

11. Г. М. Фихтенгольц. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. М., Физматгиз, 1958.
12. Дж. Алберг, Э. Нильсон, Дж. Уолш. Теория сплайнов и ее приложения. М., «Мир», 1972.
13. С. К. Годунов. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1971.
14. И. С. Березин, И. П. Жидков. Методы вычислений. Т. 1. М., Физматгиз, 1962.
15. А. М. Гришин, Н. А. Игнатенко. ИФЖ, 1972, 23, 2.

УДК 532.5+536.24

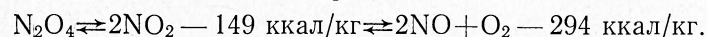
ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ РЕАГИРУЮЩЕГО ГАЗА В ТРУБАХ

В. Д. Виленский, Б. С. Петухов, В. К. Шиков

(Москва)

В качестве одного из возможных путей решения задачи о поиске теплоносителей для ядерных реакторов на быстрых нейтронах предлагаются химически реагирующие (диссоциирующие) газовые системы [1]. Наличие в них обратимых химических реакций, сопровождающихся изменением числа молей и тепловыми эффектами, ведет к увеличению эффективности термодинамического цикла, обеспечивает высокие тепловые свойства газов и значительное увеличение теплоотдачи к ним.

Одной из возможных химически реагирующих систем, представляющих интерес для использования их в качестве теплоносителей и рабочих тел, является азотный тетраоксид



Температурный диапазон этой реакции $300 \div 1200^\circ \text{K}$ при $p=1$ атм и $450 \div 1500^\circ \text{K}$ при $p=100$ атм.

В настоящее время имеется значительное число работ, посвященных исследованию теплоотдачи при течении в трубах диссоциирующих газов. Это позволяет уже сейчас говорить об основных особенностях теплоотдачи в этих условиях, о своеобразии в постановке таких задач и некоторых результатах их решения.

Особенности постановки задачи о течении в круглой трубе химически реагирующего газа

Течение и теплообмен химически реагирующего газа в круглой трубе рассматриваются на основании системы уравнений гидродинамики типа уравнений пограничного слоя. В этом приближении не учитывается изменение давления в поперечном сечении трубы [2].

Пусть в газе между m компонентами протекает N независимых гомогенных химических реакций (в общем случае неравновесных):

$$\sum_{i=1}^m \nu'_{in} A_i \rightleftharpoons \sum_{i=1}^m \nu''_{in} A_i, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Уравнение пограничного слоя для этого случая в наиболее полном виде даны в [3]. Для течения несжимаемого химически реагирующего газа без учета действия внешних сил они имеют вид:

$$\rho \omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \rho \omega_r \frac{\partial \omega_x}{\partial r} = - \frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu \frac{\partial \omega_x}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(r\rho\omega_x) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho\omega_r) = 0, \quad (2)$$

$$\rho\omega_x \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho\omega_r \frac{\partial c_i}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rj_{ir}) + \sum_{n=1}^N (\nu''_{in} - \nu'_{in}) \mu_i \dot{\omega}_n, \quad (3)$$

$$\dot{\omega}_n = k_{jn} \prod_{i=1}^m [n_i]^{\nu_i} - k_{rn} \prod_{i=1}^m [n_i]^{\nu_i}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m c_i = 1, \quad (5)$$

$$\rho c_p \omega_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p \omega_r \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) - \sum_{n=1}^N Q_{pn} \dot{\omega}_n. \quad (6)$$

