

УДК [535.371+536.526].001.5

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС И СТАБИЛИЗАЦИЯ ГОРЕНИЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ЗА РЕБРОМ И ЗА УСТУПОМ

Б. Ф. Бояршинов, С. Ю. Фёдоров

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

Проведено сравнение характеристик пограничного слоя с горением при стабилизации пламени ребром и уступом. Получены данные о тепловом пограничном слое, о скорости срыва пламени и скорости испарения этанола в воздушный поток с турбулентностью до 26 %. Показано, что температура во внешней области пограничного слоя и скорость срыва пламени за ребром выше, чем за уступом. При обоих способах стабилизации пламени интенсивность испарения соответствует переходному режиму массообмена.

Ключевые слова: пограничный слой, массоперенос, горение, срыв пламени, ребро, уступ.

ВВЕДЕНИЕ

Для управления процессами переноса в пристенных газовых потоках широко используются различные типы турбулизаторов, в числе которых ребро и обратный уступ. Такие же преграды применяются для стабилизации пламени с целью предотвращения срыва горения, для интенсификации тепло- и массообмена в энергетическом оборудовании. Систематические экспериментальные данные о характеристиках подобных устройств при отсутствии горения представлены в большом количестве исследований [1–3]. Из обзоров [4–7] следует, что за преградой возникает область возвратных токов, определяющая параметры течения в пограничном слое. Ниже по потоку на расстоянии примерно $7 \div 10$ высот преграды расположена область присоединения, которая характеризуется высокой турбулентностью и интенсивностью процессов переноса. В обзоре [8] были проанализированы наибольшие уровни коэффициентов переноса в зоне присоединения, реализованные в экспериментах с отрывными течениями (за ребром, за уступом и т. д.). Наличие зоны отрыва вызывает целый ряд новых эффектов, в числе которых расслоение опытных данных по тепло- и массообмену [9], формирование крупномасштабных структур, возникновение нескольких областей присоединения. В [10] эти эффекты рассматривались вместе с другими случаями криволинейного дви-

жения газа (вихри Тейлора — Гёртлера, взаимодействие импактной струи с преградой и т. д.).

При обтекании преграды происходит интенсивное вращение газа и возбуждается соответствующий ему момент количества движения. Начальное вращение и последующее взаимодействие поперечного вихря с пограничным слоем исследовались численными методами в работе [11]. Отмечено нарушение аналогии процессов переноса. Толщина пограничного слоя, коэффициенты трения и теплообмена изменяются немонотонно по длине канала. Результаты исследований, полученные с применением вычислительных технологий, качественно близки к данным экспериментов в дозвуковых потоках. В [12] установлено, что непосредственно вниз по течению от уступа происходит «сворачивание» оторвавшегося слоя смешения и формирование так называемых квазидвумерных «валов» Кельвина — Гельмгольца. Затем в процессе конвекции этих валов вниз по потоку происходит их «спаривание» и образование интенсивных продольных вихрей, после чего течение довольно быстро приобретает трехмерную хаотичную структуру. В сверхзвуковом потоке продольные вихри устойчивы и регистрируются на большом удалении от преграды. Их продольный размер сопоставим с габаритами исследуемого объекта [13].

При горении используются различные преграды для стабилизации пламени, в том числе ребро и уступ [14]. В плоском пограничном слое в зоне рециркуляции, образующейся за ребром при скорости воздуха $1 \div 4$ м/с, преграда отда-

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта СО РАН № 24, а также при финансовой поддержке фонда Президента РФ (НШ-4349.2010.8).

© Бояршинов Б. Ф., Фёдоров С. Ю., 2013.

