

УДК 536.24

## ПРОЯВЛЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДИФфуЗИИ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ С ИНОРОДНЫМ ВДУВОМ

Лукашов В.В., Жиливостова С.В.

*Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе Сибирского Отделения Российской Академии Наук  
Новосибирск, Россия*

### АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследованы особенности ламинарного диффузионного пограничного слоя на проницаемой поверхности. Измерения распределений концентраций гелия, азота и кислорода при изотермическом вдуве гелия в поток воздуха 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 эффективной бинарной диффузии, описываемой законом Фика. Наблюдаемое диффузионное разделение воздуха обусловлено особенностями механизма диффузии в многокомпонентной смеси газов.

### ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях вдува инородного газа в поток воздуха, пограничный слой, как правило, рассматривается в приближении эффективной бинарной смеси газов. Известно, что если величины коэффициентов бинарной диффузии отдельных компонентов газовой смеси заметно различаются между собой, это может приводить к разнообразным суммарным эффектам [1]. Например в [2], при моделировании обтекания поверхности высокоскоростным потоком воздуха замечено, что в условиях, когда молекулы кислорода могут диссоциировать на атомы при взаимодействии со стенкой, происходит диффузионное разделение компонентов смеси. В распределении азота по толщине пограничного слоя может возникать локальный максимум. Отмечается, что вдув усиливает этот эффект, а отсос газа из пограничного слоя, наоборот, приводит к снижению эффекта разделения. Экспериментальные исследования в этой области крайне ограничены.

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.

Коэффициенты бинарной диффузии  $D_{N_2-O_2}$  более чем в три раза меньше, чем  $D_{He-O_2}$  или  $D_{He-N_2}$ . Поэтому использование приближения эффективной бинарной диффузии при вдуве гелия в воздух требует обоснования. Данная работа посвящена изучению особенностей диффузионного переноса в ламинарном пограничном слое со вдувом He в поток воздуха.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная установка представляла собой аэродинамическую трубу непрерывного действия незамкнутого типа с рабочей частью сечением 108x108 мм, длиной 0.5 м. Нижняя стенка рабочей части изготовлена из пористых пластин, через которые в поток подавался инжектант с постоянной массовой интенсивностью вдува ( $j_{CT} = \text{const}$ ). Максимальная скорость воздуха – 4 м/с – позволяла получить 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 медь-константановой термопарой с диаметром спая 0.1 мм. Тепловые условия опытов были максимально приближены к изотермическим: Температура инжектанта, температура основного потока и температура окружающей среды были равны между собой ( $\sim 23^\circ\text{C}$ ). 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  $8^\circ\text{C}$ , во внешней части пограничного слоя происходит охлаждение потока [4]. Это приводило к нарушению условий изотермичности, избежать которое в эксперименте не представлялось возможным.

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%.

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.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Распределения объемных концентраций He, N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> при U=4 м/с, z=120 мм и при вдуве гелия  $j_{CT}=0.00434; 0.0109; 0.0174$  кг/м<sup>2</sup>с показаны на рис.1. 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  $\bar{j}_{CT} \sqrt{\text{Re}} = 0.55$ .

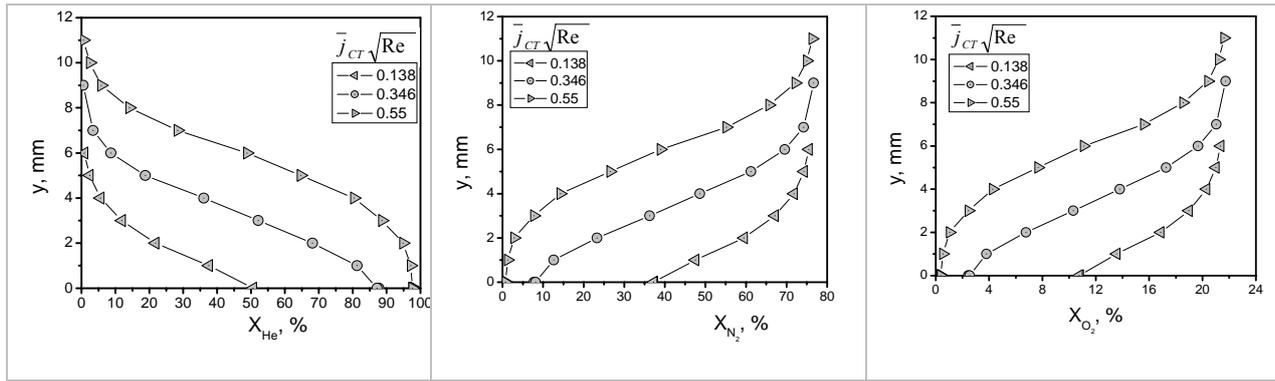


Рис. 1. Распределение объемных концентраций гелия, азота и кислорода в пограничном слое.