Здесь и далее приняты обозначения: x, r — координаты; $X = \frac{x}{r_0 \text{Re Pr}}$; $R = \frac{r}{r_0}$; ω_x, ω_r — компоненты скорости течения; $W_x = \frac{\omega_x}{\bar{w}}$; \bar{w} — средняя по сечению скорость газа; T — температура газа; c_i, μ_i — массовая доля и молекулярный вес; p — давление; h — удельная энтальпия смеси; G — расход газа; r_0 — радиус трубы; $d = 2 r_0$; ρ, c_p — плотность, удельная теплоемкость смеси; j_i — плотность потока компонента; $\dot{\omega}_n$ — скорость n -й химической реакции; m_i — массовая скорость образования компонент; A, ε — частотный фактор и энергия активации константы скорости диссоциации; B, ε^* — параметры константы равновесия; ν'_{in}, ν''_{in} — стехиометрические коэффициенты компонента i в n -й реакции; μR — универсальная газовая постоянная; Re, Pr, Le — числа Рейнольдса, Прандтля, Льюиса — Семенова; индексы: ст — стенка трубы; 0 — входное сечение трубы; ж — среднemasовые величины; i — компонента смеси.

Для определения изменения давления по длине трубы используется уравнение постоянства расхода газа через поперечное сечение трубы

$$2\pi \int_0^{r_0} \rho \omega_x r dr = G. \quad (7)$$

Уравнение состояния смеси компонентов используется в идеально-газовой форме

$$p = \rho RT \left(\sum_{i=1}^m \frac{c_i}{\mu_i} \right).$$

Записывая краевые условия, ограничимся наиболее распространенным в трубах случаем отсутствия на стенке трубы вдува газа и каталитических реакций.

Условия на стенке трубы:

$$\begin{aligned} r = r_0, \quad x \geq 0, \quad \omega_x = \omega_r = 0, \\ T_{\text{ст}} = T(x) \quad \text{или} \quad q_{\text{ст}} = q(x), \\ (j_{ir})_{\text{ст}} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m-1. \end{aligned}$$

Условия на оси трубы:

$$r = 0, \quad x > 0, \quad \frac{\partial \omega_x}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial c_i}{\partial r} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m-1.$$

Условия на входе в трубу;

$$\begin{aligned} x = 0, \quad 0 \leq r < r_0, \quad \omega_x = \bar{w} \quad \text{или} \quad \omega_x = 2\bar{w}(1 - R^2), \quad T = T_0, \\ c_i = c_{i_0} \quad (\text{равновесие}), \quad i = 1, 2, \dots, m-1, \quad p = p_0. \end{aligned}$$

В отличие от решения задачи о теплообмене в нереагирующем газе, в данном случае задание давления необходимо, так как оно определяет интенсивность протекания химических реакций. В уравнениях (1), (3), (6) величины μ , λ , D — это молекулярные или эффективные коэффициенты переноса в зависимости от ламинарного или турбулентного течения.

Основные особенности задачи о теплообмене при течении реагирующих газов в трубах вытекают из того, что реакции диссоциации для газов, используемых в теплообменниках, низкотемпературны. Подавляющее большинство реакций заканчивается при температурах, меньших 1500°K (характерным примером является реакция диссоциации N_2O_4).

Невысокий уровень температуры в каналах теплообменников позволяет не учитывать излучения. Вместе с тем, большинство газовых систем, использующихся в качестве теплоносителей, характеризуется слабой зависимостью свойств от состава, что объясняется небольшим различием компонентных теплофизических свойств в рассматриваемых диапазонах температур. Поэтому при течении и теплообмене диссоциирующих газов в трубах роль диффузионного разделения обычно невелика. Это означает, что при исследовании теплообмена при равновесном течении в трубе диссоциирующих газов состав смеси можно определять согласно уравнениям Гульдберга — Вааге, дополненным стехиометрическими соотношениями между концентрациями компонентов. При неравновесном протекании реакций по этой же причине можно применять бинарное приближение. Характерным примером может служить диссоциирующая двуокись азота $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO} + \text{O}_2$. Близость диффузионных свойств NO и O_2 позволяет заменить действительную смесь газом, в котором протекает химическая реакция $2\text{NO}_2 \rightleftharpoons 3\text{B}$.

Для сравнения отметим, что в высокотемпературном пограничном слое в условиях внешней задачи диффузионное разделение играет важную роль, особенно при учете излучения [3].

