

УДК 536.24

О проявлении многокомпонентной диффузии в ламинарном пограничном слое с инородным вдувом*

В.В. Лукашов, С.В. Жиливостова

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: luka@itp.nsc.ru

Экспериментально исследованы особенности ламинарного диффузионного пограничного слоя на проницаемой поверхности при изотермическом вдуве гелия в поток воздуха. Измерения распределений концентраций гелия, азота и кислорода показали, что соотношение объемных долей N_2 к O_2 по толщине пограничного слоя изменяется. При больших интенсивностях вдува гелия в воздух наблюдается отличие от бинарной диффузии, описываемой законом Фика. Оценки также показали, что в пограничном слое с инородным вдувом возможны проявления эффектов многокомпонентной диффузии.

Ключевые слова: многокомпонентная диффузия, пограничный слой, инородный вдув.

ВВЕДЕНИЕ

При исследованиях вдува инородного газа в поток воздуха образующийся диффузионный пограничный слой, как правило, рассматривается в приближении бинарной смеси газов. Однако известно, что различия в величинах коэффициентов бинарной диффузии отдельных компонентов газовой смеси могут приводить к разнообразным суммарным эффектам [1].

В работе [2], при моделировании обтекания профиля высокоскоростным потоком воздуха, когда молекулы кислорода на поверхности могли диссоциировать на атомы, получено, что происходит диффузионное разделение компонентов воздуха. Отмечено, что вдув усиливает этот эффект, а отсос газа из пограничного слоя, наоборот, приводит к снижению эффекта разделения.

Эффекты, связанные с многокомпонентным характером диффузии, могут проявляться и при наличии фазовых переходов на стенке. Так, в работе [3] показано, что при пленочной конденсации паров из трехкомпонентной смеси на вертикальной поверхности происходит фракционирование между двумя неконденсирующимися газами по мере приближения к поверхности фазового перехода.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (грант № НШ-6965.2006.8) и РФФИ (грант № 05-02-16478).

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование диффузии при вдуве гелия в поток воздуха в ламинарном пограничном слое на проницаемой поверхности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу непрерывного действия незамкнутого типа с рабочей частью сечением 108×108 мм, длиной 0,5 м. Нижняя стенка рабочей части изготовлена из пористых пластин, через которые в поток подавался инжектант с постоянной массовой интенсивностью вдува ($j_{СТ} = \text{const}$). Максимальная скорость воздуха — 4 м/с — позволяла получить устойчивый ламинарный пограничный слой по всей длине канала.

В ходе эксперимента контролировались тепловые параметры пограничного слоя. Температура пористой стенки измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Температура в пограничном слое и в ядре потока измерялась медьконстантановой термопарой с диаметром спая 0,1 мм.

Химический анализ компонентов пограничного слоя осуществлялся хроматографическим методом. В экспериментах использовался хроматограф типа ЛХМ-8МД. Отбор пробы из пограничного слоя проводился с помощью зонда, выполненного на основе трубки Пито. Приемное отверстие имело форму эллипса с вертикальным размером 0,2 мм. Анализируемая газовая смесь вводилась в измерительный тракт хроматографа с помощью газового крана-дозатора, что обеспечивало постоянство объема исследуемой пробы. Разделительная колонка (СаА) при использовании в качестве газа носителя водорода позволяла проводить одновременные измерения концентраций гелия, азота и кислорода в диапазоне от 0 до 100 %. Используемая в наших опытах разделительная колонка не позволяла отделить кислород от содержащегося в воздухе аргона. На хроматограмме сигнал, соответствующий O_2 и Ar, регистрировался как один пик. Поэтому при описании экспериментальных данных под концентрацией кислорода подразумевается сумма концентраций кислорода и аргона.

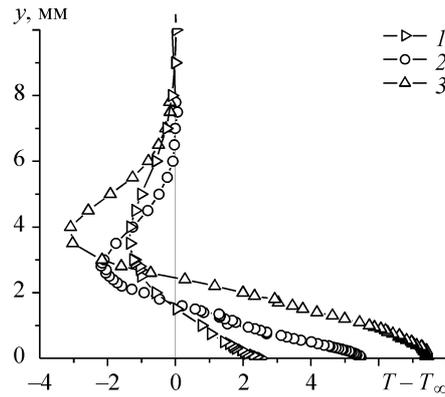
В качестве детектора использовался катарометр. Перед началом измерений и по завершении каждой серии экспериментов проводилась калибровка хроматографа на поверочных газовых смесях известного состава. Проведенные тестовые измерения показали, что в выбранном режиме работы регистрирующего прибора площади пиков на хроматограмме зависят от величин концентраций измеряемых веществ линейно.

