

УДК 530;532

Е.Г. Азнакаєв

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ В РІДИНАХ, ЇХ СУМІШАХ ТА ЩІЛЬНИХ БАГАТОФАЗНИХ І БІОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Приведено теорію процесів переносу у щільних середовищах з врахуванням одночастинкових та багаточастинкових рухів. Наведений закон подібності для нерівноважних та рівноважних характеристик середовища. Вивчаються характеристики турбулентних течій.

Дослідження процесів переносу у щільних середовищах викликають великий інтерес. Проблеми розробки нових технологічних процесів у промисловості, розв'язок нових задач аерокосмічної науки, опис функціонування біологічних систем потребують знання природи процесів переносу у різноманітних середовищах.

Математичною основою теоретичного опису процесів переносу у щільних середовищах є роботи автора [1, 2].

1. Розглянемо спочатку однокомпонентні щільні гази та рідини.

Для опису процесів переносу застосовується узагальнене кінетичне рівняння Больцмана-Енського:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + \vec{V} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \vec{r}} + \frac{\vec{F}}{m} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \vec{V}} - \frac{1}{m} \iint \frac{\partial \Phi_{12}}{\partial \vec{r}} \cdot \frac{\partial f_2}{\partial \vec{V}} d\vec{r}_2 d\vec{V}_2 = I_{CT}, \quad (1.1)$$

де f_1 та f_2 – одночастинкова та двочастинкова функції розподілу молекул; \vec{r} , \vec{V} – просторова координата та швидкість молекули; \vec{F} – зовнішня сила, що діє на цю молекулу; m – маса молекули середовища; Φ_{12} – потенціал парної взаємодії молекул середовища; I_{CT} – інтеграл зіткнень молекул.

Для опису нескорельованого одночастинкового руху застосовується кінетичне рівняння Больцмана-Енського, а для опису колективних багаточастинкових процесів (скорельованих рухів великих груп молекул) вводиться ефективний потенціал, зв'язаний з четвертим членом у лівій частині рівняння (1.1).

Розв'язок рівняння (1.1) шукаємо методом збурень. Це дозволяє знайти вираз для функції розподілу молекул середовища та розрахувати коефіцієнти переносу щільного середовища.

Знайдені рівняння гідродинаміки для щільного середовища мають вигляд рівнянь Нав'є-Стокса, у які слід підставити знайдені для щільного середовища коефіцієнти переносу.

Розрахункові вирази для коефіцієнтів переносу щільного середовища мають вигляд [3]:

$$\xi = \alpha_0^* \rho^* T^{*-1} - \alpha_1^* \rho^{*5/3} T^{*-2}, \quad (1.2)$$

де ξ – різноманітні рівноважні та нерівноважні характеристики середовища; $\alpha_0^* = 1$; $\alpha_1^* = K/4$; K – величина, близька до одиниці; $\rho^* = \rho/\rho_{кр}$; $T^* = T/T_{кр}$, ρ та T – густина та температура середовища, $\rho_{кр}$ та $T_{кр}$ – критичні густина та температура середовища.

Формула (1.2) добре описує експериментальні дані та показує справедливість закону подібності для властивостей щільного середовища. Графік залежності величини ξ від η ($\eta = \rho^{*2/3} T^{*-1}$) приведено на рисунку.

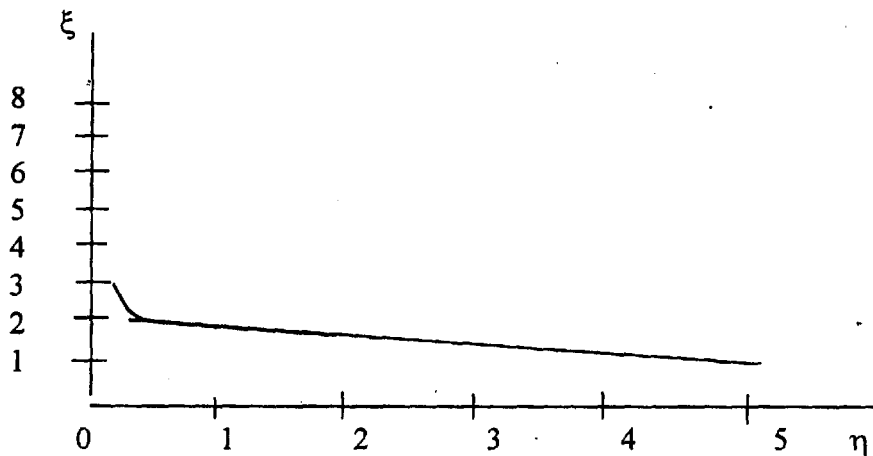


Рис. Залежність характеристики середовища ξ від η .

