

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”**

На правах рукопису
УДК 533.6.011.8:536.75

Веретільник Тимофій Іванович

**Перехресні ефекти в бінарних газових сумішах
при довільних числах Кнудсена**

Спеціальність 05.14.07 - Механіка рідини, газу та плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ - 1996



00739565 (Z)

Дисертацією є рукопис
Роботу виконано в Черкаському інженерно-технологічному
інституті на кафедрі фізики

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
професор Акіншпін В.Д.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор Придатченко Ю.В.
кандидат технічних наук,
доцент Турік В.М.

Провідна установа: Черкаське відкрите акціонерне
товариство "Азот"

Захист відбудеться "13" травня 1996 р. о 15 год. 00 хв.
на засіданні спеціалізованої ради Д.01.02.13 при Національному
технічному університеті України "КПІ" за адресою:
252056, м.Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 5, аудиторія 406.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній
бібліотеці Національного технічного університету України.

Автореферат розісланий "6" квітня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
кандидат технічних наук

В.П. Рожалін

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси тепломасопереносу в газах та газових сумішах займають важливе місце в різних виробництвах та технологіях. Розвиток вакуумної техніки, новітніх хімічних технологій, розділення газових сумішей та ізотопів, удосконалення процесів сушки, ефективне використання твердого палива - все це потребує ретельного вивчення параметрів, які дозволяють керувати рухом газів та газових сумішей, а також при розробці високоточних методів розрахунків при проектуванні. Можливий шлях до правильного розуміння суті процесів тепломасообміну пов'язаний із розробкою кінетичної теорії газів та газових сумішей з теоретичною перевіркою результатів експериментів. З іншого боку, результати, які одержані методами кінетичної теорії газів, порівнюються з результатами термодинаміки нерівноважних процесів (ТНП).

На даний час цілком достатньо вивчено рух газів в різних каналах. Але потрібно звернути увагу на так звані перехресні ефекти, які мають місце в будь-якій нерівноважній ситуації, що реалізується в газовій системі. Потрібно враховувати їх внесок в так звані явища переносу, що приводять систему в рівноважний стан.

Таким чином, виникає проблема дослідити перехресні ефекти в бінарних газових сумішах, спочатку в стаціонарному, а потім в квазістаціонарному станах.

Мета роботи. Дослідження перехресних ефектів в бінарних газових сумішах при їх русі в каналах під дією різних термодинамічних сил (градієнтів температури, концентрації, тиску) при довільних числах Кнудсена.

Методи дослідження. Використано математичний апарат інтегрального та диференціальних обчислювань, ТНП. Значне місце займають числові методи дослідження перехресних ефектів з широким застосуванням сучасних ПЕОМ.

Наукова новизна роботи.

1. На основі термодинаміки нерівноважних процесів для перервних систем по Де Грооту досліджено перехресні ефекти в стаціонарному стані.

2. Проведено теоретичне дослідження руху бінарних сумішей розріджених газів в плоскому каналі під дією поздовжніх градієнтів температури, концентрації та тиску при довільних значеннях чисел Кнудсена. Вперше досліджено на основі ТНП перехресні ефекти в квазістаціонарному наближенні при русі бінарних газових сумішей. Вперше розв'язана задача про розділення бінарних газових сумішей на ядерних фільтрах у вільномолекулярному режимі течії.

Практична цінність роботи.

1. Отримані в розрахунках значення кінетичних коефіцієнтів, а також знайдені залежності їх від макроскопічних параметрів, можна використовувати для передбачення потоків газових компонентів в каналах в широкому діапазоні умов.

2. Перехресні ефекти можливо застосовувати для діагностики нерівноважного стану газів.

3. Одержані залежності коефіцієнтів Онзагера від числа Кнудсена можуть бути використані при розрахунках тепломасопереносу в процесах горіння, розділення газових сумішей, сушки, а також при визначенні різних поправок на перехресні ефекти: термомолекулярний тиск, дифузійний бароефект, термодифузію.

Результати наукових досліджень впроваджені на Черкаському виробничому об'єднанні "Азот" (акт впровадження додається до дисертації).

