

ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫСТОРИИ ТЕЧЕНИЯ НА ГОРЕНИЕ В ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Э. П. Волчков, В. В. Терехов, В. И. Терехов

Институт теплофизики СО РАН им. С. С. Кутателадзе, 630090 Новосибирск, terekhov@itp.nsc.ru

Представлены результаты численного моделирования горения метана в ламинарном пограничном слое у пористой пластины при наличии непроницаемого предвключенного участка. Анализ результатов основан на сопоставлении данных при горении и без него, а также при различных длинах предвключенного участка и его отсутствии. Показано, что предыстория течения существенно влияет на теплообмен и трение в пограничном слое со вдувом без горения, тогда как при горении влияние предыстории снижается. Наименьшее влияние предыстория течения при горении оказывает на теплообмен.

Ключевые слова: вдув, горение, ламинарный пограничный слой, теплообмен, трение, предвключенный участок.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование диффузионного горения в пограничном слое со вдувом представляет значительный интерес как для практических приложений с целью повышения эффективности энергоустановок, так и с точки зрения совершенствования теоретических моделей. Реагирующие течения в пограничном слое вблизи пористой поверхности, обтекаемой потоком окислителя, с подачей топлива через поверхность характерны для условий горения жидких и твердых топлив, а также при термической деградации материала стенки. В данном направлении достигнут значительный прогресс, однако в настоящее время нет единого подхода, позволяющего достаточно точно описать картину течения, тепло- и массообмен, устойчивость горения и другие характеристики. Это обусловлено исключительно сложными механизмами химической кинетики, тепловыделения, излучения, сил плавучести, турбулентности и многих других факторов.

Настоящая работа посвящена изучению влияния условий в набегающем потоке окислителя на картину течения, тепло- и массообмен в зоне горения. Действительно, во многих практических приложениях этот поток оказывается существенно неравномерным, а в экспе-

риментальных исследованиях горения в пограничном слое перед пористой секцией часто имеется непроницаемый теплоизолированный участок (с целью стабилизации горения). Другим широко распространенным методом стабилизации пламени является установка плохообтекаемого тела перед участком вдува горючего — ребер, уступов и т. п. Отрыв потока за ними приводит к утолщению пограничного слоя, что также можно условно рассматривать как увеличение длины предвключенного непроницаемого участка.

Теплообмен в пограничном слое при наличии необогреваемого начального участка для случая непроницаемой поверхности изучен достаточно подробно. Расчетные формулы, полученные из решения интегральных соотношений, представлены, например, в монографии [1]. Область влияния предвключенного участка распространяется примерно на 5 длин начального участка. В работе [2] численно исследовано влияние начального непроницаемого участка на трение и теплообмен в области пористого вдува и установлено, что влияние начального участка растет по мере увеличения скорости вдува. При наличии горения в пограничном слое данная задача подробно не изучалась, между тем, как показано в работах [3–6], влияние непроницаемого участка может быть весьма существенным. Сильное влияние предыстории оказывает при отрыве ламинарного потока за обратным уступом [7]. Поэтому детальное исследование процессов теплопереноса в по-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 09-08-00654а) и фонда Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-4349.2010.8).

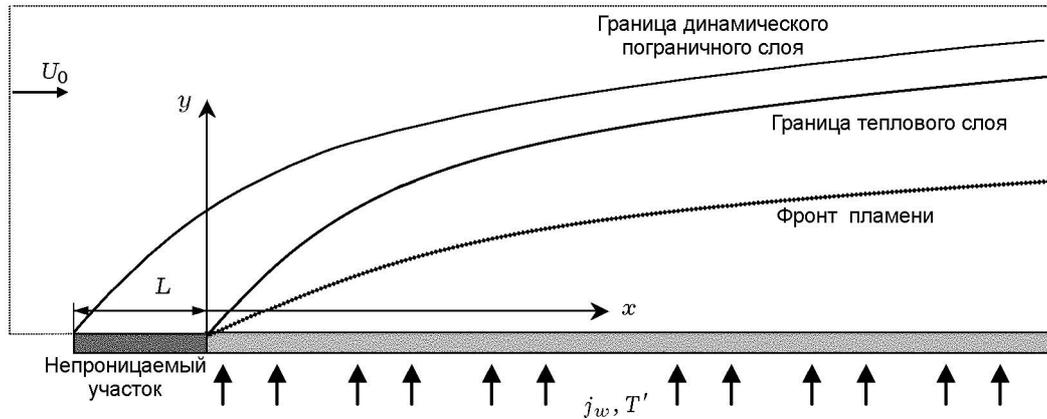


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

граничном слое со вдувом и горением при наличии непроходимого адиабатного начального участка представляет большой интерес.