Дополнительно при помощи газоанализатора ТЕСТ-2М осуществлялся контроль влажности воздуха. Как показали измерения, в наших опытах содержанием влаги можно пренебречь: объемная концентрация воды в воздухе основного потока не превышала 0,2 % об.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Тепловые условия опытов максимально приближались к изотермическим: температуры вдуваемого газа и основного потока устанавливались равными комнатной температуре. Однако в результате воздействия диффузионного термоэффекта (эффекта Дюфо) в пограничном слое со вдувом гелия происходит перераспределение тепла по толщине пограничного слоя. Наблюдается разогрев поверхности проницаемой стенки и смеси газа вблизи нее до 8 °С, во внешней части пограничного слоя происходит охлаждение потока. Это приводит к нарушению

Рис. 1. Распределение температуры при вдуве гелия в воздух, $\bar{j}_{CT}\sqrt{Re} = 0,04$ (1), 0,15 (2), 0,2 (3).



условий изотермичности (рис. 1), избежать которого в эксперименте не представляется возможным.

Распределения объемных концентраций He, N₂ и O₂ при $U = 4$ м/с, $z = 120$ мм и при вдуве гелия $\bar{j}_{CT} = 0,00434, 0,0109, 0,0174$ кг/м²с показаны на рис. 2. Известно, что при использовании зондовых методов исследования состава смесей происходит “осреднение” по некоторому объему, зависящему от соотношения скорости набегающего на зонд потока и скорости отбора пробы. Максимальное воздействие зонда на исследуемый поток происходит вблизи стенки, где скорости потока минимальны. Это хорошо заметно по распределению гелия при $\bar{j}_{CT}\sqrt{Re} = 0,55$. Известно, что при значении параметра $\bar{j}_{CT}\sqrt{Re} = 0,48$ должно происходить оттеснение пограничного слоя, однако измеренные значения концентрации гелия “на стенке” меньше 100 %.

Безразмерные концентрации He, N₂, O₂ стремятся к нулю при $y \rightarrow 0$ и к единице на внешней границе пограничного слоя. Поэтому различия в распределениях безразмерных концентраций всех трех веществ практически незаметны (рис. 3). Если ограничиться анализом распределений веществ в таком представлении, то можно было бы сделать заключение о том, что диффузия гелия в воздух не отличается от обычной бинарной диффузии. Но в этом случае связь концентраций кислорода и азота с концентрацией гелия описывалась бы: $X_{N_2} = (1 - X_{He})X_{N_2}^\infty$

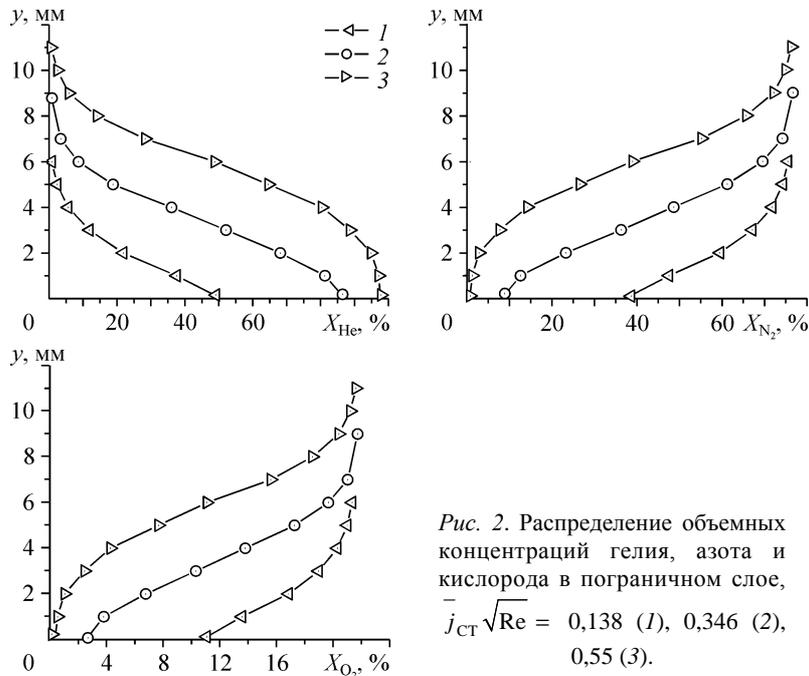


Рис. 2. Распределение объемных концентраций гелия, азота и кислорода в пограничном слое, $\bar{j}_{CT}\sqrt{Re} = 0,138$ (1), 0,346 (2), 0,55 (3).