До захисту виносяться такі основні положення:

1. Результати теоретичних та експериментальних досліджень руху бінарної суміші газів по каналу при довільних числах Кнудсена.
2. Розрахунки кінетичних коефіцієнтів матриці Онзагера для руху бінарних газових сумішей в каналах при довільних числах Кнудсена, довільній концентрації, для різних моделей міжмолекулярних взаємодій.
3. Точка зору про можливість використання методів ТНП перервних систем для опису руху газових сумішей в каналах різної форми при довільних числах Кнудсена.
4. Результати числового розв'язку квазістаціонарної задачі для бінарних газових сумішей.
5. Новий метод розділення бінарних газових сумішей на ядерних фільтрах в режимі вільномолекулярної течії.

Зв'язок з тематикою науково - дослідних робіт (НДР). Робота виконана на кафедрі фізики як складова частина дербюджетної НДР: 157-92 "Тепломасоперенос в газах та газових сумішах."

Апробація роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

- Міжнародній науково-технічній конференції "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень", м. Житомир 1993р.
- 19 міжнародному симпозіумі по динаміці розріджених газів, (RGD-19), м. Оксфорд, Англія, 1994 р.
- Республіканській науково-технічній конференції "Аерокосмічний комплекс: конверсія та технології", м. Житомир, 1995 р.

- Євромехколовіумі 342 "Аеротермодинаміка", м. Готтінген, Німеччина, 1995 р., а також наукових семінарах кафедри фізики Черкаського інженерно-технологічного інституту.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 8 робіт, 5 із яких є доповідями на конференціях та симпозіумі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 137 сторінках і складається із вступу, п'яти розділів, висновків, бібліографії, додатків. Дисертація включає 33 малюнки, 2 таблиці, та 88 найменувань списку літератури.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано вибір напрямку досліджень, сформульовані мета та основні задачі дисертаційної роботи, наукова та практична цінність одержаних основних результатів, а також перераховані основні положення, що виносяться на захист.

Перший розділ є методичним. В ньому розглянуто питання молекулярно-кінетичної теорії газів та основні положення термодинаміки незворотніх процесів, що складають основу всіх досліджень.

Відмічається, що в даній роботі розглядається тільки розріджений газ, тобто такий газ, в якому усереднена по часу потенційна енергія взаємодії між молекулами значно менша їх середньої кінетичної енергії. Параметром розрідження газу виступає число Кнудсена, яке визначається як відношення середньої довжини вільного пробігу молекул λ до геометричного розміру задачі d , тобто :

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

На основі числа Кнудсена розглянуто нині діючу класифікацію режимів течії газів:

$K_n \leq 0.01$ - гідродинамічний режим ;

$K_n \approx 0.01:0.1$ - гідродинамічний режим зі сковзанням ;

$K_n \approx 0.1:10$ - перехідний режим ;

$K_n \approx 10:100$ - майже вільномолекулярний режим ;

$K_n \geq 100$ - вільномолекулярний режим.

Відомо, що іншим параметрам розрідження є параметр δ , який зв'язаний з числом Кнудсена таким чином:

$$\delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2K_n} = \frac{\sqrt{\pi} d}{2 \lambda} \quad (2)$$

Проведено короткий аналіз апроксимуючих кінетичних рівнянь. Особливу увагу приділено лінеаризованому кінетичному рівнянню третього порядку для газових сумішей. Характерною особливістю останнього є можливість використання будь-якої моделі міжмолекулярних взаємодій. В цій главі, крім того, обговорюються моделі міжмолекулярних взаємодій, а також граничні умови до кінетичних рівнянь для функції розподілу.

В першому розділі також розглянуто загальні ідеї інтегральних методів розв'язання кінетичних рівнянь. Обговорюються переваги цих методів при застосуванні до апроксимуючих кінетичних рівнянь.

В кінці першого розділу наведені основні рівняння термодинаміки незворотних процесів.

$$\sigma = \sum_{i=1}^n I_i X_i, \quad I_i = \sum_{j=1}^n L_{ij} X_j, \quad (3)$$

де σ - виробництво ентропії, X_i - термодинамічні сили,

I_i - термодинамічні потоки, L_{ij} - кінетичні коефіцієнти.

