

УДК 532.526, 532.529

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТЕПЛО - И МАССООБМЕНА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

М.С. Макаров

Институт теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Методы управления тепломассообменом являются одной из актуальных проблем современной энергетики, авиационной и ракетной техники. В последнее время исследователи обратили внимание на возможность управления конвективным переносом тепла и вещества за счёт изменения свойств рабочего газа. Так авторы работ [8, 4] предлагают использовать водородо-ксеноновые, гелий-ксеноновые смеси, обладающие аномально малыми числами Прандтля (0.18...0.24), для новых сверхзвуковых теплообменных аппаратов и замкнутых газотурбинных установок. Автор работы [11] указал на эффективность использования гелий-ксеноновой и гелий-метановой смесей для интенсификации теплообмена при свободной конвекции в прослойках и вынужденной конвекции в трубах.

Такие методы, безусловно, найдут своё применение в устройствах «замкнутого типа», т.е. без уноса рабочего газа в окружающую среду. В устройствах же «открытого типа» рабочий газ невозможно полностью заменить смесью с заданными свойствами. В этом случае изменение свойств рабочего газа можно обеспечить только за счёт вдува в поток, по-возможности, небольшой доли вещества, изменяющего ход диффузионных процессов или процессов теплообмена. Причём в качестве рабочего газа необходимо рассматривать воздух, газовое топливо (например: водород, метан, пропан и т.д.) или продукты их реакции.

В данной работе предлагается подход к управлению тепломассообменом, основанный на использовании эффектов многокомпонентной диффузии для изменения состава и свойств рабочего газа. Представлены результаты численного моделирования газодинамики и массообмена в ламинарном пограничном слое на плоской проницаемой пластине при вдуве гелия или неона в поток воздуха или воздушно-водородной смеси.

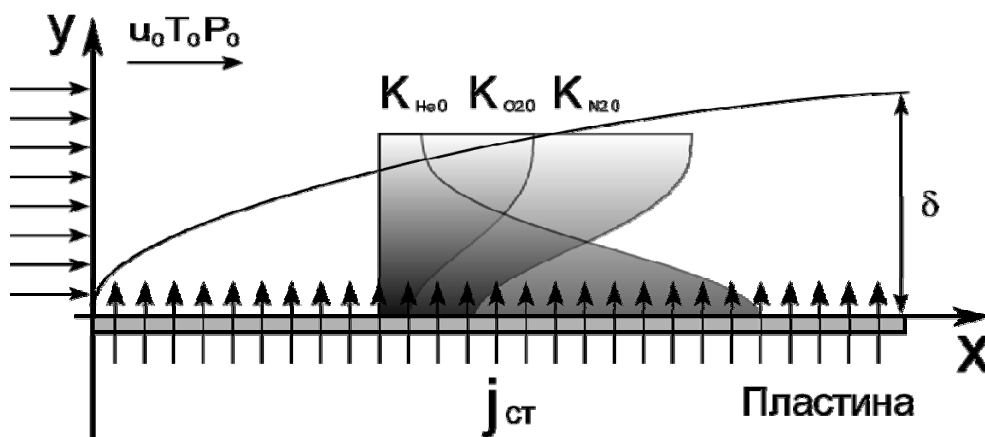


Рис. 1. Схема течения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1. Система уравнений

Рассматривался двумерный ламинарный пограничный слой на плоской проницаемой пластине при инородном вдуве газа в поток многокомпонентной газовой смеси в изотермических условиях. Схема течения представлена на рисунке 1.

Система дифференциальных уравнений записывалась в следующем виде:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

уравнение движения:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad (2)$$

уравнение диффузии:

$$\rho u \frac{\partial K_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial K_i}{\partial y} = \frac{\partial(-J_i)}{\partial y}, \quad i = 1 \dots n, \quad (3)$$

где n - число компонент газовой смеси, J_i - массовый поток i -ого компонента.

