КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Радіофізичний факультет

С.М.Гойса, Л.В.Іщук, Н.В.Воробйова

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу загальної фізики (розділ 2, "Молекулярна фізика") частина I

Видавнича лабораторія радіофізичного факультету Київського університету імені Тараса Шевченка

Київ 2009

УДК 539.18 (075.8)
ББК 22.383я73

Рецензент
д-р фіз.-мат. наук, проф. Ю.С.Жаркіх

Гойса С.М., Іщук Л.В., Воробйова Н.В.

Методичні вказівки до лабораторних робіт із курсу загальної фізики (розділ 2, "Молекулярна фізика") частина І.

Перша частина методичних рекомендацій до лабораторних робіт з курсу “Молекулярна фізика” повністю присвячена визначенню молекулярних характеристик газів. В роботі 1 використовується методика ультразвукового зондування газів, яка дозволяє на сучасному експериментальному рівні визначити швидкість розповсюдження ультразвуку в газах, сталу адіабати для різних газів та знайти склад газової суміші. В роботах 2 і 3 вивчаються явища переносу в газах, визначаються коефіцієнти теплопровідності та в’язкості, що дозволяє оцінити ефективний газокінетичний переріз розсіювання та розміри молекул газів. Робота 4 присвячена методам отримання та вимірювання вакууму, визначенню параметрів складових вакуумної установки.

В кожній роботі коротко викладена фізична суть явищ, описані експериментальні установки та методики вимірювань, наведені завдання, контрольні запитання та рекомендована література. Виконання вказаних лабораторних робіт має сприяти більш глибокому розумінню фізичних явищ в газах.

Для студентів фізичних та радіофізичних спеціальностей університетів.

Затверджено вченою радою радіофізичного факультету
(протокол №2 від 9 жовтня 2006 року)

УДК 539.18(075.8)
ББК 22.383я73

© Гойса С.М., Іщук Л.В., Воробйова Н.В., 2009
© Видавнича лабораторія радіофізичного факультету
Київського університету імені Тараса Шевченка

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ДЕЯКИХ ГАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДУВАННЯ

Мета роботи: опанування методикою ультразвукового зондування газів; визначення за допомогою ультразвукового зондування сталої адіабати для різних газів; визначення процентного вмісту окремих компонент у газовій суміші.

Прилади та обладнання: ультразвуковий дефектоскоп, гумові балони з одноатомним, двоатомним і триатомним газами, гумові балони з сумішшю одноатомного та двоатомного газів.

Завдання:

1. Виміряти швидкість ультразвуку в різних газах:
   – одноатомному (Ar або He),
   – двоатомному (N_2) та
   – триатомному (CO_2)

і за виміряними значеннями обчислити сталу адіабати γ.

2. Порівняти отримані результати із розрахованими за класичною теорією теплоємності газів.
3. Виміряти швидкість ультразвуку в суміші газів і обчислити молярну масу суміші та процентний вміст у ній окремих компонент (молярну та вагову концентрації).
4. Визначити похибки вимірів.

Короткі теоретичні відомості

Молярні теплоємності при сталому тискові C_p і сталому об'ємі C_V, відношення яких $\gamma = C_p / C_V$ називають сталою чи показником адіабати, є важливими характеристиками газів. За величиною γ можна визначити будову молекул газу: одноатомні вони чи багатоатомні. Також можна отримувати інформацію про характер теплового руху молекул: чи рухаються вони тільки поступально; або рухаються одночасно поступально з обертанням навколо осей, які проходять через центр мас; або ж відбуваються ще й коливання атомів, які входять до складу молекули, відносно її центра мас.

Згідно класичної теорії теплоємностей ідеальних газів, яка ґрунтується на гіпотезі Больцмана про рівномірний розподіл енергії за ступенями вільності, молярна теплоємність при сталому об'ємі однокомпонентного газу визначається як

$$C_V = \left(\frac{dU}{dT}\right)_V = \frac{i}{2}R, \qquad (1)$$

де U – внутрішня енергія моля газу; T – його абсолютна температура; R – універсальна газова стала. При цьому

$$i = 3 + r + 2s, \qquad (2)$$

де 3 – число поступальних, r – обертальних та s – коливальних ступенів вільності.

Число ступенів вільності молекули дорівнює числу незалежних змінних, які однозначно визначають її енергію. Щоб задати положення молекули у просторі, треба задати координати її центра мас (поступальні ступені вільності); задати числа, які визначають орієнтацію молекули (обертальні ступені вільності). Обертальних ступенів вільності два для лінійних молекул і три – для нелінійних. Також необхідно задати числа, які визначають відносне положення атомів у молекулі. Число коливальних ступенів вільності визначається зі співвідношення

$$s = 3n - 3 - r, \tag{3}$$

де n – число атомів у молекулі.

За законом про рівномірний розподіл енергії, на кожен поступальний та обертальний ступінь вільності припадає енергія $\frac{1}{2}kT$, де k – стала Больцмана. На коливальний ступінь вільності припадає удвічі більша енергія – kT, оскільки при коливаннях треба враховувати не тільки кінетичну, але й потенціальну енергію. Тому у формулі (2) i не дорівнює числу ступенів вільності.

Користуючись рівнянням Майєра

$$C_p = C_V + R,$$

отримуємо вираз для γ однокомпонентного газу

$$\gamma = \frac{C_V + R}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \tag{4}$$

З формули (4) випливає, що якщо експериментально виміряти γ, то можна визначити i, тобто отримати інформацію про будову молекули.

Один із способів визначення сталої адіабати газів полягає у вимірюванні швидкості υ розповсюдження звукових хвиль у газі.

Звуковими або акустичними хвилями називаються пружні хвилі малої інтенсивності. Розповсюдження пружних хвиль у середовищі в загальному випадку не пов'язано з переносом речовини. Воно полягає в залученні у вимушені коливання все більш і більш частинок середовища, віддалених від джерела коливань. *Під частинкою середовища слід розуміти малий елемент його об'єму, розміри якого набагато більше міжмолекулярних відстаней і в якому міститься достатньо велика кількість молекул*.

Звукова хвиля в газі являє собою послідовність областей стиснення та розрідження газу, яка розповсюджується у просторі, тобто тиск у кожній точці простору відчуває періодичне відхилення тиску Δp від середнього значення тиску p. З точки зору молекулярно-кінетичної теорії, якщо в одному місці спостерігається більша густина молекул, то молекули будуть переходити з цієї області в область із меншою густиною. З точки зору звукової хвилі треба, щоб молекули, які вилітають із області із більшою густиною і тиском, передавали свій імпульс молекулам, які знаходяться в області розрідження. *Звук виникає в тому випадку, коли розміри області зміни густини і тиску набагато більші за середню відстань, яку проходять молекули між зіткненнями.*

Коливання густини і пов'язані з ними коливання температури у звуковій хвилі відбуваються настільки швидко, а теплопровідність газів настільки мала, що для таких процесів теплообмін не грає суттєвої ролі. Різниці температур між згущенням та розрідженнями газу в звуковій хвилі не встигають вирівнюватись. Тому, *розповсюдження звуку можна вважати адіабатним процесом.*

З хвильового рівняння для розповсюдження звука в середовищі випливає, що

$$\upsilon^2 = \frac{dp}{d\rho},$$

де ρ – густина газу.

Користуючись умовою адіабатності процесу, для ідеального газу маємо вираз для швидкості звукової хвилі

$$\upsilon = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \tag{5}$$

де μ – молярна маса газу. Або з (5) стала адіабати

$$\gamma = \frac{\mu}{RT}\upsilon^2. \tag{6}$$

виміривши

У випадку, коли розчин містить суміш одноатомного та двоатомного газів (наприклад, He та N_2), для визначення вмісту компонентів у суміші слід скористатися формулою

$$\upsilon_{\text{сум}}^2 = RT\frac{\gamma_{\text{сум}}}{\mu}, \tag{7}$$

де $\mu = \frac{\mu_1 x + \mu_2}{1+x}$ – молярна маса суміші, μ_1 та μ_2 – молярні маси компонентів суміші, $x = \frac{\nu_1}{\nu_2}$ – відношення кількості молів ν_1 газу першого сорту до кількості молів ν_2 газу другого сорту. Тоді $\gamma_{сум}$ – стала адіабати суміші, яка визначається співвідношенням

$$\gamma_{\text{сум}} = \frac{xC_{V_1} + xR + R + C_{V_2}}{xC_{V_1} + xC_{V_2}}, \tag{8}$$

де C_{V_1} та C_{V_2} – молярні теплоємності компонентів суміші при сталому об'ємі газу.

Примітка : формули (7) і (8) вивести самостійно.

Опис установки для вимірювань

Для вимірювання швидкості ультразвуку в різних газах використовується ультразвуковий імпульсний дефектоскоп УКБ–1М. Прилад дозволяє вимірювати час розповсюдження ультразвукових коливань у межах від 0 до 5600 мкс.

