакуумна система складається з циліндричної вакуумної камери 1 відповідних розмірів, розміщеної на



$$p_m = \frac{0,015}{3,2} = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ Торр (0,624 Па)}.$$

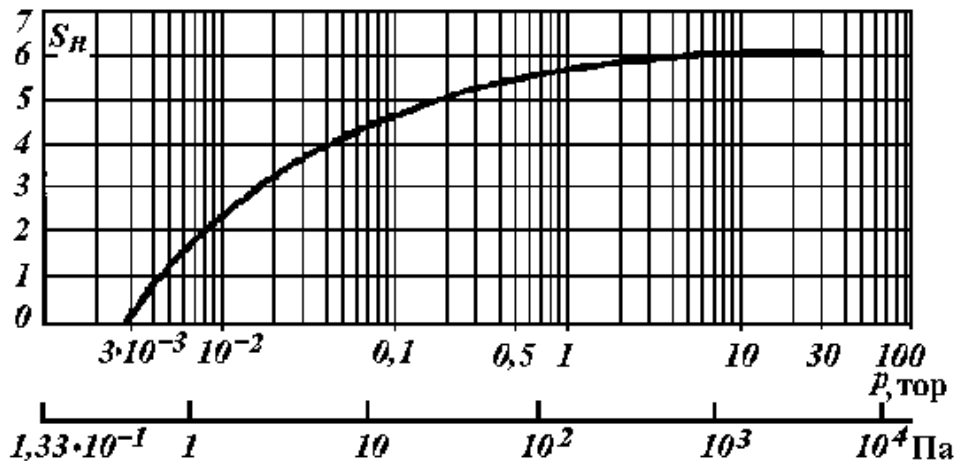


Рис. 17.4

Перш ніж розраховувати тривалість відкачки від атмосферного тиску до межі, коли починається в'язкісний режим, порівняємо провідність вакуумпроводу і швидкодію насоса.

Швидкодія насоса у цих межах дорівнює 5,8 л/с (див. рис. 17.4), а провідність вакуумпроводу:

$$U_g = 1,88 \cdot 10^{-5} \frac{(32)^4 \cdot 760}{104,2} = 72 \text{ л/с},$$

тобто остання значно більша.

Тепер знаходимо загальний об'єм, що відкачується, а потім приведений об'єм, враховуючи, що коефіцієнт політропи для повітря  $n = 1,2$  і остаточно тривалість відкачки

$$V_z = V_{вк} + V_{напр} + V_{затв} = \frac{\pi}{4} (400^2 \cdot 500 + 260^2 \cdot 200 + 320^2 \cdot 320) \cdot 10^6 = 99,2 \text{ л},$$

$$V_{пр} = \frac{99,2}{1,2} = 82,7 \text{ л},$$

$$t_1 = 2,3 \frac{82,7}{5,8} \lg 760 = 95 \text{ с}.$$

Далі знайдемо тривалість відкачки в межах в'язкісного і молекулярно-в'язкісного режиму, тобто від 1 Торр до 0,312 Торр.

Спочатку знайдемо загальну провідність вакуумпроводу та послідовно з'єднаного з ним електромагнітного клапана ДУ-32 ( $l_{кл} = 120 \text{ мм}$ ,  $d = 32 \text{ мм}$ ) для в'язкісного режиму.

Вплив наявності колін на вакуумпроводі враховуємо введенням ефективною довжини за формулою  $l_{ef} = l + 1,33nd$ , де  $n$  – число колін.

Провідність вакуумпроводу знайдемо за формулою:

$$U_{вн} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l_{ef}} p_{в.м-в} (\text{м}^3/\text{с}),$$

а клапана -

$$U_{в.кл} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{ml_{кл}} p_{в.м-в} (\text{м}^3/\text{с}),$$

де  $m$  – уточнюючий множник, який вибираємо в межах від 2 до 3.

Загальну провідність вакуумної магістралі знаходимо за формулою послідовного з'єднання:

$$U_{заг} = \frac{U_{вп} \cdot U_{кл}}{U_{вп} + U_{кл}},$$

$$l_{еф} = 1,04 + 1,33 \cdot 2 \cdot 0,032 = 1,125 \text{ м};$$

$$U_{вп} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} 41,6 = 5,27 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} = 52,7 \text{ л/с};$$

$$U_{кл.в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{2,5 \cdot 0,12} 41,6 = 0,1977 \text{ м}^3/\text{с} = 198 \text{ л/с};$$

$$U_{заг} = \frac{52,7 \cdot 198}{52,7 + 198} = 41,6 \text{ л/с}.$$

Використовуємо формулу (17.11) і знаходимо тривалість відкачки у в'язкісному режимі:

$$t_2 = \frac{83 \cdot 87}{41,6} \left( \frac{1}{41,6} - \frac{1}{133} \right) + 2,3 \frac{83}{5,8} \lg \frac{133}{41,6} = 19,5 \text{ с}.$$

Тепер залишилося знайти тривалість відкачки до заданого тиску, тобто від  $0,312 \text{ Торр}$  до  $4 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$ .