ляет пламя от стенки и уменьшает тепловые потоки. Коэффициенты теплообмена в пограничном слое за ребром при горении и без горения подобны друг другу. В работе [15], в которой рассматривался осесимметричный аналог ребра (диск) и уступа («тюльпан»), показано, что кроме геометрических параметров затупленного тела (стабилизатора пламени) имеют значение его конфигурация и скорость газа. В первом варианте (диск) срыв пламени происходил раньше, чем во втором. В работе [16] отмечалось наличие когерентных вихревых структур за уступом. Влияние турбулентности набегающего дозвукового потока и высоты ребра на тепло- и массообмен исследовалось в работе [17]. Сравнивались данные для испарения с горением и без горения. Показано, что при турбулентности потока на входе в канал $\approx 1\%$ скорость срыва пламени за ребром высотой $h = 3$ мм может достигать 70 м/с; она снижается с увеличением турбулентности набегающего потока и возрастает с ростом высоты ребра. Диапазон, в котором изменяются коэффициенты массопереноса при горении за преградой, практически вдвое шире, чем в отсутствие горения.

Работы, направленные на прямое сопоставление данных по массообмену при горении за ребром и за уступом в плоском канале, авторам не известны. Отсутствуют исследования, где в одних и тех же условиях сравнивались бы возможности стабилизации пламени с помощью ребра и уступа. Цель работы — изучить наиболее общие закономерности тепло- и массообмена при горении за уступом, сравнить структуру теплового пограничного слоя за уступом и за ребром, сопоставить скорости срыва пламени при разной высоте уступа и разной турбулентности воздушного потока.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Установка представляет собой аэродинамическую трубу [17] длиной 700 мм с рабочим участком прямоугольного сечения 100×100 мм. Для управления турбулентностью на входе в конфузур устанавливалась либо решетка с 25 резбовыми отверстиями $M27 \times 1.5$ (межцентровое расстояние 43 мм), либо проволочная сетка с ячейками 1×1 мм. Степень турбулентности ($Tu_0 = 8, 18, 26\%$) задавалась количеством открытых отверстий в решетке (соответственно 25, 9 или 5); в опытах с сеткой $Tu_0 = 1\%$.

Нижняя поверхность конфузур была покрыта второй стенкой, которая повторяла ее контур и могла отклоняться от него. При входе в канал подвижная стенка имела поперечный участок, вместе с которым образовывала уступ переменной высоты $0 \div 7$ мм. Верхняя крышка канала отсутствовала, чтобы исключить продольный градиент давления. Боковые стенки прозрачные, составлены из набора кварцевых пластин. Нижняя поверхность на ширине 80 мм образована шестью пластинами, изготовленными из пористой нержавеющей стали. Продольный размер пластины, непосредственно примыкающей к уступу, составлял 40 мм, остальные пять пластин имели размеры в плане 80×80 мм. Система подачи горючего обеспечивала постоянный уровень этанола в пористых пластинах, которые благодаря действию капиллярных сил оставались влажными в течение эксперимента. Скорость испарения этанола (j_w , кг/($m^2 \cdot c$)) с каждого элемента нижней стенки самоустанавливалась в соответствии с условиями тепло- и массообмена с зоной горения, ее определяли по изменению объема в мерных сосудах с точностью 5%. При горении профили температуры измерялись термопарой из платино-платинородиевой проволоки диаметром 50 мкм, которая была сварена встык и растянута между двумя кварцевыми капиллярами. Показания термопары корректировались с целью компенсации радиационных потерь зонда. По нашим оценкам максимальная погрешность измерения средней температуры составляла $\approx 5\%$. Температура набегающего потока $\approx 290 \pm 2$ К, температура испаряющейся поверхности этанола ≈ 341 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 показаны профили температуры на разном удалении от преграды при скорости обтекания $u_0 = 10$ м/с, $Tu_0 = 1\%$. Видно, что толщина теплового пограничного слоя за ребром и уступом отличается несущественно и увеличивается вниз по потоку. На расстоянии 160 мм от входа в канал (квадраты) во внешней области пограничного слоя ($y = 12 \div 15$ мм) температура газа за ребром выше, чем за уступом, на $300 \div 500$ К. На удалении 320 мм расхождение в профилях температуры практически исчезает.

