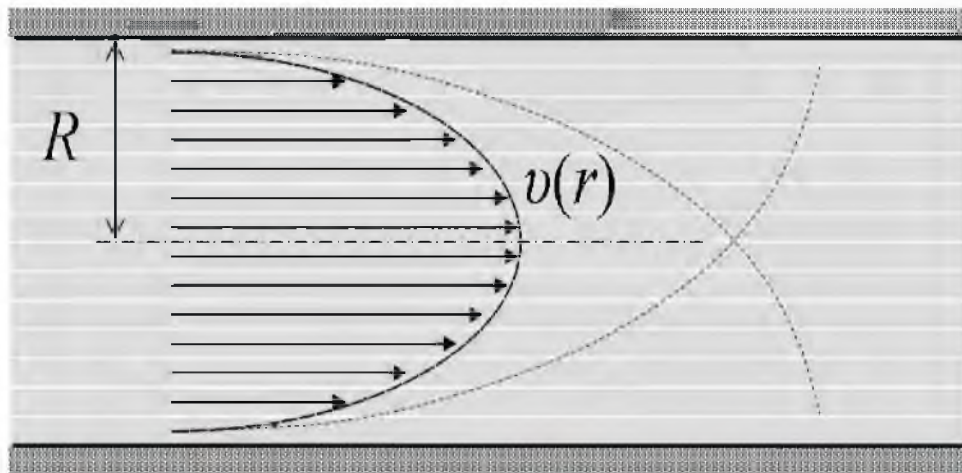


А.К.Дорош, Р.М.Мельник

МЕХАНІКА СУЦІЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

- закон Пуазейля для ламінарного руху рідин і газів у капілярах, визначення показників в'язкого тертя
- процеси переносу у газах, оцінка кінематичних параметрів, параметрів молекул газу



Закон Пуазейля

Протікання рідини через капіляр

У випадку близько розташованих двох поверхонь, між якими рухається рідина, або у перерізі вузької трубки, шари Прандтля перекриваються. Такі трубку чи зазор між поверхнями називають *капілярами* (від лат *capillaris* - волосний, тонкий як волос), а їх діаметр чи відстань між площинами - *капілярними*. Шари рідини ламінарного потоку будуть рухатися вздовж поверхонь капіляра з максимальною швидкістю найдалі від поверхонь. На Рис. 12 показано схематично пунктирними кривими fronti швидкостей шарів рідини при вільному ламінарному потоку з протилежного боку від поверхні, суцільною лінією наведено обвідну векторів швидкості при перекритті шарів Прандтля.

При тисках на кінцях капіляра P_1 і P_2 таких, що рух рідини є ламінарним, можна вважати перепади тиску $\Delta P = P_2 - P_1$ на всій довжині L рівним перепаду на довільно малій частині капіляра $\frac{\Delta P}{L} = \frac{dP}{dL}$. Якщо довжина капіляра набагато більша за його радіус $L \gg R$, то можна нехтувати особливостями потоку рідини на кінцях капіляра.

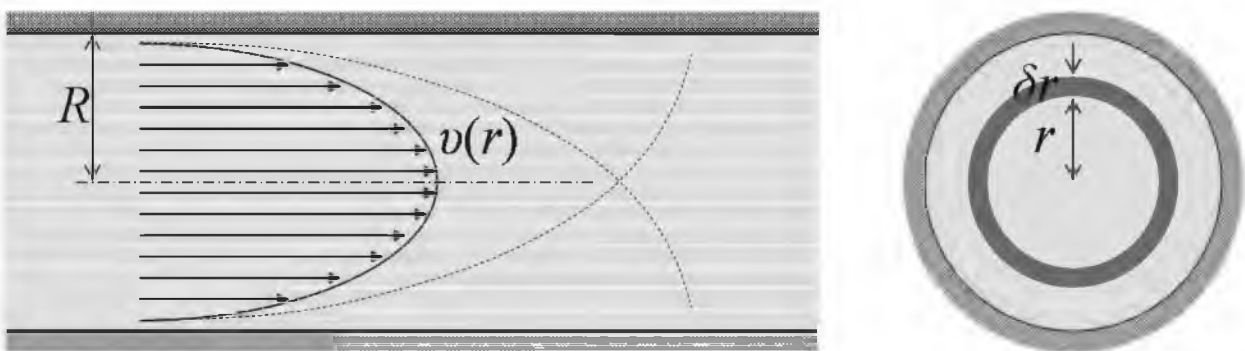


Рис. 12. Рідина рухається по круглому капіляру. Суцільна обвідна лінія показує фронт швидкостей руху шарів рідини. Пунктирні лінії — гіпотетичні fronti швидкості рідини у шарі Прандтля попри одну із стінок за відсутності протилежної стінки. Справа зображений переріз капіляра з виділеним елементом площі $\delta S = 2\pi r \delta r$.

Закон Пуазейля

Рідини різної в'язкості η будуть мати відмінну швидкість протікання через капіляр $Q = \frac{V}{t}$. V – об'єм рідини, що проходить за час t через переріз капіляра при усталеному ламінарному струмені в капілярі.

Далі будемо користуватися такими допущеннями: довжина капіляра набагато більша за його радіус; потік ламінарний, одновимірний, в кожній точці потоку швидкість направлена вздовж осі капіляра (такий потік називають "потокотом Пуазейля"); рідина ідеально в'язка (ньютонівська) і нестислива, перепад тиску в капілярі не приводить до зміни об'єму речовини.

При виконанні зазначених умов залежність швидкості протікання рідини через капіляр Q від η , геометричних параметрів радіуса R і довжини L капіляра, різниці тиску ΔP прикладеної до його кінців, має наступний вигляд

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \eta L} \quad (32)$$

і має назву *закону Пуазейля*. Інша назва – *рівняння Пуазейля* або закон Пуазейля-Хагена. Закон встановлений експериментально та незалежно Хагеном (Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen) і Пуазейлем (Jean Leonard Marie Poiseuille) в 1838-1839 рр.

У закон Пуазейля входить показник динамічної в'язкості рідини індивідуальний для різних рідин зумовлений різним значенням взаємодії між молекулами дотичних шарів різної швидкості у капілярному шарі (у шарі Прандтля). Закон Пуазейля використовують для знаходження реологічних параметрів в'язкості рідин за швидкістю протікання через капіляри різної форми. Найчастіше це круглі капіляри або ще має практичне використання протікання рідин між плоскими капілярними зазорами.

Математичне обґрунтування закону Пуазейля

Циліндричний моношар молекул на відстані r від вісі малої товщини dr прискорюється дотичним швидшим шаром внутрішнім із силою внутрі-

шнього тертя (25)

$$F_{\eta,in} = \left(\eta \frac{dv(r)}{dr} 2\pi r L \right)_{in} = \eta \frac{dv(r)}{dr} 2\pi r L;$$

сповільнюється верхнім шаром меншої швидкості

$$F_{\eta,out} = \left(\eta \frac{dv(r)}{dr} 2\pi r L \right)_{out} = \eta \frac{dv(r + \delta r)}{dr} 2\pi(r + \delta r)L.$$

Циліндричний шар (моношар) рідини малої товщини δr з поперечною до осі капіляра площею $\delta S = \pi \delta r^2 = 2\pi r \delta r$ рухається під дією сили тиску $\Delta P \delta S$, рухається з сталою швидкістю в сторону меншого тиску, сила тиску зрівноважується силами в'язкого тертя

$$F_{\eta,in} - F_{\eta,out} = -\Delta P \delta S.$$

При $\delta r \rightarrow 0$, $\frac{dv(r + \delta r)}{dr} \rightarrow \frac{dv(r)}{dr}$,

$$\frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta P}{\eta L} r. \quad (33)$$

Це диференціальне рівняння, з крайовою умовою $v(R) = 0$, має розв'язок

$$v = \frac{\Delta P}{2\eta L} (R^2 - r^2) \quad (34)$$

параболічної залежності фронту швидкості від радіуса r . Очевидно швидкість рідини буде найбільшою по осі капіляра.

