

ОБОБЩЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ МЕТАНА В ПЛОСКОМ КАНАЛЕ

АННОТАЦИЯ

Численно исследовано влияние скорости спутного потока окислителя на горение турбулентной струи метана в плоской камере сгорания. Проведено обобщение коэффициентов поверхностного трения на внутренних стенках камеры.

1. ВВЕДЕНИЕ

Как показывает анализ литературных источников [1—6 и др.] в основном исследовано поведение коэффициентов поверхностного трения и теплоотдачи в не реагирующих течениях, а в работах по горению необходимые для практических расчетов аналогичные данные не приводятся.

Обобщение результатов реагирующих течений отличается от инертных тем, что в этом случае появляются новые определяющие параметры. Так, например, при горении кроме характерных температур T_0 (начальная температура) и T_w (температура поверхности), определяющую роль может играть адиабатическая температура горения T_{ad} .

В [1] экспериментальные данные различных авторов для ламинарного пограничного слоя обобщаются едиными зависимостями $St(Re)$ в следующем виде:

$$St = 0.332Re^{-0.5}.$$

Для турбулентного пограничного слоя аналогичная зависимость имеет следующий вид:

$$St = 0.0288Re^{-0.2}.$$

В этих формулах при определении числа Стэнтона использовалась определяющая температура:

$$T = T_\infty + 0.5 (T_w + T_\infty). \quad (1)$$

Авторами отмечается, что при этом разброс экспериментальных данных для различных газов и температур набегающего потока оказывается достаточно большим. При сравнительно небольшом диапазоне изменения температур в пограничном слое, когда различие теплофизических параметров также незначительно, расчет коэффициентов тепло- и массообмена в критериальном виде можно осуществлять с использованием определяющей температуры (1).

При значительном изменении физических параметров, например, при горении инжектанта в пограничном слое, использование определяющей температуры (1) при расчете чисел подобия может привести к значительным погрешностям. В этом случае

возникает необходимость введения в эмпирические расчетные зависимости дополнительных обобщенных параметров.

В настоящей работе представлены результаты численного исследования авторов по изучению влияния горения на коэффициенты поверхностного трения на внутренних стенках камеры сгорания и проведено их обобщение для различных параметров спутности.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Основные предположения и допущения

Рассматривается задача о диффузионном горении струи метана, вытекающей из плоского сопла с полувисотой h_1 с начальной скоростью u_{01} , начальной температурой T_{01} и начальной концентрацией метана c_{1-01} . Все остальное пространство канала заполнено спутным потоком окислителя с начальными параметрами u_{02} , T_{02} , c_{2-02} . В области перемешивания возникает фронт горения, положение которого определяется по максимальной температуре. Схема течения приведена на рис. 1.

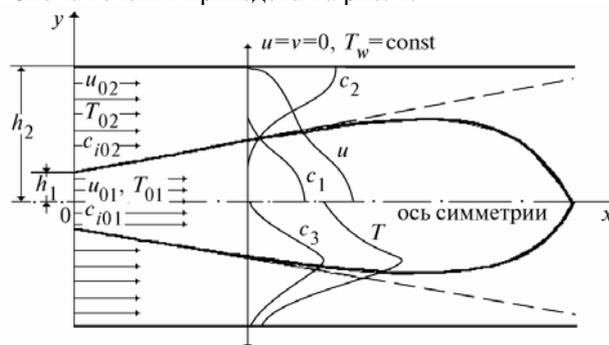


Рис. 1. Схема течения в плоском канале

Предполагается, что реакцию горения метана можно записать следующим обобщенным уравнением:



Здесь метан (CH_4) и кислород (O_2) являются исходными веществами, продукты реакции состоят из углекислого газа (CO_2) и паров воды (H_2O), а азот (N_2) выступает в качестве инертного разбавителя. Таким образом, газовая смесь состоит из пяти компонент.

Предполагается также, что течение является стационарным и двумерным; влияние потерь тепла на излучение, подъемных сил, а также эффектов Сорэ и Дюфура пренебрежимо мало; удельные теплоемкости всех компонент смеси равны и не зависят от темпера-

туры; коэффициенты диффузии всех компонент равны между собой ($D_i = D$, $i=1,2,3,4,5$) и равны коэффициенту температуропроводности a , т.е. $Le = a/D = 1$.