Оскільки ці межі тиску відповідають молекулярно-в'язкісному режиму течії газу, то необхідно буде використовувати і відповідні формули для розрахунку провідності вакуумпроводу і клапана, а також враховувати зміну швидкодії насоса. У зв'язку з цим поділимо цей діапазон тиску на такі відрізки: 1 – від  $41,6 \text{ Па}$  до  $20 \text{ Па}$ ; 2 – від  $20 \text{ Па}$  до  $10 \text{ Па}$ ; 3 – від  $10 \text{ Па}$  до  $5,32 \text{ Па}$  і на кожному знайдемо середній тиск.

При розрахунках на останньому відрізку необхідно врахувати граничний тиск насоса ВН-2 МГ ( $p_{ср} = 3,06 \text{ Па}$ ) і задане газовиділення.

Провідність вакуумпроводу в молекулярно-в'язкісному режимі знайдемо за формулою:

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{d^4}{l_{еф}} \frac{p_1 + p_2}{2} + 122 \cdot \frac{d^3}{l_{еф}} \cdot b;$$

провідність клапана –

$$U_{кл.м-в} = U_{кл.м} + \frac{U_{кл.в} - U_{кл.м}}{p_v - p_m} (p_i - p_m),$$

де  $p_i$  - середній тиск на відповідному відрізку,  $U_{кл.в}$ ,  $U_{кл.м}$  - провідність клапана у в'язкісному і молекулярному режимі відповідно. Провідність клапана у молекулярному режимі визначається як 10 % від провідності отвору, тобто  $U_{кл.м} = 0,1 \cdot 36,4 \cdot S \sqrt{T/\mu}$ , де  $S$  – площа отвору. Для повітря ця формула буде

такою  $U_{кл.м} = 9,1 \cdot d^2$ .

Виконаємо відповідні розрахунки для першого відрізка, на якому

$$p_{cp} = \frac{p_1 + p_2}{2} = \frac{41,6 + 20}{2} = 30,8 \text{ Па};$$

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} \cdot 30,8 + 122 \cdot \frac{(0,032)^3}{1,125} \cdot 0,8 = 0,042 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{кл.м-в} = 9,1 \cdot (0,032)^2 + \frac{0,198 - 0,0093}{41,6 - 0,624} (30,8 - 0,624) = 0,148 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{заг} = \frac{0,042 \cdot 0,1485}{0,042 + 0,1485} = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Оскільки середня швидкодія насоса на цьому відрізку приблизно така, як і раніше, то відповідно до загальної формули тривалість відкачки на цьому відрізку буде:

$$t_3 = 2,3 \frac{83 \cdot (5,8 + 33)}{5,8 \cdot 33} \lg \frac{41,6}{20} = 12,3 \text{ с}.$$

Розраховуємо тривалість відкачки на другому відрізку, на якому  $p_{cp} = 15 \text{ Па}$ :

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} \cdot 15 + 122 \cdot \frac{(0,032)^3}{1,125} \cdot 0,9 = 0,022 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{кл.м-в} = 9,1 \cdot (0,032)^2 + \frac{0,198 - 0,0093}{41,6 - 0,624} (15 - 0,624) = 0,076 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{заг} = \frac{0,022 \cdot 0,076}{0,022 + 0,076} = 0,017 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Середня швидкодія насоса на цьому відрізку  $S_n \approx 4,5 \text{ л/с}$  (рис. 17.4), тому тривалість відкачки:

$$t_4 = 2,3 \frac{83 \cdot (4,5 + 17)}{4,5 \cdot 17} \lg \frac{20}{10} = 16,2 \text{ с}.$$

На останньому відрізку, де середній тиск  $p_{cp} = 7,66 \text{ Па}$ , необхідно врахувати зростання граничного тиску, що досягається у вакуумній системі через газовиділення зі стінок вакуумної системи (або конструктивних елементів).

Спочатку аналогічно знаходимо загальну провідність вакуумної магістралі:

$$U_{вп.м-в} = 1,36 \cdot 10^3 \frac{(0,032)^4}{1,125} \cdot 7,66 + 122 \cdot \frac{(0,032)^3}{1,125} \cdot 1,0 = 0,0133 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{кл.м-в} = 9,1 \cdot (0,032)^2 + \frac{0,198 - 0,0093}{41,6 - 0,624} (7,66 - 0,624) = 0,042 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$U_{заг} = \frac{0,0133 \cdot 0,042}{0,0133 + 0,042} = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Середня швидкодія насоса на цьому відрізку  $S_n \approx 1,6 \text{ л/с}$ . Тому відповідна середня швидкість відкачки системи буде:

$$S_o = \frac{S_n \cdot U_{заг}}{S_n + U_{заг}} = \frac{1,6 \cdot 10}{1,6 + 10} = 1,38 \text{ л/с.}$$