З рівняння (34), об'єм води, що проходить через переріз капіляра в одиницю часу рівний сумі об'ємів, що протікають через елементи площі $\delta S = 2\pi r \delta r$. Швидкість $v(r)$ через них є різною (34). Швидкість витікання $Q = \sum \delta Q(r) = \sum 2\pi r \delta r v(r)$. Сумуванням по всіх елементах перерізу

$$Q = \frac{\pi \Delta P}{2\eta L} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$

отримаємо закон Пуазейля (32).

Рівність $F_{\eta,in} - F_{\eta,out} = 2\pi \Delta P r \delta r$ підстановкою сили в'язкого тертя ньютонівської рідини

$$\eta L \left(\left(r \frac{dv}{dr} \right)_{in} - \left(r \frac{dv}{dr} \right)_{out} \right) = -\Delta P r \delta r$$

у диференціальній формі є рівнянням другого порядку ламінарного току рідини через капіляр

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dv}{dr} \right) = -\frac{\Delta P}{\eta L}.$$

Заміною $\frac{1}{r} \frac{d}{dr} = 2 \frac{d}{dr^2}$ та інтегруванням отримуємо $\frac{dv}{dr} = -\frac{\Delta P}{2\eta L} r$.

Лабораторна робота

Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини за швидкістю протікання через капіляр

Мета роботи:

експериментальне визначення коефіцієнта внутрішнього тертя дистильованої води за швидкістю стаціонарного потоку в капілярі на основі рівняння Пуазейля.

Опис устаткування

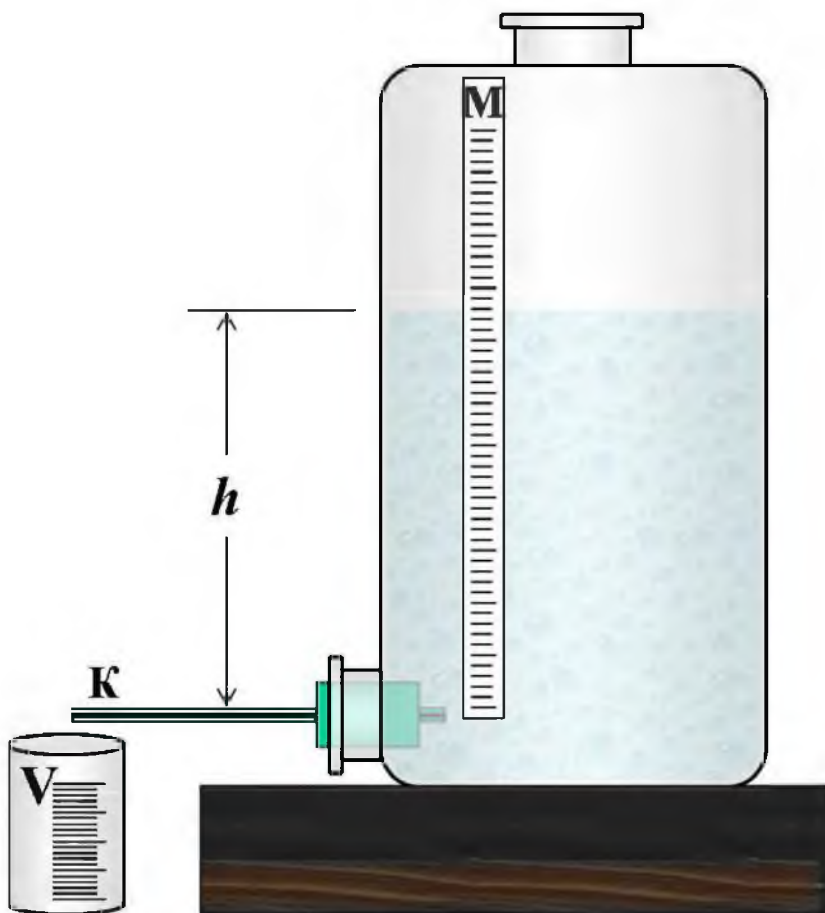


Рис. 13.

Скляний бутиль Вульфа має дві шийки з широкими отворами Рис.13, верхню і бічну нижню. В нижній міститься скляна втулка з горизонтально розташованим капіляром (К). На кінці капіляра знаходиться кран, який не зображений на Рис.13. Рідина тече через капіляр при відкритому крані. Верхній отвір накритий пластиковою кришкою, перед початком дослідів її знімають.

Бутиль заповнюється дистильованою водою або іншою досліджуваною рідиною. Під відкритим кінцем капіляра встановлюється мірний стакан або мензурка з мілілітровими поділками ($1 \text{ мл} = 10^{-6} \text{ м}^3$) вимірювання об'єму витікаючої рідини.

Тиск на кінці капіляра в бутлі більший за тиск з відкритого боку на величину стовпа рідини $\Delta P = \rho g h$. ρ – густина рідини,

g – прискорення вільного падіння. h – висота стовпа рідини – відстань від поверхні води до капіляра вимірювана міліметровою лінійкою (М) розташованою на поверхні бутля. Висота рідини h повинна бути не менше 10 см. При виливанні рідини міняється висота h , ця зміна повинна бути набагато меншою за значення h . Крім того, при малих h буде низькою різниця тисків ΔP , час проведення експерименту може стати непомірно великим.

Дослідним шляхом вимірюється кінематичний параметр в'язкості $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ використанням закону Пуазейля. Підстановкою $\Delta P = \rho g h$ у (32)

$$\nu = W \frac{h t}{V}, \quad W = \frac{\pi}{8} \frac{R^4}{L} g = \text{const.} \quad (32w)$$

Довжина капіляру L і його внутрішній радіус R вимірюються до його кріплення в бутлі Вульфа або використовується калібрований капіляр з вказаними розмірами. При вимірюванні в лабораторії радіус капіляра вимірюється під мікроскопом з мірною шкалою окуляра, довжина визначається штангельциркулем. Відносна похибка $\frac{\Delta W}{W} \approx \frac{4 \Delta R}{R}$ при $\frac{\Delta L}{L} < \frac{\Delta R}{R}$.

Виконання роботи

Знаходження показників в'язкості дистильованої води

Бутиль наповніть дистильованою водою до верхнього краю шкали М. Після відкриття крану потрібно почекати 5-10 с до встановлення стаціонарного протікання води через капіляр і сталої швидкості витікання води. Далі запустити секундомір, відмітивши поділку рівня води в мірній мензурці чи стакані. Після витікання об'єму (наприклад $V = 20$ мл) виключити секундомір і занести в Табл. 12 дані V і t , час рідини об'єму V .

Для зручності бажано, щоб об'ємом V був однаковий в кожному наступному експерименті. Для уникнення розбризкування води на стінки мензурки потрібно, щоб вода стікала рівномірно по стінці. Для цього використовується нитка або тоненький

шнурочок, по якому вода на виході з капіляра стікає на стінку і далі по стінці мірної посудини.