2. Суміші щільних газів та рідин

Для опису процесів переносу у щільних сумішах застосовується узагальнене кінетичне рівняння Больцмана-Енського для сумішей, у якому також враховано як одночастинкові так і багаточастинкові рухи молекул середовища [4]. Це рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{V}_i \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \vec{r}_i} + \frac{\vec{F}_i}{m_i} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial \vec{V}_i} - \sum_{j=1}^N m_i^{-1} \iint \frac{\partial \Phi_{ij}}{\partial \vec{r}_i} \cdot \frac{\partial f_{2ij}}{\partial \vec{V}_i} d\vec{r}_j d\vec{V}_j = I_{cti}, \quad (2.1)$$

де m_i – маса молекули i -го компонента суміші; \vec{V}_i та \vec{r}_i – просторова швидкість та координата молекули i -го компонента суміші; \vec{F}_i – зовнішня сила, що діє на цю молекулу; Φ_{ij} – потенціал парної взаємодії молекул сорту i та j ; t – час; N – число компонентів суміші; f_i – одночастинкова функція розподілу молекул i -го сорту; f_{2ij} – двочастинкова функція розподілу молекул сорту i та сорту j ; I_{cti} – інтеграл зіткнень молекул, віднесений до i -го компонента суміші.

Розв'язок рівняння (2.1) шукаємо у вигляді ряду по ступенях градієнтів гідродинамічних величин. У рамках цього підходу знайдено вирази для функцій розподілу молекул щільної суміші, що дозволяє знайти коефіцієнти переносу щільної суміші.

Рівняння гідродинаміки для щільної суміші мають вигляд рівнянь Нав'є-Стокса, у яку слід підставити знайдені коефіцієнти переносу для щільної суміші.

Вирази для коефіцієнтів переносу щільної суміші можуть бути представлені у вигляді [3, 4]:

$$\xi = \tilde{\alpha}_0 \tilde{\rho} \tilde{T}^{-1} - \tilde{\alpha}_1 \tilde{\rho}^{5/3} \tilde{T}^{-2}, \quad (2.2)$$

де $\tilde{\xi}$ – рівноважні та нерівноважні характеристики щільної суміші; $\tilde{\alpha}_0 = 1$, $\tilde{\alpha}_1 = K/4$, K – величина, близька до одиниці; $\tilde{\rho} = \rho/\rho_{кр.с}$; $\tilde{T} = T/T_{кр.с}$, $\tilde{\rho}$ та \tilde{T} – густина на температура щільної суміші, $\tilde{\rho}_{кр.с}$ та $\tilde{T}_{кр.с}$ – критичні густина та температура щільної суміші.

Формула (2.2) узгоджується з експериментальними даними та показує справедливості закону подібності для властивостей щільного середовища. Графік залежності величини $\tilde{\xi}$ від η ($\eta = \tilde{\rho}^{2/3} \tilde{T}^{-1}$) $\eta(\eta = \tilde{\rho}^{2/3} \tilde{T}^{-1})$ приведено на рисунку.

3. Багатофазні щільні системи.

Для опису процесів переносу у багатофазних щільних і біологічних середовищах також можна застосовувати методи статистичної фізики. Кінетичне рівняння для багатофазної системи рідина – тверда фаза має вигляд [5]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{V} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \frac{\vec{F}}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{V}} - \left(m^{-1} \frac{\partial U_{\text{ef.p-t}}}{\partial \vec{r}} + m^{-1} \frac{\partial U_{\text{ef.t-t}}}{\partial \vec{r}} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{V}} = I_{T-T} + I_{P-T}, \quad (3.1)$$

де m – маса частинки твердої фази; t – час; \vec{r}_i та \vec{V}_i – просторова координата та швидкість частинки твердої фази; \vec{F} – зовнішня сила, що діє на цю частинку; $U_{\text{ef.p-t}}$ та $U_{\text{ef.t-t}}$ – описують взаємодію частинки твердої фази з рідиною та цієї частинки з іншими частинками твердої фази; f – одночастинкова функція розподілу частинок твердої фази; I_{T-T} та I_{P-T} – описують зіткнення між частинками твердої фази та частинками твердої фази та рідини.

Подібне до (3.1) кінетичне рівняння для багатофазної системи рідина – рідина (емульсія) може бути застосовано з урахуванням залежності розмірів кластерів рідкої фази від координат та значень термодинамічних змінних у цій точці простору [6]. Діаметр кластера дисперсної фази знаходять з умови рівності тиску зовні та всередині кластера.

Знайдені рівняння гідродинаміки для багатофазної системи мають вигляд рівнянь Нав'є-Стокса, у які входить внесок від міжфазної взаємодії, а також знайдені вирази для коефіцієнтів переносу багатофазної щільної системи [5, 6].

Вирази для коефіцієнтів переносу та їх залежність від термодинамічних змінних мають такий же вигляд, як і у формулі (2.2) та на рисунку з урахуванням залежності параметрів від розмірів кластерів та їх взаємодії між собою.

