

УДК 536.244

ТЕПЛООБМЕН В УСКОРЕННОМ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩЕМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

© 1996 г. Б. Ф. Бояршинов, Э. П. Волчков, В. В. Лукашов

Представлено академиком А.И. Леонтьевым 23.06.95 г.

Поступило 10.08.95 г.

Воздействие на процессы переноса различных факторов, сопутствующих горению, является предметом исследований в ряде экспериментальных и теоретических работ. Горение в каналах часто сопровождается возникновением продольного градиента статического давления и ускорением газового потока. Влияние ускорения на структуру течения в реагирующем пограничном слое исследовалось в [1, 2]. Показано, что наличие продольного отрицательного градиента статического давления приводит к деформации профилей скорости, возникновению ее максимума в области тепловыделения. Однако данные по теплообмену на стенке в таких условиях отсутствуют.

Рассматриваемые по отдельности ускорение и горение вызывают сходные эффекты при их воздействии на теплообмен. При горении в пограничном слое без ускорения ядра потока закономерности процессов переноса исследовались, например, в [3, 4]. Показано, что протекание экзотермической реакции сопровождается ламинаризацией течения в пристенной области пограничного слоя, снижением интенсивности теплообмена по сравнению со случаем отсутствия горения. В опытах без горения, но с ускорением [5–7] установлено, что воздействие продольного отрицательного градиента статического давления ($\frac{dP}{dx} < 0$) на нереагирующий пограничный слой также приводит к снижению интенсивности теплообмена, а при достаточно сильном ускорении возможна ламинаризация потока.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования совместного воздействия отрицательного градиента статического давления и горения на теплообмен в пограничном слое.

Использованный в опытах аэродинамический стенд описан в [3]. Его рабочая часть с входным сечением 100×100 мм дополнена гибкой профи-

лирующей крышкой, задающей закон изменения скорости в ядре потока $U_0(x)$. В большинстве опытов эта зависимость задавалась из условия $K = \text{const}$. Величина параметра Кейса

$$K = \frac{v}{U_0^2} \frac{dU_0}{dx},$$

характеризующего ускорение, варьировалась в опытах от $4.1 \cdot 10^{-6}$ до $25 \cdot 10^{-6}$. Как и в [3, 4], исследовался режим горения, при котором потоки испаряющегося этанола определялись интенсивностью испарения с пористой стенки.

В предварительных опытах было установлено, что при положительном градиенте давления $\frac{dP}{dx} > 0$ горение неустойчиво. Приведенные ниже экспериментальные данные соответствуют случаю $\frac{dP}{dx} < 0$, при этом перепад статического давления по длине рабочей части (320 мм) не превышал

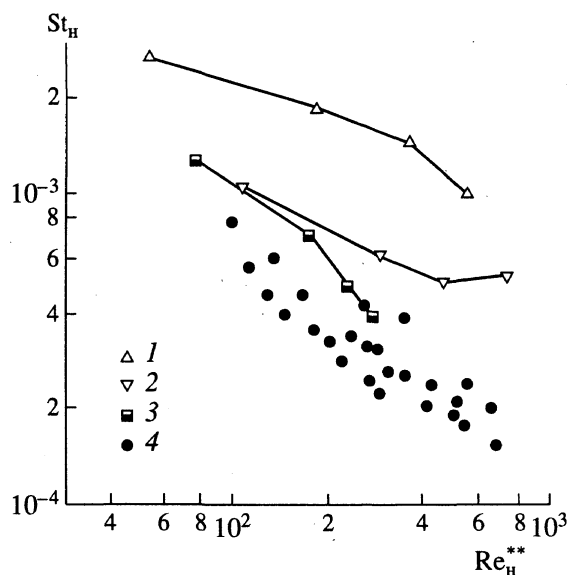


Рис. 1. Теплообмен в ускоренном пограничном слое с химическими реакциями. $K = 19 \cdot 10^{-6}$ (1), $6.3 \cdot 10^{-6}$ (2), $(25-4) \cdot 10^{-6}$ (3), 0 (4).

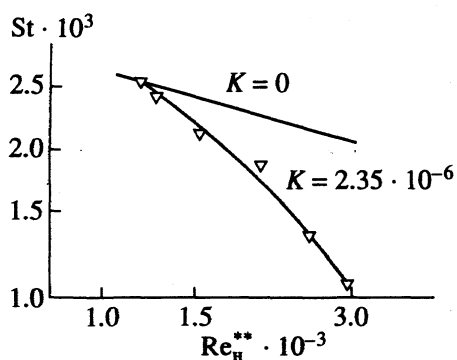


Рис. 2. Теплообмен в ускоренном пограничном слое без горения по данным [7].

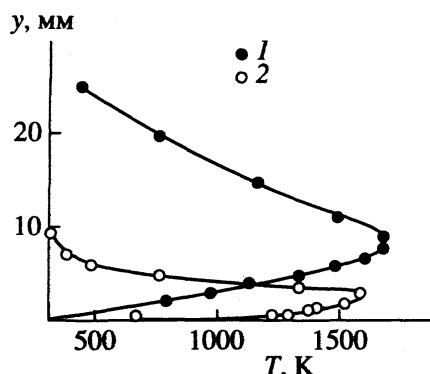


Рис. 3. Распределение средней температуры в поперечном сечении пограничного слоя с горением. 1 — $U_0 = 10$ м/с, $K = 0$; 2 — $U_0 = 11$ м/с, $U_s = 2$ м/с.