За невеликого об'єму ($V = 10 - 20$ мл) витікання рідини висота стовпа міняється мало, від деякого значення h_1 при включенні секундоміра, до h_2 при його виключенні. Можна прийняти середнє значення висоти $h = \frac{1}{2}(h_1 + h_2)$ або занотувати h в момент, коли витекло половина порції $V/2$, що фіксується за показаннями шкали мензурки.

Дослід проводиться 3-4 рази підряд, дані заносяться в Табл. 12. Далі виливають частину води до пониження рівня h ще на 1,5-2 см. Знову повторюють дослід 3-4 рази і зливають частину води у окрему посудину для зменшення рівня h і т.д. до виконання не менше 15 дослідів. Кожного разу при наповненні мірного стакана (мензурки) воду також зливають у окрему посудину.

Обчислення кінематичного показника в'язкості ν проводиться по формулі (32w) із занесенням в Табл. 12. Всі вимірювання і дані приводяться в системі одиниць СІ.

У мірних стаканах, мензурках використовують несистемні одиниці об'єму

$$1 \text{ л} = 1 \text{ дм}^3 = 10^{-3} \text{ м}^3; \quad 1 \text{ мл} = 10^{-3} \text{ л} = 10^{-6} \text{ м}^3 = 10^3 \text{ мм}^3.$$

Кінематична в'язкість ν в системних одиницях вимірюється в $\text{м}^2/\text{с}$, динамічна η — у $\text{Па} \cdot \text{с}$ (одиниці вимірювання на стр.30). Через низькі значення цих показників для рідин і газів застосовують приставки одиниць

$$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^6 \text{ мм}^2/\text{с}; \quad 1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10^3 \text{ мПа} \cdot \text{с} = 10^6 \text{ мкПа} \cdot \text{с}.$$

Похибка $\Delta\nu$ зумовлена похибками Δh , ΔV і ΔW . Похибка по часу Δt входить у похибку визначення об'ємної порції рідини ΔV , що витекла за час t . Похибкою Δh можна нехтувати у разі $\frac{\Delta h}{h} \ll \frac{\Delta V}{V}$.

Значення ν не повинно змінюватися із зменшенням h . В протилежному випадку присутня систематична неточність експери-

Табл. 12.

N	$t, \text{с}$	$V, \text{м}^3$	$\Delta V, \text{м}^3$	$h, \text{м}$	$\Delta h, \text{м}$	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	$\Delta \nu, \text{мм}^2/\text{с}$
1							
2							
...							

менту. Мають бути вертикальною шкала вимірювань h і горизонтальним капіляр. При нахиленому капілярі на протікання води в ньому буде впливати не однакова гідростатична складова тиску на різних ділянках капіляра.

1. Проведіть дослід знаходження показника коефіцієнта кінематичної в'язкості ν не менше як для 15 різних значень різниці тисів на кінцях капіляра $\Delta P = \rho gh$, зумовлених гідростатичним тиском стовпа рідини h . Отримані дані заповніть у Табл. 12.
2. Побудуйте точковий графік $\nu(h)$, відобразіть похибки $\Delta \nu$, проведіть горизонтальну лінію усередненого значення $\langle \nu \rangle$ по всіх отриманих з дослідів $\nu(h)$. Якщо значення $\nu(h) \pm \Delta \nu$ укладаються на $\langle \nu \rangle$, то не зважаючи на не відтворювані умови дослідів кінематична в'язкість не залежить від h , оцінка точності $\nu = \langle \nu \rangle$ розраховується за похибкою прямого вимірювання.
3. Обчисліть коефіцієнт динамічної в'язкості рідини $\eta = \nu \rho$. Густина знаходиться за табличним значенням, Табл. 13, або вимірюється пікнометром.

Табл. 13. Густина води при різних температурах і норм. тиску [Т26]

Т, °C	ρ , кг/м ³	Т, °C	ρ , кг/м ³	Т, °C	ρ , кг/м ³
0	999,841	20	998,203	40	992,21
1	999,900	21	997,992	41	991,83
2	999,941	22	997,770	42	991,44
3	999,965	23	997,538	43	991,04
4	999,973*	24	997,296	44	990,63
5	999,965	25	997,044	45	990,22
6	999,941	26	996,783	46	989,79
7	999,902	27	996,512	47	989,37
8	999,849	28	996,232	48	988,93
9	999,781	29	995,944	49	988,49
10	999,700	30	995,646	50	988,04
11	999,605	31	995,340	55	985,70
12	999,498	32	995,025	60	983,21
13	999,377	33	994,702	65	980,56
14	999,244	34	994,371	70	977,78
15	999,099	35	994,031	75	974,86
16	998,943	36	993,68	80	971,80
17	998,774	37	993,33	85	968,62
18	998,595	38	992,96	90	965,31
19	998,405	39	992,59	100	958,35

* При $T = 3,8 - 4,2^\circ\text{C}$ приймається для води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

* Найбільша густина води при температурі $3,9^\circ\text{C}$.

Контрольні запитання

1. Що розуміють під силою в'язкого тертя, чим зумовлена?
2. Чи залежить сила в'язкого тертя від швидкості руху тіла?
3. Чи виконується закон збереження механічної енергії при дії сил в'язкого тертя?
4. Чим зумовлена сила в'язкого тертя?
5. У чому проявляється в'язкість рідин?
6. Дайте визначення коефіцієнта динамічної в'язкості, кінетичної в'язкості, текучості, деформації зсуву, напруги зсу-

ву, швидкості зсуву.

7. Що розуміють під потоком Пуазейля? Потік Пуазейля ламінарний чи турбулентний?
8. Які умови повинні виконуватись для виникнення потоку Пуазейля в трубці? Чи повинна рідина задовольняти умовам нестискуваної рідини, ідеальної рідини?
9. Чому рівний перепад швидкості dv/dr при русі рідини в капілярі, як він залежить від r ?
10. Як залежить від r напруга зсуву ?
11. Чому рівна напруга зсуву біля осі капіляра циліндра і біля стінки?

Лабораторна робота

Оцінка кінетичних параметрів теплового руху молекул газу

Оцінка кінетичних параметрів теплового хаотичного руху молекул повітря і їх характеристичних розмірів виконується на основі застосування молекулярно-кінетичної теорії, рівнянь фізичної кінетики і вимірювання параметрів в'язкості повітря при протіканні через капіляр.

