

УДК 536.46

Влияние препятствия на структуру течения и массообмен в пограничном слое с горением этанола на горизонтальной поверхности*

Б.Ф. Бояршинов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: boyar@itp.nsc.ru

В экспериментах с горением этанола на горизонтальных поверхностях показаны наиболее общие свойства пограничного слоя с химическими и фазовыми превращениями. В их числе возникновение крупномасштабных структур и проявление объемных сил, влияющих на устойчивость течения и на тепломассоперенос. Показано, что диапазон скоростей, при которых существует горение в пограничном слое за ребром, шире, чем за уступом. Характер массообмена в потоке с горением за преградой становится переходным и остается таковым вплоть до срыва пламени. Над горизонтальной стенкой при числах Рейнольдса $Re < 5 \cdot 10^4$ интенсивность переноса вещества практически вдвое выше, чем в случае горения под стенкой. При переходе к горению под стенкой градиенты температуры на поверхности возрастают.

Ключевые слова: тепло- и массообмен, пограничный слой, горение, крупномасштабные структуры, срыв пламени, объемные силы, переходный режим.

Введение

Воздействие на перемешивание газа играет решающую роль в управлении тепло- и массообменом вблизи поверхности. Это достигается изменением уровня массовых и объемных сил, степени турбулентности воздуха, созданием областей с отрывом и возвратным течением, с продольным градиентом давления. При горении газа перемешивание и химическое реагирование связаны между собой, поэтому важно знать пределы, в которых оба процесса остаются устойчивыми к внешним газодинамическим возмущениям. Установка препятствий обеспечивает прямое влияние на структуру пограничного слоя, от которой зависит скорость срыва пламени. Действие преграды на тепломассообмен в нереагирующем пограничном слое и при горении имеет сходства и различия.

Из работ [1–4] следует, что при отсутствии горения за преградой возникает область возвратных течений. Ниже по потоку расположена область присоединения, которая характеризуется высокой турбулентностью и интенсивностью процессов переноса. В работе [5] была получена эмпирическая зависимость для наибольшего уровня коэффициентов переноса в области присоединения. По данным [6, 7] на стенке может

* Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Президента РФ (грант НШ-4349.2010.8) и в рамках интеграционного проекта СО РАН (№ 24).

существовать несколько таких областей. Авторы работы [8] отмечают, что восстановление пограничного слоя к турбулентному состоянию после отрыва происходит чрезвычайно медленно.

В ряде случаев, когда в результате взаимодействия газа со стенкой происходит искривление линий тока, отмечаются различные проявления массовых сил. Количественные измерения в осесимметричных сверхзвуковых струях, проведенные в работе [9], указывают на существование стационарной азимутальной неравномерности в распределении газодинамических параметров. Она идентифицируется с продольными вихрями. В опытах [10] при сравнительно малых скоростях воздуха (5 м/с) наблюдались продольные неоднородности на внешней границе струи, истекающей из сужающегося сопла с профилем Витошинского. С уменьшением кривизны линий тока, которое достигалось присоединением к соплу цилиндрического участка, продольные структуры на выходе из канала не регистрировались. Из данных по визуализации поперечных сечений следа в опытах [11] следует связь продольных структур с вихрями противоположного вращения. Вихри парные, они взаимодействуют между собой, свиваясь и объединяясь. Авторы работы [12] полагали, что рост продольных вихрей обусловлен их взаимодействием с мелкомасштабной турбулентностью в окружающем пространстве. В работе [13] на основании корреляционных измерений пульсаций концентрации водорода в струе, истекающей в воздух, также сделан вывод о возрастании доли крупномасштабных пульсаций при удалении от сопла.

В работе [14] искривление линий тока связано с обтеканием тупого двугранного угла сверхзвуковым потоком газа. В пограничном слое наблюдались продольные вихри, размер которых сопоставим с габаритами исследуемого объекта. Состояние исследований крупномасштабных структур при дозвуковом обтекании изотермическим воздушным потоком пониженной турбулентности ($Tu_0 < 0,1\%$) представлено в работе [15]. Исследовалась устойчивость пограничного слоя на плоских и на криволинейных поверхностях. Продольные структуры рассматривались, как промежуточные образования при переходе от ламинарного течения к турбулентному.