Для расчёта диффузионных потоков компонент газовой смеси применялась итерационная модель Лапина Ю.В., Стрельца М.Х., основанная на соотношениях Максвелла-Стефана [6]:

$$J_i = -\frac{\rho}{B_i} \frac{\partial K_i}{\partial y} + \frac{MK_i}{B_i} \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{J_j}{M_j D_{ij}} \right) - \frac{\rho K_i}{B_i M} \frac{\partial M}{\partial y}; \quad B_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \left(\frac{MK_j}{M_j D_{ij}} \right). \quad (4)$$

Для замыкания системы уравнений (1)-(3) использовались уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = PM/RT, \quad (5)$$

соотношение, определяющее коэффициент динамической вязкости многокомпонентной газовой смеси Gordon S., McBride B.J [2]:

$$\mu = \sum_{j=1}^n K_j \mu_j \left(K_j + \sum_{k=1, k \neq j}^n K_k \Phi_{jk} \right)^{-1}; \quad \Phi_{jk} = 0.25 \left(1 + \left(\frac{\mu_j}{\mu_k} \right)^{0.5} \left(\frac{M_k}{M_j} \right)^{0.25} \right)^2 \left(\frac{2M_k}{M_j + M_k} \right)^{0.5} \quad (6)$$

и формула для определения молекулярного веса смеси:

$$M = \left(\sum_{j=1}^n \frac{K_j}{M_j} \right)^{-1}. \quad (7)$$

2. Граничные условия

На поверхности пористой пластины (при $y = 0$) продольная составляющая скорости $u = 0$ (выполняется гипотеза прилипания), поперечная составляющая скорости определяется заданной интенсивностью вдува $v = j_{ct}/\rho_{ct}$, а концентрации компонент газовой смеси определяются из баланса массы:

$$(J_i)_{ct} = j_{ct}(K'_i - K_{ict}), \quad (8)$$

где: $(J_i)_{ct}$ - интенсивность диффузионного потока i -ого вещества на поверхности пористой пластины, определяемая соотношением (4); K_{ict} , K'_i - массовая концентрация i -ого вещества на поверхности пористой пластины и во вдуваемой газовой смеси.

На внешней границе пограничного слоя ($y = \delta$) скорость и концентрация компонент считаются постоянными и равными значениям в набегающем потоке.

3. Метод решения

Приведённая система уравнений (1)-(7) с учётом граничных условий решалась численным методом интегрирования уравнений пограничного слоя с $x - \omega^2$ преобразованием координат [9, 1]. Нелинейность дифференциальных уравнений устранялась методом простых итераций на каждом шаге интегрирования с точностью 10^{-3} % от вычисляемой величины (u, K_i). Вблизи стенки использовалось сжатие сетки. Шаг по оси X менялся в зависимости от текущей толщины динамического пограничного слоя по закону $\Delta X = \delta/400$.

Для оценки точности результатов численного интегрирования и коррекции вычислительной погрешности использовался метод апостериорной оценки по балансу массы [7]. В алгоритм расчёта были внесены следующие дополнительные шаги:

1. Расчёт первого итерационного приближения для профиля массовых концентраций n компонент газовой смеси по уравнениям (3) - K_i^* ;
2. Оценка точности расчёта концентраций для каждой точки профиля из баланса массы:

$$\sum_{i=1}^n K_i = 1 \quad (9)$$

по формуле:

$$\Delta K = 1 - \sum_{i=1}^n K_i^*; \quad (10)$$

3. Коррекция состава газового потока в каждой точке профиля по формуле $K_i^{**} = K_i^* + \Delta K \cdot K_i^*/(1 - \Delta K)$;
4. Использование профиля концентраций K_i^{**} для нового итерационного приближения.

Максимальная вычислительная погрешность в определении баланса массы (10) контролировалась и не превышала 10^{-4} .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведено численное моделирование газодинамики и массообмена в ламинарном пограничном слое на плоской проницаемой пластине при вдуве гелия в поток воздуха в приближении трёхкомпонентной смеси (азот – кислород – гелий). Интенсивность вдува

составляла $0.00307 \text{ м}^2/\text{с}$ и оставалась постоянной по длине пластины. Скорость набегающего потока была равна 2 м/с .

На рисунке 2 представлено распределение соотношения мольных концентраций азота и кислорода по толщине пограничного слоя для двух сечений по длине пластины 80 мм (сплошная линия), 190 мм (пунктирная линия). Точками представлены экспериментальные данные из работы [5]. Видно, что в пристенной части пограничного слоя формируется область с повышенным, по сравнению с основным потоком, относительным содержанием кислорода (эффект разделения). Этот эффект обусловлен двумя факторами:

1. Коэффициент бинарной диффузии гелия в азот больше чем в кислород [10]. Это, условно, приводит к более интенсивному, по сравнению с кислородом, разбавлению азота вдуваемым гелием и, как следствие, к увеличению относительной концентрации кислорода вблизи стенки.