Опис устаткування

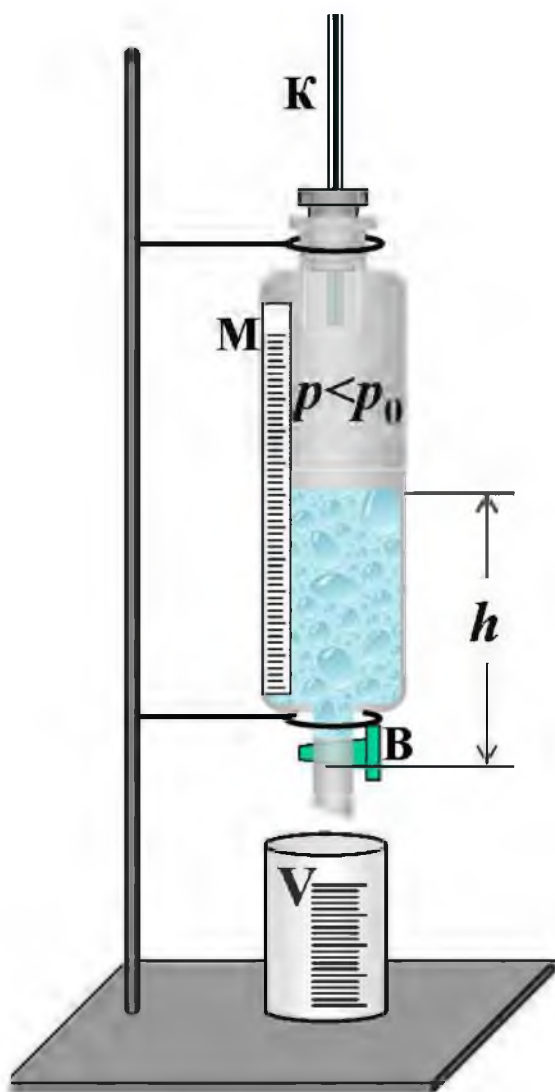


Рис. 14.

Використовується широка колба з краном (В), Рис. 15, зверху втулка з скляною трубкою (К), в ній капіляр. Втулка з трубкою витягується з колби, наливається дистильована вода і знову встановлюється щільно на місце. Не повинно між втулкою і колбою проникати повітря.

На початку, при відкриванні крана, вода вільно витікає. Повітря через капіляр не встигає затікати в колбу, в ній створюється понижений тиск $P < P_0$ — атмосферний тиск. Через кілька секунд встановиться тиск повітря у колбі $P = P_0 - \rho g h$, вода далі витікає рівномірно під дією різниці тисків на кінцях капіляра $\Delta P = \rho g h$.

Метод вимірювання кінематичного параметра в'язкості повітря за допомогою капіляра виконується

так само як і для рідин. На кінцях капіляра створюється постійний тиск ΔP . Вимірюється об'єм, повітря V , що пройшло за час

t , висота стовпа рідини h зумовлюючого різницю тисків. Для знаходження кінематичного коефіцієнта в'язкості ν використовується закон Пуазейля (32, 32w):

$$\nu = A \frac{h t}{V}, \quad A = \frac{\pi}{8} \frac{R_a^4}{L_a} g. \quad (32a)$$

R_a — радіус капіляра, L_a — його довжина.

В основному в'язке тертя зумовлене рухом молекул із повільніших шарів у швидші і навпаки. При кімнатній температурі до повітря застосовна модель ідеального газу, взаємодія між дотичними шарами різної швидкості практично відсутня. Газу мають динамічну в'язкість на 2-3 порядки (!) меншу в'язкості рідин. Капіляр для реологічних дослідів з повітрям підібраний меншого радіуса R_a , має відбуватися перекриття шарів Прандтля і утворюватися параболічний фронт швидкостей. Саме у такому випадку застосовний закон Пуазейля.

Більша довжина L_a задає повільніший час проходження повітря через капіляр, точніше вимірювання часу витікання рідини з колби. Об'єм витікаючої рідини V рівний об'єму повітря, яке проходить через капіляр. Вимірюється об'єм води за поділками мірного стакана чи мензурки, у яку виливається вода.

Точність вимірів буде істотно гіршою при вільному падінні води в мензурку, при розбризкуванні води на стінки мензурки. Щоб вода стікала рівномірно по стінці мензурки використовується нитка для стікання води від капіляра. Нитку перед дослідом потрібно змочити. Вода утримується при нитці переважно силою поверхневого натягу.

Через те, що перепад тиску на кінцях капіляра малий по відношенню до атмосферного тиску $\Delta P \ll P_0$, нехтується незначний можливий перепад повітря в капілярі.

За невеликого об'єму V рівномірного витікання води, висота h міняється від h_1 при включенні секундоміра, до h_2 при його виключенні, $h = \frac{1}{2}(h_1 + h_2)$. Вимірюється h по міліметровій шкалі (М) колби. Висота рідини h має бути не менше 10 см, зміна висоти $h_2 - h_1$ набагато менша h .

Виконання роботи

Знаходження показника кінематичної в'язкості повітря

Табл. 14.

N	$t, \text{с}$	$V, \text{м}^3$	$\Delta V, \text{м}^3$	$h, \text{м}$	$\Delta h, \text{м}$	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	$\Delta \nu, \text{мм}^2/\text{с}$
1							
2							
...							

1. Колбу наповнюють дистильованою водою до верхнього краю шкали М. Перший раз це потрібно виконати в присутності лаборанта.
2. Відкривають кран, очікують кілька секунд до встановлення рівномірного витікання води. Запускають секундомір при проходженні певної мітки водою у мірному стакані (мензурці). Відмічають значення стовпа рідини в колбі h при виливанні половини об'єму $V/2$. Після витікання всього об'єму V (наприклад $V = 20$ мл) виключіть секундомір. Дані нотують у Табл. 14.
3. Дослід проводять не менше 10 разів. При потребі доливають дистильовану воду у колбу. Всі дослідження проводяться при рівні води в колбі не менше 10 см.
4. Для кожного досліду обчислюють коефіцієнт кінематичної в'язкості $\nu \pm \Delta \nu$. Аналізують точність вимірювань, незалежність значення ν від різниці тисків на кінцях капіляра (від висоти стовпа рідини h у колбі).
5. Визначають середнє значення показника в'язкості $\bar{\nu}$ по всіх даних експерименту при різних h (різному гідростатичному тиску ρgh на кінцях капіляра), застосовують похибку прямого виміру для випадкової складової $\Delta \nu_{\text{в}}$. Знаходять значення динамічного показника в'язкості $\eta = \nu \rho$, знаходять похибку непрямого виміру, $\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta \nu}{\nu}$. Отримані дані

показників в'язкості заносять у Табл. 1, порівнюють з даними наукової літератури, стр.??.

Табл. 15.

Фізичні параметри	Значення
Кінематичний коеф. в'язкості $\bar{\nu}$, мм ² /с	
Динамічний коеф. в'язкості η , мкПа · с	
Температура T , °С	
Температура T , К	
Тиск P , Па	
Молярна маса M , кг/моль	
Густина ρ , кг/м ³	
Стала Больцмана k_B , Дж/К	$1.380648 \cdot 10^{-23}$
Число Авогадро N_A , 1/моль	$6.02214086 \cdot 10^{23}$
Універсальна газова стала $R = N_A \cdot k_B$, Дж/(моль · К)	8.31446

Густина повітря може бути знайдена використанням рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$P = \frac{\rho}{M} RT = n k_B T.$$

Температуру повітря, при підстановці у формулу, потрібно перевести у системні градуси Кельвіна. Температура T і тиск P зчитуються з лабораторних термометра і барометра-анероїда. Молярна маса повітря використовується з довідника або розраховується відповідно хімічному складу повітря. Склад повітря практично сталий, біля поверхні землі має склад 78,08% азоту, 20,96% кисню, 0,9% аргону з молярною масою $M = 0,02896$ кг/моль. Істотну зміну може вносити висока вологість повітря.