З принципу взаємності Онзагера випливає, що матриця кінетичних макроскопічних коефіцієнтів є симетричною, тобто

$$L_{ij} = L_{ji}, \quad i \neq j \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

Другий розділ присвячений аналітичному огляду та термодинамічному аналізу перехресних ефектів, що мають місце в бінарних газових сумішах. Аналіз робіт показує, що на даний час перехресним ефектам присвячені експериментальні та теоретичні дослідження, в яких, як правило, обговорюється один із ефектів. Ми ж розглядаємо всі ефекти з єдиних позицій, що послужило основою для коректних порівнянь та узагальнень.

Розглянемо перехресні ефекти, які можливі в бінарній газовій суміші, на основі варіаційного принципу Пригожина, який можна сформулювати таким чином: стаціонарні стани системи, в яких відбувається незворотний процес, характеризуються тим, що швидкість виникнення ентропії має мінімальне значення при даних зовнішніх умовах, які перешкоджають досягненню системою рівноважного стану. До перехресних ефектів відносимо стаціонарні стани з мінімальним виробництвом ентропії, причому будемо розглядати стаціонарні стани тільки другого порядку при рівності нулю однієї з двох фіксованих сил. Всі перехресні ефекти досліджені при довільних числах Кнудсена, довільній концентрації газової суміші для різних моделей потенціалу міжмолекулярної взаємодії.

На рис.1 представлена так звана "Двоколбова система", яка відображає суть розглянутих далі ситуацій. Ця система являє собою два об'єми V_1 та V_2 , які з'єднані каналом довжиною l . Вираз для виробництва ентропії у випадку бінарної суміші

розріджених газів має вигляд :

$$\sigma_s = qX_q + \langle u_1 - u_2 \rangle PX_c + \omega X_p . \quad (5)$$

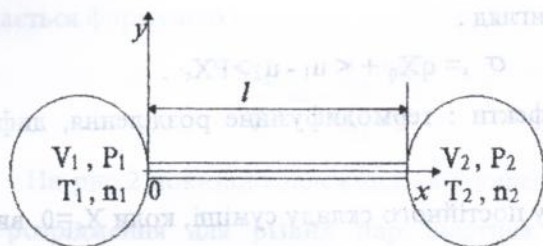


Рис.1. Двоколбова система.

У виразі (5) X_q , X_c , X_p - термодинамічні сили, що мають вигляд :

$$X_q = \frac{\tau}{T}, \quad X_c = \frac{\mu c}{T}, \quad X_p = \frac{V P}{T}, \quad (6)$$

де τ , μ , V - логарифмічні градієнти температури, числової густини та тиску відповідно, а P і T - середні значення тиску та температури. Величини q , $\langle u_1 - u_2 \rangle P$ і ω в (5) являють собою усереднені по перерізу каналу потоки : тепловий потік, аналог дифузійного потоку та середньочислова швидкість. Ці потоки зв'язані з термодинамічними силами системою лінійних рівнянь :

$$\begin{aligned} q &= L_{11}X_q + L_{12}X_c + L_{13}X_p \\ \langle u_1 - u_2 \rangle P &= L_{21}X_q + L_{22}X_c + L_{23}X_p \\ \omega &= L_{31}X_q + L_{32}X_c + L_{33}X_p . \end{aligned} \quad (7)$$

Визначимо перехресні ефекти, які мають місце в бінарній газовій суміші.

В ізотермічному випадку, коли $X_q=0$, вираз для виробництва ентропії (5) має вигляд :

$$\sigma_s = \langle u_1 - u_2 \rangle PX_c + \omega X_p . \quad (8)$$

і можливі два перехресних ефекти : бародифузійне розділення, дифузійний бароефект.

В ізобаричному випадку, коли $X_p=0$, вираз для виробництва ентропії (\mathcal{S}) має вигляд :

$$\sigma = qX_q + \langle u_1 - u_2 \rangle PX_c . \quad (9)$$

і можливі два ефекти : термодифузійне розділення, дифузійний термoeфект.