Для обоснования необходимости изучения подобных течений важно знать количественный результат их воздействия на процессы переноса. В работе [16] отмечается, что продольные структуры вызывают интенсивное вовлечение жидкости в газовый поток. Вдали от сопла этот процесс значительно превосходит вовлечение жидкости когерентными структурами. Эти эффекты рассматривались вместе с другими случаями криволинейного движения газа в работе [17]. Было показано, что в пограничном слое на вогнутой поверхности, когда формируются вихри Тейлора–Гертлера, интенсивность переноса тепла практически удваивается. На связь между кривизной линий тока и проявлением подъемных сил в стратифицированной жидкости указано в работе [18]. Принимая аналогию процессов переноса импульса и циркуляции в криволинейном течении, а также гипотезу о пути перемешивания, в работе [19] было получено распределение касательных напряжений и тепловых потоков в пограничном слое. Показано, что на вогнутой стенке теплообмен и трение могут возрасти в 1,4–1,8 раза, а на выпуклой поверхности могут снизиться на 30–40 % в зависимости от степени неизотермичности.

Известны публикации [20, 21], посвященные смешанной конвекции на нагретой горизонтальной пластине при отсутствии горения. Их авторы получили данные для определения условий проявления объемных сил, связанных с эффектами плавучести. Из работы [22] следует, что в горизонтальном пограничном слое при неустойчивой стратификации по плотности теплоотдача возрастает. В работе [23] рассматривались два случая: теплообмен «на потолке» и «на полу». Авторы полагают, что в пограничном слое появляется продольный градиент давления, который может привести к существенной деформации профилей скорости и к отрыву потока над нагретой стенкой.

При горении возникает необходимость обеспечить устойчивость пламени при сильной стратификации газа по плотности, когда в поле силы тяжести появляется плавучесть. В работе [24] стабилизатор пламени отсутствовал. Показано, что при увеличении скорости воздуха передняя кромка пламени смещается вниз по потоку. Когда необходимо стабилизировать горение, используются такие же преграды, как в потоках без горения, т.е. ребро и уступ [25], действие которых вызывает вращение газа и формирование поля массовых сил. Для плоского пограничного слоя за ребром было установлено, что преграда приподнимает пламя над горизонтальной стенкой, тепловые потоки уменьшаются, а коэффициенты теплообмена при горении и без горения остаются подобными друг другу. Сравнений с другими способами стабилизации пламени не проводилось. В работе [26] рассматривалось горение круглой восходящей струи природного газа в воздухе, когда пламя стабилизировалось либо диском (осесимметричный аналог ребра), либо уступом. Показано, что кроме геометрических параметров стабилизатора пламени имеет значение его конфигурация и скорость газа. В первом варианте (диск) срыв пламени происходил раньше, чем во втором. В работе [27] уступ способствовал стабилизации горения. Отмечалось появление когерентных вихревых структур за преградой. Когда пламя присоединялось к уступу, структуры не наблюдались. Авторы полагали, что устойчивость горения в большей степени зависит от эффективности перемешивания, чем от кинетики химического реагирования. Опыты [28] выполнены для пламени, которое стабилизировалось уступом или прямоугольным параллелепипедом. Наблюдения проведены при вдуве метана сквозь пористую стенку в горизонтальном канале высотой 250 мм и шириной 30 мм. В таком узком канале продольные структуры не наблюдались, а необратимый срыв пламени происходил при скорости воздуха $\sim 2,5\text{--}3$ м/с. Такого же порядка скорость срыва отмечалась в работе [29], в которой были получены данные для горения образца диаметром 20 мм.

Влияние турбулентности набегающего потока и высоты ребра на теплообмен в пограничном слое над горизонтальной стенкой при дозвуковом ее обтекании исследовалось в работе [30]. Сравнились данные для случаев испарения с горением и без горения. Выявлено, что если турбулентность потока на входе в канал составляет $\sim 1\%$, то скорость срыва пламени U_b 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 при отсутствии горения. Обнаружено расслоение опытных данных по массопереносу [7, 31]. Для чисел Рейнольдса $Re < 2 \cdot 10^6$ это расслоение относительных потоков вещества на стенке $\overline{J_w} = J_w / \rho_0 U_0$ обобщено семейством степенных зависимостей $\overline{J_w} \approx \psi \cdot Re^{-0,5}$, где множитель $\psi = 1, 2, 3, \dots$, а показатель степени характерен для ламинарного пограничного слоя. Авторы работы [32] провели измерения в пограничном слое под верхней горизонтальной стенкой канала при вдуве через нее и горении смеси водорода и азота. Показано выполнение «тройной» аналогии Рейнольдса в потоке с химическими превращениями. Очевидно, чтобы выявить вклад плавучести, было бы интересно для одних и тех же режимов сопоставить данные по теплообмену для горения под верхней и над нижней стенкой.

Многообразие ситуаций, в которых наблюдались крупномасштабные структуры, неоднозначность их влияния на устойчивость горения и процессы переноса дают основание для продолжения исследования причин возникновения этих газодинамических неоднородностей. В их числе могут быть различные проявления объемных и массовых сил как следствие искривления линий тока или изменения плотности газа. В настоящей работе рассматриваются только некоторые стороны проблемы смешанной конвекции при горении на горизонтальных стенках канала, когда возникает стратификация по плотности и вращение газа за преградой. Цель — получить наиболее общие эмпирические

данные по влиянию объемных сил на структуру течения, на его устойчивость и на процессы переноса; показать, что вращательное движение, как причина проявления массовых сил на плоской стенке, сохраняется на удалении от преграды.