Процеси переносу у розріджених газах

Для розріджених газів, яким є повітря, застосовне наближення моделі ідеального газу. Для таких газових середовищ всі

кінематичні показники руху молекул, теплопереносу, дифузних процесів, переносу імпульсу при в'язкому терті мають простий зв'язок між собою, витікають один з другого на основі формул кінетичних процесів, піддаються обрахунку при мінімальних затратах часу і засобів експериментальних вимірювань. Із вимірювання параметрів тиску, температури розрідженого газу, знаходження показника кінематичної в'язкості проводиться оцінка оцінка таких параметрів, як розмір молекул, швидкість їх руху, довжина вільного пробігу, частота зіткнень, ефективний переріз розсіяння на молекулах, як на мішенях для молекулярних пучків. Це досить таки вагомий перелік параметрів молекул, мікро- і нанорозмірних величин.

Процеси переносу належать до необоротних процесів, що виникають через порушення рівноважного стану середовищ. Порушується середній статистичний розподіл молекул по координаті, швидкості. Хаотичний тепловий рух "вирівнює" цей розподіл. Різниця концентрацій, різниця температур вирівнюється з часом також завдяки тепловому руху часток середовища. Із розподілу Максвелла середня швидкість теплового руху молекул повітря і середньоквадратична швидкість

$$\bar{u} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{RT}{M}}, \quad \sqrt{u^2} = \sqrt{3 \frac{RT}{M}} \quad (35)$$

Дифузія - перенесення маси

Якщо у вибраному напрямку Oz є градієнт концентрації $n = \frac{dN}{dV}$ газу $\frac{dn}{dz} > 0$, то це напрямок максимального перепаду. У поперечних напрямках $\frac{dn}{dx} = 0, \frac{dn}{dy} = 0$. У площині Oxy виділимо малу площу ΔS . Потік молекул зумовленого тепловим рухом часток вздовж напрямку Oz через площу ΔS не однаковий через різницю концентрації по різні боки від площі. Є потік частинок

$$j_N = \frac{1}{\Delta S} \frac{dN}{dt}.$$

У виділеному макроскопічному об'ємі можна умовно розділити всю кількість часток N на 6 рівних по кількості частин. $\frac{1}{6}N$ рухається з се-

редньою швидкістю $\bar{u}$ вздовж осі Oz , $\frac{1}{6}N$ рухається в протилежну сторону. Такі ж "порції" рухаються в протилежні сторони вздовж осей Oy , Ox . Такий поділ, хоч і умовний, має фізичний зміст: швидкість теплового руху молекул різна, але, через усереднення по великій їх кількості, імпульс у всі сторони рівний $\frac{1}{6}N m_0 \bar{u}$. Справді, при вимірюванні тиску газу, зумовленого хаотичною дією молекул на мембрану манометра, нема різниці у яку сторону повернути вимірювальний прилад.

Для усереднених часток їх швидкість

$$\bar{u} = \frac{dz}{dt},$$

$$j_N = \frac{1}{\Delta S} \frac{dN}{dz} \bar{u}.$$

В одиницю часу через площадку ΔS рухаються в сторону нижчої концентрації $\frac{1}{6}N_1$ часток і в протилежну сторону $\frac{1}{6}N_2$,

$$j_N = 2 \frac{1}{6} \bar{u} \lim_{z_2 \rightarrow z_1} \frac{1}{\Delta S} \frac{N_2 - N_1}{z_2 - z_1}.$$

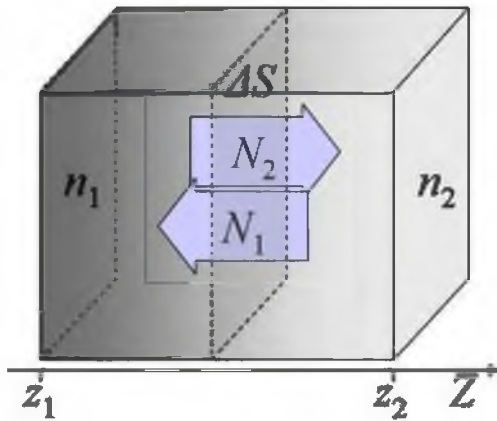


Рис. 15.

Множник 2 виникає з врахування подвійного приросту концентрацій зрозумілий з

наступного прикладу. Якщо в обох коробках однакова кількість предметів $m_1 = m_2$ і їх різниця $\Delta m = m_2 - m_1 = 0$, то при перенесенні тільки одного предмета з першої коробки в другу їх різниця рівна двом. В одній коробці предметів на один зменшилося $m'_1 = m_1 - 1$, а в другій на один зросла $m'_2 = m_2 + 1$, $\Delta m' = m'_2 - m'_1 = (m_2 + 1) - (m_1 - 1) = 2$.

Рух направленого молекулярного потоку відбувається до розсіяння потоку на частках середовища. Кількість зіткнень з N частками середовища до довжини вільного пробігу повинна відповідати відношенню приросту зіткнень на прирості пройденого шляху $\frac{N}{\lambda} = \frac{dN}{dl}$. Середня довжина вільного пробігу λ – віддаль, яку долає частинка, за проміжок часу між зіткненнями з іншими частинками. Параметр λ є деяким ефективним, статистично усередненим по великій кількості частинок; вимагає експериментального узгодження значення з розрахунковим, має доволі добротне відтворення в експерименті. Середня довжина вільного пробігу молекул є одним із характеристикних параметрів кінематики нерівноважних процесів у газах.

Густина перетину площі ΔS частками в одному напрямку

$$\frac{N}{\Delta S} = \lambda \frac{dN}{\Delta S dl} = \lambda n. \quad (36)$$

Потік часток, як різниця потоків в обох напрямках вздовж осі Oz нормальних до площі ΔS ,

$$j_N = \frac{1}{3} \lambda \bar{u} \lim_{z_2 \rightarrow z_1} \frac{n_2 - n_1}{z_2 - z_1} = -\frac{1}{3} \lambda \bar{u} \frac{dn}{dz},$$

відбувається в сторону нижчої концентрації. Для випадків $\delta n \ll n$ допустима рівність $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ з обох сторін від площі ΔS .

Потік частинок зумовлений малим градієнтом концентрації називають явищем *дифузії* (гр. diffusion — розлиття). У скалярній і векторній формах потік переносу частинок

$$j_N = \frac{dN}{\Delta S dt} = -D \frac{dn}{dz}, \quad j_N = -D \nabla n. \quad (37)$$

Коефіцієнт дифузії для розрідженого газу

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{u}. \quad (38)$$

Коефіцієнт дифузії залежить від характеристик параметрів руху часточок, відрізняється для різних речовин і середовищ у яких відбувається перенос речовини. Як і "рухливість" молекул $\bar{u}$ (35), значення коефіцієнта дифузії визначається температурою T газового середовища, $\bar{u} \sim \sqrt{T}$, інертністю часток $\bar{u} \sim \sqrt{M^{-1}}$. Молярна маса газу $M = N_A m_0$, N_A — число Авогадро, m_0 — маси частки однокомпонентного газу чи усереднена маса по всіх частках.

Дифузією називають також проникнення речовини з одного середовища в інше, вирівнювання концентрації розчиненої у рідині речовини, домішок у газі. Розрізняють дифузію через специфічні перегородки фільтрування, осмотичного тиску, електропорації тощо. Коефіцієнт дифузії важливий показник в описанні процесів кінетики фізико-хімічних, біологічних процесів, мембранних технологій, метаболізму клітин.