2.2. Система уравнений

С учетом сделанных предположений система уравнений имеет следующий вид [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(r\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} &= 0; \\ \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial r} \right); \\ \rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_{eff}}{\text{Pr}_{eff}} \frac{\partial H}{\partial r} \right); \\ \rho u \frac{\partial c_1}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_1}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_{eff}}{Sc_{eff}} \frac{\partial c_1}{\partial r} \right) - \omega \\ \rho u \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial r} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r\mu_{eff}}{Sc_{eff}} \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial r} \right), i=2,3,4. \end{aligned}$$

Здесь $\tilde{c}_i = c_i + \sigma_i c_1$, $i = 2, 3, 4$;

$$\omega = \rho^2 k_0 c_{fu} c_{ox} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right).$$

Выражение (8) определяет скорость расхода топлива в результате химической реакции горения. Концентрация азота c_5 определяется из соотношения:

$$c_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 c_i.$$

Плотность смеси ρ определяется из уравнения состояния для идеального газа:

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

где M — молярная масса смеси:

$$M = \frac{1}{\sum_{i=1}^5 \frac{c_i}{M_i}}.$$

2.3. Граничные условия

При $x = 0$ (на выходе из сопла) задаются начальные значения всех искомых функций:

$$x > 0: 0 < y < h_1: u = u_{01}; c_1 = c_{01}; \tilde{c}_i = \sigma_i c_{01};$$

$$H_0 = c_p T_{01} + Q c_{01};$$

$$h_1 < y < h_2: u = u_{02}; c_1 = 0; \tilde{c}_i = c_{0i}; H_0 = c_p T_{02}$$

$$0 < y < h_2: k_0 = \alpha_1 u_0^2; \varepsilon_0 = \alpha_2 \frac{k_0^{3/2}}{H}.$$

На оси струи задаются условия симметрии:

$$x \geq 0, \quad y = 0:$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial c_1}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial T'^2}{\partial y} = 0$$

На внутренней твердой поверхности канала задаются граничные условия I и II рода:

$$x \geq 0, \quad y = H: u = v = k = 0,$$

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial c_1}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{c}_i}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial T'^2}{\partial y} = 0.$$

Для данной задачи граничные условия конкретизировались следующим образом. Начальная скорость метана $u_{1-01} = 2$ м/с, начальная скорость спутного потока воздуха варьировалась в пределах: $0.5 \text{ м/с} \leq u_{2-02} \leq 2.0 \text{ м/с}$. Начальная температура задавалась равной $T_{01} = 900$ К, а температура внутренней поверхности канала $T_w = 600$ К. Начальная концентрация кислорода в смеси задавалась равной содержанию кислорода в воздухе $c_{02} = 0.232$. Начальная концентрация метана $c_{01} = 0.74$. Считалось, что продукты реакции в начальном сечении канала отсутствуют.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис.2 представлено изменение безразмерных коэффициентов поверхностного трения вдоль канала.

$$\frac{\tau_w}{\rho u_{01}^2} = \frac{c_f}{2}$$

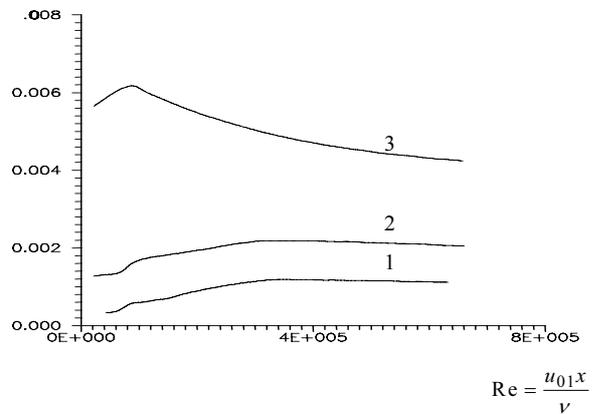


Рис. 2. Изменение безразмерных коэффициентов поверхностного трения вдоль канала при m : 1 — 0,25; 2 — 0,5; 3 — 1,0

Здесь местное число Рейнольдса Re_x определено по начальной скорости топлива u_{01} . Безразмерные коэффициенты трения $c_f/2$ определены также по начальной скорости топлива u_{01} . Из рис. 2 видно, что с увеличением параметра спутности $c_f/2$ увеличивается, и это логично, т.к. с увеличением скорости спутного потока увеличивается градиент скорости у внутренней поверхности канала.