Существенная особенность теплообмена в трубах состоит в том, что из-за низкотемпературного характера реакций концентрации компонентов на стенке трубы изменяются по длине. Этот фактор играет очень важную роль в теплообмене при течении реагирующих газов в трубах, так как с изменением концентрации связано изменение энтальпии смеси на стенке. Последнее весьма существенно, поскольку химическая энтальпия составляет большую часть общей энтальпии смеси.

Непостоянство состава и энтальпии газа на стенке трубы отличает теплообмен в трубах от задачи о теплообмене в пограничном слое, где вследствие высокотемпературного характера реакций диссоциации воздуха состав газовой смеси (и ее энтальпия) на поверхности тела могут считаться постоянными.

Необходимо отметить, что в правой части уравнения (6) отсутствует член $\sum_{i=1}^m j_i r c_i \frac{\partial T}{\partial r}$, что связано с близостью в рассматриваемых интервалах температур удельных теплоемкостей компонентов. Кроме того, в уравнениях энергии и сохранения компонентов можно не учитывать изменение давления вдоль трубы, так как в каналах теплообменников оно составляет малую долю от общего уровня давления.

Теплообмен при ламинарном течении диссоциирующих газов в круглой трубе

Подавляющее большинство работ, посвященных исследованию теплоотдачи при течении в круглой трубе относится к азотному тетраоксиду. Поскольку стадии реакции весьма четко разделены по температуре, то на примере этой смеси возможно исследовать теплоотдачу к реаги-

рующему газу как в условиях равновесного (первая стадия), так и неравновесного (вторая стадия) протекания реакции, причем в бинарном приближении.

В работах [4—6] по исследованию теплоотдачи к диссоциирующему N_2O_4 физические свойства газовой смеси считаются постоянными. Таким образом в этих работах исследуется эффект протекания химических реакций на теплообмен, а гидродинамика задана. Система уравнений является частным случаем системы (1)—(7) и имеет вид (в безразмерных переменных):

$$2(1 - R^2) \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) - Da \cdot \Delta H \cdot \exp\left(\frac{E\theta}{1+\theta}\right) \dot{m}, \quad (9)$$

$$2(1 - R^2) \frac{\partial c}{\partial X} = \frac{Le}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial c}{\partial R} \right) + Da \cdot \exp\left(\frac{E\theta}{1+\theta}\right) \dot{m}, \quad (10)$$

Здесь $\theta = \frac{T - T_0}{T_0}$ — безразмерная температура, c — концентрация продукта реакции $aA \rightleftharpoons bB$, \dot{m} — безразмерная скорость диссоциации, $E = \frac{\varepsilon}{\mu RT_0}$ — безразмерная энергия активации реакции диссоциации, $\Delta H = \frac{Q_p}{\mu_A c_p T_0}$ — безразмерный тепловой эффект реакции, $Da = \frac{A_f \exp(-E) c_p r_0^2}{\lambda \mu_A} \rho^a$ — относительное время реакции по условиям на входе в трубу (этот параметр пропорционален давлению в трубе в степени, равной порядку реакции диссоциации). С величиной \dot{m} связаны еще два параметра $B^* = \frac{\rho}{B}$ и $E^* = \frac{\varepsilon^*}{\mu RT_0}$, отвечающие константе равновесия реакции $K_p = B \exp\left(-\frac{\varepsilon^*}{\mu RT}\right)$. Температура стенки трубы в этих работах принята постоянной, а стенка — некаталитической. Краевые условия:

$$X \geq 0, \quad R = 1, \quad \theta = \theta_{ст}, \quad \frac{\partial c}{\partial R} = 0,$$

$$R = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial R} = \frac{\partial c}{\partial R} = 0,$$

$$X = 0, \quad 0 \leq R < 1, \quad \theta = 0, \quad c = c_0 \quad (\text{равновесие}).$$

Из уравнений (9), (10) и краевых условий следует, что в рамках бинарной модели безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта $Nu = \frac{q_{ст} d}{\lambda (T_{ст} - T_{ж})}$) зависит от следующих параметров:

$$Nu = Nu \left(X, Da, E, Le, \Delta H, B^*, E^*, \theta_{ст}, \frac{\theta_{ст}}{\theta_{ж}} \right).$$

При этом наряду с прочими известными условиями подобия [2], важнейшими являются тождественность типа реакции и подобие законов изменения констант скоростей реакций и константы равновесия с температурой.