В настоящей работе на основе численного моделирования исследуется влияние длины предвключенного участка на структуру диффузионного пламени, тепло- и массообмен и трение в ламинарном пограничном слое при вдуве через пористую поверхность горючего. Большое внимание уделено сопоставлению с результатами расчета при вдуве без горения, а также с опытными данными [8, 9].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе исследовались тепло- и массообмен и трение на горизонтальной пористой поверхности, обтекаемой ламинарным потоком воздуха при горении в нем метана, подаваемого через пластину (рис. 1). Перед пористой пластиной предполагалось наличие теплоизолированного непроходимого участка. Его длина L менялась в диапазоне $0 \div 0.08$ м, наиболее характерном для экспериментальных установок [3, 4, 8, 9]. Длина всей пластины равнялась 0.32 м. За нулевое значение координаты x принималась точка начала пористого участка. Скорость набегающего потока воздуха 1 м/с, его температура 300 К, относительный расход метана через пористую поверхность $J = \frac{\rho_w V_w}{\rho_0 U_0} = 0.005$, где ρ_w , V_w — плотность и скорость вдуваемого газа, ρ_0 , U_0 — плотность и скорость невозмущенного потока. Температура вдуваемого газа была постоянной по длине пластины и равной $T' = 310$ К во всех расчетах. Влиянием радиационного теплообмена и

свободной конвекции на тепло- и массоперенос пренебрегали.

УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Вид законов сохранения, описывающих динамику многокомпонентных газовых смесей при наличии химических превращений, хорошо известен [10]. В настоящей работе использовали полные двумерные уравнения Навье — Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} &= 0, \\ \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)_i, \\ \frac{\partial \rho H u_j}{\partial x_j} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial H}{\partial x_j} \right) + \sum_{\alpha=1}^N H_\alpha \frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial k_\alpha}{\partial x_j}, \\ \frac{\partial \rho k_\alpha}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{Sc_\alpha} \frac{\partial k_\alpha}{\partial x_j} \right) + \dot{\omega}_\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

и уравнение состояния идеального газа:

$$p = \frac{\rho R T}{M}. \quad (2)$$

Здесь u_i , u_j — компоненты вектора скорости, p — давление, μ — вязкость, H , H_α — энтальпия газовой смеси и компонента α соответственно, Pr — число Прандтля, Sc — число

Шмидта, k_α — массовая концентрация компонента α , ω_α — скорость образования (поглощения) компонента α , M — молекулярная масса.

Следует отметить, что в данном случае было использовано упрощенное представление диффузионных потоков веществ, основанное на обобщенном законе Фика. Диффузионные потоки вещества в нем определяются как $j_\alpha = \rho D_\alpha \nabla k_\alpha$, где D_α — эффективный коэффициент диффузии компонента α в смесь. Коэффициенты бинарной диффузии (необходимые для расчета эффективного коэффициента) и теплопроводности, а также вязкость и теплоемкость индивидуальных веществ определяли по полиномам [11]. Коэффициенты переноса смеси газов вычислены согласно методам, также изложенным в работе [11]. Химическая кинетика горения метана в воздухе рассчитана по модели, состоящей из одной глобальной реакции окисления метана до углекислоты и воды [12], скорость которой $\dot{\omega}_{\text{CH}_4} = -10^{10} k_{\text{CH}_4} k_{\text{O}_2} \exp(-9070/T)$.

Уравнения (1) решали методом контрольного объема. Для интерполяции конвективных потоков на гранях контрольного объема применяли схему QUICK. Процедура расчета давления основана на алгоритме SIMPLEC. Для источниковых членов в уравнениях диффузии была использована линеаризация.

Граничные условия:

- на входе в расчетную область задавались компоненты вектора скорости;
- на выходе задавалось давление, компоненты вектора скорости экстраполировались со вторым порядком точности («мягкие» граничные условия);
- на стенке задавалось условие прилипания для продольной компоненты скорости, поперечная компонента определялась из заданного массового потока; для уравнения энергии граничное условие задавалось в виде баланса тепла на стенке; аналогично и для уравнений сохранения компонентов газовой смеси — граничное условие представляло собой баланс масс компонентов.