Для випадку постійного складу суміші, коли $X_c=0$, вираз для виробництва ентропії (\mathcal{S}) має вигляд :

$$\sigma = qX_q + \omega X_p . \quad (10)$$

і можливі два перехресних ефекти : термомолекулярна різниця тиску (ТРТ) та баричний термoeфект.

Для проведення термодинамічного аналізу всіх перехресних ефектів будемо використовувати приведені кінетичні коефіцієнти l_{ij} , які зв'язані з L_{ij} , такими співвідношеннями :

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{PT}{\lambda_1} l_{11}; & L_{12} &= \frac{PT}{\lambda_1} l_{12}; & L_{13} &= \frac{T}{\lambda_1} l_{13}; \\ L_{21} &= \frac{PT}{\lambda_1} l_{21}; & L_{22} &= \frac{PT}{\lambda_1} l_{22}; & L_{23} &= \frac{T}{\lambda_1} l_{23}; \\ L_{31} &= \frac{PT}{\lambda_1} l_{31}; & L_{32} &= \frac{PT}{\lambda_1} l_{32}; & L_{33} &= \frac{T}{\lambda_1} l_{33}; \end{aligned} \quad (11)$$

де
$$\lambda_1 = \left(\frac{m_1}{2kT} \right)^{1/2} . \quad (12)$$

Показано, що будь-який перехресний ефект для різних пар газів визначається відношенням недиагонального кінетичного коефіцієнту до діагонального в матриці Онзагера. Для різних пар інертних газів та різних моделей потенціалів взаємодії між молекулами побудовано залежності показників перехресних

ефектів від параметру розрідження та концентрації компонентів. Наприклад, баричний термоэффект - це ефект виникнення градієнта температури при наявності в суміші постійного градієнта тиску, визначається формулою :

$$\frac{\nabla T}{T} = -\frac{l_{13}}{l_{11}} \frac{\nabla P}{P} \quad (13)$$

На рис.2 показано залежність відношення l_{13}/l_{11} від параметру розрідження для різних пар інертних газів та різних концентрацій.

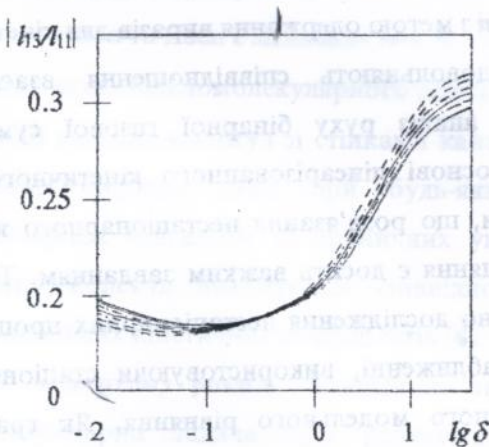


Рис.2. Залежність величини l_{13}/l_{11} від параметру розрідження δ при різних концентраціях c

(потенціал 6-12 Леннарда-Джонса)

1 - $c = 0.1$; 2 - $c = 0.9$;

— - He-Ne;

- - - He-Ar;

- · - · Ne-Ar.

Із рис.2 видно, що для всіх пар газів величина h_{12}/M_{11} слабо залежить від концентрації суміші та від сорту газів, які входять в цю суміш.

Показано, що результати розрахунків на основі потенціалу (6-12) Леннарда-Джонса добре погоджується з відомими експериментальними даними. Розбіжність між теоретичними розрахунками та експериментальними для цього потенціалу не перебільшує 7%. Результати для потенціалів "тверді сфери" та максвелловські молекули мають гірші показники через те, що вони мають лише один параметр реального потенціалу.

В третьому розділі з метою одержання виразів для кінетичних коефіцієнтів, що задовольняють співвідношення взаємності Онзагера, проведено аналіз руху бінарної газової суміші в плоскому каналі на основі лінеаризованного кінетичного рівняння. Слід відмітити, що розв'язання нестационарного кінетичного модельного рівняння є досить важким завданням. Тому в цьому розділі проведено дослідження нестационарних процесів в квазістационарному наближенні, використовуючи стаціонарний розв'язок для кінетичного модельного рівняння. Як граничні умови прийнято повністю дифузне розсіювання молекул кожного сорту в усіх точках поверхні каналу, тобто відображені молекули розподілені за максвелловским законом з локальним значенням температури газу та числової густини компонентів.