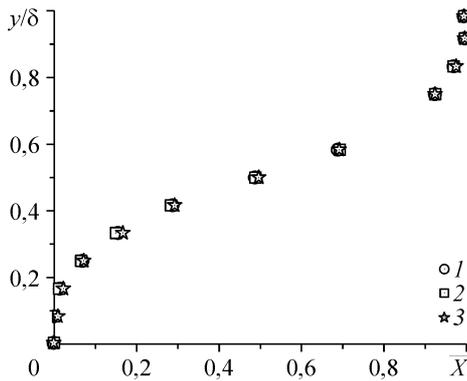


Рис. 3. Безразмерный профиль концентрации, O_2 (1), N_2 (2), He (3).

и $X_{O_2} = (1 - X_{He})X_{O_2}^\infty$. Данные, представленные на рис. 4, показывают, что допущение бинарности рассматриваемой смеси газов нарушается вблизи поверхности пористой стенки. Заметим, что имеются различия между зависимостями для азота и для кислорода. Это означает, что при вдуве гелия в поток воздуха в пограничном

слое наблюдается изменение состава воздуха. То есть, если воспользоваться терминологией [2], наблюдается диффузионное разделение воздуха.

Разделение компонентов воздуха при диффузии в него гелия можно характеризовать параметром $A = \frac{(X_{N_2}/X_{O_2})}{(X_{N_2}/X_{O_2})_\infty}$ — изменением соотношения между объем-

ными концентрациями азота и кислорода в данной точке пограничного слоя по сравнению с их соотношением в основном потоке. $(X_{N_2}/X_{O_2})_\infty = 3,569$, что соответствует сухому атмосферному воздуху стандартного состава. Если диффузия описывается законом Фика и смесь гелия с воздухом можно рассматривать как бинарную, то $A = 1$.

На рис. 5 представлены распределения параметра A по толщине пограничного слоя при тех же режимах, что и на рис. 2. Видно, что при концентрациях гелия более 50 % вблизи проницаемой стенки ($y/\delta \leq 0,5$) параметр $A < 1$. Можно говорить об избыточном содержании кислорода по сравнению с перемешанной смесью воздуха и соответствующего количества гелия.

Во всем диапазоне условий проведенных опытов параметр разделения A обобщается как функция объемной концентрации гелия в текущей точке пограничного слоя (рис. 6). Звездочками на рис. 6 обозначены данные, полученные

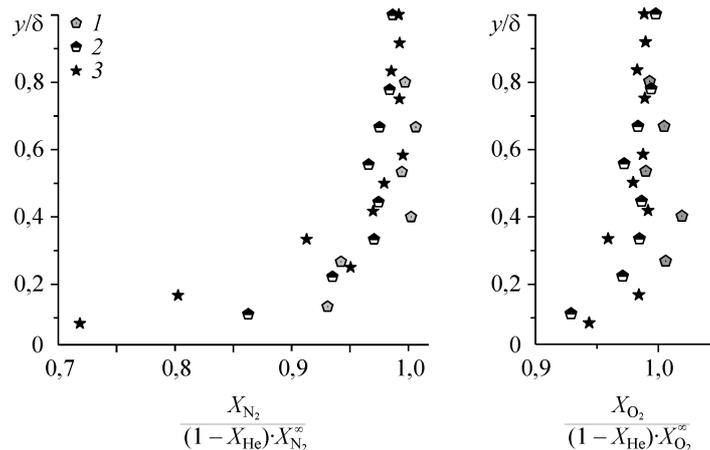


Рис. 4. Отличие концентраций O_2 и N_2 от бинарной диффузии: $U_0 = 2$ (1), 4 (2, 3), $z = 190$ (1), 120 (2, 4), $\bar{j}_{CT} \sqrt{Re_X} = 0,346$ (1, 2), 0,55 (3).