Два п'єзоперетворювачі, один з яких слугує джерелом ультразвукових коливань, а другий – їх приймачем, з'єднані з УКБ–1М провідниками (рис.1). П'єзоперетворювачі знаходяться на одній вертикальній лінії: один (1) – зафіксований на платі, на якій розташований універсальний штатив (3), другий (2) – на універсальному штативі (3). За допомогою штативу можна змінювати відстань між поверхнями п'єзоперетворювачів. Відстань між п'єзоперетворювачами відлічується за шкалою на штативі. Досліджувані гази знаходяться в гумових балонах. Для вимірювання швидкості ультразвуку в досліджуваних газах балон (4) затискається між двома перетворювачами: джерелом та приймачем.

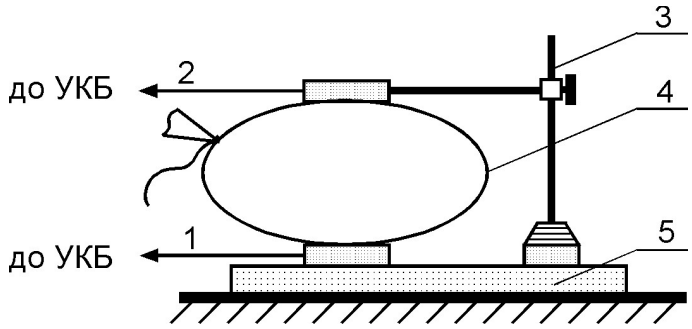

Рис. 1. Схема установки для вимірювання деяких газових характеристик
1 – приймач, 2– джерело ультразвукових коливань, 3 – штатив,
4 – балон з газом, 5 – плата

Вказівки до процесу вимірювань

Згідно з інструкцією включити ультразвуковий дефектоскоп і виконати *калібрувальні виміри:* змінюючи відстань l між поверхнями п'єзоперетворювачів (наприклад, від 6 см до 18 см), через кожні 1-2 см виміряти час t, за який ультразвук проходить цю відстань в повітрі. За формулою

$$\upsilon = l / t$$

обчислити його швидкість та сталу адіабати γ (6).

Знайти похибку вимірів величин υ та γ і, порівнюючи отримані результати з табличними значеннями цих величин, зробити висновок про відсутність чи наявність систематичної похибки.

Після цього затиснути камеру з повітрям між двома п'єзоперетворювачами і, змінюючи відстань між джерелом і приймачем з кроком 0,5…1 см, зробити 8-10 вимірів часу проходження ультразвуку. Обчислити υ і γ та порівняти отримані результати з попередніми. *Зробити висновок про вплив стінок камери на результати вимірів*.

Виміри повторити із камерами, що містять інші гази.

Для визначення концентрації одного з компонентів у суміші газів, виміряти швидкість розповсюдження ультразвуку в ній.

Якщо гази, що утворюють суміш, одноатомні (чи двоатомні), то взявши значення γ, отримане за формулою (6), із попередніх вимірів відповідно для одночи двоатомного газів, визначити молярну масу розчину

$$\mu = \frac{\nu_1 \mu_1 + \nu_2 \mu_2}{\nu_1 + \nu_2}.$$

Знаючи молярну масу кожного газу, визначити м*олярну концентрацію одного з компонентів розчину*

$$K_\mu = \frac{\mu_1 - \mu}{\mu_2 - \mu_1} \cdot 100\% \tag{9}$$

і його *масову концентрацію*

$$K_b = \frac{\mu_1(\mu_2 - \mu)}{\mu(\mu_2 - \mu_1)} \cdot 100\%. \tag{10}$$

Якщо газ являє собою суміш відомих одноатомного та двоатомного газів, то для визначення молярної концентрації одного з компонентів визначають відношення кількості молів газу першого сорту до кількості молів газу другого сорту x. Для цього в рівняння (7) підставити експериментально виміряне значення швидкості звуку в суміші $\upsilon_{\text{сум}}$, відомі значення молярних мас газів μ_1 та μ_2, і теплоємностей C_{V_1} та C_{V_2}, і розв'язати рівняння відносно x. Молярна концентрація газу другого сорту, яку шукаємо, буде дорівнювати

$$K_\mu = \frac{\nu_2}{\nu_1 + \nu_2} \cdot 100\%. \tag{11}$$

Примітка **:** рівняння (7) має більше одного кореня. Обґрунтувати і вибрати єдиний фізично правильний розв'язок.

Контрольні запитання

1. Дати визначення поняттям ідеальний газ, ступені вільності.
2. Чому дорівнює число i у формулі (2) для ідеальних одно-, дво- і триатомного газів?
3. Чим в межах класичної теорії теплоємностей ідеального газу відрізняються залежності енергії поступального, обертального та коливального руху молекул від температури?
4. За яких умов справедлива робоча формула (6)?
5. Як пов'язані теплоємності C_p та C_V? Виведіть це співвідношення для ідеального газу.
6. Що таке звукова хвиля?
7. Чому процес розповсюдження звукової хвилі в газі є адіабатним?
8. Фізична причина відмінності C_p і C_V.
9. Як розрахувати число коливальних ступенів вільностей?
10. Які недоліки класичної теорії теплоємностей ідеальних газів і як вони долаються в квантовій теорії?

Література

1. *Кікоїн І.К., Кікоїн А.К.* Молекулярна фізика / За ред. В.А. Григорової. – К., 1968. – С. 56–79.
2. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики, Т.2: Термодинамика и молекулярная физика. – М.,1979. – С.80-82.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ

Мета роботи: визначити коефіцієнт теплопровідності повітря.

Прилади та обладнання: герметично запаяна мідна трубка з дротиною із провідника, джерело постійного струму, магазин опорів, амперметр, вольтметр, насос, манометр Бурдона.

Завдання:

1. Виміряти коефіцієнт теплопровідності повітря при різних градієнтах температури та одному і тому ж тискові повітря.
2. Виміряти коефіцієнт теплопровідності повітря при одному і тому ж градієнтові температури і при різних тисках повітря.
3. Оцінити похибки вимірів.
4. Пояснити залежність коефіцієнта теплопровідності газу χ від тиску.

Короткі теоретичні відомості

Передача тепла від більш нагрітого тіла до менш нагрітого тіла може у випадку газоподібного тіла здійснюватись трьома способами: теплопровідністю, конвекцією, випромінюванням.

При теплопровідності газів кількість тепла dq, що проходить за одиницю часу через площадку dS, перпендикулярну до напрямку градієнта абсолютної температури $\frac{dT}{dn}$, визначається законом Фур'є

$$dq = -\chi \frac{dT}{dn} dS , \qquad (1)$$

де χ – коефіцієнт теплопровідності газу.

Вираз для χ залежить від умов, за яких відбувається теплопровідність, а саме від співвідношення між довжиною вільного пробігу молекул газу λ і характерним розміром системи d, в якій відбувається цей процес. Згідно теорії явищ переносу, якщо $\lambda << d$ (в цьому випадку суттєву роль в теплопровідності відіграють зіткнення між молекулами газу), то коефіцієнт теплопровідності

$$\chi = \frac{1}{3}\bar{\upsilon}\lambda\rho c_V, \tag{2}$$

де $\bar{\upsilon}$ – середня швидкість теплового руху молекул газу, ρ – густина газу, c_V – його питома теплоємність за сталого об'єму.

Аналіз виразу (2) показує, що в цьому випадку коефіцієнт теплопровідності не залежить від тиску. А залежність його від температури визначається температурною залежністю $\bar{\upsilon}$, λ, c_V.

При $\lambda >> d$ не має сенсу враховувати зіткнення між молекулами (зіткнення відбуваються в основному з конструктивними елементами системи) і

$$\chi \sim \rho \sim n. \tag{3}$$

Із співвідношень (3) випливає, що χ буде прямо пропорційним тиску при $\lambda >> d$. На такій залежності побудовані теплові манометри різних типів (наприклад, манометр опору, термопарний манометр).

Для визначення коефіцієнту теплопровідності газу часто застосовують наступний метод (дослід Шлейєрмахера). Вздовж осі циліндричної трубки, в середині якої знаходиться досліджуваний газ, натягується тонкий дріт. Якщо дріт нагрівати струмом, а температуру стінки трубки підтримувати сталою, то в напрямку радіуса трубки встановиться градієнт температури. За одиницю часу через будь-яку коаксіальну з дротиною циліндричну поверхню радіуса r пройде кількість тепла

$$Q = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi r l, \tag{4}$$

де l – довжина дротини.

Для стаціонарного процесу $Q = \text{const}$. Будемо вважати, що різниця температур дротини T_1 і трубки T_2 мала порівняно із їх власними температурами $(T_1 - T_2 << T_1, T_2)$. Тоді можна знехтувати температурною залежністю коефіцієнта теплопровідності. Проінтегрувавши рівняння (4), маємо

$$Q \ln \frac{r_2}{r_1} = -\chi \cdot 2\pi l (T_2 - T_1), \tag{5}$$

де r_1 – радіус дротини, r_2 – внутрішній радіус трубки.