Уровень температуры газового потока определяет скорость химического реагирования, поэтому особенности структуры теплово-

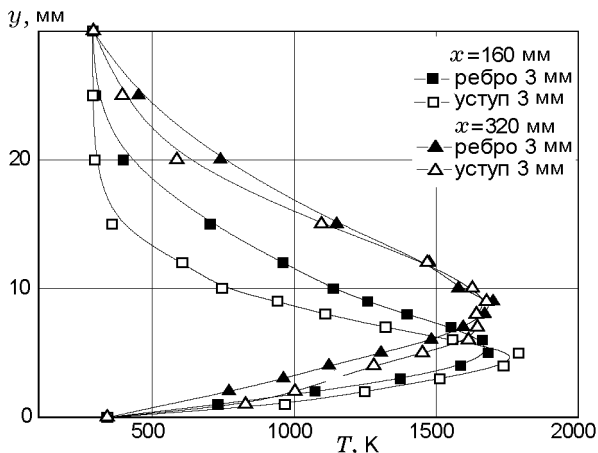


Рис. 1. Профили температуры в пограничном слое с горением за уступом и ребром при различном удалении от преграды

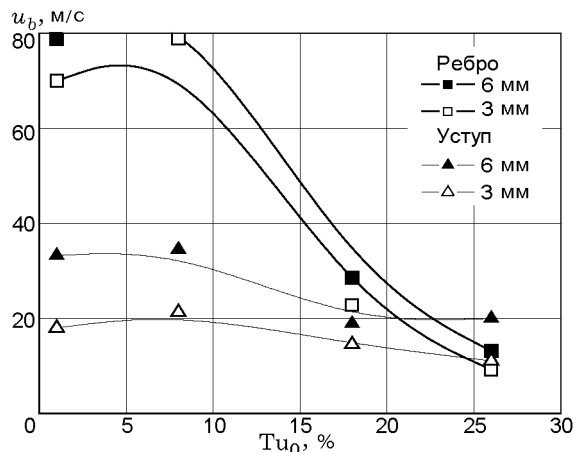


Рис. 3. Скорость срыва пламени за ребром и уступом

го пограничного слоя влияют на предельную скорость газа, при которой происходит прекращение горения и срыв пламени. При высоте уступа $h > 3$ мм передняя кромка пламени представляет собой «огненный валик», отсоединенный от кромки преграды на расстояние $5 \div 15$ мм (рис. 2, а). При увеличении скорости обтекания область пламени за «валиком» становится все более тонкой, в ней появляются и начинают развиваться разрывы. Скорости, при которых развиваются разрывы пламени, субъективно (с погрешностью $\approx 1 \div 2$ м/с) принимались как скорости срыва горения. При превышении скорости срыва пламя разрывается и происходит «обращение зоны горения» (рис. 2, б), при котором горение остается только за преградой, где его не было при скоростях, меньших скорости срыва, и исчезает там, где оно существовало до срыва.

Скорость срыва пламени зависит от высоты уступа и степени турбулентности набегающего воздушного потока. На рис. 3 представлены данные о скорости срыва пламени за ребром и за уступом, значительно отличающиеся для этих способов стабилизации горения. При интенсивности внешней турбулентности не выше 20 % устойчивость горения за ребром выше, чем за уступом. Для двух типов стабилизаторов зависимость скорости срыва пламени от уровня турбулентности разная: за уступом она слабее по сравнению с горением за ребром. В теоретической работе [18] описан процесс срыва пламени, при котором его передняя кромка смещается вниз по потоку по мере возрастания скорости обтекания. По нашим данным такая картина срыва пламени нестационарная, она наблюдалась в опытах при $Tu_0 = 26$ %.

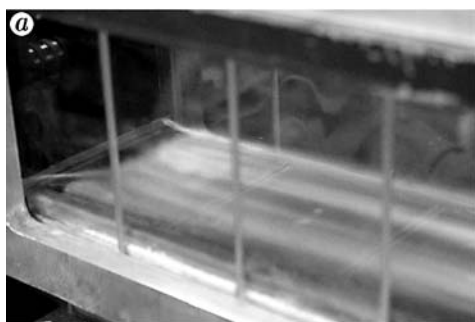


Рис. 2. Внешний вид пламени в пограничном слое с горением этанола за уступом высотой 4 мм: а — скорость обтекания (20 м/с) меньше скорости срыва пламени, б — после срыва пламени (25 м/с)