Экспериментальное оборудование

Горение вблизи плоской поверхности жидкого топлива исследовалось в аэродинамической трубе [30, 33] с рабочим участком прямоугольного сечения 100×100 мм длиной 700 мм (рис. 1). Прозрачные боковые стенки составлены из набора кварцевых пластин. Рабочий участок непосредственно состыкован с конфузуром, степень поджатия 6,8. Для управления турбулентностью на входе в конфузур устанавливались либо решетка с 25 резьбовыми отверстиями ($M 27 \times 1,5$, межцентровое расстояние равно 43 мм), либо проволочная сетка с ячейками 1×1 мм. Степень турбулентности на входе в канал ($Tu_0 = 8, 18, 26\%$) задавалась количеством открытых отверстий в решетке (соответственно 25, 9 или 5). В опытах с сеткой уровень турбулентности составлял $Tu_0 = 1\%$.

Рабочий участок адаптировался к конкретному эксперименту. При изучении тепло-массообмена его горизонтальные поверхности были образованы пористыми пластинами с размерами 80×80 мм (толщиной 10–15 мм, пористостью ~60%), изготовленными спеканием шариков из нержавеющей стали. Количество пластин изменялось от четырех до семи, они размещались либо на верхней поверхности, т. е. «на потолке», либо «на полу» прямоугольного канала. В опытах с лазерным доплеровским анемометром (ЛДА), когда воздушный поток содержал частицы кварцевого порошка, пористые пластины «на полу» заменялись кюветами с возобновляемой засыпкой из стеклянных шариков диаметром $(0,7 \pm 0,15)$ мм.

Когда пламя стабилизировалось обратным уступом, поверхность конфузора была покрыта второй стенкой, которая повторяла контур поверхности конфузора и могла отклоняться от него. При входе в канал подвижная стенка имела поперечный участок, вместе с которым образовывала уступ переменной высоты $h < 7$ мм. При проведении опытов с горением за ребром в начальном сечении канала перпендикулярно стенке устанавливалась пластина по всей его ширине. Кромка пластины возвышалась над стенкой на высоту $h < 15$ мм.

В опытах без ускорения, когда нет продольного градиента статического давления ($dP/dx = 0$), верхняя крышка канала отсутствовала. В опытах с ускорением необходимый закон изменения скорости по длине канала задавался установкой гибкой верхней стенки (длина 400 мм).

В качестве горючего использовался этанол (водный раствор 96 % по объему). Система его подачи обеспечивала постоянный уровень жидкости в пористых пластинах (или в засыпке), которые оставались влажными в течение эксперимента. Скорость выгорания этанола с каждой пластины J_W (кг/с/м^2) самоустанавливалась в соответствии с условиями

конвективного теплообмена с зоной горения. Расход горючего измерялся для каждой пористой пластины по изменению уровня этанола в мерных сосудах. Погрешность измерений

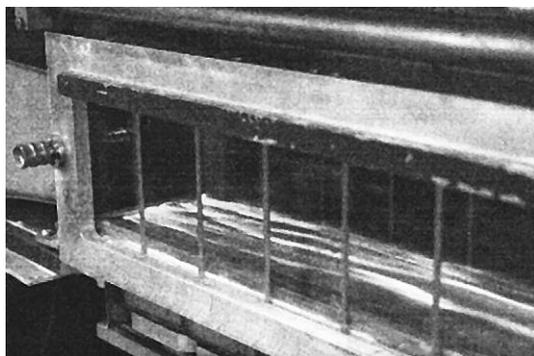


Рис. 1. Пограничный слой с испарением и горением этанола «на полу» за преградой. Высота ребра 3 мм, воздушный поток 10 м/с слева направо, верхняя крышка канала отсутствует. Камера Canon EOS 1000D, экспозиция 1/400 с. Видны продольные неоднородности, размер которых сопоставим с длиной канала.

составляла $\sim 5\%$. На поверхности пластины, обращенной к газовому потоку, были приварены хромель-алюмелевые термопары. Точность задания граничных условий на стенке ($T_w = \text{const}$, $C_w = \text{const}$) обеспечивалась тем, что процесс испарения и горения был практически адиабатическим. Температура испаряющейся пленки оставалась постоянной — $T_w \sim 340,5 \pm 0,5$ К — вне зависимости от скорости воздуха на входе в канал U_0 (она не зависит от его турбулентности Tu_0 , высоты преграды h и от удаления от нее x , если $U_0 > 10$ м/с [34]). Массовая доля горючего на стенке, исходя из кривой насыщения, принималась равной $C_w = 0,8$.