Враховуючи, що різниця абсолютних температур трубки і дротини $(T_1 - T_2)$ дорівнює різниці їх температур $(t_2 - t_1)$ за шкалою Цельсія, вираз для χ набуває вигляду

$$\chi = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi l (t_1 - t_2)}, \tag{6}$$

де температура мідної трубки t_2 дорівнює кімнатній температурі.

Знехтуємо конвекцією і тепловим випромінюванням. Тоді у формулі (6) Q – це кількість тепла, яка переноситься від дротини до стінок трубки шляхом теплопровідності за одиницю часу і дорівнює потужності, що виділяється електричним струмом у дротині

$$Q = I^2 R,$$

де I – струм, який протікає через дротину, R – її опір.

Отже, у формулі (6) всі величини, крім температури дротини, вимірюються безпосередньо. Для визначення температури дротини можна скористатися тим, що опір металів у досить широкому температурному інтервалі лінійно залежить від температури як

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot t), \tag{7}$$

де R – опір металу при температурі t, R_0 – опір при 0°С, α – температурний коефіцієнт опору.

Із співвідношення (7) випливає, що

$$t_1 - t_2 = \frac{R_1 - R_2}{\alpha R_0}. \tag{8}$$

Значення R_0 можна визначити, пропускаючи через дротину малі струми. Тоді можна вважати, що дротина практично не нагрівається, а її температура дорівнює температурі трубки t_2 (кімнатній)

$$R_0 = \frac{R_2}{(1 + \alpha t_2)}, \tag{9}$$

де R_2 – опір дротини при кімнатній температурі.

Підставляючи формули (8) і (9) в (6), отримаємо

$$\chi = \frac{I^2 R_1 R_2 \alpha \ln(r_2 / r_1)}{2\pi l (R_1 - R_2)(1 + \alpha t_2)}, \tag{10}$$

де R_1 – опір дротини при температурі t_1.

При визначенні χ за формулою (10) одержане значення буде завищеним, оскільки ми знехтували теплом, що передається випромінюванням, конвекцією та через електричні провідники, які підведені до дротини. Вплив конвекції на передачу тепла від дротини до стінки можна оцінити, роблячи виміри при різних тисках. Кількість тепла, що переноситься конвекцією, зменшується із зменшенням тиску газу.

Опис установки для вимірювань

Схема експериментальної установки наведена на рис.1. Мідна трубка 1 герметично закрита з обох кінців і має відгалуження для під’єднання форвакуумного насоса. Всередині трубки вздовж її осі натягнута дротина із провідника 2. Трубка вертикально закріплена у штативі. Для виміру тиску у трубці використовується манометр 3. Посудина 4 використовується як баластний об'єм для підтримки сталого тиску.

Від джерела сталого струму 5 до дротини підводиться струм, який можна регулювати магазином опорів 6. Величина струму контролюється амперметром 7. Спад напруги на дротині визначається за допомогою вольтметра 8.

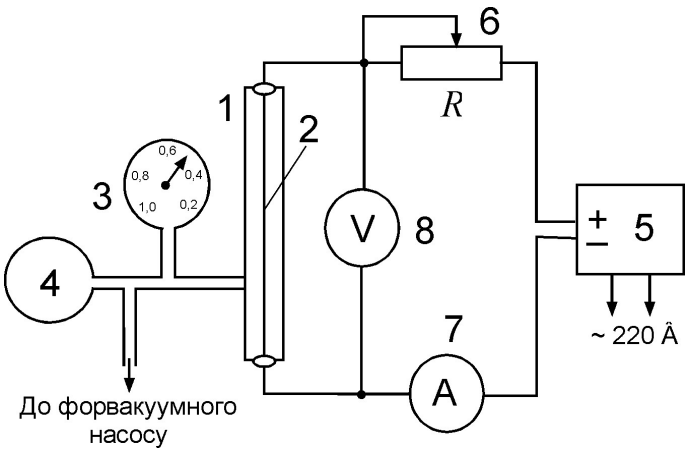

Рис. 1. Схема установки для вимірювання коефіцієнту теплопровідності газів : 1 – вертикально розташована мідна трубка; 2 – дротина із сталі; 3 – манометр; 4 – баластний об'єм; 5 – джерело постійного струму; 6 – магазин опорів; 7 – амперметр; 8 – вольтметр .

Вказівки до процесу вимірювань

Визначити опір дротини R_2 при кімнатній температурі t_2, пропускаючи через неї малі струми, які не викликають її розігріву (30 мА, 40 мА, 50 мА, 60 мА, 70 мА, 80 мА), регулюючи величину струму за допомогою магазину опорів 6 (рис.1). При кожному значенні струму, яке показує амперметр 7, вольтметром 8 виміряти спад напруги на дротині та за законом Ома обчислити опір дротини за формулою

$$R = \frac{U}{I}.$$

Різні градієнти температури створюють протіканням через дротину великих струмів (0,5 А; 0,6 А; 0,7 А; 0,8 А; 0,9 А; 1 А; 1,1 А), які суттєво розігрівають дротину.

Щоб прослідкувати за можливим впливом тиску в системі на коефіцієнт теплопровідності повітря, провести вимірювання при струмі ~ 1,1 А і значеннях тиску p=0,8 $p_{\text{атм}}$; p=0,6 $p_{\text{атм}}$; p=0,4 $p_{\text{атм}}$; p=0,2 $p_{\text{атм}}$. Для зниження тиску в трубці використовують насос Комовського (або інший).

Після закінчення вимірів обчислити: коефіцієнт теплопровідності за формулою (10), довжину вільного пробігу, ефективний газокінетичний переріз розсіювання молекул, оцінити похибки вимірів. З отриманих результатів зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Отримайте із загального рівняння явищ переносу в газах рівняння теплопровідності.
2. Поясність фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності, визначте його розмірність в системі СІ.

3. Від яких параметрів газу, за яких умов і як саме залежить коефіцієнт теплопровідності газу? Поясніть залежність довжини вільного пробігу молекул λ від температури і тиску.

4. Які припущення робилися при одержанні робочої формули (10), як це впливає на отримані значення χ?

5. Яким чином в експерименті можна зменшити вплив втрати тепла на дротині за рахунок конвекції?

6. Що таке градієнт деякої фізичної величини?

Література

1. *Кікоїн І.К., Кікоїн А.К.* Молекулярна фізика / За ред. В.А. Григорової. – К.,1968. – С. 100–115.
2. Физический практикум / Под ред. В.И.Ивероновой. – М., 1962. – С.158–162.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ ПОВІТРЯ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи: визначити коефіцієнт внутрішнього тертя (коефіцієнт в'язкості) повітря капілярним методом.

Прилади: скляна капілярна трубка, мікроманометр, кран, скляна ємність з водою, таймер.

Завдання:

І. Виміряти об'єм повітря q, що протікає через капіляр за одиницю часу для різних значень різниці тисків Δp на його кінцях.

2. Побудувати графік залежності $q = f(\Delta p)$. За прямолінійною ділянкою графіка обчислити коефіцієнт в'язкості газу.

3. Обчислити число Рейнольдса, що відповідає переходу від ламінарного потоку до турбулентного.

4. За відомими значеннями температури і тиску газу обчислити довжину вільного пробігу і ефективний газокінетичний переріз розсіювання молекул повітря.

5. Оцінити похибку вимірів.

Короткі теоретичні відомості

В'язкість газів – це їх властивість, яка проявляється як під часу руху самого газу, так і будь-якого тіла в ньому. Розрізняють три режими течії газів по трубопроводах: турбулентний, ламінарний та молекулярний.

Характер течії газу визначається величиною відношення енергії рухомого потоку до енергії, необхідної для подолання сил внутрішнього тертя, і називається числом Рейнольдса Re. Наближений вираз числа Рейнольдса має вигляд

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho R}{\eta} \upsilon_{cp},$$

де ρ – густина газу, R – радіус трубки, по якій протікає газ, η – коефіцієнт в'язкості, υ_{cp} – середня швидкість напрямленого руху молекул газу в потоці.

Чим менше число Рейнольдса, тим більшу роль відіграють сили в'язкості при рухові газу. Дослідним шляхом встановлено: потік газу буде ламінарним, якщо $\mathrm{Re} < 1100$.

За умови ламінарності течії газу і через наявність внутрішнього тертя різні циліндричні шари будуть рухатись без завихрень з різною швидкістю паралельно один одному. Виникнення в'язкості пояснюється на підставі молекулярно-кінетичної теорії газів. У газі, що рухається, на швидкість хаотичного теплового руху накладається швидкість напрямленого переносного руху υ, однакова для всіх молекул даного шару газу і різна для різних шарів. Молекули, які переміщуються завдяки хаотичному рухові з більш швидкого шару до більш повільного, мають більшу кількість руху $m\upsilon$, ніж молекули повільного шару. Тим самим вони прискорюють цей шар, і навпаки. Для змочуючого внутрішню поверхню трубки газу швидкість найбільша на осі труби і дорівнює нулю біля її стінок.