Известно, что при значении параметра  $\bar{j}_{cr}\sqrt{Re} = 0.48$  должно происходить оттеснение пограничного слоя, однако измеренные значения концентрации гелия «на стенке» меньше 100%.

В случае диффузии гелия в воздух при обычной бинарной диффузии связь концентраций кислорода и азота с концентрацией гелия описывалась бы:  $X_{N_2} = (1 - X_{He}) \cdot X_{N_2}^\infty$  и  $X_{O_2} = (1 - X_{He}) \cdot X_{O_2}^\infty$ . Данные, представленные на рис.2-3, показывают, что допущение об эффективной бинарной смеси газов в рассматриваемой системе 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.

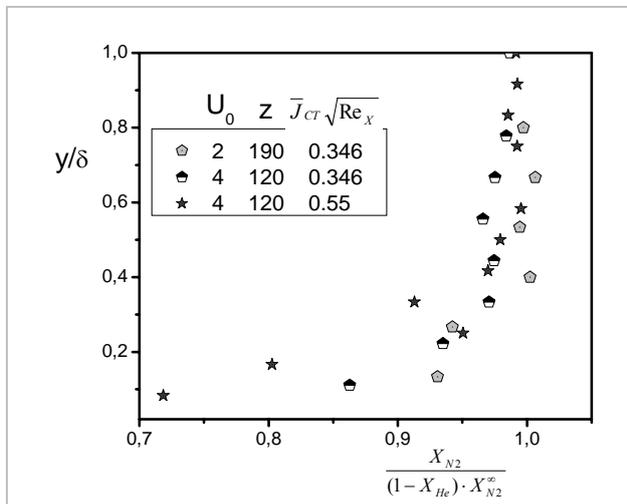


Рис. 2. Отличие концентраций азота от бинарной диффузии.

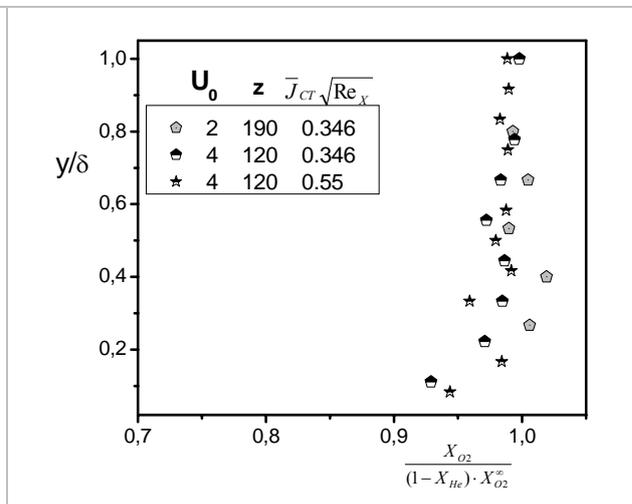


Рис. 3. Отличие концентраций кислорода от бинарной диффузии.

Разделение компонентов воздуха при диффузии в него гелия можно характеризовать параметром  $A = \frac{(X_{N_2} / X_{O_2})}{(X_{N_2} / X_{O_2})_0}$ . Этот параметр характеризует изменение соотношения между объемными концентрациями азота и кислорода в текущей точке пограничного слоя по сравнению с их соотношением в основном потоке.  $(X_{N_2} / X_{O_2})_0 = 3.728$ , что

соответствует атмосферному воздуху стандартного состава. Если диффузия описывается законом Фика и смесь гелия с воздухом можно рассматривать как эффективную бинарную, то  $A = 1$ .

На рис. 4 представлены распределения параметра  $A$  по толщине пограничного слоя при тех же режимах, что и на рис. 1. 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.5).