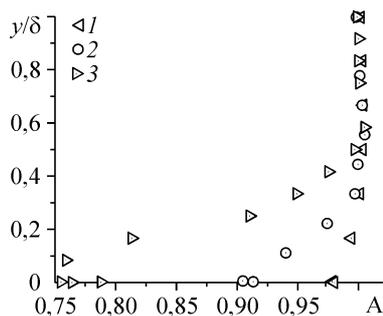


Рис. 5. Изменение параметра разделения A по толщине пограничного слоя.

$$\bar{j}_{\text{CT}} \sqrt{\text{Re}_X} = 0,135 \text{ (1)}, 0,346 \text{ (2)}, 0,55 \text{ (3)}.$$

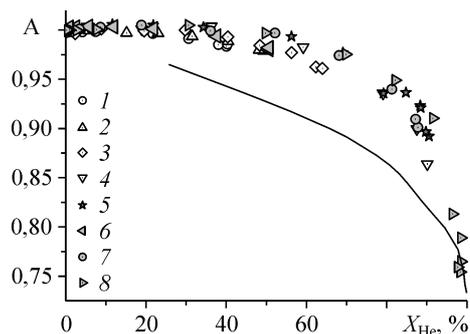


Рис. 6. Зависимость параметра разделения A от величины объемной концентрации геля.

$$U_0 = 2 \text{ (1-5)}, 4 \text{ (6-8)}, z = 80 \text{ (1, 5)}, 120 \text{ (2, 6-8)}, 190 \text{ (3, 4)}, \bar{j}_{\text{CT}} \sqrt{\text{Re}_X} = 0,110 \text{ (1)}, 0,138 \text{ (2, 4)}, 0,180 \text{ (3)}, 0,346 \text{ (4, 7)}, 0,4 \text{ (5)}, 0,55 \text{ (8)}.$$

по результатам химического анализа проб газовой смеси, выполненного по нашей просьбе в Институте катализа СО РАН на хроматографе “Кристалл-2000М”.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ СОСТАВА СМЕСИ

В большинстве случаев многокомпонентная диффузия наиболее просто описывается обобщенным законом Фика, предложенным Онсагером в 1945 г.:

$$J_i = -\rho \sum_{j=1}^{n-1} \mathbf{D}_{ij} \nabla K_j, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (1)$$

где \mathbf{D}_{ij} — коэффициенты многокомпонентной диффузии, которые являются функциями коэффициентов бинарной диффузии и концентраций компонентов, J_i — массовый диффузионный поток i -го компонента. Недиagonальные элементы матрицы \mathbf{D}_{ij} ($i \neq j$) описывают связь диффузионного потока вещества с градиентами концентрации остальных компонентов смеси [4].

Как показали прямые измерения, в наших опытах воздух практически не содержал паров воды. Остальные имеющиеся в воздухе вещества (CO_2 , Ar и другие инертные газы) ввиду их малой концентрации можно не учитывать. Таким образом, в нашем случае пограничный слой можно рассматривать как смесь трех газов: He ($i = 0$), O_2 ($i = 1$), N_2 ($i = 2$). Заметим, что коэффициент бинарной диффузии $\mathcal{D}_{01} = 0,726 \text{ см}^2/\text{с}$ практически равен $\mathcal{D}_{02} = 0,708 \text{ см}^2/\text{с}$, а величина $\mathcal{D}_{12} = 0,209 \text{ см}^2/\text{с}$ почти в 3,5 раза меньше.

Для получения количественных оценок можно воспользоваться линеаризованной теорией многокомпонентной диффузии, предложенной в работе [5]. Метод основан на преобразовании матрицы $[\mathbf{D}]$ к диагональному виду $\Delta = P^{-1} [\mathbf{D}] P$. Линейный оператор P состоит из собственных векторов матрицы многокомпонентной диффузии $[\mathbf{D}]$. Если такое преобразование существует, то, переходя к псевдо концентрациям веществ $\hat{K} = P^{-1} K$, диффузионная задача в трехкомпонентном пограничном слое сводится к бинарной диффузии псевдовеществ \hat{X} :

$$U \frac{\partial \hat{K}_i}{\partial z} + V \frac{\partial \hat{K}_i}{\partial y} = \Delta_i \frac{\partial^2 \hat{K}_i}{\partial z^2}, \quad \text{где } i = 0, 1. \quad (2)$$

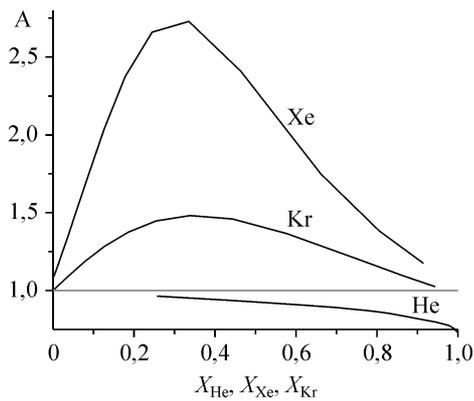


Рис. 7. Оценки величины параметра разделения A в пограничном слое при инородном вдуве.