Теорія явищ переносу в газах у випадку ламінарної течії дає наступний вираз для коефіцієнта в'язкості

$$\eta = \frac{1}{3} \bar{\upsilon} \rho \lambda, \tag{1}$$

де $\bar{\upsilon}$ – середня швидкість теплового руху молекул, λ – середня довжина вільного пробігу. У свою чергу

$$\lambda = \frac{1}{\sigma n}, \tag{2}$$

де σ – ефективний газокінетичний переріз розсіювання молекул, n – їх концентрація.

При ламінарному режимі протікання газу по трубці радіусом R за формулою Пуазейля визначається об'єм газу Q, який перетікає через трубку за t секунд,

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta l} t, \tag{3а}$$

або об'єм газу, що перетікає через трубку за одиницю часу

$$q = \frac{Q}{t} = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \eta l}, \tag{3б}$$

де Δp – різниця тисків на кінцях трубки, l – її довжина.

Отже, для визначення η потрібно знати величини q, Δp (вимірюються) та R, l (задаються конструкцією трубки). Визначивши експериментально η, можна за формулами (1) та (2), обчислити λ та σ.

Опис установки для вимірювань

Капіляр, по якому протікає газ (у даній роботі це повітря), з'єднаний з мікроманометром, що вимірює різницю тисків на його вході і виході. Кран дозволяє регулювати швидкість витікання води з герметично закритої ємності, яка визначає швидкість протікання повітря по капіляру. Сталій швидкості протікання газу по капіляру відповідає певна різниця тисків Δp на його кінцях.

На ємність з водою нанесена шкала, проградуйована у півлітрах. За нею визначається об'єм води, який витікає з ємності за певний проміжок часу. Він дорівнює об'єму газу Q, що протікає через капіляр за той же проміжок часу. Останній вимірюється за допомогою таймера.

Вказівки до процесу вимірювань

1. Уважно ознайомитись з порядком роботи з мікроманометром (опис додається до лабораторної роботи).

2. Під'єднати розгерметизовану ємність через кран до крану холодного водопостачання. Відкрити обидва крани (рис.1) та набрати воду у ємність. Закрити крани, відокремити систему водопостачання від установки, ємність загерметизувати. Поступово відкриваючи кран (при цьому почне виливатися вода з ємності і утвориться різниця тисків на кінцях капіляра), встановити певну різницю тисків Δp на кінцях капіляра. Краще починати виміри з малих різниць тисків (мала швидкість витікання води, а значить і газу).

3. Показання мікроманометра записують після того, як встановиться стаціонарний потік (перестане змінюватись Δp). У випадку малих змін показів мікроманометра Δp за час протікання об'єму газу Q беруть середнє значення для різниці тисків Δp.

4. Виміри об'єму газу Q, що протікає за проміжок часу t, провести не менше, як для 10-12 різних значень різниць тисків Δp на кінцях капіляра. За результатами вимірів побудувати залежність $q = f(\Delta p)$. Експериментальні дані і результати розрахунку занести у таблицю

№ п/п	t, с	L_1, поділки	L_2, поділки	$L = \frac{L_1 + L_2}{2}$, поділки	Δp, Па	q, м^3/с
1						
2						
3						
…						
11						

12						

де L_1 – довжина стовпчика рідини у вимірювальній трубці мікроманометра на початку вимірювання, L_2 – довжина стовпчика рідини у вимірювальній трубці мікроманометра у кінці вимірювання. За отриманими результатами побудувати залежність $q = f(\Delta p)$.

5. За формулою (3б), у випадку ламінарної течії між q і Δp існує прямопропорційна залежність. Побудувавши графік залежності $q = f(\Delta p)$ оцінити, при якій різниці тисків відбувається перехід від ламінарного потоку до турбулентного та обчислити число Рейнольдса, що відповідає цьому переходу.

та його похибку для прямолінійної ділянки графіка $q = f(\Delta p)$. У цьому випадку рівняння прямої

$$y = bx + a,$$

набуває вигляду

$$q = \frac{\pi R^4}{8\eta l}\Delta p,$$

де $y = q$, $x = \Delta p$, $a = 0$, $b = \frac{\pi R^4}{8\eta l}$ – тангенс кута нахилу прямої. Звідси

$$\eta = \frac{\pi R^4}{8lb}.$$

З одержаних значень знаходять середню величину η та її випадкову похибку (для довірчої імовірності $\alpha = 0{,}95$).

Оскільки $\frac{\Delta_{вип}\eta}{\bar{\eta}} = \frac{\Delta b}{b} = \frac{C_{an} \cdot S_b}{b}$, то

$$\Delta_{вип}\eta = \bar{\eta} \cdot \frac{C_{an} \cdot S_b}{b},$$

де $C_{\alpha n}$ – коефіцієнт Стьюдента, S_b – середня квадратична похибка визначення кутового коефіцієнта b.

Невиключену систематичну (приладну) складову похибки непрямого вимірювання обрахувати за формулою

$$\Delta_{вип}\eta = \bar{\eta} \cdot \sqrt{\left(\frac{4\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right) + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2}; \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} = \frac{\Delta L}{L}; \quad \frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta K}{K},$$

де $d = 2R$ – діаметр капіляра, L – довжина стовпчика рідини в мікроманометрі для даної величини Δp, K – висота, на яку змінюється положення рівня стовпчика води у ємності за час витікання об'єму води Q, який дорівнює об'єму газу, що проходить через капіляр за час t.

7. Записати кінцевий результат із урахуванням похибки вимірювання.

8. За знайденим значенням коефіцієнта в'язкості повітря обчислити ефективний газокінетичний переріз розсіювання молекул повітря.

Контрольні запитання

1. Яка природа виникнення тертя між шарами газу, що рухаються?
2. Із загального рівняння для явищ переносу вивести рівняння для явища внутрішнього тертя.
3. Що таке коефіцієнт в'язкості? Визначити його фізичний зміст, вказати розмірність в системі СІ.
4. Від яких характеристик газу, за яких умов та як саме залежить коефіцієнт в'язкості газу?
5. Назвіть три режима течії газів по трубі. Які умови визначають режими течії газів по трубопроводах?
6. Що характеризує число Рейнольдса?
7. За яких умов справедлива формула Пуазейля?
8. Поясніть принцип дії мікроманометра.

Література

1. *Кікоїн І.К., Кікоїн А.К.* Молекулярна фізика. К., 1968, С. 176-183.
2. Физический практикум / Под ред. В.И.Ивероновой. – М., 1962. С. 169-171.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ТЕХНІКА ОТРИМАННЯ І ВИМІРЮВАННЯ ВАКУУМУ

Мета роботи : ознайомлення з методами отримання і вимірювання вакууму.

Прилади і обладнання: вакуумна установка ВУП-5М.

Завдання:

1. Детально ознайомитись з вакуумною установкою та окремими деталями, насосами і приладами для вимірювання тиску.
2. Дослідити процес відкачування системи форвакуумним насосом. Виміряти і побудувати залежність тиску p від часу відкачування t. Побудувати графік залежності $\ln p = f(t)$. За лінійними ділянками залежності визначити сталу відкачування C установки. Визначити граничний вакуум, який одержують за допомогою форвакуумного насосу.
3. Дослідити процес відкачування системи дифузійним насосом. Виміряти залежність тиску від часу відкачування. Побудувавши графік залежності $\ln p = f(t)$, за лінійними ділянками визначити швидкість відкачування установки. За допомогою іонізаційного манометра оцінити граничний вакуум, який одержують дифузійним насосом.

Короткі теоретичні відомості

Техніка вакууму відіграє все більш важливе значення в сучасних науці, техніці і промисловості. Наведемо тільки деякі приклади застосування вакуумної техніки:

1. Електронна промисловість, де вакуум є неодмінною умовою функціювання електровакуумних приладів (телевізори, рентгенівські трубки, газові лазери, тощо).
2. Мікроелектроніка і оптична промисловість (нанесення плівок, хімічне травлення, молекулярно-променева епітаксія, іонне легування).
3. Ядерна фізика і фізика космосу (прискорювачі заряджених частинок, імітатори космічних умов, тощо).
4. Металургія, хімічна і легка промисловості (вакуумне переплавлення металів, отримання надчистих матеріалів, металізація пластмас, каталіз, отримання різних фармацевтичних препаратів).
5. Машинобудування (електронно-променеве зварювання, нанесення зміцнювальних покриттів на ріжучі інструменти).

Тому знання основ вакуумної техніки є необхідним для сучасних експериментаторів і інженерів.