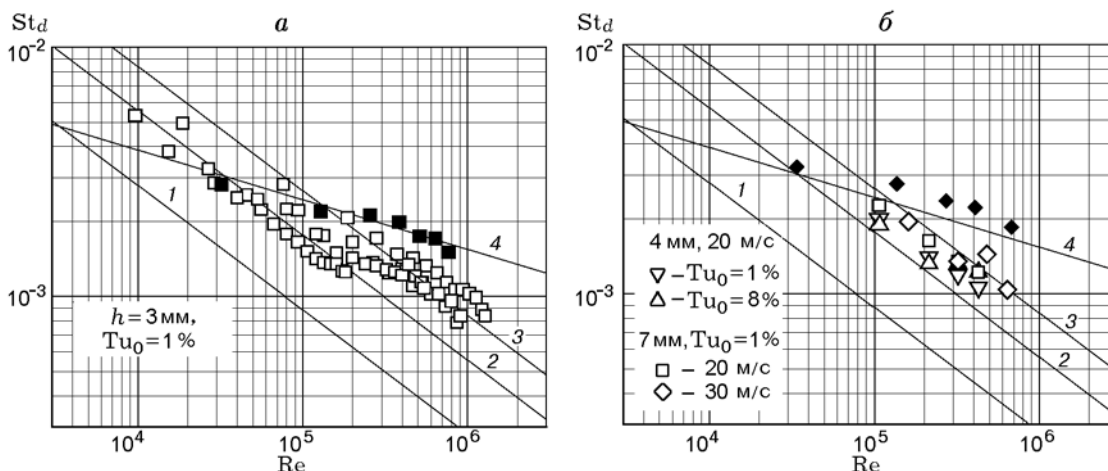


Рис. 4. Массоперенос за ребром (а) и уступом (б) при наличии (светлые символы) и отсутствии горения (темные символы)

Различие в устойчивости горения сравнительно слабо влияет на процессы переноса тепла и вещества за ребром и за уступом. Отличие коэффициентов массопереноса для этих способов стабилизации пламени не превышает 30 %. На рис. 4 приведены данные по массообмену в пограничном слое без продольного градиента давления на пластине, полученные в экспериментах с ребром и уступом. При наличии и отсутствии горения на испаряющейся поверхности диффузионные числа Стантона определялись по соотношению $St_d = j_w / (\rho_0 u_0 C_w)$. Концентрация этанола на стенке устанавливалась из условия насыщения по измерениям температуры поверхности испаряющейся пленки жидкости. В опытах без горения массовая доля этанола $C_w = 0.03$, в случае горения $C_w = 0.8$. Данные для первой и последней пластин не рассматривались, чтобы исключить проявление концевых эффектов. Эксперименты без горения за преградами проводились при скорости на входе в канал $u_0 = 24$ м/с ($Tu_0 = 1\%$). На рис. 4,а представлены опытные данные для ребра высотой 3 мм, полученные во всей области существования пограничного слоя с горением при увеличении скорости воздуха до 68 м/с ($Tu_0 = 1\%$), которая близка к срыву пламени. Данные на рис. 4,б относятся к горению за уступом высотой $h = 4$ мм при $u_0 = 20$ м/с, $Tu_0 = 1$ и 8 %. Результаты для уступа высотой $h = 7$ мм ($Tu_0 = 1\%$) получены при скорости воздуха 20 и 30 м/с.

Видно, что в опытах без горения данные по массообмену группируются около линии 4,