В работе [4] рассмотрена теплоотдача при равновесном течении азотного тетраксида $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2$. Физические свойства газа при температуре протекания реакции $290 \div 490^\circ K$ приняты постоянными, число $Le = 1$. Влияние температуры стенки на число Nu показано на рис. 1. Существенное различие предельных значений числа Nu (при $X \rightarrow \infty$) при разных температурах стенки, как показано в [4], обусловлено зависимостью от температуры производной равновесного состава по температуре $\left(\frac{\partial c}{\partial T}\right)_{равн}$. В этой же работе исследовано влияние числа Da

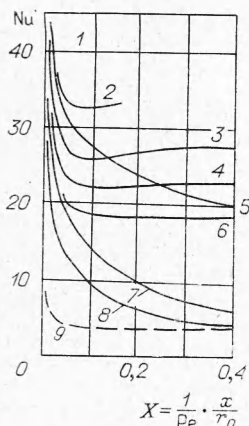


Рис. 1. Влияние температуры стенки на число Нуссельта при равновесном течении азотного тетраксид; $Le=1,0$; $E^*=23,0$; $B^*=7,77 \cdot 10^8$.
 1 — $T_{ст}=370^\circ\text{K}$; 2 — $T_{ст}=330^\circ\text{K}$; 3 — $T_{ст}=310^\circ\text{K}$; 4 — $T_{ст}=300^\circ\text{K}$; 5 — $T_{ст}=320^\circ\text{K}$; 6 — $T_{ст}=T_0=290^\circ\text{K}$; 7 — $T_{ст}=T_0=430^\circ\text{K}$; 8 — $T_{ст}=T_0=490^\circ\text{K}$; 9 — «замороженное» течение.

приведенной длины X , где изменение энтальпии газа на стенке наиболее интенсивно. Одновременно необходимо отметить, что кривые $Nu'(X)$ лежат в целом ближе к кривой для инертного газа, чем $Nu(X)$.

Работа [6] рассматривает теплоотдачу при ламинарном течении в круглой трубе газа с постоянными физическими свойствами и реакцией $aA \rightleftharpoons bB$. При постоянной температуре стенки исследовано влияние величины и знака теплового эффекта реакции и числа Le .

Теплоотдача и гидравлическое сопротивление при течении в круглой трубе равновесно диссоциирующего водорода с учетом переменности физических свойств исследованы в [7]. Расчеты показали, что наибольшее влияние равновесия диссоциации оказывает на теплоотдачу (числа Нуссельта в области развитой диссоциации превосходят «замороженные» в 2,5—4 раза). Влияние диссоциации на гидравлическое сопротивление существенно меньше.

Единственной известной работой, посвященной экспериментальному изучению теплоотдачи к равновесно диссоциирующему в ламинарном режиме течения, является [8]. Однако очень малое число экспериментальных точек (всего 4) не позволяет считать приведенные данные надежными.

на число Nu при течении модельного газа с реакцией $A_2 \rightleftharpoons 2A$. Физические свойства смеси соответствовали азотному тетраксиду, а параметры скорости реакции диссоциации изменялись.

Влияние на теплоотдачу температуры стенки трубы и давления при неравновесной химической реакции рассмотрено в [5]. Здесь исследовалась реакция $2NO_2 \rightleftharpoons 3N$, заменяющая действительную реакцию диссоциации двуокиси азота. Число $Le=1$. Свойства газовой смеси считались постоянными, температура стенки трубы задана. В работе выявлено наличие по длине трубы трех характерных областей с различным влиянием химической реакции на теплоотдачу.

Равенство числа Le единице не означает в данном случае, что результаты по теплоотдаче ($Nu' = \frac{q_{ст} dc_p}{\lambda (h_{ст} - h_{ж})}$) описываются зависимостями для инертного газа при постоянной температуре стенки [2]. Причина состоит в отмеченном выше изменении по длине трубы состава газа, а следовательно, и энтальпии, на стенке.