Дамо визначення вакууму. *Вакуумом прийнято називати стан газу в обмеженому стінками об'ємі при тискові нижче атмосферного*. Стан розрідження газу у відкачуваному об'ємі можна кількісно оцінювати абсолютним тиском. Тоді поняття "вакуум" набуває значення фізичної величини, яку можна вимірювати в одиницях тиску. У вакуумній техніці тиск, як правило, вимірюється у міліметрах ртутного стовпчика або в торрах (1 мм. рт. ст. = 1 торр $\approx$ 133 Па). В залежності від величини тиску розрізняють наступні ступені вакууму:

1. технічний (10^3…1 торр);
2. попередній вакуум (форвакуум) (1…10^{-3} торр);
3. високий (10^{-3}…10^{-8} торр);
4. надвисокий (10^{-9}…10^{-11} торр);
5. ультранадвисокий вакуум (< 10^{-12} торр);

Виявляється, що така класифікація вакууму не завжди є точною: деякі фізичні явища (наприклад, теплова і ізотермічна ефузія) можуть відбуватися як при умовах розрідження газу, так і при атмосферному тискові. Тому використовують іншу класифікацію вакууму, яка ґрунтується на співвідношенні між числом взаємних зіткнень молекул газу і числом їх зіткнень зі стінками вакуумної системи. Це так зване число Кнудсена K_H, яке визначається як відношення довжини вільного пробігу молекул λ до характерного розміру вакуумної системи d

$$K_H = \lambda / d .$$

Основне рівняння вакуумної техніки
Кінетика процесу відкачування

На рис.1 наведена схема найпростішої вакуумної установки. Вона складається з трьох основних елементів: об'єму 1, який відкачується (реципієнт); пристрою 2, який відкачує реципієнт (насос); трубопроводу 3, який з'єднує за допомогою кранів 4 реципієнт з насосом. Для кількісної характеристики проце-

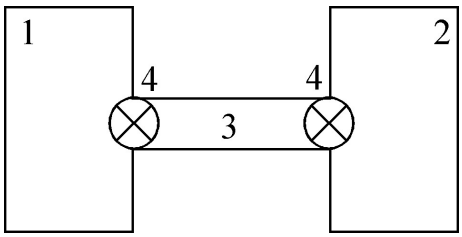

Рис. 1. Схема вакуумної установки:
1 – реципієнт; 2 – насос; 3 – трубопровід; 4 – крани.

су відкачування вводять поняття про кількість газу, яка визначається його масою або кількістю молекул. У вакуумній техніці прийнято кількість газу Q' визначати як добуток тиску p на об'єм V газу. У випадку, коли газ знаходиться у термодинамічно рівноважному стані,

$$Q' = pV = NkT ,$$

де k – стала Больцмана, N – число молекул газу , T – абсолютна температура. Частіше за все цікавить кількість газу Q, віднесена до одиниці часу. Наприклад, кількість газу, яка виходить з певного об'єму за одну секунду

$$Q = p\frac{dV}{dt}.$$

Для кількісної характеристики роботи насосу вводять поняття швидкості відкачування S_H. Швидкість відкачування насосу S_H являє собою об'єм газу V_H, який відкачується за одиницю часу при тискові p_2 в насосі, а саме

$$S_H = \frac{dV_H}{dt} = \frac{1}{p_2}\frac{p_2 \cdot dV_H}{dt} = \frac{Q_H}{p_2}.$$

У вакуумній техніці S_H найчастіше вимірюється у [літр·с$^{-1}$]. Сучасні насоси, які використовуються для отримання високого і надвисокого вакууму, мають величини S_H в діапазоні 10…10^6 літр·с$^{-1}$. Швидкість відкачування насосів залежить від тиску p_2 . Зазвичай насос починає працювати при деякому тискові p_0. Існує також граничний тиск p_∞ (граничний вакуум насосу), при якому S_H прямує до нуля $(S_H \approx 0)$. Тобто насос не може забезпечити вакуум з $p < p_\infty$. Значення p_0, p_∞ і залежність $S_H = f(p_2)$ різні для насосів різних типів.

Процес відкачування об'єму характеризують швидкістю відкачування S_P. Це об'єм газу, який видаляється за одиницю часу з реципієнту при тискові p_1 у ньому,

$$S_P = \frac{dV_P}{dt} = \frac{1}{p_1} \cdot \frac{p_1 dV}{dt} = \frac{Q_P}{p_1}.$$

Характеристикою трубопроводу є його пропускна здатність U. Це кількість газу Q_T, яка проходить через трубопровід за одиницю часу при різниці тисків на його кінцях $p_1 - p_2$, тобто

$$U = \frac{Q_T}{p_1 - p_2}.$$

Іноді у вакуумній техніці вводять поняття опору трубопроводу $Z = U^{-1}$.

При кількісному розгляді процесу відкачування треба відрізняти стаціонарний стан від нестаціонарного. В стаціонарному стані кількість газу, що відкачується, не змінюється з часом. Реально стаціонарні стани зустрічаються рідко. Але можна ввести поняття квазістаціонарної течії газу. Для неї кількість газу, що відкачується, слабко залежить від часу. Для такої течії відсутня зміна кількості газу Q вздовж напрямку відкачки, тобто

$$Q_H = Q_P = Q_T = Q.$$

Скориставшись цією умовою, знайдемо зв'язок між величинами S_H, S_P і Q.

$$Q = S_H \cdot p_2 = S_P \cdot p_1 = U \cdot (p_1 - p_2)$$

Звідси отримаємо

$$\frac{1}{S_P} = \frac{1}{U} + \frac{1}{S_H} \text{ ; або } S_P = \frac{U}{1 + S_H/U}. \qquad (1)$$

Співвідношення (1) носить назву *основного рівняння вакуумної техніки*. З нього, передусім , випливає:

а) При постійній пропускній здатності трубопроводу U і будь-якій швидкості відкачування насосу S_H максимальна ефективна швидкість відкачування реципієнту S_P не перевищує U. Швидкість відкачування насосу може бути реалізована повністю тільки, якщо насос безпосередньо з’єднаний з вакуумною камерою ($U \to \infty$).

б) Щоб забезпечити високу швидкість відкачування реципієнту, треба не тільки потурбуватися про швидкість відкачування насосу, але й про можливість зменшити опір трубопроводу.

Розглянемо кінетику процесу відкачування, тобто встановимо закон, за яким змінюється з часом тиск в реципієнті. Нехай вакуумна система має постійний об’єм V, з якого при тискові p відкачується газ зі швидкістю S_P. Крім того, будемо вважати, що за рахунок течій (негерметичність системи), або за інших причин за час dt в об’єм V поступає кількість газу Q_g. Із закону збереження маси випливає, що швидкість зміни кількості газу в реципієнті дорівнює різниці кількості газу, що натікає до реципієнту, і тої, що відкачується з об’єму. Тому швидкість зміни кількості газу в об’ємі визначається виразом

$$\frac{d(pV)}{dt} = V\frac{dp}{dt} = Q_g - Q, \qquad (2)$$

де $Q = p \cdot S_P$. Отже маємо

$$S_P = -\frac{V}{p} \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{Q_g}{p} \qquad (3)$$

Це диференціальне рівняння дозволяє знайти зміну тиску у відкачуваному реципієнті при одночасних процесах відкачування і натікання. Для того, щоб знайти залежність $p = f(t)$ необхідно знати залежність від тиску величин Q_g і S_P. Задача знаходження залежностей $S_P(p)$ зводиться до знаходження залежностей $S_H(p)$ і $U(p)$ (рівняння (1)).

Розглянемо випадок, коли швидкість натікання газу і пропускна здатність трубопроводу не залежать від тиску. Виявляється також, що для деяких насосів величина S_H в досить широкому діапазоні значень тиску не залежить від тиску. Якщо в реципієнті досягнуто граничного вакууму $p = p_\infty$, тобто, коли тиск в реципієнті перестає змінюватись, і $dp/dt = 0$, з рівняння (3) випливає, що

$$p_\infty = \frac{Q_g}{S_P}.$$

Використовуючи ці умови, після інтегрування рівняння (3), отримаємо

$$p = p_\infty + (p_0 - p_\infty) \cdot \exp[-\frac{S_P}{V} \cdot t], \qquad (4)$$

де p_0 – тиск в момент часу $t = 0$. Якщо ж $p_0 >> p_\infty$, то з (4) маємо

$$p = p_0 \cdot \exp[-\frac{S_P}{V} \cdot t]. \qquad (5)$$

Користуючись рівнянням (4), можна експериментально визначити S_P, а потім U і S_H.

Методи отримання вакууму (насоси)

Інтервал тисків, з якими мають справу у вакуумній техніці, дуже великий: $10^3 \ldots 10^{-12}$ торр, і жоден з насосів (крім кріогенних) не дозволяє отримувати вакуум в такому широкому інтервалі значень тисків. Тому на практиці для отримання високого і надвисокого вакууму використовують послідовно кілька насосів різних типів. За своїм призначенням насоси поділяють на два класи:

а) низьковакуумні (форвакуумні) насоси. Вони починають працювати від атмосферного тиску і дозволяють створювати розрідження до ~10^{-3} торр;

б) високовакуумні насоси, які починають працювати після отримання попереднього вакууму і можуть давати вакуум аж до ~10^{-12} торр.