Кінетичне рівняння записується в інтегральній формі з прийнятими граничними умовами, а потім перетворюється в замкнену систему шести інтегральних рівнянь для макроскопічної швидкості, тензора в'язких напружень та теплового потоку кожного компонента газової суміші. Система інтегральних рівнянь для

цього випадку розв'язана методом Бубнова-Галеркіна. Особливість цих рівнянь в тому, що їх вільні члени включають вільномолекулярні значення відповідних макроскопічних величин. Тому пробні функції для моментів, що визначались, були вибрані у відповідності з відомим гідродинамічним розв'язанням задачі.

В результаті розрахунків було отримано кінетичні коефіцієнти матриці Онзагера. Крім того, проведено аналіз кінетичних коефіцієнтів для граничних режимів руху газових сумішей. В'язкий режим ($Kn \rightarrow 0$) характерний тим, що основним механізмом переносу тепла та маси є зіткнення між молекулами.

У випадку вільномолекулярного режиму ($Kn \rightarrow \infty$) головним є взаємодія газових молекул зі стінками каналу. Показано, що для всіх пар інертних газів при будь-яких потенціалах міжмолекулярних взаємодій та граничних умовах дифузного розсіювання молекул виконується співвідношення Онзагера для недіагональних кінетичних коефіцієнтів (4).

У четвертому розділі аналітично та чисельно розв'язана квазістаціонарна задача про релаксацію бінарних газових сумішей в двоколбовій системі. Числові розрахунки проведені для трьох пар бінарних газових сумішей (He-Ne, He-Ar, Ne-Ar) в широкому діапазоні чисел Кнудсена (0.01-100) при різних концентраціях першого компонента: $c=0.1; 0.3; 0.5; 0.9$.

На основі ТНП була одержана система рівнянь, за допомогою якої можна обчислити кінетичні коефіцієнти, а також залежності від часу, температури та тиску для різних концентрацій легкого компонента:

$$\begin{cases} \frac{d\tau}{dt} = \frac{2}{3}(l_{11}\tau + l_{12}c\mu + l_{23}v) \\ \frac{d\mu}{dt} = (1-c)(l_{21}\tau + l_{22}c\mu + l_{23}v) \\ \frac{dv}{dt} = (l_{31}\tau + l_{32}c\mu + l_{33}v) \end{cases} \quad (14)$$

Показано, що кожний приведений кінетичний коефіцієнт дає внесок в явище переносу.

Коротко розглянемо фізичний зміст кожного кінетичного коефіцієнта.

l_{12} -характеризує внесок в тепловий потік, який обумовлений градієнтом концентрації.

Але у відповідності із співвідношенням Онзагера $l_{12}=l_{21}$.

l_{21} -приведений кінетичний коефіцієнт, який характеризує внесок в дифузійний потік першого компонента, що обумовлений градієнтом температури.

l_{13} -характеризує внесок в тепловий потік, який обумовлений градієнтом тиску.

Згідно принципу Онзагера $l_{31}=l_{13}$.

l_{31} -приведений кінетичний коефіцієнт, який характеризує внесок в середньочислову швидкість, що обумовлена градієнтом температури.

На рис.3 показано залежність l_{13} від параметра δ при різних концентраціях.

Як видно із рис.3, при будь-яких значеннях концентрації c величина l_{13} монотонно зменшується із збільшенням δ . При фіксованих δ величина l_{13} збільшується із збільшенням концентрації c .

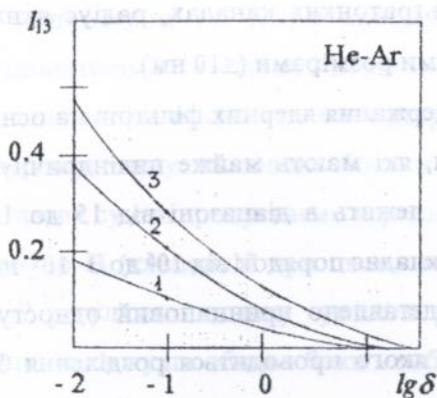


Рис.3. Залежність величини I_{13} від параметра розрідження δ при різних концентраціях c .