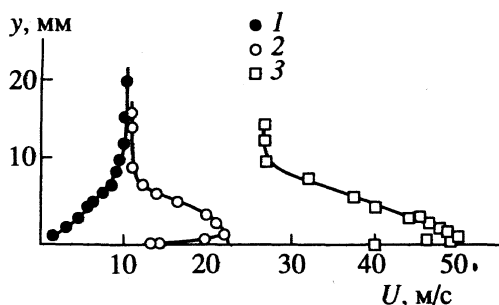


Рис. 4. Деформация профилей средней скорости в пограничном слое с ускорением и горением. 1 — $U_s = U_0 = 10$ м/с; 2 — $U_s = 2$ м/с, $U_0 = 11$ м/с; 3 — $U_s = 6$ м/с, $U_0 = 27$ м/с.

600 Па. Скорость воздушного потока на входе в профилированный участок изменялась в диапазоне $U_s = 2-10$ м/с.

В экспериментах измерялось распределение температуры и полного напора в пограничном слое. Диаметр платино-платинородиевой проволоки 0.02 мм, внутренний диаметр отверстия приемника полного давления 0.2 мм. По результатам этих измерений определяли также профили сред-

ней скорости, исходя из того, что молекулярный вес газовой смеси остается практически постоянным по толщине пограничного слоя [3]. Данные по тепломассообмену получены на основании измерений расхода топлива через каждую из пластин в течение заданного интервала времени. Значения чисел Стентона

$$St = \frac{j_w r}{\rho_0 U_0 (h_0 - h_w)}$$

в опытах определяли по потоку испарившегося горючего j_w . Значения полных энтальпий на стенке h_w , соответствующих адиабатическому испарению и горению этанола, которые не зависят от условий обтекания, взяты из работы [4]. Числа Рейнольдса по толщине потери энергии определяли из соотношения

$$Re^{**} = \frac{1}{\mu_0} \left(1 + \frac{1}{b_1} \right) \int_0^x j_w dx.$$

Здесь ρ_0 , μ_0 , h_0 — плотность, динамическая вязкость и полная энтальпия в ядре потока, $b_1 = (h_0 - h_w)/r$ — параметр проницаемости, r — теплота испарения.

Сравнение экспериментальных данных по теплообмену в реагирующем пограничном слое с ускорением (светлые точки) и без него (темные точки) представлено на рис. 1. Видно, что при наличии ускорения интенсивность теплообмена может возрасти в несколько раз. Точки 1, 2 относятся к $U_s = 2$ и 6 м/с при одной и той же форме канала, высота которого изменялась по закону $S = S_0 - \alpha x$, где $S_0 = 100$ мм, $\alpha = 0.25$, что соответствует значениям $K = 19 \cdot 10^{-6}$ и $K = 6.3 \cdot 10^{-6}$. Точками 3 показаны результаты опытов при профилировании канала с постоянным градиентом давления (-150 Па/м) при $U_s = 3$ м/с, когда параметр K менялся по длине в диапазоне $(25-4) \cdot 10^{-6}$. Видно, что в этом случае влияние градиента давления на теплообмен относительно слабое.

Полученные данные о влиянии химического реагирования на теплообмен в ускоренном пограничном слое можно также сопоставить со случаем отсутствия горения. На рис. 2, взятом из [7], видно, что в пограничном слое без химических превращений наличие ускорения $K = 2.35 \cdot 10^{-6}$ приводит к уменьшению чисел Стентона по сравнению с данными для $K = 0$.

Возможно, что интенсификация теплообмена в ускоренном пограничном слое с горением обусловлена значительными изменениями в его структуре. Профили средних значений температуры и скорости для сечения $x = 320$ мм, соответствующего концу участка ускорения при $K = 19 \cdot 10^{-6}$, представлены на рис. 3 и 4. Видно, что по сравнению с безградиентным течением распределение этих

параметров существенно деформировано: уменьшились толщины теплового и динамического пограничного слоя, в профиле скорости появляется максимум. Градиент скорости поперек пограничного слоя в пристенной области значительно выше, чем для неускоренного потока.

Таким образом, несмотря на то что ускорение и горение, рассматриваемые по отдельности, приводят к ламинаризации и снижению интенсивности тепло- и массообмена, при совместном их воздействии возможна интенсификация процессов тепломассопереноса в пограничном слое. Эта интенсификация, по-видимому, связана с существенной деформацией профилей скоростей, температур, которая вызвана появлением продольного отрицательного градиента статического давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 93-02-14517, а также Фонда Сороса

и правительства Российской Федерации, договор JJ 31000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джонс Дж., Изааксон Л., Врик С. // РТЖ. 1971. Т. 9. № 9. С. 122-129.
2. Ramachandra A., Radhuanandan B.N. // Comb. Sci. and Techn. 1983. V. 33. № 5/6. P. 309-313.
3. Бояришинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И. // ФГВ. 1992. № 3. С. 29-36.
4. Бояришинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И. // ФГВ. 1994. № 1. С. 8-15.
5. Бэк Л., Каффел Р., Массье П. // РТЖ. 1969. Т. 7. № 4. С. 194-196.
6. Кейс В., Моффет Р., Тилбар В. // Тр. Амер. о-ва инж.-механиков. Сер. С. Теплопередача. 1970. Т. 92. № 3. С. 190-198.
7. Roganov P.S., Zabolotsky V.P., Shishov E.V., Leontiev A.I. // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1984. V. 27. № 8. P. 1251-1259.