Інша класифікація насосів ґрунтується на фізичних явищах (закономірностях), які закладені в основу роботи насосів. Це:

а) сорбційні насоси; б) іонні насоси; в) механічні насоси; г) насоси змішаного типу.

Принцип дії насосів першого класу ґрунтується на явищах сорбції, хемосорбції (випарювальні насоси). На явищах фізичної адсорбції та конденсації ґру-

нтується принцип дії адсорбційних і конденсаційних насосів (цеолітові насоси, сублімаційні насоси, кріоадсорбційні, тощо).

В основі роботи іонних насосів лежить керований рух попередньо заряджених молекул газу в електричних і магнітних полях.

В насосах змішаного типу для відкачування використовуються кілька фізичних явищ. Наприклад, в магніторозрядному насосі використовується напрямлений рух іонізованих молекул газу в електричному і магнітному полях і явище сорбції.

Механічні насоси поділяються на об'ємні та молекулярні. Насоси об'ємного типу здійснюють відкачування за рахунок періодичної зміни об'єму робочої камери насосу. Цей тип насосів з'явився раніше за інші і набув широкого розповсюдження в багатьох конструктивних варіантах: поршневі, ротаційні, тощо. Вони використовуються для отримання форвакууму. Принцип дії молекулярних насосів заснований на передачі кількості руху молекулам газу, що відкачуються, від рухомих поверхонь насосу або від молекул робочої речовини (рідина, пара, газ). Наприклад, водоструменеві, ежекторні, бустерні, турбомолекулярні насоси. Вони використовуються для отримання як форвакууму, так і високого і надвисокого вакууму.

В лабораторній роботі використана промислова вакуумна установка ВУП-5М. У ній для відкачування робочої камери використовуються механічні пластинчато-роторний і дифузійний насоси. Розглянемо детальніше їх будову і принцип роботи.

Пластинчато-роторний насос

Цей механічний насос об'ємного типу (рис.2) є технічним розвитком принципу відкачки, що використовується в звичайному поршневому насосі.

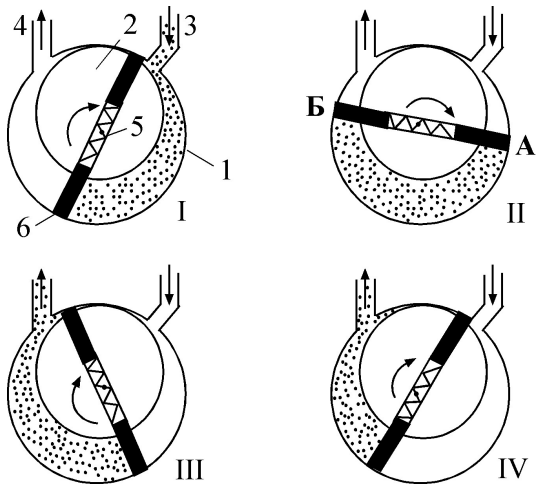

Рис. 2 Принципова будова пластинчато-роторного насосу.
1-камера; 2-барабан; 3,4-відповідно впускний та випускний патрубки;
5-пружина; 6-пластини.

Камера 1 з ротором, який виконує роль поршня, занурена в бак. Бак наповнено технічним маслом (на рис.2 бак не зображено). Ротор, що обертається,

складається з барабану 2 та двох пластин 6, розміщених в пазах барабану. Між пластинами містяться пружини 5, що притискають пластини до циліндричної стінки камери. Вісь обертання ротору зміщена по відношенню до осі циліндричної камери так, що барабан при обертанні постійно стикається зі стінкою камери. На рисунку стрілками показані також впускний 3 та випускний 4 патрубки. Римськими цифрами показані чотири основні положення ротору, які він займає послідовно під час одного півоберту. Стрілка вказує напрям обертання.

В положенні II пластина А, що змістилася вниз, створила розширення з боку впускного отвору. У це розширення входить газ із вакуумної системи. Одночасно пластина Б, змістившись вгору, створила стиснення в бік випускного отвору.

В положенні III пластина А провела “всмоктування” газу, а пластина Б виштовхнула стиснутий газ через клапан випускного отвору (клапан на рис.2 не наведено). Положення IV співпадає з початковим положення I, з тією лише різницею, що пластини помінялись місцями. Далі робота насосу продовжується в описаному порядку. Таким чином, кожна пластина виконує подвійну роль: з одного боку, вона “тягне” за собою газ, що входить із впускного отвору (клапану), з іншого – стискає газ для його виштовхування з насосу через випускний отвір. При неперервному обертанні ротору відбувається відкачка вакуумної системи, до якої приєднується насос впускним патрубком.

Сучасні насоси такого типу дозволяють досягти розріджень до тисків $10^{-2}…10^{-3}$ торр.

Дифузійний насос

Робота дифузійних насосів ґрунтується на захопленні молекул відкачуваного газу струменем пари робочої рідини, найбільш вживані з яких є ртуть і мастила. Тому ці насоси називають іноді пароструминними. Оскільки їх дія пов'язана з дифузією частинок відкачуваного газу в струмінь пари, то такі насоси також називають дифузійними.

Конструкція та принцип дії дифузійного насоса проілюстровані на рис.3. Він складається з нагрівача 1, робочої рідини 2, паропроводу 3 з тарілчастим соплом 4, конденсатора 5. Робоча рідина знаходиться на дні насоса, де за допомогою нагрівача нагрівається і випаровується. Пара піднімається по паропроводу і виходить через тарілчасте сопло. В соплі відбувається перетворення енергії тиску пари в кінетичну енергію, і пара з великою швидкістю виходить з

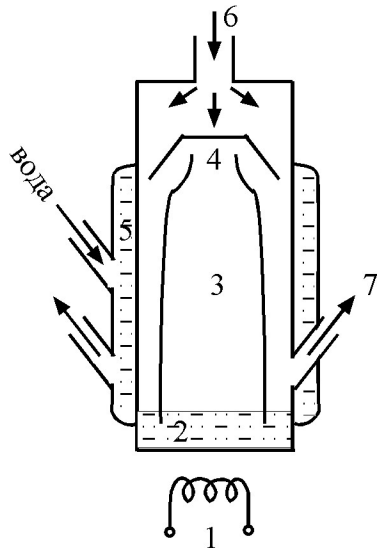

Рис.3. Конструкція дифузійного насоса :
1-нагрівач; 2-робоча рідина; 3-паропровід; 4-тарільчасте сопло;
5-конденсатор; 6-вхідний патрубок; 7-вихідний патрубок.

сопла. Потім вона потрапляє на стінки насоса (конденсатора), які охолоджують водою, конденсується на них і стікає на дно насоса. Таким чином, нагрівач, паропровід, сопло і конденсатор забезпечують безперервну циркуляцію робочої речовини.

Тиск пари в струмені значно більший за тиск відкачуваного газу, який на початку дії насоса настільки малий, що довжина вільного пробігу молекул приблизно дорівнює розмірам вхідного патрубка 6, який сполучає насос з реципієнтом. Це означає, що зіткнення молекул зі стінками відбувається частіше, ніж взаємні зіткнення. Тому єдиною причиною потрапляння молекул газу в насос є випадковий збіг напрямку швидкості молекул з напрямком згори донизу. Тобто відкачуваний газ за рахунок самодифузії потрапляє до струменя пари. При зіткненні з молекулами пари молекули газу отримують імпульс в напряму руху струменя пари. Тиск пари в струмені досягає 10 торр (досить великий). При такому тискові зворотною дифузією молекул можна знехтувати : молекули “захоплюються” струменем. Таким чином, основне призначення струменя пари

зводиться до того, щоб передати частину свого імпульсу молекулам відкачуваного газу і спрямувати їх донизу до вихідного патрубка 7, де тиск дорівнює тиску попереднього вакууму (10^{-3}…1 торр). Звідси газ відкачується в атмосферу форвакуумним насосом. Оскільки швидкість дифузії у вакуумі дуже велика, то дифузійні насоси мають дуже велику швидкість відкачування.

Звичайно, сучасні насоси мають кілька сопел, що діють послідовно (багатоступінчасті насоси). Це дозволяє використати ефект фракціювання мастил і, в залежності від роду робочої речовини, одержувати розрідження 10^{-7}…10^{-10} торр.

Техніка вимірювання тиску. Манометри

Тиск є найбільш важливою з величин, які вимірюються в техніці вакууму. Виміри інших величин, що зустрічаються в техніці вакууму, таких як швидкості відкачування і натікання, часто зводяться до вимірів тиску. Прилади, що слугують для вимірів повного тиску називають вакуумметрами (вакуумні манометри). У випадку суміші газів часто доводиться вимірювати парціальні тиски її складових. Для цього використовують мас-спектрометри різних конструкцій. Вони ж застосовуються для виявлення негерметичностей у вакуумних камерах. Ця процедура має велике практичне значення при експлуатації вакуумних приладів.