Программа тестовых расчетов включала сопоставительный анализ для случая обтекания ламинарным потоком непроницаемой и проницаемой пластин при наличии адиабатического участка различной длины, а также при вариации граничных условий на поверхности. Для случая $T_w = \text{const}$ по длине теплообменной пластины результаты расчета с погрешно-

стью не более 0.8 % согласуются с формулой Кейса [1]

$$\frac{\text{St}}{\text{St}_{L=0}} = \left[1 - \left(\frac{L}{L+x} \right)^{0.75} \right]^{-1/3}, \quad (3)$$

полученной из решения интегральных соотношений импульсов и энергии. Здесь $\text{St}_{L=0}$ — число Стентона при отсутствии начального участка. Решение этих уравнений при $q_w = \text{const}$ дает выражение для относительного коэффициента теплоотдачи в виде

$$\frac{\text{St}}{\text{St}_{L=0}} = \left[1 - \frac{L}{x+L} \right]^{-1/3}. \quad (4)$$

Вычисления по формуле (4) с вышеуказанной погрешностью совпадают с результатами численных расчетов.

Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными [3, 4] показало их удовлетворительное совпадение на сетках (неравномерных, со сгущением линий к фронту пламени, стенке и началу пористого участка пластины) 250×150 ячеек, дальнейшее измельчение сетки к сколько-нибудь существенному изменению результатов не приводило.

ВЛИЯНИЕ ПРЕДЫСТОРИИ НА ТЕЧЕНИЕ СО ВДУВОМ БЕЗ ГОРЕНИЯ

На первом этапе численного исследования изучалось влияние предвключенного непроницаемого участка на трение и теплообмен при вдуве нереагирующего газа. Через стенку подавался метан с постоянной температурой $T' = 310$ К и постоянной по длине скоростью вдува. Зависимости коэффициентов трения и теплообмена от чисел Рейнольдса Re_x и Re_{x+L} , рассчитываемых по длине пористого участка и по полной длине пластины соответственно, приведены на рис. 2. В литературе [1, 2, 13] встречается представление результатов в зависимости от первого или второго чисел Рейнольдса. Действительно, при анализе теплообмена удобнее использовать первое представление, поскольку тепловой пограничный слой развивается от начала пористой пластины, тогда как второй вариант предпочтительнее при анализе трения вследствие того, что динамический пограничный слой занимает всю пластину.

Линия 1 на рис. 2, а, б соответствуют закону Блазиуса для трения при обтекании ламинарным потоком непроницаемой пластины.