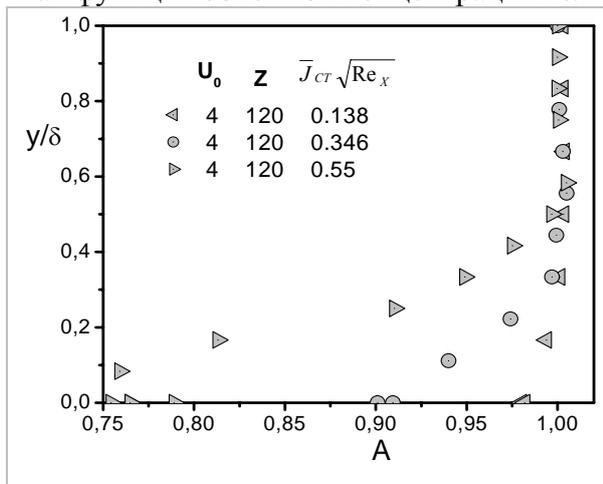


Рис.4. Изменение соотношения объемных концентраций азота и кислорода по толщине пограничного слоя при вдуве гелия в воздух.

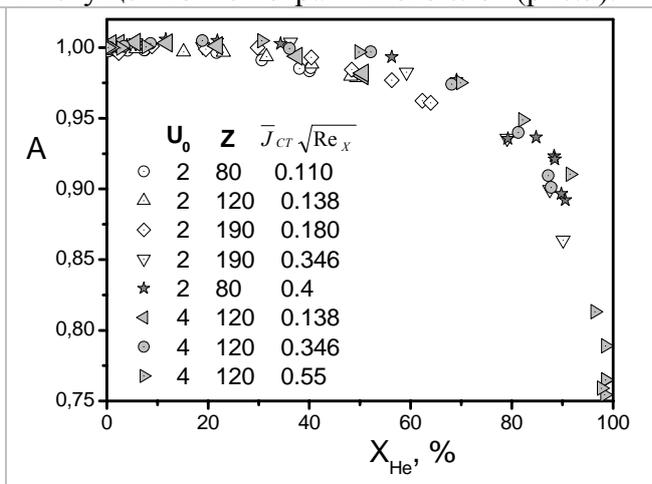


Рис.5. Зависимость величины диффузионного разделения воздуха от концентрации гелия.

## ВЫВОДЫ

Экспериментальное исследование структуры ламинарного диффузионного пограничного слоя показало, что при вдуве гелия через горизонтальную пористую стенку в поток сухого воздуха соотношение объемных концентраций  $N_2/O_2$  может изменяться по толщине пограничного слоя. Наблюдаемое диффузионное разделение воздуха обусловлено особенностями механизма диффузии в многокомпонентной смеси газов.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований д.т.н., член-корр. Волчкову Э.П.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-6965.2006.8 и гранта РФФИ № 05-02-16478.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$\bar{j}_{cr} \sqrt{Re} = \frac{j_{cr}}{\rho \cdot U} \sqrt{\frac{U \cdot z}{\nu}}$  - безразмерный параметр вдува;

$j_{cr}$  – массовая интенсивность вдува,  $кг/м^2 \cdot с$ ;

$T$  – текущая температура в пограничном слое,  $К$ ;

$K$  – массовая концентрация веществ;

$T_{\infty}$  – температура основного потока, К;

$U_0$  – скорость основного потока, м/с;

$X$  – объемная концентрация компонента;

$\bar{X} = \frac{X - X_{CT}}{X_{\infty} - X_{CT}}$  - безразмерный профиль концентрации;

$y$  – координата в перпендикулярном направлении к поверхности, м;

$z$  – продольная координата, направленная вдоль пластины, м

$\delta$  – толщина диффузионного пограничного слоя, м;

$\rho$  – плотность основного потока, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – кинематическая вязкость основного потока, м<sup>2</sup>/с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Krishna R., Wesselingh J.A. The Maxwell-Stefan approach to mass transfer. Chem. Eng. Science. 1997. v. 52. No 6. pp. 861-911.
- [2] Анфимов Н.А. Диффузионное разделение смеси газов при наличии диссоциации. ДАН СССР. 1964. 156(6). С. 1316-1319.
- [3] F.E. Sage, J. Esprin Film condensation from a ternary mixture of vapors upon a vertical surface// Int. J. Heat Mass Transfer. 1976. v. 19.- pp. 323-333.
- [4] Volchkov E.P., Lebedev V.P., Lukashov V.V. Experimental Investigation of a Diffusion Thermoeffect in a Boundary Layer During Helium Injection into Air. Heat Transf. Res., 2006. v.37. No1. pp. 77-84.