Додатковий до граничного тиск, що створюється потоком газовиділення, це  $p_{зв} = Q_{зв} / S_o$ , а граничний тиск насоса ВН-2МГ  $p_{зр} = 3,06 \text{ Па}$  і тоді загальний граничний тиск у вакуумній системі буде:

$$p_{з.зр} = p_{зв} + p_{зр} = 2,43 / 0,00138 + 3,06 = 3,24 \text{ Па}$$

Тривалість відкачки на останньому відрізку

$$t_5 = 2,3 \frac{83 \cdot (1,6 + 10)}{1,6 \cdot 10} \lg \frac{10 - 3,24}{5,32 - 3,24} = 70,85 \text{ с.}$$

Остаточно загальна тривалість відкачки вакуумної системи від атмосферного тиску до заданого буде:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 = 95 + 19,5 + 12,3 + 16,2 + 70,85 \approx 214 \text{ с.}$$

### *Запитання для самоперевірки*

1. З яких головних елементів складається вакуумна система?
2. Як розрізняють численні вакуумні системи за ступенем отриманого вакууму і чим вони відрізняються?
3. Який газовий закон називають політропним?
4. Наведіть загальний вираз для розрахунку часу відкачки вакуумної системи.
5. Коли необхідно враховувати вплив граничного тиску при розрахунках часу відкачки?
6. Як знаходять додатковий до граничного тиск, що створюється газовиділенням у вакуумній системі?
7. Як ураховують у розрахунках згини вакуумних магістралей?
8. Як розраховують провідність клапана ?

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. – М.: Мир, 1964. – 715 с.
2. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. - М.: Высш.шк., 1990. – 320 с.
3. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высш.шк., 1967. – 352 с.
4. Ландау Л. Д., Ахиезер А. И., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. Механика и молекулярная физика. - М.: Наука, 1969. – 400 с.
5. Фролов Е. С., Русак Ф. А. и др.. Вакуумные системы и их элементы.- М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.
6. Королев Б. И. и др.. Основы вакуумной техники.- М.: Наука, 1975. – 463 с.
7. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем.- М.: Энергия, 1971. – 304 с.
8. Шепілко Є. В. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу Ваккумна техніка. Харків: ХДАМГ, 2003. 22 с.
9. Волкова З. П., Хотин В. М. Материалы электровакуумного производства.- Л.: Энергия, 1980. – 216 с.
10. Данилин Б. С. Вакуумное нанесение тонких пленок.- М.: Энергия, 1967. – 312 с.
11. Минайчев В. Е. Вакуумное оборудование для нанесения пленок.- М.: Энергия, 1978. – 304 с.

## Довідкові дані

## Одиниці вимірювання тиску та їх співвідношення

<b>1 Па = <math>10^{-5}</math> бар</b>	<b>1 мм.рт.ст. = 1 Торр</b>
<b>1 Па = <math>10^{-3}</math> п'єза</b>	<b>ГПа (ГектоПаскаль) = <math>6 \cdot 10^9</math> Па</b>
<b>1 Па = <math>7,50 \cdot 10^{-5}</math> Торр</b>	Техн.атмосф.( <i>ат</i> ), <b>1 ат = <math>9,8 \cdot 10^4</math> Па</b>
<b>1 п'єза (pz) = <math>10^{-3}</math> Па</b>	Фізичн.атмосф.( <i>атм</i> ), <b>1 атм = 760 Торр</b>

## Основні фізичні сталі

Заряд електрона, <i>e</i>	$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ К
Маса спокою електрона, <i>m<sub>e</sub></i>	$m_e = 9,8 \cdot 10^{-31}$ кг
Абсолютний нуль температури	$0\text{К}^0 = -273^0\text{С}$
Універсальна газова стала, R	$R = 8,32$ Дж/(моль · К <sup>0</sup> )
Атомна одиниця маси, а.о.м.	$1\text{а.о.м.} = 1,6 \cdot 10^{-27}$ кг
Число Авогадро, <i>N<sub>A</sub></i> (число молекул в молі речовини)	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ 1/моль
Стала Больцмана, <i>k</i>	$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К <sup>0</sup>

*Навчальне видання*

**ШЕПІЛКО Євген Володимирович**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

з курсу

**“ВАКУУМНА ТЕХНІКА”**

*(для студентів 3 курсу денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки  
6.050701 “Електротехніка та електротехнології”  
спеціальності “Світлотехніка і джерела світла”)*

Відповідальний за випуск *С. Л. Бухарін*

Редактор *Д. Ф. Курильченко*

Комп’ютерне верстання *О. А. Балашова*

План 2012, поз. 107 Л

---

Підп. до друку 23.03.2012  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60x84/16  
Ум. друк. арк. 7,47  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)  
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:  
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.