Температура в пограничном слое измерялась платино-платинородиевой термопарой из проволоки диаметром 50 микрон. Для локальных измерений скорости применялся лазерный доплеровский анемометр. Его оптическая часть на базе ЛАДО-2 [35] обеспечивала измерения двух компонент скорости с пространственным разрешением $0,1 \times 0,1 \times 0,5$ мм. Она размещалась над рабочим участком на платформе с диапазоном перемещений в продольном направлении $\Delta x = 500$ мм, в вертикальном — $\Delta y = 50$ мм, в трансверсальном — $\Delta z = 50$ мм. Погрешность измерений средней скорости не превышала 2%. В качестве рассеивающих центров использовались частицы кварцевого порошка (среднемодальный размер ~ 1 микрон), которые вводились в проточную часть аэродинамической трубы во входном сечении конфузора.

Результаты экспериментов

На рис. 2 показаны фотографии пограничного слоя «на потолке» при скорости воздуха, которая снижена до 3,5 м/с, когда можно сравнить разные способы стабилизации горения (воздушный поток слева направо, нижняя стенка канала отсутствует, камера Canon A490). Без стабилизации (верхний снимок) передняя кромка пламени смещена вниз по потоку от передней кромки пористой пластины (светлая полоса слева). С увеличением скорости $U_0 > 4$ м/с горение прекращается. При установке уступа передняя кромка пламени присоединяется к преграде (не отображено) и удерживается вблизи нее вплоть до срыва пламени. За ребром высотой 3 мм (нижний снимок) пламя «отсоединено» от преграды, за которой видны продольные полосы. Расстояние между полосами составляет ~ 25 мм.

Подобные опыты показывают необходимость стабилизации, а также существование характерного поперечного масштаба продольных структур. Этот размер не был обеспечен в известных опытах [28] и продольные структуры не проявились. При экспериментальном исследовании крупномасштабных структур важно показать, что каждая из них представляет собой отдельный элемент течения, имеющий собственное распределение температуры и скорости, что они входят в состав общего потока газа и взаимодействуют с соседними такими же структурами.

Если цветовые неоднородности в пламени (рис. 1) визуализируют газодинамические особенности реагирующего потока, становится очевидным преобладание продольных структур, масштаб которых сопоставим с длиной

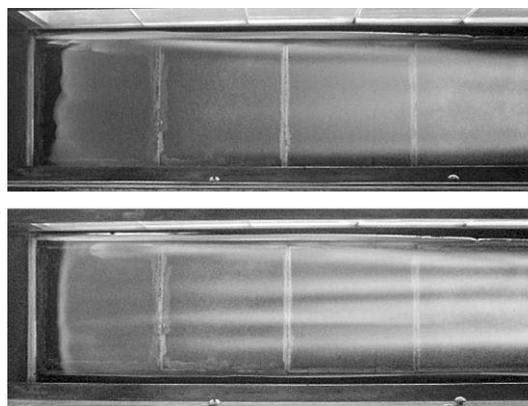


Рис. 2. Внешний вид пламени при горении «на потолке».

Вид снизу вверх, воздушный поток направлен слева направо. Светлая полоса слева — место установки стабилизатора. На верхнем снимке нет стабилизатора, на нижнем снимке пламя стабилизировано с помощью ребра высотой 3 мм.

канала. Они подвижны в трансверсальном направлении, перекрещиваются, свиваются и взаимодействуют между собой. Вниз по потоку их число уменьшается, а размер увеличивается. Для пограничного слоя за преградой важно показать наличие пространственной связи между газодинамическими и тепловыми параметрами в пределах отдельной неоднородности течения.

Используемая аппаратура не позволяет проследить динамику развития нестационарных структур, поэтому условия эксперимента приспособлялись к возможностям измерительной техники. Для горения «на полу» распределение неоднородностей становится таким же контрастным, как на рис. 2 (снизу), если канал сужающийся. Измерения в плоскости $y-z$ были проведены в выходном сечении на расстоянии от преграды $x = 400$ мм (скорость на входе $U_0 = 4,9$ м/с, на выходе — $U_0 = 9,3$ м/с, ребро $h = 3$ мм, высота канала на входе составляла 98 мм, на выходе — 49 мм, верхняя стенка канала — плоская). Были получены профили температуры $T(y, z)$, выполнены прямые ЛДА-измерения поперечной скорости $V(y, z)$ с шагом в трансверсальном направлении $\Delta z = 5$ мм. На рис. 3 (вверху) показаны данные для $y = 8$ мм ($V = 0$, т. е. начало отсчета, выбрано произвольно). Неоднородности в профиле $V(z)$ свидетельствуют о наличии чередующихся областей с вращением газа, угловая скорость составила порядка $\omega \sim \Delta V / \Delta z \sim 40$ (с^{-1}). На рис. 3 (внизу) показаны изотермы в этом же сечении. Видно, что расположение областей с особенностями в распределении температуры и скорости совпадает между собой.