Кривые $Nu'(X)$ принципиально отличаются от кривой для инертного газа (рис. 2). Это отличие особенно заметно при малых значениях

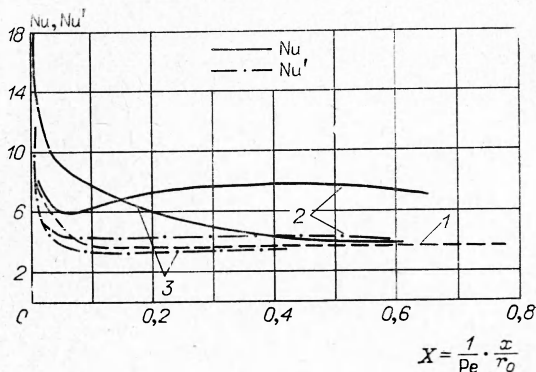


Рис. 2. Изменение местных чисел Нуссельта, определенных через разность температур (Nu) и разность энтальпий «стенка — газ» (Nu'), по длине круглой трубы при течении неравновесно диссоциирующей двуокиси азота, $Le=1,0$.

1 — «замороженное» течение; 2 — $T_{ст}=700^\circ\text{K}$; 3 — $T_{ст}=1100^\circ\text{K}$.

Исследование теплообмена при турбулентном течении диссоциирующего азотного тетраоксида в круглой трубе

Турбулентное течение и теплообмен химически реагирующих газов в трубах исследуется с помощью уравнений гидродинамики (1)—(6), записанных относительно осредненных величин. Поэтому для полного описания необходимо прежде всего определить с помощью тех или иных полуэмпирических гипотез коэффициенты турбулентного переноса импульса, тепла, массы. По существу это вопрос о влиянии переменных свойств газа и химических превращений на турбулентный перенос. Кроме того, необходимо учесть влияние турбулентных пульсаций температуры на химические превращения при определении осредненной скорости реакции.

Немногочисленные данные [9] говорят о том, что, по-видимому, турбулентный перенос импульса и тепла можно описывать с помощью полуэмпирических теорий, используемых для инертных газов. Однако это далеко не решает вопроса, так как до сих пор нет удовлетворительных теорий турбулентного переноса импульса и тепла для газов с переменными физическими свойствами.

Вопрос о влиянии турбулентности на протекание химической реакции более ясен в качественном отношении, однако количественно весьма далек от решения. Наличие в потоке пульсаций температуры и резкая экспоненциальная зависимость от нее скорости реакции приводят к тому, что осредненная скорость химической реакции выше, чем скорость реакции, определенная по средней температуре. Впервые на этот факт обратил внимание Я. Б. Зельдович [10]. В работе Л. А. Вулиса [11] проанализировано влияние пульсаций температуры на скорость необратимой химической реакции. Из результатов расчета следует, что зависимость осредненной скорости химической реакции от пульсаций состава газа сравнительно слабая, но осредненную скорость реакции сильное влияние оказывают величины пульсаций температуры и энергия активации реакции. Скорость химической реакции при интенсивностях пульсаций температуры, характерных для труб ($\sim 10\div 15\%$), согласно результатам этой работы, увеличивается в несколько раз.

Краткое рассмотрение литературных данных приводит к выводу, что в настоящее время не разработаны методы количественного учета взаимного влияния химических превращений и турбулентности.

В единственной работе, посвященной расчету теплоотдачи при турбулентном течении в круглой трубе неравновесно диссоциирующей NO_2 [12], влияние турбулентности на скорости реакции игнорировалось, а турбулентный перенос импульса описывался формулой Ван-Дриста для инертного газа с переменными свойствами (турбулентные числа Прандтля и Шмидта принимались равными единице).

В [13] для расчета теплоотдачи при турбулентном течении в трубе неравновесно диссоциирующего газа использована методика Петухова — Попова, разработанная для расчета теплоотдачи в газе с переменными свойствами вдали от входа в трубу [14]. На основании этой же методики были проведены расчеты теплоотдачи к равновесно диссоциирующим водороду [15] и азотному тетраоксиду [16]. В обоих случаях диссоциирующие газы рассматривались как газы с существенно переменными эффективными свойствами.