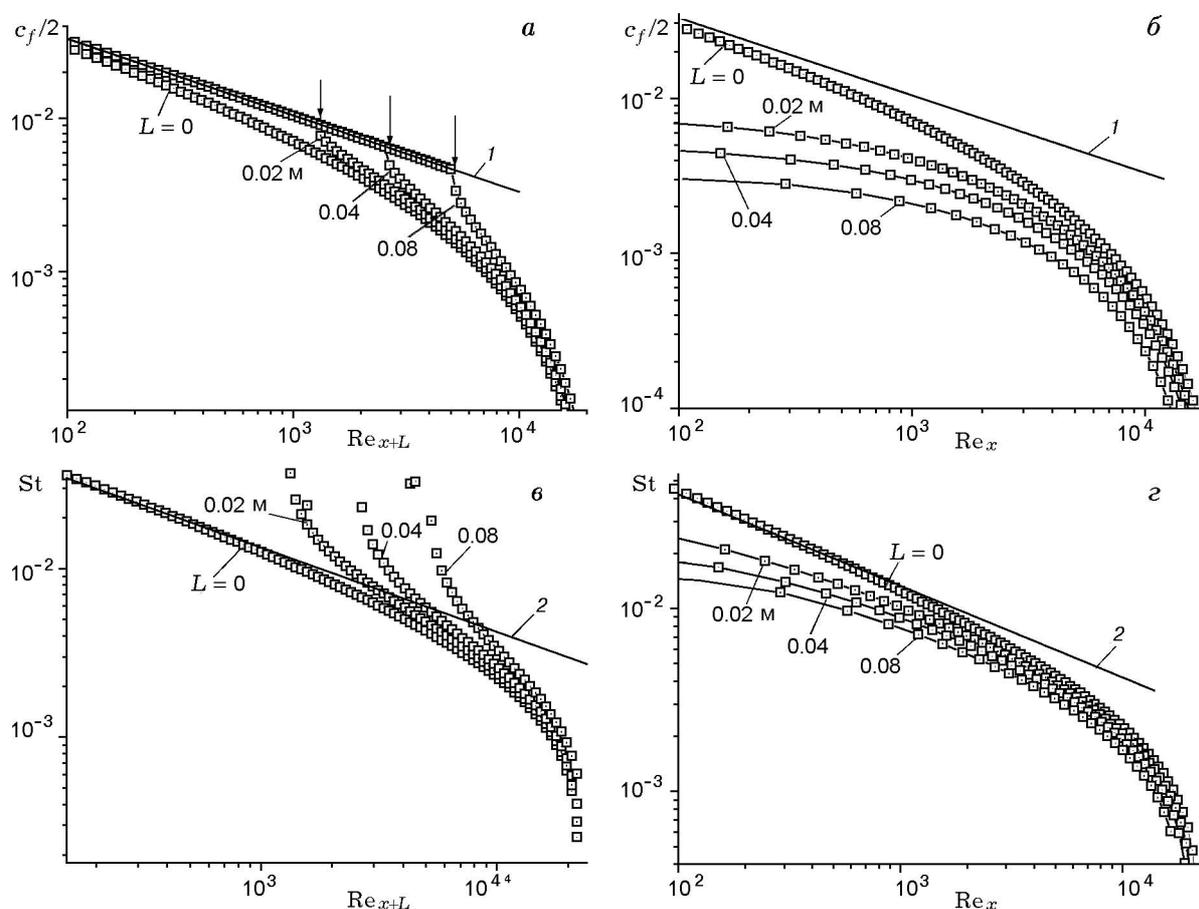


Рис. 2. Трение (*a, б*) и теплообмен (*в, г*) при вдуве метана без горения при различных длинах начального участка:

стрелками обозначено начало пористого участка; линии 1, 2 — стандартные законы трения и теплообмена для ламинарного пограничного слоя

Подобный ему закон теплообмена показан линиями 2 на рис. 2, *в, г*. Как видно, до начала пористого участка распределение коэффициента трения совпадает с законом Блазиуса. Далее вниз по потоку за счет вдува трение на стенке интенсивно снижается. При этом значения коэффициента трения для различных предысторий становятся близки друг к другу и влияние начального участка постепенно вырождается.

В отличие от трения, коэффициент теплообмена (см. рис. 2, *в*) на протяжении начального участка равен нулю, а на границе с пористым участком резко возрастает. Это обусловлено ступенчатым характером изменения тепловых граничных условий. По мере удаления от начала пористой пластины интенсивность теплообмена, подобно трению, падает и расчетные данные для различных длин L имеют тенденцию к сближению. При использова-

нии числа Рейнольдса, построенного по длине теплового пограничного слоя (см. рис. 2, *г*), наблюдается снижение коэффициента теплообмена в начале области вдува, вызываемое наличием предвключенного участка.

На рис. 3 приведены отношения коэффициентов трения (*a*) и теплообмена (*б*) при наличии предвключенного участка к значениям без него. Отметим ряд важных выводов, следующих из рисунка. Во-первых, наличие ненулевого пограничного слоя перед пористым участком приводит к снижению теплообмена и трения, причем трение снижается несколько больше. Во-вторых, при вдуве влияние предвключенного участка оказывается более существенным, чем на непроницаемой пластине. Кроме того, точка, в которой происходит оттеснение пограничного слоя, вызываемое равномерным вдувом, при наличии предвключенного участ-

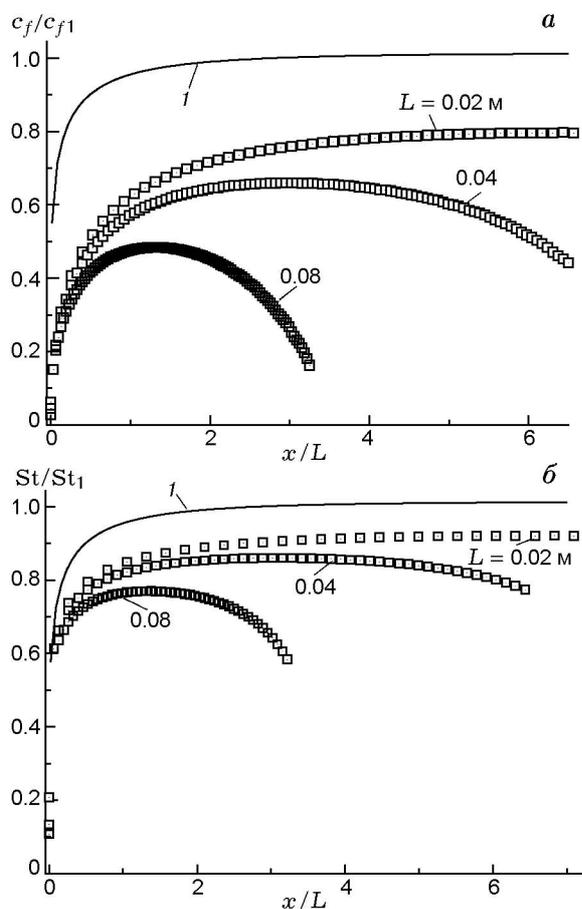


Рис. 3. Влияние длины начального участка на трение (а) и теплообмен (б) при вдуве метана без горения:

линия 1 — расчет по формуле (3)

ка сдвигается вверх по потоку, что приводит к снижению относительных коэффициентов трения и теплообмена по мере приближения к точке оттеснения.