Таким образом, цветовые неоднородности в пограничном слое с горением за преградой соответствуют продольным вихрям с противоположным направлением вращения. Особенности в распределении температуры находятся там же, где проявились особенности в профилях поперечной скорости. Продольная скорость $U(z)$ остается практически постоянной в рассматриваемом фрагменте течения при $y = \text{const}$). Данные на рис. 3 показывают, что каждый из вихрей имеет собственное распределение скорости, температуры и момента количества движения. Очевидно, что подобные свойства течения могут повлиять на общие характеристики потока (устойчивость, тепломассообмен).

Уже отмечалось, что передняя кромка пламени стабилизируемого уступом, «присоединена» к преграде вплоть до срыва пламени. Этого не происходит при стабилизации ребром, когда между преградой и пламенем сохраняется участок без горения. Кромка пламени образует огненный валик, который отстоит от ребра на 5–15 мм. Это обстоятельство, отражающее особенности течения за преградой, существенно влияет на структуру пограничного слоя и на устойчивость горения.

При увеличении скорости обтекания область пламени за ребром и за уступом на уда-

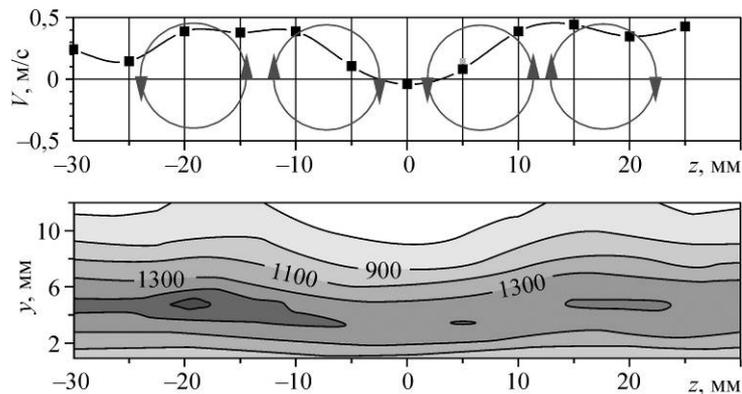


Рис. 3. Изменение параметров газа в выходном сечении сужающегося канала.

Вверху — профиль поперечной скорости над пористыми пластинами $y = 8$ мм (нулевое значение скорости V выбрано произвольно, окружностями обозначены области с внутренним вращением), внизу показаны изотермы в плоскости $y-z$.

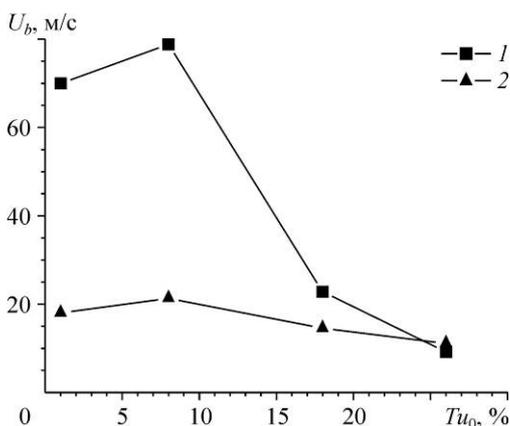
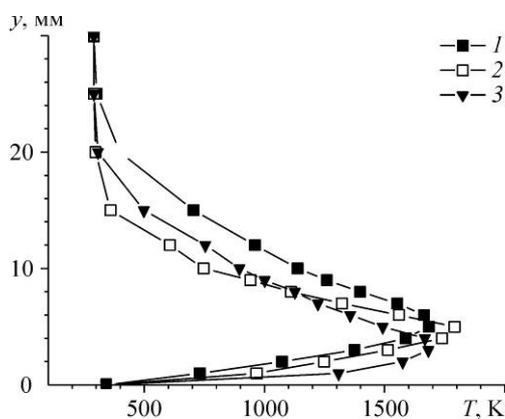
Рис. 4. Скорость срыва пламени за преградой высотой 3 мм.
1 — ребро, 2 — уступ.