1 - $c=0.1$; 2 - $c=0.5$; 3 - $c=0.9$

I_{23} -характеризує внесок в дифузійний потік першого компонента, який обумовлений градієнтом тиску.

I_{32} -приведений кінетичний коефіцієнт, який характеризує внесок в середньочислову швидкість, що обумовлена градієнтом концентрації.

Розроблений пакет прикладних програм дає змогу провести розрахунки часових залежностей зміни термодинамічних параметрів T , P , c та коефіцієнтів матриці Онзагера.

Розділ п'ятий є заключним. Він присвячений експериментальним дослідженням розділення бінарних газових сумішей на ядерних фільтрах при вільномолекулярному режимі течії.

На початку розділу дається короткий опис робіт, яким присвячена дана проблема, зокрема підкреслюється, що рух газових сумішей через ядерні фільтри можна порівняти з традиційним

потокм Кнудсена в ультратонких каналах, радіус яких можна порівняти з молекулярними розмірами (≤ 10 нм).

Описано методи одержання ядерних фільтрів на основі полімерних плівок з порами, які мають майже циліндричну форму. При цьому розміри пор лежать в діапазоні від 15 до 10^3 нм, а щільність (густина) пор складає порядок від 10^5 до $3 \cdot 10^9$ на см^2 .

На рис.4 представлено принциповий одноступеневий пристрій, за допомогою якого проводиться розділення бінарних газових сумішей. Запропонована установка базується на ідеї двоколбової моделі, тобто, коли два об'єми з'єднані один з одним каналом - капіляром.

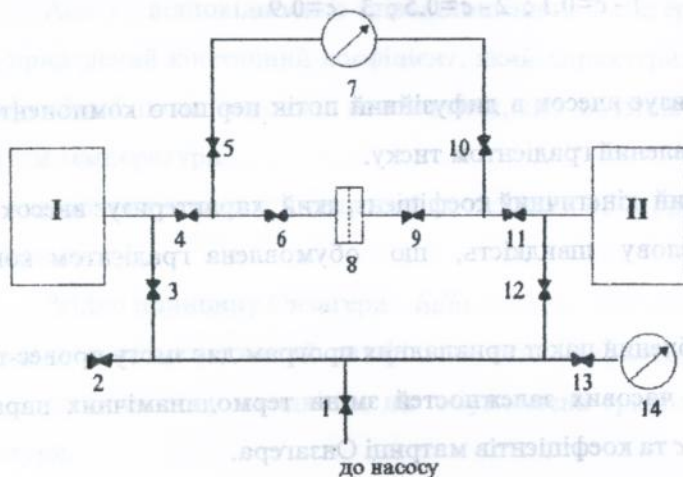


Рис.4. Принципова схема експериментальної установки.

Методика розділення газової суміші така. Перед початком досліджу вся система відкачується до тиску 10^3 Па, яке контро-

люється манометром 14. Потім вихідну бінарну газову суміш через кранонатікач 2 та клапан 3 подаємо в резервуар I.

За допомогою масляного манометра 7 задаємо та контролюємо перепад тиску по обидва боки мембрани 8. Після цього бінарну газову суміш пропускаємо через мембрану 8 із резервуару I в резервуар II (клапан 12 при цьому закритий). За допомогою натікача 2 регулюємо подачу суміші в робочий резервуар I та сталу різницю тиску по обидва боки мембрани. Загальний тиск до мембрани контролюємо манометром 14. Після закінчення процедури проводимо експрес-аналіз складу суміші в резервуарі II.

Запропонований метод дає можливість розділення газових сумішей з компонентами, які мають близькі по вазі молекули. Цей метод базується на використанні одного із перехресних ефектів: бародифузійного розділення.