Дифузію називають процесом переносу маси. Враховуючи, що $m = m_0 N$, густина $\rho = \frac{dm}{dV} = m_0 n$, потік маси¹⁵

$$j_m = \frac{dm}{\Delta S dt} = -D \frac{d\rho}{dz}, \quad j_m = -D \nabla \rho. \quad (39)$$

У вигляді (39) закон дифузії сформульований (1855 р.) німецьким фізіологом Альфредом Фіком для рідин і газів на основі

¹⁵ $\frac{dm}{\Delta S dt} = m_0 \frac{dN}{\Delta S dt} = -D m_0 \frac{dn}{dz} = -D \frac{d\rho}{dz}$

експериментальних даних¹⁶. Виконується строго у ізотермічних квазірівноважних процесах за невеликих перепадів концентрації нерівноважної компоненти. Для великих значень градієнта можуть бути супутні конвективні, турбулентні процеси з особливими перепадами густини компонент середовища. Тому під дифузією розуміють відносно повільні процеси переносу.

В'язке тертя — перенесення імпульсу

Перенос імпульсу між дотичними ламінарними шарами різної швидкості у середовищах ньютонівських рідин (25)

$$j_p = \frac{dp}{\Delta S dt} = -\eta \frac{dv}{dz}, \quad j_p = -\eta \nabla v. \quad (40)$$

Динамічний коефіцієнт внутрішнього тертя

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \bar{u} \rho = D \rho. \quad (41)$$

Впливає рівність коефіцієнта дифузії $D = \eta/\rho$ і кінематичного коефіцієнта в'язкості $\nu = \eta/\rho$, $D = \nu$, для розріджених газів.

Рівність (41) є наслідком рівності (38) і наступного обґрунтування. У розріджених газах, у повітрі, нехтовно мала взаємодія між молекулами. В'язке тертя відбувається за рахунок хаотичного руху молекул, обміну частками між шарами повітря, що рухаються з різною швидкістю. Кількість часточок, якими обмінюються дотичні шари, однакова, різні їх середня швидкість вздовж ліній току. З врахуванням (36)

$$\begin{aligned} \frac{dp}{\Delta S dt} &= \bar{u} \frac{dp}{\Delta S dz} = \bar{u} \frac{2 \frac{1}{6} (N m_0 \bar{u}_x - N m_0 (\bar{u}_x + dv))}{\Delta S dz} = \\ &= \frac{1}{3} \bar{u} \frac{N m_0 dv}{\Delta S dz} = \frac{1}{3} \lambda \bar{u} n m_0 \frac{dv}{dz} = \frac{1}{3} \bar{u} \lambda \rho \frac{dv}{dz}. \end{aligned}$$

У перетвореннях виразу для потоку треба мати на увазі, що під градієнтом

¹⁶Рівняння (39) називають *першим законом Фіка* для дифузії. Другий закон Фіка отримують застосуванням рівняння неперервності $\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(j_m) = \text{div}(D \nabla(\rho))$. При сталому D , *другий закон Фіка* $\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \Delta \rho$.

імпульсу $\frac{dp}{dz}$ мають на увазі не різницю імпульсів двох дотичних ламінарних шарів, а потік імпульсу з одного шару в інший. Потік імпульсу пропорційний градієнту імпульсу, градієнту швидкості $\frac{dv}{dz}$.

Теплопровідність

У розрідженому газі перенесення тепла здійснюється хаотичним рухом молекул, зумовлений кінетичною енергією молекул. Для розширеної моделі ідеального газу середня внутрішня енергія теплового руху молекули виражається через температуру газового середовища $\bar{\varepsilon} = \frac{i}{2} m_0 \overline{v^2} = \frac{i}{2} k T$, k — коефіцієнт Больцмана, i — кількість ступенів вільності молекули.

Теплопровідність є переносом тепла в напрямку антиградієнта температури

$$\begin{aligned} J_Q &= \frac{dQ}{\Delta S dt} = \bar{u} \frac{dQ}{\Delta S dz} = -\frac{1}{3} \bar{u} \frac{N}{\Delta S} \frac{i}{2} k \frac{dT}{dz} = \\ &= -\frac{1}{3} \lambda \bar{u} n \frac{i}{2} k \frac{dT}{dz} = -D \rho c_V \frac{dT}{dz}. \end{aligned}$$

c_V — питома ізобарична теплоємність — питомий коефіцієнт теплопровідності рівний кількості тепла переданій масі m газу для нагрівання на один кельвін і рівний приросту внутрішньої енергії теплового руху молекули

$$c_V = \frac{dQ}{m dT} = \frac{d\varepsilon}{m_0 dT} = \frac{i}{2} \frac{k}{m_0} = \frac{i}{2} \frac{R}{M}.$$

$R = k N_A$ — універсальна газова стала рівна добутку коефіцієнта Больцмана на число Авогадро, $M = m_0 N_A$ — молярна маса газу.

Рівняння теплопровідності ідеального газу (рівняння Фур'є)

$$J_Q = -\kappa \frac{dT}{dz}, \quad j_Q = -\kappa \nabla T; \quad (42)$$

коефіцієнт теплопровідності

$$\kappa = D \rho c_V, \quad c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M}. \quad (43)$$

Рівняння переносу

У суцільному середовищі, при наявності малої статистичної нерівноваги фізичного параметру θ , виникає потік зумовлений хаотичним тепловим рухом молекул вздовж антиградієнта неоднорідності, через площу ΔS нормальну напрямку градієнта, з кінетичним коефіцієнтом K_θ :

— у одномірному випадку $j_\theta = \frac{d\theta}{\Delta S dt} = -K_\theta \frac{d\theta}{dz}$;

— у векторній формі $j_\theta = -K_\theta \nabla \theta$;

Для ідеального газу

$$j_\theta = \frac{d\theta}{\Delta S dt} = -K \frac{d\theta}{dz}, \quad K = D n, \quad D = \frac{1}{3} \lambda \bar{u}$$

— кінетичний коефіцієнт залежить від концентрації газу і коефіцієнта дифузії.

Для рідин, твердих тіл коефіцієнти переносу мають складну залежність, не мають такого простого зв'язку між собою, як для потоків у розріджених газах. При наявності йонів, через електричну взаємодію між частинками, потік заряду уже не може визначатись тільки переносом заряду спричиненого статистичною нерівновагою.

Реальні процеси переносу навіть в розріджених газах можуть бути складнішими, проходити при великих градієнтах фізичного параметра переносу, мати свої особливості у багатокомпонентних сумішах газів. Великі перепади тепла породжують нерівноважні процеси зміни інших термодинамічних параметрів тиску, густини і відповідних потоків.

Характеристичні параметри кінетики молекул газу

Молекула газу у своєму тепловому русі постійно стикається з іншими молекулами, міняє траєкторію руху. Відбувається розсіяння молекул, їх відхилення від направленої руху. Середню відстань між двома послідовними зіткненнями частки називають *довжиною вільного пробігу*

$$\lambda = \bar{u}_v \tau. \quad (44)$$

τ — час вільного пробігу — середній час руху між двома зіткненнями, $\overline{u}_B$ — середня швидкість молекули одної відносно другої. Якби інші частки газу були нерухомі, то швидкість $\overline{u}_B$ була б рівною середній швидкості $\overline{u}$ (35).