лении $\sim (25-30) \cdot h$ становится все более тонкой, в ней появляются разрывы. Уровень скоростей, когда начинают развиваться разрывы пламени, субъективно (с погрешностью $\sim 1-2$ м/с) принимался как скорость срыва пламени U_b . Если $U_0 > U_b$, пламя разрывается и происходит «обращение зоны горения», при котором горение остается только за преградой, где его не было при $U_0 < U_b$, и исчезает там,

где оно существовало до срыва. Скорость срыва пламени зависит от высоты преграды и степени турбулентности набегающего воздушного потока. На рис. 4 представлены данные для пламени за ребром [30] и за уступом, видны значительные отличия для этих способов стабилизации горения. Если интенсивность внешней турбулентности не превосходит 20–25 %, то устойчивость горения за ребром (1) выше, чем за уступом. Для двух типов стабилизаторов зависимость скорости срыва пламени от уровня турбулентности разная: за уступом (2) она слабей по сравнению с горением за ребром.

Уровень температуры газового потока определяет скорость химического реагирования. Возможно, что особенности в структуре теплового пограничного слоя могут повлиять на предельную скорость газа, при которой происходит срыв пламени. На рис. 5 показаны профили температуры на удалении от преграды $x = 160$ мм для горения под верхней стенкой (3) и на нижней поверхности канала. Скорость обтекания $U_0 = 10$ м/с, $Ti_0 = 1$ %. Видно, что в этом сечении толщина теплового пограничного слоя и уровень температуры за ребром «на полу» становятся выше, чем в других случаях. Во внешней области пограничного слоя это превышение достигает 300–400 К. Из опытов с горением «на потолке» следует, что при изменении направления объемных сил градиенты температуры вблизи стенки существенно увеличиваются. Как отмеченные особенности повлияют на характер процессов переноса, на ламинарно-турбулентный переход?

На рис. 6 показаны относительные потоки вещества $\overline{J_W} = j_W / \rho_0 U_0$, полученные в опытах с горением этанола на горизонтальных стенках канала за ребром высотой 3 мм. Символьные обозначения 1, 2 — данные для горения «на потолке», символьные обозначения 3, 4 относятся к опытам для пограничного слоя с горением «на полу». Сплошными линиями показаны известные закономерности для пограничного слоя.



Линии 1 и 2: $\overline{J_W} = \psi \cdot 0,332 \cdot Re^{-0,5} Sc^{-0,6}$.

Здесь число Шмидта $Sc = 1,3$. Множитель $\psi = 1$ используется для «стандартного» ламинарного течения. Коэффициент $\psi = 2$ применялся в работах [7, 17] для описания переходных течений с искривленными линиями тока, с внутренним вращением, когда проявляются массовые

Рис. 5. Профили температуры в пограничном слое за преградами высотой 3 мм на горизонтальных стенках канала.

Горение «на полу»: 1 — за ребром, 2 — за уступом; горение «на потолке»: 3 — за ребром.

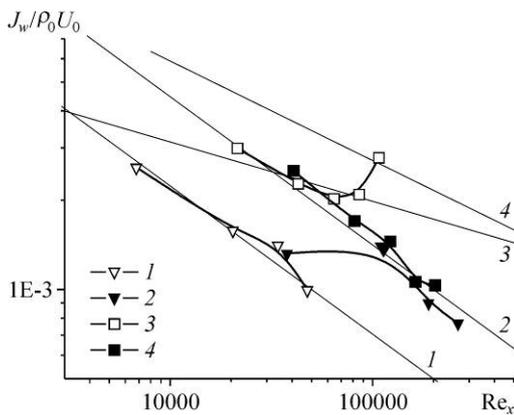


Рис. 6. Относительные потоки этанола в пограничном слое за ребром высотой 3 мм на горизонтальных стенках канала при изменении скорости воздуха.

Горение «на потолке»: 2,5 (1), 14,2 (2) м/с, горение «на полу»: 4,03 (3), 7,6 (4) м/с; 1 — ламинарно-пограничный слой, 2 — пограничный слой с крупномасштабными структурами [7], 3 — массообмен при турбулентном течении, 4 — массообмен в области присоединения [5].

силы. Линия 3 соответствует турбулентному массопереносу $\overline{J_w} = 0,029 \cdot \text{Re}^{-0,2} \text{Sc}^{-0,6} \cdot C_w$. Линией 4

представлены относительные потоки, полученные из обобщения [5] для области присоединения за преградой $\overline{J_w} = 0,104 \text{Re}^{-0,335} C_w$. Видно, что при горении «на потолке», когда скорость воздуха мала ($U_0 = 2,5$ м/с), характер массообмена близок к «стандартному» ламинарному процессу, массовые силы и смешанная конвекция не проявляются. При увеличении скорости ($U_0 = 14,2$ м/с) происходит переход к общей закономерности (линия 2), характерной для течений с внутренним вращением.