Коэффициенты диффузии псевдовеществ Δ_i являются собственными числами матрицы $[D]$. Известно [4], что для тройной смеси идеальных газов $\Delta_1 \neq \Delta_2$. Следовательно, решения (2) не будут строго подобными. Если принять допущение, что отличие от подобия уравнений диффузии псевдовеществ можно учесть с помощью поправки на аналог числа Шмидта — $\hat{Sc}^{2/3}$, то соотношение между значениями псевдоконцентраций на стенке представляются в виде

$$\Delta_0^{-2/3} \frac{\hat{K}'_0 - \hat{K}_0^{CT}}{\hat{K}_0^{CT} - \hat{K}_0^\infty} = \Delta_1^{-2/3} \frac{\hat{K}'_1 - \hat{K}_1^{CT}}{\hat{K}_1^{CT} - \hat{K}_1^\infty}. \quad (3)$$

Имея значение концентрации инжектанта на стенке, соотношение (3) позволяет получить состав газовой смеси на стенке. Расчеты, выполненные таким образом, показаны на рис. 6 сплошной линией. Заметим, что, хотя результат таких оценок зависит от порядка индексации компонентов газовой смеси (выбора вещества, концентрация которого определяется из баланса), получаемые оценки позволяют качественно предсказать масштаб эффекта.

Оценки для системы водород-воздух показали, что эффект разделения возможен, только если $X_{H_2} \rightarrow 1$ (при критическом вдуве). Имеющиеся у нас экспериментальные данные при вдуве водорода в воздух не обнаруживают каких-либо отличий от бинарной системы.

Оценки, приведенные на рис. 7, показывают, что при вдуве инертных газов Хе и Кг в воздух параметр разделения $A > 1$. Заметим, что молекулярная масса Хе и Кг в несколько раз больше молекулярной массы воздуха, а для гелия наоборот.

Также можно отметить, что существуют смеси, в которых величина диффузионного разделения при вдуве одного вещества в заранее перемешанную смесь двух других может быть существенно больше, чем для системы гелий-воздух.

ВЫВОДЫ

Экспериментально исследованы особенности структуры ламинарного диффузионного пограничного слоя на пористой поверхности при вдуве гелия в поток воздуха. В условиях изотермического вдува измерения распределений объемных концентраций гелия, азота и кислорода обнаружили, что соотношение объемных долей N_2/O_2 по толщине пограничного слоя изменяется.

На основе линеаризованной теории многокомпонентной диффузии Тура предложены соотношения, позволяющие качественно оценить масштаб эффекта диффузионного разделения в трехкомпонентном пограничном слое.

Авторы выражают благодарность за полезные замечания академику РАН Э.П. Волчкову.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

[D] — матрица коэффициентов многокомпонентной диффузии в n -компонентной смеси,	X — объемная концентрация компонента,
D_{ij} — коэффициент бинарной диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$,	$\bar{X} = \frac{X - X_{\text{СТ}}}{X_{\infty} - X_{\text{СТ}}}$ — безразмерный профиль концентрации,
$j_{\text{СТ}} \sqrt{\text{Re}} = \frac{j_{\text{СТ}}}{\rho U} \sqrt{\frac{U z}{\nu}}$ — безразмерный параметр вдува,	y — координата в перпендикулярном направлении к поверхности, м,
$j_{\text{СТ}}$ — массовая интенсивность вдува, $\text{кг}/\text{м}^2 \text{с}$,	z — продольная координата, направленная вдоль пластины, м,
T — текущая температура в пограничном слое, К,	δ — толщина диффузионного пограничного слоя, м,
K — массовая концентрация веществ,	ρ — плотность основного потока, $\text{кг}/\text{м}^3$,
T_{∞} — температура основного потока, К,	ν — кинематическая вязкость основного потока, $\text{м}^2/\text{с}$.
U — скорость основного потока, м/с,	

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krishna R., Wesselingh J.A. The Maxwell-Stefan approach to mass transfer // Chem. Engng. Science. — 1997. — Vol. 52, No. 6. — P. 861–911.
2. Анфимов Н.А. Диффузионное разделение смеси газов при наличии диссоциации // ДАН СССР. — 1964. — Т. 156, № 6. — С. 1316–1319.
3. Sage F.E. Esprin Film condensation from a ternary mixture of vapors upon a vertical surface // Inter. J. Heat Mass Transfer. — 1976. — Vol. 19. — P. 323–333.
4. Poss T., Krishna R. Multicomponent mass transfer. — Wiley. — 1993. — 609 с.
5. Toor H.L. Solution of the linearized equations of multicomponent mass transfer: I // AIChE. J. — 1964. — Т. 10, № 4. — P. 448–455.

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2007 г.