Из рис. 2 также следует, что в отличие от инертного течения, при горении безразмерные коэффициенты поверхностного трения меняются вдоль канала немонотонно: сначала увеличиваются, затем умень-

шаются. Очевидно, что это происходит из-за влияния горения, т.к. безразмерный коэффициент поверхностного трения зависит от вязкости и от градиента скорости на поверхности. Поскольку течение при наличии горения является сильно неизо-термическим, то вязкость сильно меняется в соответствии с зависимостью:

$$\mu = \mu_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

Об изменении градиента скорости на стенке можно судить по профилям осредненной скорости, представленным на рис. 3.

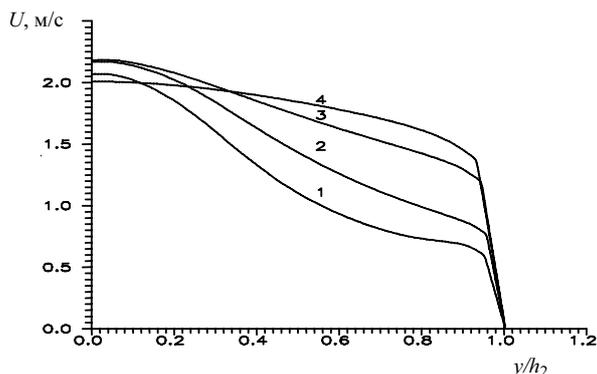


Рис. 3. Профили осредненной скорости в различных сечениях канала при x/h_2 : 1 — 5.3; 2 — 9.0; 3 — 12.7; 4 — 16.3.

Поскольку у поверхности (при $y/h_2 \rightarrow 1$) все профили практически сливаются, и трудно определить $\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)_w$, то на рис. 4 в увеличенном масштабе приведены те же самые профили в пристеночной области.

Из рис. 4 ясно видно, что по мере развития факела градиент скорости увеличивается (линии 1—3), а после окончания горения — уменьшается (линия 4). Очевидно, что уменьшение поверхностного градиента скорости за факелом немного превышает увеличение вязкости на стенке, поэтому поверхностное трение после окончания факела очень слабо снижается.

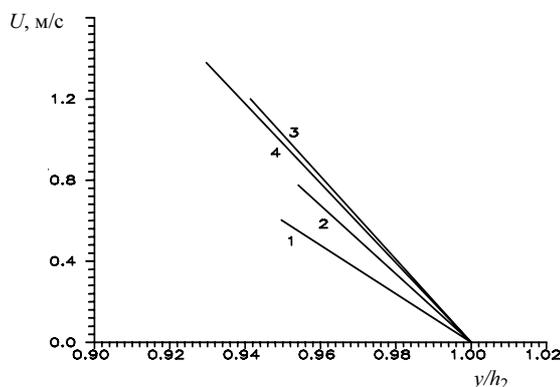


Рис. 4. Изменение осредненной скорости у поверхности канала в различных сечениях x/h_2 : 1 — 5.3; 2 — 9.0; 3 — 12.7; 4 — 16.3

Задача исследования — найти некоторую обобщенную зависимость $c_f/2 = f(Re_x)$, которая учитывала бы влияние параметра спутности. Тщательная математическая обработка результатов численного расчета показала, что обобщение безразмерных коэффициентов поверхностного трения единой зависимостью возможно только в той области канала, где отсутствует горение. Для этого коэффициенты поверхностного трения необходимо определять по характерной скорости:

$$u^* = 0,5(u_{01} + u_{02}) \quad (2)$$

и, кроме того, разделить на соответствующий параметр спутности m :

$$\frac{c_f^*}{2} = \frac{\tau_w}{\rho u^{*2} m} \quad (3)$$

Результаты расчета с учетом параметра спутности приведены на рис. 5, из которого следует, что при $Re > 4 \cdot 10^5$ безразмерные коэффициенты поверхностного трения можно описать единой степенной зависимостью, которая имеет следующий вид:

$$\frac{c_f}{2} = 0,07 Re^{-0,2} \quad (4)$$

Внутри диффузионного факела коэффициенты трения обобщить не удается.