При горении «на полу» нагретый газ может всплывать под действием архимедовых сил и потоки вещества на стенке увеличиваются. Относительные потоки за преградой при скорости $U_0 = 4,03$ м/с близки к линии 2, а на удалении от преграды они заметно возрастают до уровня, характерного для отрывных течений (символьные обозначения 3 и линия 4). С увеличением скорости воздушного потока влияние подъемных сил на массоперенос ослабевает, возрастает вклад сил инерции и массовых сил. Массообмен при горении «на полу» (символы 4) и «на потолке» (символы 2) при $\text{Re} > 10^5$ подчиняется одному и тому же закону. Все опытные данные сближаются с линией 2, но при больших числах Рейнольдса они не выходят на линию 3, которая описывает турбулентный массоперенос. Из работы [17] следует, что в пограничном слое с горением этанола массоперенос не становится турбулентным даже при $\text{Re} \sim 2 \cdot 10^6$.

Выводы

В экспериментах с испарением и горением этанола на горизонтальных поверхностях получены данные о наиболее общих свойствах пограничного слоя с химическими и фазовыми превращениями. В их числе возникновение крупномасштабных структур и проявление объемных сил, которые влияют на устойчивость течения и на тепломассоперенос. Многие из особенностей объекта лишь обозначены и могут быть детально изучены в последующих исследованиях.

Показано, что диапазон скоростей, в котором существует горение в пограничном слое за ребром, шире, чем за уступом. Характер массообмена в потоке с горением за преградой становится переходным и остается таковым вплоть до срыва пламени. Впервые в экспериментах установлено влияние сил плавучести на массоперенос в пограничном слое с испарением и горением на горизонтальных поверхностях. Оно состоит в том, что при числе Рейнольдса $\text{Re} < 5 \cdot 10^4$ интенсивность переноса вещества при горении над стенкой практически вдвое выше, чем в случае горения под стенкой. При $\text{Re} > 10^5$ массообмен при горении «на полу» и «на потолке» подчиняется одному и тому же закону переноса в переходном режиме течения. При горении под стенкой градиенты температуры на поверхности возрастают.

Возможно, что проявление закономерностей переходного массопереноса обусловлено наличием газодинамических структур, масштаб которых сопоставим с размерами газового потока. Наличие структур препятствует развитию хаотизации химически реагирующего газового потока. Причина их возникновения может быть связана с внутренним вращением газа как следствие искривления линий тока при обтекании преграды. Продольные крупномасштабные структуры представляют собой парные вихри с встречным вращением, каждый из которых имеет собственное распределение скорости, температуры и момента количества движения.

Отмеченные свойства реагирующего течения показывают, что с точки зрения управления процессами переноса использование переходного режима расширяет диапазон изменения параметров пограничного слоя.

Автор признателен коллегам С.Ю. Федорову и В.И. Титкову за помощь в проведении экспериментов, а также академику РАН Э.П. Волчкову за постановку задачи и полезные замечания.

Список литературы

1. Адамс Э.В., Джонстон Дж. П. Структура течения в пристеночной зоне турбулентного отрывного течения // *Аэрокосмическая техника*. 1989. № 5. С. 3–13.
2. Итон Дж.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых присоединяющихся течений // *Ракетная техника и космонавтика*. 1981. Т. 19, № 10. С. 7–19.
3. Терехов В.И., Ярыгина Н.И., Жданов Р.Ф. Особенности течения и теплообмена при отрыве турбулентного потока за уступом и ребром. Ч. 1 Структура течения // *ПМТФ*. 2002. Т. 43, № 6. С. 126–133.
4. Castro I.P., Naque A. The structure of shear layer bounding a separation region. Part 2. Effects of free-stream turbulence // *J. Fluid Mech.* 1988. Vol. 192. P. 577–595.
5. Ota T., Nishiyama H. A correlation of maximum turbulent heat transfer coefficient in reattachment flow region // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 1987. Vol. 30, No. 6. P. 1193–1199.
6. Брыляков А.П., Жаркова Г.М., Занин Б.Ю., Коврижина В.Н., Сбоев Д.С. Отрыв потока на прямом крыле при повышенной внешней турбулентности // *Уч. зап. ЦАГИ*. 2004. Т. 35, № 1–2. С. 57–62.
7. 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.
8. Эпик Э.Я., Юшина Л.Е., Супрун Т.Т. Теплоотдача в зоне релаксации за локальным замкнутым отрывом различного типа // *Тр. второй Рос. нац. конф. по тепломассообмену, Москва 26–30 окт., РНКТ-2: “Вынужденная конвекция однофазной жидкости”*. М.: Моск. энерг. ин-т, 1998. Т. 2. С. 282–285.
9. Запругаев В.И., Киселев Н.П., Павлов А.А. Влияние кривизны линий тока на интенсивность продольных вихрей в слое смещения сверхзвуковых струй // *ПМТФ*. 2004. Т. 45, № 3. С. 32–43.
10. Козлов Г.В., Грек Г.Р., Сорокин А.М., Литвиненко Ю.А. Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру круглой струи // *Теплофизика и аэромеханика*. 2008. Т. 15, № 1. С. 59–73.
11. Bernal L.P., Roshko A. Streamwise vortex structures in plane mixing layers // *J. Fluid Mech.* 1986. Vol. 170. P. 499–525.
12. Moore D.W., Saffman P.G. The density of organized vortices in a turbulent mixing layer // *J. Fluid Mech.* 1975. Vol. 64. P. 465–473.
13. Бояршинов Б.Ф., Федоров С.Ю., Волков А.А. Измерение корреляционных характеристик затопленной струи по комбинационному рассеянию света // *Приборы и техника эксперимента*. 1994. № 5. С. 110–116.
14. Shulein E., Trofimov V.M. Steady longitudinal vortices in supersonic turbulent separated flows // *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 672. P. 451–476.
15. Грек Г.Р., Козлов В.В., Чернорай В.Г. Гидродинамическая неустойчивость пограничных слоев и отрывных течений // *Успехи механики*. 2005. Т. 3, № 4. С. 3–40.
16. Liepmann D., Gharib M. The role of streamwise vorticity in the near-field entrainment of round jets // *J. Fluid Mech.* 1992. Vol. 245. P. 643–668.
17. Бояршинов Б.Ф. Пограничный слой с крупномасштабными структурами, с испарением и горением // *Дис. ... док. техн. наук, защищена 11.04.07; утв. 09.11.2007*. Новосибирск, 2007. 381 с.
18. Prandtl L. *Gesamelte Abhandlungen*. Berlin etc.: Springer-Verlag, 1961. Т. 2. P. 798–811.
19. Дворников Н.А., Терехов В.И. О переносе импульса и тепла в турбулентном пограничном слое на криволинейной поверхности // *ПМТФ*. 1984. № 3. С. 53–61.