4. Турбулентні процеси у газах та рідині

Для опису процесів переносу у турбулентному середовищі застосовується ланцюжок рівнянь Боголюбова – Борна – Гріна – Кірквуда – Івона з урахуванням колективної взаємодії молекул середовища [7]. Перше рівняння цієї системи рівнянь має вигляд:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{r}} + m^{-1} \left[\vec{F} - \int \frac{n \partial \Phi_{12}}{\partial \vec{r}} G_{12} d\vec{r}_2 \right] \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{V}} \right) f = \hat{I}_{CT}, \quad (4.1)$$

де m – маса частинки середовища; \vec{r}_i та \vec{V}_i – її просторова координата та швидкість; t – час; \vec{F} – зовнішня сила, що діє на цю частинку; Φ_{12} – потенціал парної взаємодії частинки середовища; n – концентрація частинок; G_{12} – парна кореляційна функція; f – одночастинкова функція розподілу частинок середовища; \hat{I}_{CT} – інтеграл зіткнень.

Розв'язуючи цю систему рівнянь, знаходимо вирази для функцій розподілу частинок та вирази для коефіцієнтів переносу турбулентного середовища.

Знайдено також систему гідродинамічних рівнянь, що описують турбулентні процеси.

Це дозволяє знайти вирази для турбулентного гідродинамічного опору циліндричних труб λ :

$$\lambda = 64 (\text{Re}_{\text{кр}} y)^{-1} (1 + \bar{\alpha}_0 y) \exp [a_0 y + a_1 \sqrt{y}], \quad (4.2)$$

де Re та $Re_{\text{кр}}$ – число Рейнольдса та його критичне значення; $y = Re / Re_{\text{кр}}$; $a_0 = 1,08504310^{-3}$; $\bar{\alpha}_0 = 0,85$; $a_1 = -5,94378310^{-2}$.

Можна також знайти вирази для профілю усередненої турбулентної швидкості φ у циліндричних трубах та у твердої стінки:

$$\varphi(r) = \frac{1}{\bar{\alpha}_0} \ln \left| 1 + \bar{\alpha}_0 \frac{V^* a a^2 - r^2}{2\nu a^2} \right|, \quad (4.3)$$

$$\varphi(r) = \frac{1}{\bar{\alpha}_0} \ln |1 + \bar{\alpha}_0 \eta|, \quad (4.4)$$

де a – радіус циліндричної труби; ν – кінематична в'язкість; r – відстань від осі циліндра; $V^* = \Delta P a / 2\rho L$, ΔP – перепад тиску на довжині труби L , ρ – густина середовища, $\varphi = U(r) / V^*$; U – швидкість течії у трубі та у твердої стінки. Для твердої стінки $\eta = zV^*/\nu$, z – відстань від стінки.

Ці формули узгоджуються з експериментом до чисел Рейнольдса, рівних $10^{6,4}$.

Список літератури

1. Азнакаєв Е.Г. Явления переноса в плотных однокомпонентных системах. Простые криогенные жидкости // Фізика низьких температур, 1979. – Т.5. – №10. – С.1200 – 1211.
2. Азнакаєв Е.Г. Коэффициенты переноса плотных сред // Доповіді АН УССР. Сер. Фіз.-мат. наук. 1983. – №2. – С. 44-47.
3. Азнакаєв Е.Г. Расчет равновесных и неравновесных свойств газов, жидкостей и их смесей // Біоніка, 1988. – №22. – С. 50-55.
4. Азнакаєв Е.Г. Процессы переноса в многокомпонентных смесях газов и жидкостей // Журнал прикл. мех. та технічної фізики, 1989. – №12. – С.12.
5. Азнакаєв Е.Г. Гидродинамика многофазных систем // Біоніка, 1984. – №18. – С. 22-24.
6. Азнакаєв Е.Г. Статистическая механика дисперсных сред // Біоніка, 1984. – №18. – С. 18-22.
7. Азнакаєв Е.Г., Козлов Л.Ф. Процессы переноса в турбулентных средах умеренной плотности // Біоніка, 1987. – №21. – С. 1-23.

Стаття надійшла до редакції 12 грудня 1997 року.



Емір Ганєєвич Азнакаєв (1951); закінчив Київський державний університет ім.Т.Г.Шевченка в 1973 році. Доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики. Член Європейської та Американської спільнот з матеріалознавства, член оптичного товариства ім.Роздєстєнського (Росія). Автор понад 100 робіт у галузі статистичної та математичної фізики, біофізики.

Emir G. Aznakaev (b.1951) graduated from Kyiv Shevtchenko University (1973). DSc. (Eng.). Ph.D. and Mathematician, professor of Physics Department. Member of European and American materials societies, member of Rozhdestvensky Optics society (Russia). Author of more than 100 publications in the fields statistical and mathematical physics and bio-physics.