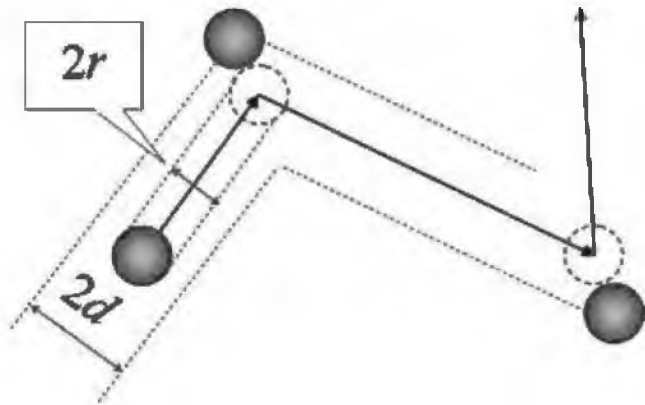


Рис. 16.

вільного пробігу.

При зіткненні двох часток, одна має вектор швидкості $\mathbf{u}_1$, друга — $\mathbf{u}_2$. Їх відносна швидкість $\mathbf{u}_B = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2$. Усереднений по багатьох зіткненнях квадрат швидкості $\overline{u}_B^2 = \overline{u}_1^2 + \overline{u}_2^2 - 2\overline{\mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2} = -2\overline{u_1 u_2 \cos \varphi} = 0$. φ — кут між векторами, середнє значення функції косинус рівне нулю. Із врахуванням рівноправності часток, що стикаються, $\overline{u^2} = \overline{u_1^2} = \overline{u_2^2}$, відносна швидкість однієї частки відносно іншої $\overline{u}_B^2 = 2\overline{u^2}$. При нехтуванні малої різниці між середньою швидкістю і коренем середньоквадратичної швидкості¹⁷ $\overline{u}_B \approx \sqrt{2\overline{u^2}}$, $\alpha \approx 1$,

$$\lambda = \sqrt{2\overline{u^2}} \tau. \quad (45)$$

При кімнатній температурі і нормальному тиску газу частка має довжину вільного пробігу десятки нанометрів. Це відстань на два-три порядки більша за розмір молекули $2r$. r — ефективний радіус частки. σ — ефективна площа поперечного перерізу, важлива фізична характеристика процесів розсіяння

¹⁷Відносна швидкість $\overline{u}_B \approx \sqrt{2\overline{u^2}}$, $\lambda = \sqrt{2\overline{u^2}} \tau = \sqrt{2} \alpha \overline{u} \tau$, $\alpha = \sqrt{\frac{3\pi}{8}} = 1,0854$. Значення коефіцієнта α впливає з формул Максвела розподілу молекул по швидкостях (35).

молекулярних пучків

$$\sigma = \pi d^2, \quad r = d/2. \quad (46)$$

Енергія потенціальної взаємодії між молекулами газу мала, короткодіюча, зіткнення вважаються пружними. Рух молекули можна уявити у вигляді труби радіуса d , рівного відстані наближення пружної взаємодії. Діаметр $2r$ є один із ефективний способів визначення розміру молекули. Адже і одноатомні молекули, і багатоатомні мають складну будову, яка не вкладається в макроскопічні методи вимірювання довжин.

Середній об'єм труби між двома зіткненнями $\sigma \lambda$. При великій кількості зіткнень N , за час $t \gg \tau$, об'єм труби $V = N \sigma \lambda$. З означення концентрації $N = V n$, при русі частки відносно нерухомих центрів розсіяння $\lambda = (n \sigma)^{-1}$. Врахування руху часток є ідентичним збільшенню концентрації молекул на множник $\sqrt{2}$,

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} n \sigma} = \frac{k T}{\sqrt{2} \sigma P}. \quad (45')$$

В останній рівності концентрація виражена через тиск і температуру згідно формули Менделєєва-Клапейрона.

Чим вища концентрація часток n , більша густина середовища ρ , тим більша частота зіткнень τ^{-1} , менше значення λ , повільніше проходить дифузія, інші процеси переносу.

Знаходження кінематичних показників процесів переносу для повітря

1. Коефіцієнт дифузії для розріджених газів рівний коефіцієнту динамічної в'язкості $D = \bar{\nu}$. Значення параметра $\bar{\nu}$ для повітря виміряне експериментально, знаходиться у Табл. . Середня швидкість молекули розраховується по формулі (35). Концентрація повітря розраховується за формулою Менделєєва-Клапейрона $P = n k T$ із застосуванням значень параметрів Табл. . Обчислені дані заносяться у Табл. 16.

Табл. 16. Зведені дані фізичних параметрів повітря, кінематичних показників процесів переносу

Фізичні параметри повітря	Значення
Коефіцієнт дифузії D , $\text{мм}^2/\text{с}$	
Середня швидкість молекули $\bar{u}$, $\text{м}/\text{с}$	
Концентрація газу n , $1/\text{мм}^3$	
Довжина вільного пробігу λ , $\text{м}/\text{с}$	
Частот зіткнень молекули τ^{-1} , с^{-1}	
Площа поперечного перерізу σ , нм^2	
Ефективний радіус молекули r , нм	
Питома ізохорна теплоємність c_V , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	
Коефіцієнт теплопровідності κ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	

- Довжина вільного пробігу молекули обчислюється по формулі (41), частот зіткнень молекули, площа поперечного перерізу, радіус молекули знаходяться використанням формул (45, 45', 46). Порівняйте отримані значення з літературними даними, стр. 74.
- Зробіть висновок про можливість уявити або чомусь співставити кількість молекул у одному кубічному міліметрі. Співставте розміри молекул повітря з довжиною хвилі світла (видимий діапазон $\lambda = 400 - 700 \text{ нм}$).
- Обчисліть значення питомої ізохорної теплопровідності і коефіцієнта теплопровідності (43). Кількість ступенів вільності для молекул повітря $i = 5$. Сухе повітря не менше як 99% двоатомний газ, має 3 поступальні ступені вільності і 2 обертальні. Порівняйте отримані дані з даними довідника, стр. (22).

Контрольні запитання

1. Чим обумовлена в'язкість газів? Чи є відмінність від в'язкого тертя у рідинах? Яку роль в процесах тертя відіграє будова агрегатних станів?
2. Що розуміють під процесом переносу, чим зумовлений?
3. Що розуміють під статистично нерівноважним процесом?
4. Що розуміють під моделлю ідеального газу? Чим відрізняється модель твердих сферичних часток? Чи застосовна модель матеріальних точок до рівнянь переносу?
5. Як пов'язані між собою динамічна, кінетична в'язкості розрідженого газу, коефіцієнт дифузії?
6. Дайте визначення довжини і часу вільного пробігу молекули, частоти зіткнень, ефективних радіуса і площі перерізу для розрідженого газу. Чи залежать і як ці параметри від температури, від концентрації газу? Яка залежність від маси частки?