20. **Мори Я.** Влияние свободной конвекции на вынужденное ламинарное конвективное течение над горизонтальной плоской пластиной // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. 1961. Т. 83, № 4. С. 111–115.
21. **Ван.** Экспериментальное исследование теплоотдачи при смешанной конвекции от горизонтальной плоской пластины к воздуху // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. 1982. Т. 104, № 1. С. 150–155.
22. **Петухов Б.С., Поляков А.Ф.** Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986. 191 с.
23. **Чжэнь, Спэрроу, Мукоглу.** Смешанная конвекция в пограничном слое на горизонтальной пластине // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. 1977. Т. 99, № 1. С. 70–76.
24. **Ярин А.Л.** О срыве пламени горячей жидкости воздушным потоком // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 1. С. 3–12.
25. **Raghunandan B.N., Yogesh G.P.** Recirculating flow over a burning surface – flame structure and heat transfer augmentation // Twenty-Second Symposium (Intern.) on Combustion / The Combustion Institute. 1988. P. 1501–1507.
26. **Esquiva-Dano I., Nguyen H.T., Esqudie D.** Influence of a bluff-body's shape on the stabilization regime of nonpremixed flames // Combustion and Flame. 2001. Vol. 127. P. 2167–2180.
27. **Coats C.M., Richardson A.P.** Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers. Part 1: Flame characteristics // Combustion and Flame. 2000. Vol. 122. P. 253–270.
28. **Rohmat N.A., Katoh H., Obara T., Yoshibashi T., Ohyagi S.** Diffusion flame stabilized on porous plate in a parallel airstream // AIAA J. 1998. Vol. 36. No. 11. P. 1945–1952.
29. **Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я.** Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977. 320 с.
30. **Бояршинов Б.Ф.** Некоторые особенности тепло- и массопереноса при обтекании поверхности воздушным потоком // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 4. С. 124–130.
31. **Boyarshinov B.F., Titkov V.I., Fedorov S.Yu.** Momentum transfer in the boundary layer when there is acceleration and combustion of ethanol as it evaporates behind a barrier // Combustion and Flame. 2010. Vol. 157. P. 1496–1509.
32. **Wooldridge C.E., Muzzy R.J.** Measurements in a turbulent boundary layer with porous wall injection and combustion // Tenth Symp. (Intern.) on Combustion. The Combustion Institute, 1965. P. 1351–1362.
33. База данных по характеристикам турбулентного пограничного слоя с химическими и фазовыми превращениями. Режим доступа: http://www.itp.nsc.ru/Laboratory/LAB_2_1/Flame/First%20page.html, свободный.
34. **Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Терехов В.И.** Тепло- и массообмен в пограничном слое при испарении и горении этанола // Физика горения и взрыва. 1994. № 1. С. 8–15.
35. **Дубнищев Ю.Н., Ринкевичюс Б.С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 304 с.

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2013 г.