2. Интенсивность диффузии вдуваемого газа в многокомпонентную смесь зависит не только от градиента его концентрации, но и от градиентов концентрации (диффузионных потоков) других компонент смеси [3]. Это следует из соотношений Максвелла-Стефана и отражено в модели (4).

Как видно из рисунка 2, максимальный эффект разделения наблюдается вблизи стенки и с увеличением расстояния от передней кромки растёт. Величина разделения азота и кислорода не высока $\approx 5\%$, т.к. эти газы близки по диффузионным свойствам. В газовых смесях с большей неоднородностью по диффузионным свойствам следует ожидать большего эффекта разделения. Этот факт, в частности, может быть использован для управления процессами теплообмена при горении в пристенном пограничном слое или спутных струях.

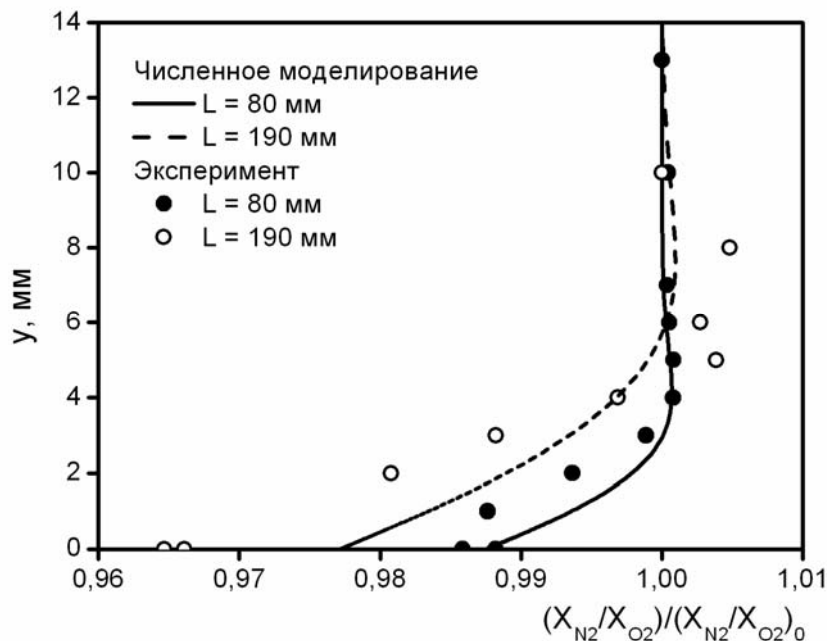


Рис. 2. Эффект разделения азота и кислорода в многокомпонентном ламинарном пограничном слое при вдуве гелия в поток воздуха.

Для оценки эффекта разделения азота и кислорода в водородо-воздушной смеси были проведены расчёты массообмена в четырёхкомпонентном (азот – кислород – водород – неон) пограничном слое при инородном вдуве неона через проницаемую

поверхность. Интенсивность вдува и скорость набегающего потока были равны $0.00307 \text{ кг/м}^2/\text{с}$ и 2 м/с соответственно. Отношение массовых концентраций азота и кислорода в набегающем потоке оставалось постоянным и равным ≈ 3 .

На рисунке 3 представлена зависимость эффекта разделения от концентрации вдуваемого газа на поверхности проницаемой пластины при массовой концентрации водорода в воздухе 0, 5 и 10 %.

Результаты численного моделирования показали, что увеличение концентрации водорода в основном потоке приводит к значительному увеличению эффекта разделения. В данном случае он может достигать 25%.