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ФРОНТОМ ГОРЕНИЯ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ДЛИНЫ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА

Горение в пограничном слое вносит существенные изменения в структуру течения и тепло- и массоперенос. На рис. 4 показаны поля продольной скорости (а), температуры (б) и давления (в) в пограничном слое с горением за предвключенным участком длиной 0.04 м. Представленные распределения имеют вид, характерный для пограничного слоя с фронтом горения [3, 4, 5, 9, 14]. Тепловыделение внутри пограничного слоя, как видно на рис. 4,б, приводит к существенному снижению плотности

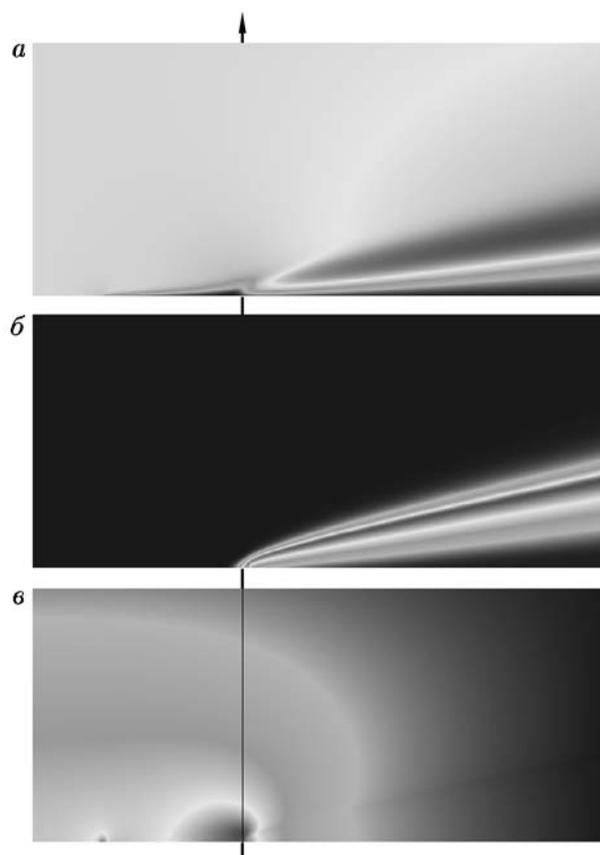


Рис. 4. Распределение скорости (а), температуры (б) и давления (в) в пограничном слое при вдуве и горении за предвключенным участком:

линией показано начало пористого участка

газовой смеси в зоне горения, и, следовательно, перед ней возникает область повышенного давления (рис. 4,в). Под воздействием продольного градиента давления скорость легкого газа во фронте пламени становится больше скорости холодного газа вне фронта, так что течение приобретает характер, близкий к пристенной струе (рис. 4,а).

Эти особенности структуры пограничного слоя с фронтом горения подтверждаются также рис. 5, где показаны профили температуры и скорости при различной длине начального участка. Профили температуры (рис. 5,а) оказались консервативными к предыстории и практически совпадают между собой при изменении длины начального участка в широких пределах. Напротив, распределения продольной скорости по толщине пограничного слоя (рис. 5,б) заметно различаются для различных