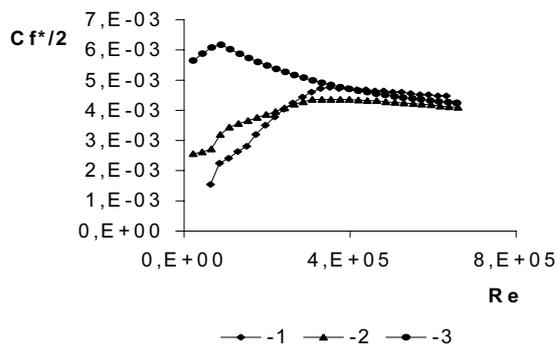


Рис. 5. Коэффициенты трения, определенные с учетом параметра спутности при m : 1 — 0,25; 2 — 0,5; 3 — 1,0

Использование для обобщения среднемассовой скорости $(\rho u^2)^* = 0,5(\rho_{01} u_{01}^2 + \rho_{02} u_{02}^2)$ положительного результата не дали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Горение качественно изменяет поведение коэффициентов поверхностного трения на внутренних стенках камеры сгорания: в отличие от не реагирующего течения они возрастают в ядре факела, а после завершения горения медленно падают. Факт неоднозначного изменения безразмерных коэффициентов поверхностного трения в плоском канале объясняется влиянием горения.

С увеличением скорости спутного потока коэффициенты поверхностного трения увеличиваются, так как растет градиент скорости у поверхности.

В области диффузионного факела коэффициенты трения не удается обобщить единой зависимостью. В области за факелом безразмерные коэффициенты поверхностного трения можно описать единой зависимостью (3), если при их определении учесть начальные скорости топлива и окислителя в соответствии с формулами (1) и (2).

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

E — энергия активации, Дж;
 c_1 — безразмерная массовая концентрация метана;
 c_2 — безразмерная массовая концентрация кислорода;
 c_3 — безразмерная массовая концентрация углекислого газа;
 c_4 — безразмерная массовая концентрация паров воды;
 c_5 — безразмерная массовая концентрация азота;
 $\frac{c_f}{2} = \frac{\tau_w}{\rho u_0^2}$ — безразмерный коэффициент поверхностного трения
 H — энтальпия, Дж/кг;
 h_1 — полувывсота щели, из которой вытекает топливо, м;
 h_2 — полуширина канала, м;
 k_0 — предэкспоненциальный множитель.
 Pr_{eff} — эффективное число Прандтля;
 Q — тепловой эффект реакции, Дж/кг;
 Sc_{eff} — эффективное число Шмидта;
 T — температура, К;
 u — продольная составляющая осредненной скорости, м/с;
 v — поперечная составляющая осредненной скорости, м/с;

$$\tau_w = \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)_w, \text{ кг/(м}\cdot\text{с}^2) - \text{касательное напряжение тре-}$$

ния на стенке.

Индексы:

i — порядковый номер компоненты газовой смеси.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сергеев Г.Т.** Основы тепломассообмена в реагирующих средах. Минск: Наука и техника, 1977. 231 с.
2. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.
3. **Волчков Э.П., Терехов В.И.** Тепломассоперенос в пограничном слое при наличии химических реакций. // Процессы переноса в высокотемпературных и химических реагирующих потоках. Новосибирск, 1982. №2. С. 13—39.
4. **Математическая теория горения и взрыва** / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович и др. М.: Наука, 1980. 478 с.
5. **Винокуров В.А., Каминский В.А., Фрост В.А., Колесников И.М.** Моделирование процессов горения в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. 2000. № 6. С. 26—30.
6. **Асланян Г.С., Майков И.Л.** Численное моделирование турбулентного горения газообразного топлива в осесимметричных камерах // Физика горения и взрыва. 1998. Т.34. № 4. С. 3—12.
7. **Теория турбулентных струй** / Под ред. Г.Н. Абрамовича. М.: Наука, 1984. 716 с.
8. **Spalding D.B.** GENMIX: General computer program for two-dimensional parabolic phenomena. London: Pergamon Press, 1977. 270 p.