которая соответствует расчету для турбулентного течения с $St_d = 0.029 Re^{-0.2} Sc^{-0.6}$ (здесь Sc — число Шмидта). Все данные, относящиеся к пограничному слою с горением, располагаются в промежуточной области между закономерностями для турбулентного и ламинарного потоков (линия 1: $St_d = 0.332 Re^{-0.5} Sc^{-0.66}$). Линии 2 и 3 соответствуют коэффициентам переноса, отличающимся от ламинарного массообмена в 2 и 3 раза. Таким образом, в пограничном слое при появлении горения характер массообмена необратимо изменяется: независимо от типа преграды турбулентный перенос становится переходным и остается таковым вплоть до срыва пламени при $Re > 10^6$.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены два основных способа стабилизации пламени — ребром и уступом. Показано, что они отличаются по способности обеспечивать устойчивость горения за преградой, но сходны по характеру тепло- и массообмена. Если интенсивность внешней турбулентности не превосходит 20 %, то диапазон скоростей, при которых существует горение в пограничном слое, за ребром шире, чем за уступом. При появлении горения в пограничном слое характер массообмена изменяется: независимо от типа преграды турбулентный перенос становится переходным и остается таковым вплоть до срыва пламени. Авторы признательны академику РАН Э. П. Волчкову за постановку задачи и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F.** Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 2003. — V. 46. — P. 4535–4551.
2. **Ота К.** Теплообмен в областях отрыва и присоединения течения при осесимметричном обтекании затупленного кругового цилиндра // Теплопередача. — 1977. — Т. 99, № 1. — С. 158–160.
3. **Дыбан Е. П., Эпик Э. Я., Юшина Л. Е.** Теплообмен на продольно обтекаемой пластине при наличии отрыва и турбулизации внешнего потока // Пром. теплотехника. — 1995. — Т. 17, № 1–3. — С. 3–12.
4. **Адамс Э. В., Джонстон Дж. П.** Структура течения в пристеночной зоне турбулентного отрывного течения // Аэрокосм. техника. — 1989. — № 5. — С. 3–13.
5. **Итон Дж. К., Джонстон Дж. П.** Обзор исследований дозвуковых присоединяющихся течений // Ракет. техника и космонавтика. — 1981. — Т. 19, № 10. — С. 7–19.
6. **Castro I. P., Haque A.** The structure of a turbulent shear layer bounding a separation region // J. Fluid Mech. — 1987. — V. 179. — P. 439–468.
7. **Castro I. P., Haque A.** The structure of shear layer bounding a separation region. Part 2. Effects of free-stream turbulence // J. Fluid Mech. — 1988. — V. 192. — P. 577–595.
8. **Ota T., Nishiyama H.** A correlation of maximum turbulent heat transfer coefficient in reattachment flow region // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 1987. — V. 30, N 6. — P. 1193–1199.
9. **Бояршинов Б. Ф.** К анализу опытных данных по тепло- и массообмену в пограничном слое // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 2. — С. 73–81.
10. **Бояршинов Б. Ф.** Пограничный слой с крупномасштабными структурами, с испарением и горением: дисс. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2007.
11. **Escriva X., Giovannini A.** Analysis of convective momentum and wall heat transfer: application to vortex boundary layer interaction // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 2003. — V. 46. — P. 2471–2483.
12. **Стрелец М. Х., Травин А. К., Шур М. Л.** Применение метода моделирования отсоединенных вихрей для расчета гидродинамики и теплообмена в отрывных турбулентных потоках // Тр. Третьей Российской нац. конф. по теплообмену. Т. 2: Вынужденная конвекция однофазной жидкости. — М.: МЭИ, 2002. — С. 273–276.
13. **Shulein E., Trofimov V. M.** Steady longitudinal vortices in supersonic turbulent separated flows // J. Fluid Mech. — 2011. — V. 672. — P. 451–476.
14. **Raghuandan B. N., Yogesh G. P.** Recirculating flow over a burning surface – flame structure and heat transfer augmentation // Twenty-Second Symp. (Intern.) on Combustion. — The Combustion Inst., 1988. — P. 1501–1507.
15. **Esquiva-Dano I., Nguyen H. T., Esqudie D.** Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of non-premixed flames // Combust. Flame. — 2001. — V. 127. — P. 2167–2180.
16. **Coats C. M., Richardson A. P.** Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers. Pt 1: Flame characteristics // Combust. Flame. — 2000. — V. 122. — P. 253–270.
17. **Бояршинов Б. Ф.** Некоторые особенности тепло- и массопереноса при обтекании поверхности воздушным потоком // ПМТФ. — 2000. — Т. 41, № 4. — С. 124–130.
18. **Ярин А. Л.** О срыве пламени горячей жидкости воздушным потоком // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 1. — С. 3–12.

*Поступила в редакцию 7/VII 2012 г.,
в окончательном варианте — 12/II 2013 г.*