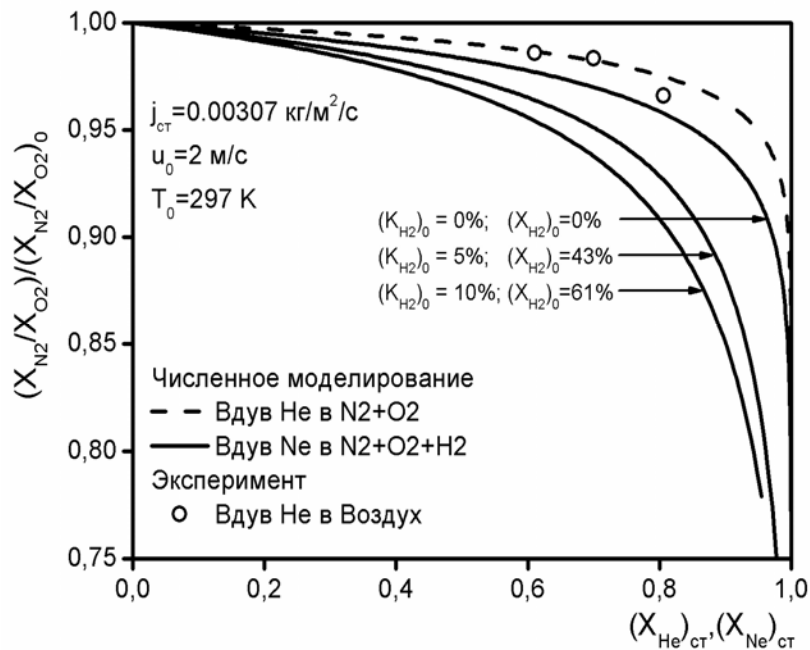


Рис. 3. Эффект разделения азота и кислорода в пограничном слое при вдуве неона в поток водородо-воздушной смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант № 06-08-01149а, 08-08-00216а и президента РФ грант НШ-2855.2008.8, МК-2863.2008.8.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- x, y - координата вдоль и поперёк пластины, м;
- u, v - продольная и поперечная составляющая вектора скорости соответственно, м/с;
- P - давление газа в потоке, Па;
- R - универсальная газовая постоянная – 8314.41, Дж/кмоль/К;
- T - температура, К;
- M_i, \bar{M} - молекулярный вес i -ого компонента и смеси соответственно, кг/кмоль;
- K_i - массовая концентрация i -ого компонента смеси;
- $X_i = K_i M_i / \bar{M}$ мольная концентрация i -ого компонента смеси;
- ρ - плотность газовой смеси, кг/м^3 ;
- δ - толщина динамического пограничного слоя, м;

μ_i, μ - коэффициент динамической вязкости i -ого компонента и смеси соотв., $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 D_{ij} - коэффициент бинарной диффузии между i -ым и j -ым компонентами смеси, m^2/s ;
 $\dot{j}_{n0} = \rho_{n0} V_{n0}$ - интенсивность поперечного потока вещества на стенке, $\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$;
 L - расстояние от передней кромки пластины, м.
Индексы:
 i, j, k - индексы компонент;
 n - число компонент смеси;
 0 - параметры газа в набегающем потоке;
' - параметры вдуваемого газа;
 $n0$ - параметры газа на стенке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Denny V.E., Mills A.F. Nonsimilar solution for laminar film condensation on a vertical surface. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1969. – Vol.12. – №11. – P. 965 – 979.
2. Gordon S., McBride B.J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. I. Analysis – Washington, NASA RP1311, 1994. – Vol. 1. – 58 p.
3. Taylor R., Krishna R. Multicomponent mass transfer. - New York: John Wiley & Sons, 1993. – 609 с.
4. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Изв. акад. наук. Энергетика. – 2000. – №5. – С. 101–113.
5. Жиливостова С.В. О многокомпонентной диффузии в ламинарном пограничном слое при инородном вдуве. // Тезисы докладов Всероссийской школы-семинара молодых учёных «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии». – Н.:Издательство ИТ СО РАН, 2007 – С. 83-84.
6. Лапин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. – М: Наука, 1989. – 368с.
7. Макаров М.С. Метод численного исследования эффектов многокомпонентной диффузии с апостериорной оценкой точности вычислений // Тезисы Всероссийской школы-семинара молодых учёных «Физика неравновесных процессов в энергетике и наноиндустрии». – Н.: Издательство ИТ СО РАН, 2007 – С. 83-84.
8. Научные основы технологий XXI века. – М.: УНЦП «Энергомаш», 2000. – 136 с.
9. Патанкар С.В., Сполдинг Д.Б. Тепло- и массообмен в пограничных слоях. Пер с англ. – М.: Энергия, 1971. – 128 с.
10. Рид Р., Праусниц Д., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. Пер. с англ. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
11. Терехов В.И. Управление конвективным теплообменом при течении бинарных смесей чистых газов // Труды XVI Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках". – М: Издательский дом МЭИ, 2007. – Т.1. – С. 50–56.