* Ряд работ посвящен экспериментальному исследованию теплоотдачи к равновесно диссоциирующему в первой стадии N_2O_4 [17—20]. В [17] показано, что для описания местных коэффициентов теплоотдачи при равновесном течении азотного тетраоксида ($Le \approx 1$) можно использовать зависимости, применяемые для расчета теплоотдачи к инертным газам, если коэффициент теплоотдачи относить к разности энтальпий «стенка — газ», а безразмерные параметры, входящие

в эти зависимости, определять по эффективным свойствам. Аналогичный вывод следует из работы [18]. В работах [8, 9, 19, 20] определялся средний по длине коэффициент теплоотдачи, поэтому анализ результатов, имеющих к тому же значительный разброс, весьма затруднен.

Теплоотдача при неравновесной диссоциации NO_2 в турбулентном режиме течения исследовалась экспериментально в [21]. На основании анализа методами подобия одномерного уравнения энергии была показана возможность связать коэффициенты теплоотдачи в диссоциирующем NO_2 и в нереагирующем газе зависимостью

$$\text{Nu}_{\text{ст}}/\text{Nu}_0 = F(K_2), \quad K_2 = \frac{Q_p \dot{\omega}_{\text{ст}} x}{q_{\text{ст}}},$$

где $\text{Nu}_{\text{ст}} = \frac{q_{\text{ст}} d}{\lambda_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0)}$; Nu_0 — число Нуссельта для инертного газа с постоянными свойствами; $\omega_{\text{ст}} = k_f \rho_{\text{ст}}^2$ — масштаб скорости диссоциации NO_2 , определенный по температуре стенки; T_0 — темпера-

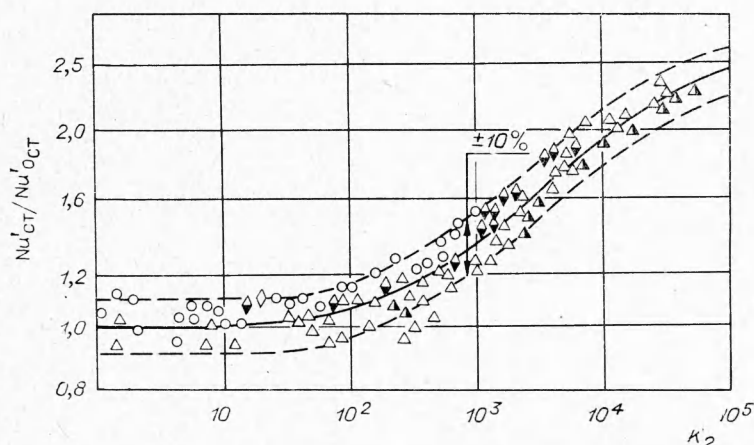


Рис. 3. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче при течении в круглой трубе неравновесно диссоциирующей окиси азота

$$[21]; \text{Nu}'_{\text{ст}} = \frac{q_{\text{ст}} d}{\lambda_{\text{ст}} (T_{\text{ст}} - T_0)}; \text{Nu}'_{0\text{ст}} \text{ для нереагирующего газа}; K_2 = \frac{Q_p \omega_{\text{ст}} x}{q_{\text{ст}}}.$$

тура начала диссоциации NO_2 . Результаты обобщения экспериментальных данных с помощью параметра K_2 представлены на рис. 3. При $K_2 < 25$ отношение коэффициентов теплоотдачи близко к единице, а при $K_2 > 10^4$ — стремится к отношению эффективного и «замороженного» коэффициентов теплопроводности при температуре стенки.

Значительный комплекс экспериментальных работ по исследованию теплообмена при турбулентном течении N_2O_4 проведен в [22, 23].