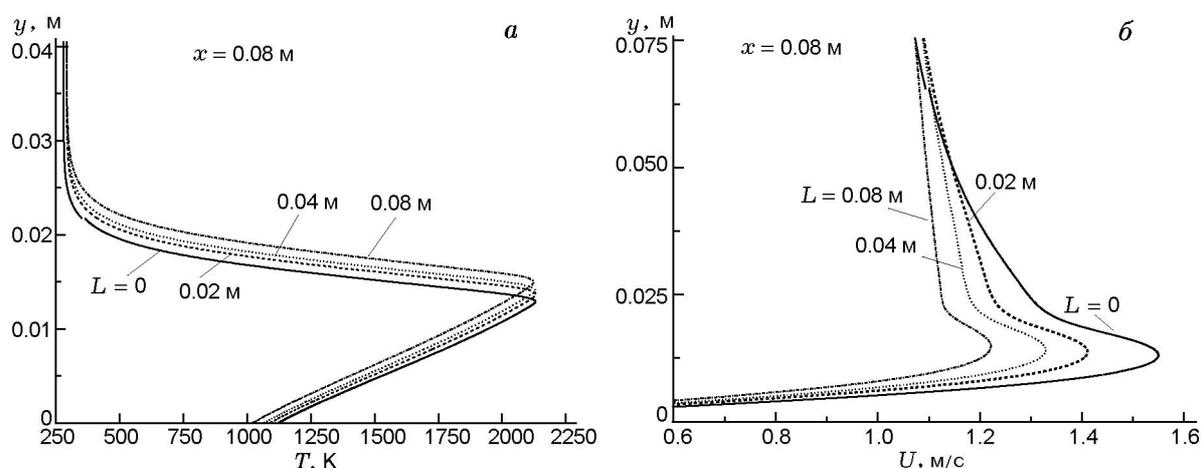


Рис. 5. Профили температуры (а) и скорости (б) при горении метана в пограничном слое

значений L , что свидетельствует о более сильном влиянии предыстории потока на аэродинамическую структуру, нежели на тепловую.

Следует отметить, что скорость во фронте пламени может превышать ее значение на внешней границе пограничного слоя даже при отсутствии внешнего ускорения потока. Такой характер течения наблюдался и в опытах [3, 4, 14], а также в расчетах [15]. Эта интересная особенность поведения профиля скорости при наличии горения подробно обсуждалась в работе [16]. Увеличение L и, соответственно, толщины динамического слоя перед началом пористого участка, как это видно из рис. 5, б, приводит к сглаживанию профиля и снижению максимума скорости в области фронта пламени.

На рис. 6 результаты расчета настоящей работы сопоставлены с опытными данными [8] при горении метана за предвключенным участком в ламинарном воздушном потоке. Видно, что расчетные данные хорошо коррелируют с результатами опытов как по положению фронта пламени, так и по величине максимальной скорости в пристенной зоне, что еще раз подтверждает вышеизложенные выводы.

Отмеченные особенности аэродинамики реагирующего пограничного слоя отражаются на поведении коэффициентов трения и теплообмена. Распределения коэффициента трения показаны на рис. 7, а. Здесь число Рейнольдса рассчитывается по координате $x + L$, отсчитываемой от начала всей пластины. Линия 1 представляет собой закон Блазиуса. При отсутствии начального участка ($L = 0$) трение на

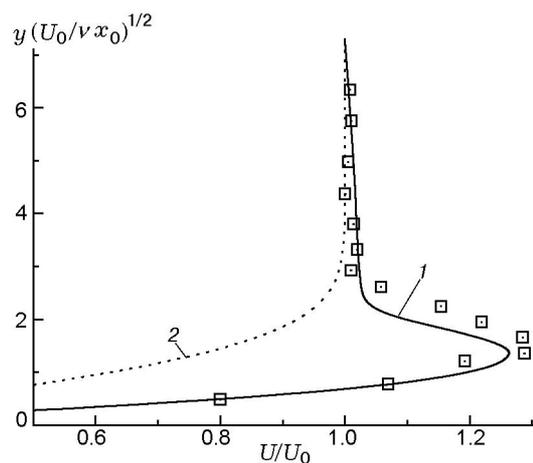


Рис. 6. Сопоставление результатов расчета (линия 1) с данными опытов [8] при горении метана (точки):

линия 2 — профиль Блазиуса

большей части пластины превышает значение для непроницаемой пластины. Это объясняется тепловыделением в пограничном слое, приводящим к сильному изменению теплофизических свойств по толщине пограничного слоя, и продольным ускорением потока во фронте пламени, что в итоге превалирует над влиянием вдува. При наличии предвключенного участка распределение трения по длине имеет характерные минимум и максимум. Причем такая картина наблюдается при всех исследованных длинах L . Участок снижения трения обусловлен торможением потока непосредственно перед местом вдува. Об этом наглядно свиде-