Табл. 17. Густина газів при нормальному тиску і темп. $t = 0^{\circ}\text{C}$ [Т16]

Речовина	ρ , кг/м ³	Речовина	ρ , кг/м ³
Азот	1,2505	Озон	2,144
Аміак	0,77146	Оксид азоту(IV)	1,3402
Аргон	1,7839	Оксид азоту(I)	1,97781
Ацетилен	1,1716	Оксид сірки(IV)	2,9269
Бромід водню	3,6445	Оксид вуглецю(IV)	1,9769
Водень	0,08988	Оксид вуглецю(II)	1,2504
Водяний пар насичений при $T = 100^{\circ}\text{C}$	0,589	Пропан	2,02
Повітря сухе	1,2928	Сірководень	1,5362
Гелій	0,17846	Спирт метиловий	1,426
Кисень	1,42895	Спирт етиловий	2,043
Криптон	3,733	Фтор	1,696
Ксенон	5,89	Хлор	3,214
Метан	0,7168	Хлороводень	1,639
Неон	0,8999	Хлороформ	5,639
		Етан	1,357
		Етилен	1,2604

Табл. 18. Густина (кг/м³) газів при різних температурах і нормальному тиску [Т23]

T , $^{\circ}\text{C}$	N_2 , CO	Ar	H_2	He	CO_2	O_2	Ne
0	1,250	1,783	0,0898	0,1784	1,976	1,428	0,899
100	0,916	1,305	0,0657	0,1305	1,447	1,050	0,659
200	0,723	1,030	0,0519	0,1030	1,143	0,826	0,519
300	0,597	0,850	0,0428	0,0850	0,944	0,682	0,429
400	0,508	0,724	0,0364	0,0724	0,802	0,580	0,365
500	0,442	0,627	0,0317	0,0627	0,698	0,504	0,318
600	0,392	0,558	0,0281	0,0558	0,618	0,447	0,281
700	0,352		0,0252		0,555	0,402	
800	0,318		0,0228		0,502	0,363	
900	0,291		0,0209		0,460	0,333	
1000	0,268		0,0192		0,423	0,306	

Табл. 19. Частота $\tau^{-1} \cdot 10^{-7}, \text{с}^{-1}$ зіткнень на одну секунду молекул газу між собою при нормальному тиску [Т35]

Газ	0°C	25°C	Газ	0°C	25°C
Азот	721	708	Кисень	672	626
Аргон	614	596	Криптон	542	514
Водень	1533	1443	Ксенон	602	558
Повітря	747	698	Неон	431	407
Гелій	685	649	Оксид вуглецю(IV)	934	861

Табл. 20. Довжина λ , мкм вільного пробігу молекул газів при різних тисках і температурах [Т33]

Газ	$0^{\circ}\text{C},$ 0,1 Па	$0^{\circ}\text{C},$ 133 Па	$25^{\circ}\text{C},$ 133 Па	$0^{\circ}\text{C},$ 101325 Па	$25^{\circ}\text{C},$ 101325 Па
Азот	6070	48,0	50,7	0,063	0,067
Аргон	6440	47,1	53,1	0,062	0,067
Водень	11380	83,9	93,1	0,110	0,123
Повітря	6170	45,4	50,9	0,060	0,067
Гелій	18200	133,2	147,4	0,175	0,194
Кисень	6560	48,1	54,0	0,063	0,071
Криптон	4900	36,9	40,9	0,048	0,053
Ксенон	3500	26,4	29,8	0,035	0,039
Неон	12600	94,4	204,5	0,124	0,138
Оксид вуглецю(IV)		29,5	33,4	0,039	0,044

Табл. 21. Найбільш імовірна u_p , середня $\bar{u}$ при температурі 20°C , середньоквадратична $\sqrt{u^2}$ швидкості молекул газів у м/с при нормальному тиску [Т23]

Газ	u_p	$\bar{u}$	$\sqrt{u^2}$
Азот	398	471	492
Аміак	517	604	632
Аргон	338	395	414
Водень	1487	1755	1838
Водяний пар	502	587	613
Повітря	394	463	485
Гелій	1064	1252	1310
Кисень	377	440	461
Криптон	233	272	285
Ксенон	195	218	228
Метан	536	619	651
Неон	474	557	580
Оксид вуглецю(II)	402	471	492
Оксид вуглецю(IV)	318	376	392
Пари ртуті	151	176	184

Табл. 22. Коефіцієнти теплопровідності κ різних середовищ

Матеріал	κ , Вт/(м·К)	Матеріал	κ , Вт/(м·К)
Графен	≈ 5000	Бетон	1,75
Алмаз	1001-2600	Бетон на гравії	1,51
Графіт	278,4-2435	Бетон на піску	0,7
Карбід кремнію	490	Базальт	1,3
Срібло	430	Скло	1-1,15
Мідь	401	Термопаста	0,7
Оксид берилію	370	Вода (норм.умови)	0,6
Золото	320	Цегла	0,2-0,7
Алюміній	202-236	Силіконове масло	0,16
Нітрид алюмінію	200	Пінобетон	0,05-0,3
Нітрид бору	180	Деревина	0,15
Кремній	150	Мінеральні мастила	0,12
Латунь	97-111	Свіжий сніг	0,10-0,15
Хром	107	Пінополістирол	0,038-0,052
Залізо	92	Екструдований піноп-ол	0,029-0,032
Платина	70	Скловата	0,032-0,041
Олово	67	Повітря (300 К, 100 кПа)	0,022
Оксид цинку	54	Аерогель	0,017
Сталь	47	Аргон (273-320 К, 100 кПа)	0,017
Свинець	35,3	Аргон (240-273 К, 100 кПа)	0,015
Кварц	8	Вакуум (абсолютний)	0 (строго)
Граніт	2,4		

Повітря є одним з кращих теплоізолюючих матеріалів. Нижчу теплопровідність з поширених газів має аргон, використовують для наповнення склопакетів для вікон. Приблизно таку ж теплопровідність має заповнений аргонем чи іншими газами аерогель (з лат. Aer — повітря, gelatus — заморожений) — "заморожений дим". Гелі мають тверду фазу речовини у вигляді структури на подібні мікроструктурної солодкої вати заповненої рідиною. В аерогелі заміщена рідка фаза газом. Тверда фаза в найпростішому випадку це діоксид кремнію. Використання мають у теплоізолюючих костюмах полярників, пожарників, обшивки космічних апаратів інше. Пінопласт (пінополістирол) і мінвата мають низьку теплопровідність через високий вміст повітря в них. Трудно в наш час знайти будівлю без застосування цих матеріалів для теплоізоляції. По тій же причині пористий пінобетон витісняє цеглу у будівництві. На протилежному краю унікально високої теплопровідності знаходяться новітні матеріали графену.

Тепловий рух молекул розрідженого газу	1
Температура і тепловий рух часточок середовища	1
Ступені вільності молекули газу	2
Внутрішня енергія розрідженого газу	3
Теплоємність розрідженого газу	5
Рівняння адіабати	6
<i>Лабораторна робота</i> Визначення показника	
 адіабати повітря методом Клемана-Дезорма	9
Опис установки	9
Порядок виконання експерименту	10
Перебіг роботи	13
Контрольні запитання	14
Вибрані поняття молекулярної фізики	17
Внутрішнє тертя рідини	23
В'язке тертя, граничний шар Прандтля	23
Сила в'язкого тертя. Коефіцієнт динамічної в'яз-	
кості	25
Реологія	29
Закон Стокса, сила лобового опору	31
Закон Стокса	31
Сила лобового опору	32
Метод Стокса. Число Рейнольдса	34
<i>Лабораторна робота</i> Визначення параметрів	
 внутрішнього тертя і дисипативних сил у	
 гліцерині методом Стокса	36
Опис устаткування	37
Виконання роботи	38
Вибрані поняття фізики суцільних середовищ . .	43

Закон Пуазейля	49
Протікання рідини через капіляр	49
Закон Пуазейля	50
<i>Лабораторна робота</i> Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідини за швидкістю протікання через капіляр	52
Опис устаткування	52
Виконання роботи	53
<i>Лабораторна робота</i> Оцінка кінетичних пара- метрів теплового руху молекул газу	58
Опис устаткування	58
Виконання роботи	60
Процеси переносу у розріджених газах	61