Прикладом конкретного виконання цього метода в дисертації є сепарація повітря на одноступеневому пристрої. Повітря в цьому випадку виступає як бінарна газова суміш, що складається із молекул азоту та кисню, в яких молекулярні ваги відповідно дорівнюють $M_{O_2} = 32$ і $M_{N_2} = 28$. Важливим параметром при розділенні сумішей є коефіцієнт сепарації. Теоретичні розрахунки коефіцієнта сепарації для повітря ми обчислювали по формулі:

$$\alpha = \sqrt{\frac{M_{O_2}}{M_{N_2}}} = \sqrt{\frac{32}{28}} = 1,069 \quad (15)$$

Із теоретичних розрахунків видно, що вихідна суміш збагачена легким компонентом на 6,9%.

На рис.5 представлено експериментальні дані залежності коефіцієнта розділення α від перепаду тиску ΔP для ядерного

фільтра, що має діаметр пор 500 \AA .

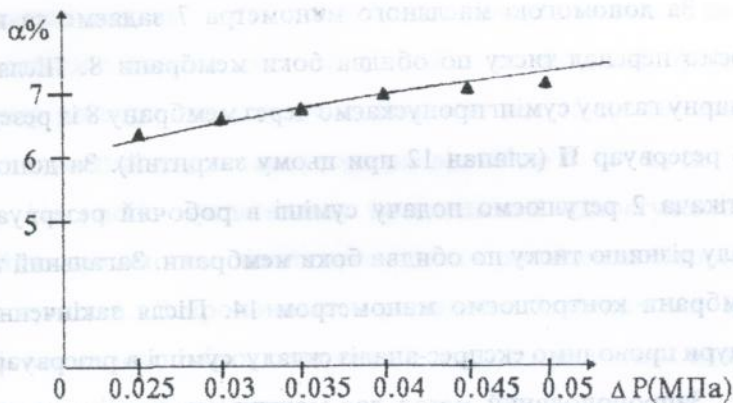


Рис.5. Залежність коефіцієнта сепарації від перепаду тиску.

Таким чином вихідна суміш в наших експериментах збагачується легким компонентом в середньому на 6-7% для однокаскадного пристрою. Звичайно, що бажаного ступеня розділення бінарних газових сумішей з компонентами, що мають близькі по вазі молекули, можна отримати тільки в багатокаскадному пристрої.

У пункті **висновки** перераховано основні результати дисертаційної роботи.

1. Проведено аналіз робіт перехресних ефектів, що мають місце при русі бінарної газової суміші. Показано, що практично у всіх роботах, як правило, обговорювався один із ефектів.

2. Проведено дослідження перехресних ефектів бінарних газових сумішей для стаціонарного стану системи з єдиних позицій на

основі варіаційного принципу Пригожина термодинаміки незворотніх процесів.

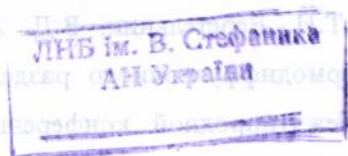
3. Досліджено тепломасоперенос бінарних газових сумішей в каналах при довільних числах Кнудсена методами кінетичної теорії розрідженого газу та термодинаміки незворотніх процесів.

Квазістаціонарна задача про рух бінарних газів в каналі розв'язана на основі апроксимуючого кінетичного рівняння третього порядку. В результаті розв'язання отримано значення коефіцієнтів матриці Онзагера.

4. Чисельно розв'язана квазістаціонарна задача про релаксацію бінарних газових сумішей в двоколбовій системі. Одержано систему рівнянь для дослідження перехресних ефектів в бінарних газових сумішах в широкому діапазоні чисел Кнудсена.

5. Розроблено пакет прикладних програм для розрахунку часових залежностей зміни термодинамічних параметрів T , P , c та коефіцієнтів матриці Онзагера.

6. Запропоновано новий метод розділення бінарних газових сумішей на ядерних фільтрах. Проведено експериментальне дослідження розділення повітря на ядерних фільтрах. Зроблено висновок, що запропонований метод розділення бінарних газових сумішей має ряд переваг, зокрема, він зменшує енерговитрати вакуумного обладнання.



Основні результати дисертації викладені у роботах:

1. Веретельник Т.И., Набережнева Е.П., Калинин В.В., Акиншин В.Д. Установление термодинамического равновесия в бинарных газовых смесях при произвольных числах Кнудсена // ИФЖ, в печати 1996 г.