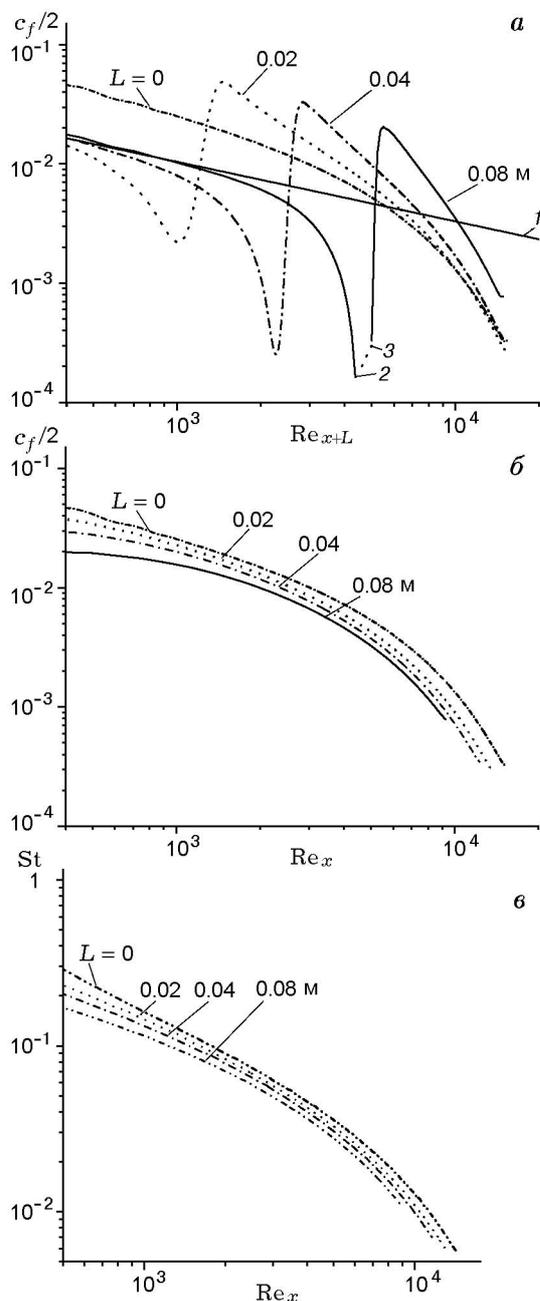


Рис. 7. Коэффициенты трения (а, б) и теплообмена (в) в пограничном слое со вдувом и горением

тельствуют поля давлений (см. рис. 4, в). При протяженных начальных участках (например, при $L = 0.08$ м на рис. 7, а) перед участком вдува и горения образуются вихревые зоны обратных течений, где трение принимает отрицательное значение (область между точками 2 и 3 на рис. 7, а). Следующая за минимумом область повышенного трения с острым максимумом вы-

звана ступенчатым изменением скорости вдува в начале пористой пластины. Дальнейшая релаксация течения по длине пористой пластины сопровождается снижением трения за счет вдува и горения.

По аналогии со случаем вдува без горения удобно проанализировать параметры теплообмена и трения, представляя их в зависимости от числа Рейнольдса, построенного по длине пористой секции (рис. 7, б, в). Оказывается, что коэффициенты трения и теплообмена на пористом участке при горении в пограничном слое монотонно снижаются от начала пористой пластины вниз по течению. Необходимо подчеркнуть, что число Стентона рассчитывалось здесь по параметрам во фронте горения и на стенке: $St = q_w / \rho_0 u_0 c_{pf} (T_f - T_w)$.

Кроме того, из рис. 7, б, в видно, что значения коэффициента трения и числа Стентона достаточно сильно отличаются между собой, что приводит к невозможности использования предположения о подобии процессов переноса тепла и импульса, зачастую применяемого в инженерном анализе тепло- и массопереноса при горении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные расчеты свидетельствуют о сложном механизме влияния вдува и горения на структуру течения и теплообмен в ламинарном пограничном слое при наличии предвключенного непроницаемого участка. Многообразие возмущающих факторов, таких как вдув, интенсивное тепловыделение, большие градиенты термогазодинамических параметров и др., не позволяют в настоящее время составить целостной картины данного явления. Для ее завершения необходимы более глубокие и обширные исследования. Однако полученные результаты дают представление об основных тенденциях поведения трения и теплообмена как при наличии горения, так и в его отсутствие. В пограничном слое пластины с пористым вдувом без горения главным фактором, приводящим к отличию результатов для непроницаемой стенки, является высокая чувствительность характеристик пограничного слоя к условиям на входе.

При горении в пограничном слое наиболее важный вклад вносят процессы вихреобразования и отрыва потока непосредственно перед областью вдува. Возможно, что подобные эффекты будут наблюдаться и при вдуве нереа-