Рассматривая вопрос о сравнении расчетных результатов по теплоотдаче неравновесно диссоциирующих газов с результатами соответствующих экспериментальных исследований, необходимо подчеркнуть, что достаточно полное сравнение можно проводить только при наличии экспериментальных данных по составу газа на стенке трубы и средне-массовых значений состава и температуры газа.

С точки зрения инженерных приложений конечным выходом исследований гидродинамики и тепло- и массообмена при течении в трубах должны быть коэффициенты, необходимые в одномерном описании указанных процессов [24, 25]. В случае течения реагирующего газа ими являются коэффициенты гидравлического сопротивления, теплоотдачи и

массоотдачи (в случае каталитических стенок трубы), а также коэффициенты, связанные с переходом от средних по сечению величин, характеризующих поток, к величинам, определяемым по среднемассовым значениям температуры и состава.

Вопрос об определении коэффициентов, связанных с осреднением, для нереагирующих газов рассмотрен в [26]. Однако для химически реагирующих газов данных такого рода нет. Отсюда следует необходимость четкой формулировки одномерной постановки задачи для течения в канале газов с конечными скоростями химических реакций. Определение необходимых для этой цели коэффициентов, связанных с осреднением, возможно только на основании решения задачи в двумерной постановке с учетом переменности физических свойств газа.

Поступила в редакцию
18/IV 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Диссоциирующие газы как теплоносители и рабочие тела энергетических установок. Минск, «Наука и техника», 1970.
2. Б. С. Петухов. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М., «Энергия», 1965.
3. Г. А. Тирский. ПМТФ, 1971, 1.
4. R. Rothenberg, I. M. Smith. AIChE J., 1966, 12, 2.
5. Б. С. Петухов, В. Д. Виленский и др. ТВТ, 1973, 11, 2.
6. R. Rothenberg, J. M. Smith. Canad. J. of Chem. Eng., 1966, 44, 2.
7. И. С. Олоничев. ИФЖ, 1969, 16, 1.
8. W. Shotte. Ind. Eng. Chem., 1958, 50, 4, 683.
9. M. J. Callagan, D. M. Mason. Chem. Eng. Sci., 1964, 19, 763.
10. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 10.
11. Л. А. Вулис. ФГВ, 1972, 8, 1.
12. Y. C. Wu, A. F. Meills, V. E. Denny. Int. J. Heat Mass. Trans., 1971, 14.
13. И. Б. Вихорев, Ю. В. Лапин. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, 1.
14. Б. С. Петухов, В. Н. Попов, ТВТ, 1963, 1, 1.
15. Б. С. Петухов, В. Н. Попов. ТВТ, 1964, 2, 4.
16. В. Н. Попов, Б. Е. Харин. ТВТ, 1968, 6, 4.
17. J. P. Irving, J. M. Smith. AIChE J., 1961, 7, 1.
18. R. R. Furgason, J. M. Smith. AIChE J., 1962, 8, 5.
19. W. F. Krieve, D. M. Mason. AIChE J., 1961, 7, 2.
20. M. J. Callagan, D. M. Mason. AIChE J., 1964, 10, 1.
21. В. Н. Майданик. Канд. дисс., МЭИ, 1972.
22. Б. Е. Тверковкин и др. Изв. АН БССР, сер. ФЭН, 1971, 4.
23. Б. Е. Тверковкин и др. Изв. АН БССР, сер. ФЭН, 1971, 3.
24. Б. В. Нестеренко, Б. В. Тверковкин. Изв. АН БССР, сер. ФЭН, 1966, 2.
25. В. С. Белянин. Канд. дисс., ИВТАН, 1973.
26. И. П. Гинзбург. Прикладная гидрогазодинамика. Л., Изд-во ЛГУ, 1958.

УДК 532.547.4

ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ СРЕДЫ В ОЦЕНКЕ МЕТОДОМ РАЗМЕРНОСТЕЙ

В. А. Шваб
(Томск)

В работе методом размерного анализа рассматривается вопрос о влиянии тонко диспергированных примесей на диффузионные процессы, возникающие в пристеночных градиентных областях турбулентного потока. Имеющиеся в литературе сведения весьма ограничены. Наи-