Отримано систему рівнянь для дослідження в квазістаціонарному наближенні перехресних ефектів в бінарних газових сумішах при довільних числах Кнудсена.

2. T. Veretelnik, V. Akinshin The Cross Effects in Binary Gas Mixture in Quasi-Stationary Approximation // Proceeding DRG-19. 1995. Vol.2 Oxford University Press, pp. 1198-1205

Чисельно розв'язана квазістаціонарна задача руху бінарної газової суміші по каналу.

3. Akinshin V.D., Veretelnik T.I., Naberejneva E.P. Movement of Binary Mixture of Rarefied Gases in Channels // 19-th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics- Oxford University, England 25-29 July, 1994, AP26

На основі лінеаризованного кінетичного рівняння досліджено рух бінарної газової суміші в плоскому каналі.

4. Veretelnik T.I., Akinshin V.D. Investigation of Gross Effects in Binary Gas Mixtures in Quasi-Stationary Approximation // 19-th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics- Oxford University, England 25-29 July, 1994, AP27

Проаналізовано всі перехресні ефекти, що мають місце в бінарній газовій суміші.

5. Т.И. Веретельник, В.Д. Акиншин К вопросу об отличии термодиффузионного разделения от бародиффузионного // Тр. Международной конференции "Фундаментальні та прикладні проблеми космічних досліджень", Житомир. 1993, с.13-14

Наведено фундаментальну різницю термодифузійного розділення від бародифузійного.

6. Veretelnik T.I., Akinshin V.D. Nonisothermal Flow of Gas in Long Channel with Account of Accomodation Effects on a Surface // EUROMECH-342 Colloquium "Aerothermodynamics" DLR Göttingen, 26-29 September, 1995

Проаналізовано неізотермічний рух газів в довгому каналі за рахунок акомодацийних ефектів на поверхні.

7. Акинъшин В.Д., Веретельник Т.И. Особенности кинетических задач с фазовыми переходами // В кн. "Аэрокосмический комплекс : конверсия и технология": Тез. докладов научно-технической конференции. Житомир, 1995, с. 77-78.

Розглянуто особливості задач по руху газів в каналах з врахуванням газових перетворень на поверхні.

8. Веретельник Т.И., Акинъшин В.Д. Соотношение взаимности Онзагера в задачах кинетической теории газов // В кн. "Аэрокосмический комплекс: конверсия и технология": Тез. докладов научно-технической конференции. Житомир, 1995, с.78-79

Запропоновано метод вибору кінетичних коефіцієнтів, для яких справедливі співвідношення взаємності Онзагера.



АННОТАЦІЯ.

Веретельник Т.И. Перекрестные эффекты в бинарных газовых смесях при произвольных числах Кнудсена .

Диссертация (рукопись) на соискания ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.07 - механика жидкости газа и плазмы, Национальный технический университет Украины "КПИ" , г.Киев, 1996 г.

Анализируются результаты теоретического и экспериментального исследования перекрестных эффектов, имеющие место в бинарных газовых смесях в широком диапазоне чисел Кнудсена.

ABSTRACT.

Veretelnik T.I. The cross effects in binary gas mixtures for arbitrary Knudsen numbers.

Dissertation for the candidate degree in technical sciences on the speciality 05.14.07 - mechanics of a liguides, gas and plasma, National Technical University of Ukraina "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 1996.

The results of the theoretical and experimental investigations of the cross effects, taking place in binary gas mixture in the wide range of the Knudsen numbers have been analyzed.

Ключові слова : рівняння Больцмана, модельне рівняння, розріджений газ, число Кнудсена, потенціал міжмолекулярної взаємодії, суміш газів, термодинамічні потоки та сили, кінетичні коефіцієнти, співвідношення взаємності Онзагера, канал, ядерний фільтр.

AB 34.574
AB 34.574

Підписано до друку 2.04 1996. Формат 60x84 1/16. Палір кол.
Друк оперативний. Ум.др.арк. 1,25 Тираж 100 прим. Зам. N 135

Редакційно – видавничий відділ ЧПГ
257006, м. Черкаси, бульвар Шевченка, 460, 4к.