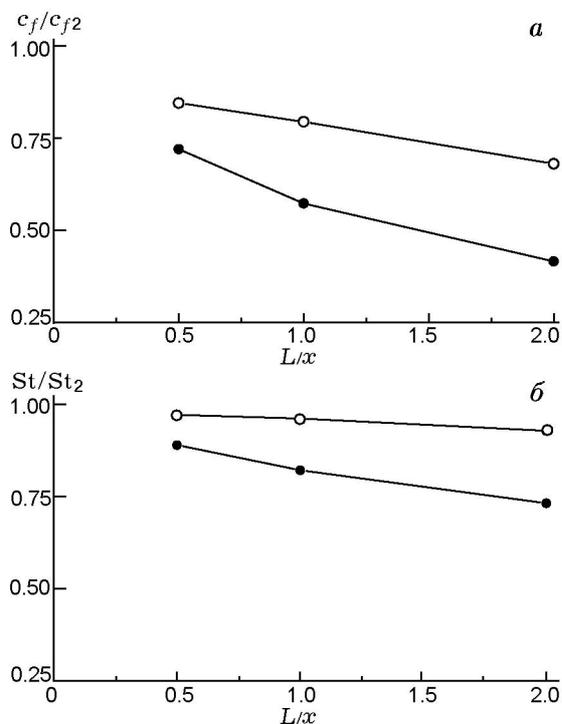


Рис. 8. Влияние длины предвключенного участка на трение (а) и теплообмен (б) при вдуве (темные точки) и горении (светлые точки) метана

гирующих веществ, но при существенно больших параметрах вдува. Значительное влияние на процессы переноса при горении оказывают также локальные максимумы скорости, формирующиеся во фронте пламени.

Наиболее важные выводы можно сделать из рис. 8. На нем представлены отношения коэффициентов трения и теплообмена к соответствующим величинам без предвключенного участка в зависимости от его длины для фиксированного сечения $x = 0.04$ м при вдуве без горения и с горением. Во-первых, отметим, что влияние предвключенного участка на трение выше, чем на теплообмен. Этот факт был отмечен и в работе [6]. Во-вторых, предыстория течения оказывает значительно меньшее влияние на пограничный слой при горении, чем в случае вдува инертного газа при отсутствии горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кэйс В. М. Конвективный тепло- и массообмен. — М.: Энергия, 1972.
2. Sastri V. M. K., Hartnett J. P. Effect of an unheated solid starting length on skin friction and heat transfer in a transpired laminar boundary layer // Progress in Heat and Mass Transfer. — Pergamon Press, 1969. — V. 2. — P. 213–223.
3. Hirano T., Iwai K., Kanno Y. Measurement of the velocity distribution in the boundary layer over a flat plate with a diffusion flame // Astron. Acta. — 1972. — V. 17. — P. 811–818.
4. Hirano T., Kanno Y. Aerodynamic and thermal structures of the laminar boundary layer over a flat plate with a diffusion flame // 14th Symp. (Intern.) Combustion. — 1973. — P. 391–398.
5. Rouvreau S., Torero J., Joulain P. Numerical evaluation of boundary layer assumptions for laminar diffusion flames in microgravity // Combust. Theory and Modelling. — 2005. — V. 9. — P. 137–158.
6. Kikkawa S., Yoshikawa K. Theoretical investigation of laminar boundary layer with combustion over a flat plate // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 1973. — V. 16. — P. 1215–1229.
7. Батенко С. Р., Терехов В. И. Влияние динамической предыстории потока на аэродинамику ламинарного отрывного течения в канале за обратным прямоугольным уступом // ПМТФ. — 2002. — Т. 43, № 6. — С. 84–92.
8. Ueda T., Ooshima A., Saito N., Mizomoto M. Aerodynamic structure of a laminar boundary layer diffusion flame over a horizontal flat plate (experimental analysis) // JSME Intern. J. Ser. 2. — 1991. — V. 34, N 4. — P. 527–532.
9. Mizomoto U. M., Ikai S., Kobayashi T. Velocity and temperature fluctuations in a flat plate boundary layer diffusion flame // Combust. Sci. and Technol. — 1982. — V. 27, N 3–4. — P. 133–142.
10. Oran E. S., Boris J. P. Numerical Simulation of Reactive Flow. — New York: Elsevier, 1987.
11. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K. The properties of gases and liquids. — New York: McGraw-Hill, 1997.
12. Westbrook C. K., Dryer F. L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames // Combust. Sci. and Technol. — 1981. — V. 27. — P. 31–43.
13. Sparrow E. M., Star J. B. The transpiration-cooled flat plate with various thermal and velocity boundary conditions // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 1966. — V. 9. — P. 508–510.
14. Ha J. S., Shim S. H., Shin H. D. Boundary layer diffusion flame over a flat plate in the presence and absence of flow separation // Combust. Sci. and Technol. — 1991. — V. 75. — P. 241–260.

15. **Ananth R., Tatem P. A., Ndubizu C. C.** A numerical model for the development of a boundary layer diffusion flame over a porous plate // Naval Research Laboratory Memorandum Report NRL/MR/6183-01-8547. — 2001.
16. **Ramachandra A., Raghunandan B. N.** On the velocity overshoot in a laminar boundary layer diffusion flame // Combust. Sci. and Technol. — 1983. — V. 33. — P. 309–313.

Поступила в редакцию 8/IV 2010 г.