Принцип дії практично всіх манометрів ґрунтується на залежності від тиску певної фізичної величини, яка може бути виміряна. Насамперед, це в’язкісні, теплові, радіометричні, компресійні, іонізаційні манометри. Розглянемо принцип дії та будову термопарного та іонізаційного манометрів, які найбільш широко використовуються на практиці і за допомогою яких вимірюється тиск в установці ВУП-5М.

Термопарний манометр

В умовах достатнього розрідження, коли середня довжина вільного пробігу молекул стає близькою до характерного розміру вакуумної системи або більшою за нього, теплопровідність газу починає помітно залежати від тиску. Причому при зменшенні тиску теплопровідність газу теж зменшується. Тому, якщо в системі знаходиться нагріте тіло, то при зменшенні тиску за рахунок погіршення тепловідбору воно почне нагріватися. Це дозволяє за зміною температури нагрітого тіла визначити тиск. На цьому явищі побудовані теплові манометри, одним з різновидів яких є термопарний манометр.

Термопарний манометр складається з датчика (манометрична лампа), зв’язаного з об’ємом, де вимірюється тиск, та виносного блоку, за допомогою якого встановлюється режим роботи манометра та вимірюється термоелектрорушійна сила термопари. На рис.4 наведена конструкція термопарного датчика. Вона складається з підігрівача 1 і термопари 2, які запаюються в скляний або металевий балон 3. Спай термопари 4 зв’язаний з нагрівачем надійним тепловим контактом. Матеріалом термопари є пара металів (наприклад, Pt і Pt-Rh) або сплавів (хромель-копель). Підігрівач виготовляється з платинового дроту. Дія манометра заснована на реєстрації термопарою змін температури дроту, викликаних зміною тиску газу. Зміну температури фіксують по покажчи-

кам мілівольтметра, що вимірює електрорушійну силу термопари. Підігрівач нагрівається пропусканням постійного струму від джерела, встановленого у виносному блоці.

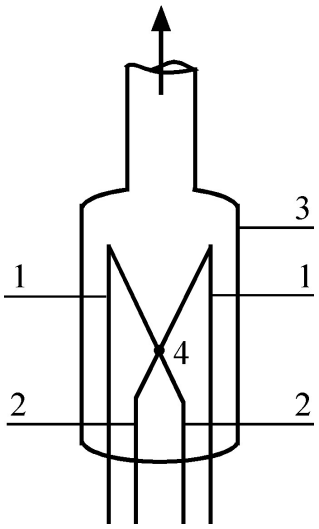

Рис. 4 Конструкція термопарного манометра:
1 – підігрівач; 2 – термопара; 3 – балон; 4 – спай термопари.

Діапазон тисків, які вимірює термопарний манометр, складає 1…10^{-4} торр. В області високих тисків він обмежений умовою, щоб довжина вільного пробігу була б порядку характерних розмірів вакуумної системи. В області малих тисків – тим, що відбір тепла від нагрітого тіла через газ стає дуже малим у порівнянні з тепловідбором через металеві вводи датчика та за рахунок теплового випромінювання: подальше зменшення тиску практично не впливає на температуру нагрітого тіла. Тиск визначається за градуювальною кривою, яка є індивідуальною для кожного манометра і додається до лабораторної роботи.

Іонізаційний термоелектронний манометр

В основі роботи іонізаційних манометрів лежить явище іонізації, тобто вибивання електрона з атома або молекули газу і перетворення їх в позитивно заряджений іон і електрон. Вільні заряди, що виникли, обумовлюють електричний струм в розрідженому газі.

В термоелектронних іонізаційних манометрах іонізація газу відбувається завдяки співударам електронів, які вилітають з розжареного катоду (термоелектронна емісія) з атомами та молекулами залишкового газу. Манометр складається з манометричного датчика, зв’язаного з об’ємом вакуумної системи, та виносного блоку. За допомогою останнього встановляється режим роботи датчика та вимірюється іонний струм.

На рис.5 наведена схема датчика іонізаційного манометра ПМИ-2. Він являє собою трьохелектродну лампу з відростком для приєднання до відкачува-

ного об'єму і складається з катоду 1, сітки 2, колектора 3. Сітка моє додатній потенціал по відношенню до катоду і колектора. Тому електрони, які вилітають з катоду в результаті термоемісії, під дією прискорюючого поля спрямовуються до сітки. Оскільки сітка дуже прозора (рідка), значна частина електронів потрапляє в простір сітка-колектор, де і відбувається іонізація газу.

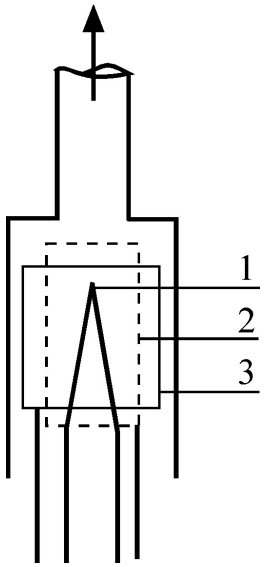

Рис.5. Схема датчика іонізаційного манометра :
1 – катод; 2 – сітка; 3 – колектор.

Колектор має невеликий від'ємний потенціал по відношенню до катоду, тому електрони в просторі сітка-колектор гальмуються і, не долітаючи до колектора, починають рух в зворотному напрямку. Деяка частина проходить крізь сітку і потрапляє в гальмуюче поле простору сітка-катод. Якщо електрон втратив частину своєї енергії на збудження або іонізацію молекул газу, то він не досягне катоду, а відіб'ється від нього і знову буде рухатись до сітки. Таким чином, значна частина електронів буде здійснювати кілька коливань в просторі катод – колектор перед тим, як потрапить на сітку. Завдяки таким коливанням збільшується шлях та час життя електронів, що вийшли з катоду, та збільшується імовірність іонізації газу в об'ємі датчика. При постійному струмі електронної емісії з катоду I_e, іонний струм I_i, як показують досліди, можна записати як

$$I_i = \alpha I_e \cdot p,$$

де α – коефіцієнт пропорційності, p – тиск газу, або

$$I_i = a \cdot p,$$

де величина a є сталою іонізаційного манометра, вона залежить від роду газу і конструктивних особливостей датчика. Величиною струму вторинних електронів можна знехтувати, тому що $I_i << I_e$. Таким чином, для вимірювання тиску газу іонізаційним манометром необхідно при заданому електронному струмі I_e виміряти іонний струм I_i на колектор і розділити на сталу a.

Константу a важко одержати розрахунком, тому іонізаційні манометри так само, як і термопарні, необхідно градуювати, порівнюючи їх показники з показ-

никами абсолютного манометра (наприклад, компресійного). Робоча область тиску, що вимірюється іонізаційними манометрами, досягає 8–10 порядків – від 10^{-2} до 10^{-12} торр.

Вакуумна система

Традиційними пристроями для одержання високого вакууму у великих об'ємах вважаються вакуумні системи на дифузійних та механічних форвакуумних насосах. На рис.6 показана схема типової вакуумної системи.

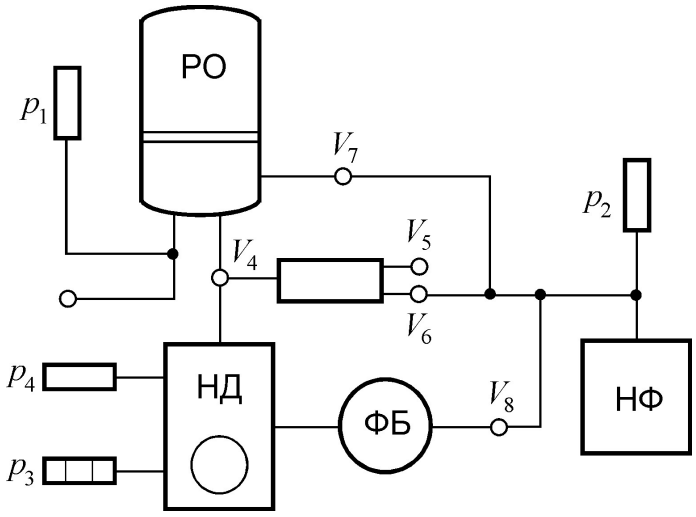

Рис.6. РО – об'єм робочий; НД – дифузійний насос; НФ – форвакуумний насос; $V_4 - V_8$ – клапани комутації; p_1, p_2, p_4 – манометри термопарні; p_3 – манометр іонізаційний; ФБ – форвакуумний балон. Клапани комутації $V_1 - V_3$ при виконанні лабораторної роботи не задіяні, тому на рисунку не зображені.

Робочий об'єм РО спочатку відкачується насосом попереднього розрідження (форвакуумний насос НФ). Він працює проти атмосферного тиску і забезпечує необхідний для дифузійного насоса НД випускний тиск. Дифузійний насос дає максимальну швидкість дії при випускному тиску 10^{-3} Тор. Для підтримки постійного випускного тиску між дифузійним насосом та форвакуумним встановлюють форвакуумний балон ФБ. На цей балон може працювати деякий час дифузійний насос при вимкненому форвакуумному насосі, якщо використовується обхідний канал відкачки об'єму РО. Клапани (затвори та крани) $V_4 - V_8$ дозволяють вимикати об'єм та різні частини системи в процесі відкачки. Манометричні датчики $p_1 - p_4$ дають можливість контролювати зміни тиску в різних частинах системи та вимірювати швидкість відкачки, натікання та газовиділення.

Вакуумну систему можна характеризувати величиною C, яка зв'язана із швидкістю відкачування. Можна показати, що для форвакуумного насоса за відсутності натікання газу справедливе співвідношення:

$$p(t) = p_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta V}{V}\right)^{-n \cdot t}, \qquad (6)$$

де p – тиск у момент часу t, p_0 – початковий тиск, ΔV – об'єм у форвакуумному насосі, в який засмоктується газ з реципієнта об'ємом V; n – число заповнень об'єму ΔV газом з реципієнта за секунду. Прологарифмувавши рівність (6), отримаємо

$$\ln \frac{p_0}{p} = n \cdot t \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta V}{V}\right) = C \cdot t, \qquad (7)$$

де $C = n \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta V}{V}\right)$. Із формули (7) видно, що C – стала. Для даної установки її можна визначити з графіка залежності $\ln \frac{p_0}{p} = f(t)$.

У випадку відкачування системи дифузійним насосом неперервної дії залежність $p(t)$ можна апроксимувати в певному інтервалі значень тиску рівнянням (5), яке можна записувати у вигляді

$$\ln \frac{p_0}{p} = \frac{S_P}{V} \cdot t = C' \cdot t, \qquad (8)$$

Співставлення (7) і (8) вказує, що стала C у формулі (7) має безпосередній зв'язок із швидкістю відкачування реципієнта S_P.

Порядок увімкнення вакуумного посту ВУП-5М і проведення вимірів

В установці передбачені ручний та автоматичний режими увімкнення. При виконанні лабораторної роботи використовується ручний режим. На передній панелі виносного пульту управління установки показана мнемосхема, якою необхідно користуватися при відкачуванні робочого об'єму. Спочатку форвакуумним насосом відкачуються форбалон і дифузійний насос. При цьому клапани $V_4 - V_7$ закриті, а клапан V_8 – відкритий.

При досягненні у дифузійному насосі попереднього вакууму вмикається підігрів дифузійного насоса. Після того, як НД доводиться до робочого стану, перекривається клапан V_8 і відкривається клапан V_7: починається відкачка РО. При цьому за допомогою манометричного датчика p_1 знімається залежність тиску p в робочому об'ємі від часу відкачування. Через деякий час після того, як в РО утворюється попередній вакуум, закривається клапан V_7 і відкриваються клапани V_8, V_4, і вся вакуумна система (РО) відкачується за лінією НФ-ФБ-НД-РО до високого вакууму. Залежність тиску в РО від часу відкачування дифузійним насосом змінюється за допомогою манометричних датчиків p_3 і p_1.

Управління клапанами здійснюється автоматично при вмиканні відповідного режиму відкачування.

Тиск вимірюється за допомогою перетворювачів ПМТ-2 (датчики p_1, p_2, p_4), розташованих на вакуумній системі. Для контролю тиску необхідно

натиснути відповідну кнопку (p_1, p_2, p_4) зони “Индикация” на пульті управління. При цьому значення цифрового індикатора відповідають терморушійній силі перетворювача, збільшеній у 100 разів. Вакуум в місці розташування перетворювача можна визначити за градуювальною кривою, що додається до установки.

Послідовність операцій при виконанні лабораторної роботи наступна:

1. Увімкнути кнопку “Сеть”. Повинна засвітитися світлова індикація під кнопкою.
2. Віджати всі кнопки на виносному пульті управління.
3. На виносному пульті управління натиснути кнопку “Ручн”.
4. Натиснути кнопку “НФ” (включення форвакуумного насоса). Повинна засвітитися світлова сигналізація. Датчик p_2 показує залишковий тиск, який створює НФ.
5. При досягненні залишкового тиску, який відповідає $\geq$ 300 у. о. за цифровим табло, натиснути кнопку “БФ”. При цьому будуть відкачуватись форвакуумний балон і дифузійний насос. Тиск на вході НД контролюється датчиком p_4. При досягненні залишкового тиску, який відповідає $\geq$ 300 у. о. за цифровим табло, необхідно включити водяне охолодження НД (відкрити кран подачі води).
6. Увімкнути дифузійний насос. Для цього натиснути кнопку “НД” на виносному пульті.
7. Через 90 хвилин після включення “НД” перевірити вакуум датчиком p_3. Для цього спочатку необхідно прогріти датчик. Режим прогріву p_3 включається одночасним натисканням кнопок “Накал” і “Эмис”. Через 15-20 хвилин віджати кнопку “Накал”. Натиснути кнопку “$\times 10^{-5}$”. При цьому на цифровому табло повинно бути контрольне значення 1000 $\pm$ 50 у. о. Віджати кнопку “Эмис”. Після цього на цифровому табло вказується робочий вакуум в мм. рт. ст. (торр). (з урахуванням множника, який вибирається кнопками “$\times 10^{-5}$” або “$\times 10^{-7}$”).
8. Відкачати робочий об’єм. Для цього при працюючому НД натиснути кнопку “ПВ” (попередній вакуум). Після досягнення вакууму $5 \cdot 10^{-2}$ торр (датчик p_1) натиснути кнопку “БФ”. Через деякий час натиснути кнопку “ВВ” (високий вакуум). Вакуум в робочому об’ємі вимірюється спочатку датчиком p_1, а потім, коли тиск в робочому об’ємі стане нижче ніж $5 \cdot 10^{-3}$ торр, датчиком p_3.

Контрольні запитання

1. Що таке вакуум?
2. Які ступені вакууму розрізняють в залежності від тиску?
3. Отримати основне рівняння вакуумної техніки. Його фізичний зміст.
4. Що таке пропускна здатність трубопроводу і від чого вона залежить?
5. В чому полягає принцип дії іонних насосів?
6. Принцип дії пластинчато-роторного насосу.

7. Принцип дії дифузійного насосу.
8. У чому полягає принцип дії термопарного манометру?
9. У чому полягає принцип дії іонізаційного манометру?
10. Поясніть, як визначити сталу відкачування C вакуумної установки.
11. Як можна експериментально визначити швидкість відкачування вакуумної установки?

Література

1. Королев Б. И. Основы вакуумной техники. – М. 1964.
2. Дешман С. Научные основы вакуумной техники. – М. 1964.
3. Кучеренко Е. Т. Справочник по физическим основам вакуумной техники. – К. 1981.
4. Грошковский Я. Техника высокого вакуума. – М. 1975. с. 662.

З М І С Т

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1
ВИЗНАЧЕННЯ ДЕЯКИХ ГАЗОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЗА ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДУВАННЯ….3
Короткі теоретичні відомості…….. 3
Опис установки для вимірювань……6
Вказівки до процесу вимірювань……6
Контрольні запитання……7
Література……8

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА
ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ……..8
Короткі теоретичні відомості……8
Опис установки для вимірювань……10
Вказівки до процесу вимірювань……11
Контрольні запитання……11
Література……12

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3
ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО
ТЕРТЯ ПОВІТРЯ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ……12
Короткі теоретичні відомості……12
Опис установки для вимірювань…… 14
Вказівки до процесу вимірювань…… 14
Контрольні запитання…… 16
Література…… 16

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4
ТЕХНІКА ОТРИМАННЯ І ВИМІРЮВАННЯ ВАКУУМУ……17
Короткі теоретичні відомості…… 17
Основне рівняння вакуумної техніки.
Кінетика процесу відкачування……18
Методи отримання вакууму (насоси)……. 21
Пластинчато-роторний насос……...21
Дифузійний насос……23
Техніка вимірювання тиску. Манометри……24
Термопарний манометр…… 24
Іонізаційний термоелектронний манометр…….. 25
Вакуумна система…….. 27
Порядок увімкнення вакуумного посту ВУП-5М
і проведення вимірів……...28

Контрольні запитання…….29
Література…….30

Навчальне видання

ГОЙСА Сергій Миколайович
ІЩУК Лариса Вадимівна
ВОРОБЙОВА Надія Володимирівна

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з курсу загальної фізики
(розділ 2, "МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА")
частина І

Підписано до друку 12.10.2008. Формат 60x80[16].
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний.
Наклад 150 примірників. Ум. друк. арк. 3.

Видавнича лабораторія радіофізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка