

УДК 536.46

Влияние турбулентности, ускорения и отрыва воздушного потока на поле скорости, температуры и на массообмен в пограничном слое с горением этанола*

Б.Ф. Бояршинов

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

E-mail: boyar@itp.nsc.ru

Рассматриваются вопросы взаимодействия газодинамики и горения с использованием известной базы опытных данных о пограничном слое с горением этанола. Газодинамика представлена линиями тока, горение — изотермами. Исследуется влияние повышенной степени турбулентности воздуха (до 18 %), ускорения в сужающемся канале, влияние высоты ребра-стабилизатора пламени (3 и 6 мм) на структуру течения в отдельных сечениях и в пограничном слое в целом. Показано, что непосредственно за преградой, где проявляются признаки кинетического реагирования газовой смеси, линии тока пересекаются, а при горении в сужающемся канале с низкой турбулентностью воздуха изотермы и линии тока становятся эквидистантными вблизи фронта пламени, как в случае диффузионного реагирования. Массообмен на поверхности жидкого горячего остается консервативным к изменению газодинамических параметров воздушного потока.

Ключевые слова: турбулентность, ускорение, отрыв, горение смеси, диффузионное горение, линии тока, изотермы, фронт пламени.

Введение

Структура пламени предварительно перемешанных и неперемешанных реагентов определяется основными механизмами переноса — конвективным и диффузионным. Известны две крайние ситуации. В случае горения предварительно перемешанных реагентов [1] линии тока, т.е. траектории конвективного движения газа, пересекают фронт пламени под углом до 90° , а характер реагирования определяется химической кинетикой. В случае горения не перемешанных реагентов [2] область химических превращений ориентирована вдоль линий тока. При этом ламинарный фронт пламени является непроницаемым для конвективных потоков горячего и окислителя и служит стоком для реагентов и источником продуктов сгорания, которые переносятся к фронту и от фронта реакции вследствие диффузии. Если исключается из рассмотрения передняя кромка пламени, то начало пограничного слоя с диффузионным горением представляет собой

* Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН № 121031800217-8.

особую точку [3]. Между этими крайностями находится все многообразие промежуточных режимов, связанных с неполным перемешиванием, характером течения (ламинарное или турбулентное) и т.д. В общем случае анализ проблемы взаимного влияния газодинамических и химических процессов осуществить практически невозможно. В одном и том же горелочном устройстве могут быть одновременно реализованы и кинетический, и диффузионный режимы, которые существенно отличаются скоростью горения. С точки зрения управления процессами химического реагирования представляет интерес изучение возможности влияния на соотношения между механизмами диффузионного и конвективного переноса, на переход от одного режима горения к другому. В работах [4, 5] было показано, что устойчивость горения в пограничном слое обеспечивается стабилизатором (ребром, обратным уступом), за которым в ограниченном по длине участке отрыва потока перемешиваются воздух и пары горючего. В области присоединения потока за преградой происходит воспламенение этой смеси и горение в кинетическом режиме с интенсивным тепловыделением. Вниз по потоку тепловыделение быстро снижается, и химическое реагирование переходит в диффузионный режим.

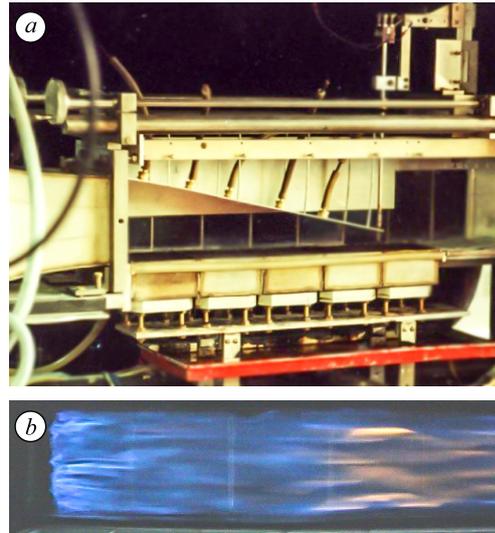
Если для анализа условий перехода между кинетическим и диффузионным горением планируется использовать изотермы и линии тока, то требуется база данных о структуре пламени, включающая в себя распределение температуры, скорости и состава газовой смеси, а также потоков тепла в зоне горения и на стенках канала. Такая база существует применительно к горению этанола, испаряющегося в воздушный поток с нижней стенки горизонтального канала [6, 7]. Принимая её за основу, представляется возможным на качественном уровне проанализировать эффективность внешних газодинамических факторов различного масштаба как инструментов для управления процессами переноса в пограничном слое с химическими превращениями. О результатах влияния управляющего воздействия предлагается судить по взаимному расположению линий тока и изотерм в пламени. При совпадении изотермы максимальных температур и линий тока, т.е. в диффузионном режиме, тепловыделение снижается; при пересечении изолиний тепловыделение в газовой фазе существенно возрастает, а приближение фронта пламени к стенкам увеличивает потери тепла из зоны химического реагирования.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы, опираясь на известные экспериментальные данные [6, 7], рассмотреть, в какой степени влияют изменения в характере течения на взаимное расположение осреднённых по времени линий тока и изотерм в пограничном слое с испарением и горением этанола. В качестве факторов, характеризующих газовый поток, используются следующие параметры: турбулентность внешнего течения, ускорение под воздействием продольного градиента давления, отрыв потока вблизи передней кромки пламени. Очевидно, для управления объектом важно знать режимы, в которых он устойчиво существует, поэтому анализ предельных состояний пограничного слоя с горением — это одна из проблем, которая затрагивается в представленном исследовании.

Объект исследований

В базе данных [6, 7] содержится информация о распределении параметров газа в пламени и на стенке прямоугольного канала [4, 5], имеющего сечение на входе 100×100 мм при общей длине 700 мм. Плоская нижняя поверхность рабочего участка (см. рис. 1) образована пористыми пластинами, пропитанными этанолом (96 % по объёму). По всей ширине канала устанавливался стабилизатор пламени — ребро высотой $h = 3 \div 6$ мм. Боковые

Рис. 1. Вариант сборки рабочего участка для экспериментов с горением на нижней стенке канала за преградой в ускоренном воздушном потоке при снятой ближней боковой стенке (а) и вид пламени при горении за областью отрыва без ускорения (б) (вид сверху, передняя кромка пламени слева).



стенки, прозрачные по всей длине и высоте, были выполнены из набора кварцевых пластин. Верхняя стенка имела переменный профиль для создания необходимого ускорения воздушного потока. Степень турбулентности определялась соотношением между осредненными пульсациями скорости u' и скоростью основного потока U_0 на входе в рабочий участок по формуле

$$Tu = \sqrt{(u')^2} / U_0 \quad (1)$$

и составляла 1 %, 8 % и 18 %. Она варьировалась при замене сетки в диффузоре аэродинамической трубы на решетки с различным количеством отверстий. На рис. 1б показан внешний вид пламени за областью отрыва за ребром высотой 3 мм при горении без ускорения (вид сверху, передняя кромка пламени находится слева на 15–20 мм от ребра, экспозиция 1/200 с).

Для ребра высотой $h = 3$ мм и для трех уровней турбулентности на входе в рабочий участок Tu_0 рассматривались три значения ускоренности воздушного потока, характеризуемой параметром Кейса $K = (\nu/U_0^2)(dU_0/dx)$, а именно: $K = 0$ при отсутствии верхней крышки; $K = 0,5 \cdot 10^{-6}$, когда верхняя стенка, длина которой равна 400 мм, параллельна нижней, а высота канала на выходе из рабочего участка $H = 100$ мм; $K = 10^{-6}$, когда $H = 70$ мм. Принято, что x (м) — это расстояние от преграды вниз по потоку, y (м) — расстояние от стенки, ν (м²/с) — кинематическая вязкость воздуха; скорость воздуха на входе канал $U_0 \sim 10$ м/с.

Измерения профилей скорости $U(x, y)$ в пограничном слое вблизи пористой поверхности выполнены лазерным доплеровским анемометром при запылении воздушного потока частицами кварцевого порошка, размером 1–10 микрон. Частицы вводились в районе наибольшего сечения диффузора. Поле температур $T(x, y)$ получено с применением платино-платинородиевой термопары из проволоки диаметром 0,15 мм. Таким образом, с учетом случая, когда высота преграды составляла $h = 6$ мм, в работе рассматривались 10 режимов горения. Наиболее полные данные соответствуют комбинации $Tu = 1$ %, $h = 3$ мм, $K = 0$, когда в дополнение к профилям $U(x, y)$ и $T(x, y)$ с помощью зондов хроматографа Цвет-102 были получены профили состава $C_i(x, y)$ газовой смеси, включающей семь стабильных веществ: N_2 , O_2 , H_2O , CO , CO_2 , C_2H_5OH , C_2H_4O , с шагом по длине $\Delta x = 40$ мм.

Линии тока и изотермы

Конфигурация линий тока задавалась изолиниями функции тока Ψ , для отыскания которых необходимо знать распределение плотности газовой смеси. С этой целью использовалось выражение

$$\Psi = \int_0^y \rho U dy. \quad (2)$$

Здесь зависимость плотности ρ (кг/м^3) от состава и температуры смеси учитывалась по уравнению состояния $\rho = PM/RT$, где T (К) — температура, давление $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па, газовая постоянная $R = 8314$ Дж/(кг·град), молекулярный вес смеси M (а.е.м.) рассчитывался по известным данным о массовой доли C_i компонентов:

$$\frac{1}{M} = \sum \frac{C_i}{M_i}. \quad (3)$$

Преобразование опытных данных

В работе [8] было показано, что молекулярный вес смеси газов в пограничном слое с горением испаряющегося этанола близок к $M = 29$. Лишь в непосредственной близости к стенке, когда $y < 1$ мм, массовая доля паров горючего возрастает до 0,81, а молекулярный вес смеси отличается от веса воздуха на величину, которая превышает погрешность экспериментов. В основной части пограничного слоя, толщина которого достигает ~ 20 мм и более, плотность смеси определяется преимущественно концентрацией азота и кислорода. На рис. 2 представлено распределение температуры и основных компонентов газовой смеси в пограничном слое с испарением и горением этанола за ребром высотой $h = 3$ мм для $x = 160$ мм [6]. Область вблизи стенки $y < 1$ мм, которая менее всего подвержена влиянию внешней турбулентности и ускорения воздушного потока, в расчетах не принималась во внимание.

На рис. 3 показаны результаты обработки опытных данных по составу и температуре для различных сечений ($y > 1$ мм), когда $Tu = 1\%$, $h = 3$ мм, $K = 0$. Видно, что плот-

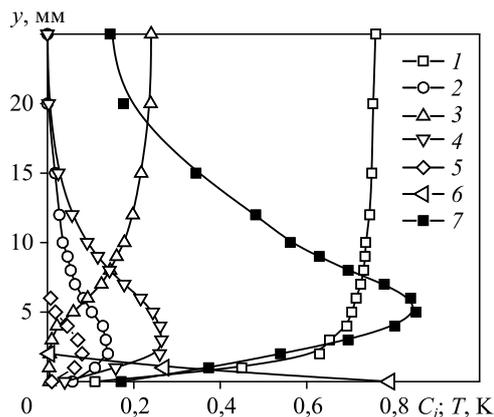


Рис. 2. Распределение состава веществ и температуры в канале без верхней стенки при $U_0 = 10$ м/с, $x = 160$ мм, $h = 3$ мм.

1 — N_2 , 2 — H_2O , 3 — O_2 , 4 — CO_2 ($\times 2$),
5 — CO , 6 — $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 7 — $T/2000$.

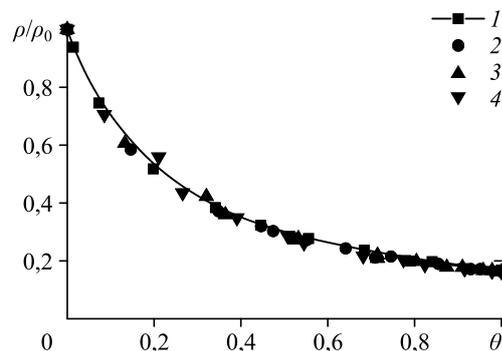


Рис. 3. Обобщенная зависимость плотности от температуры в канале без верхней стенки при $U_0 = 10$ м/с, $h = 3$ мм.

$x = 40$ (1), 120 (2), 200 (3), 280 (4) мм.

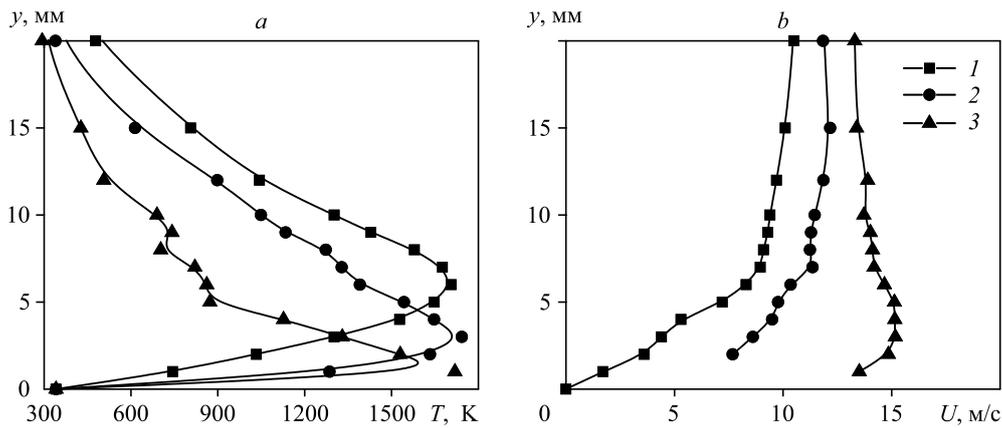


Рис. 4. Деформация профилей температуры (а) и продольной скорости (b) в пограничном слое с горением; влияние продольного градиента давления.

$K (\times 10^6) = 0$ (1), 0,5 (2), 1 (3).

ность ρ (кг/м^3) связана с обобщенной температурой $\theta = (T - T_0)/(T_f - T_0)$ во внешней области пограничного слоя и в зоне горючего единой зависимостью $\rho(\theta)$, которая в настоящей работе использовалась для всех исследуемых режимов. Здесь T_f — температура во фронте пламени, а $\rho_0 \sim 1,21 \text{ кг/м}^3$ и $T_0 \sim 290 \text{ К}$ — плотность и температура набегающего потока воздуха в экспериментах. Таким образом, в настоящей работе исходными параметрами являются только опытные данные по температуре и скорости.

Структура течения в пограничном слое с горением за преградой

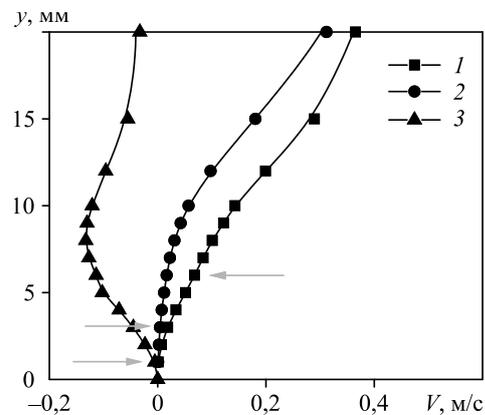
Деформация профилей температуры и скорости

На рис. 4 показана деформация профилей температуры и скорости при ускорении ($dP/dx < 0$) воздушного потока ($Tu = 1\%$) за ребром $h = 3 \text{ мм}$ над испаряющейся поверхностью жидкого горючего на удалении 200 мм от входа в канал. Видно, что по мере возрастания параметра ускорения K в сужающемся канале максимум температуры (рис. 4а) приближается к стенке и уменьшается из-за возрастания теплотерь. Скорость газа во фронте пламени (рис. 4b) увеличивается быстрее, чем во внешней области, а в случае, когда $K = 10^{-6}$, она превосходит скорость воздуха вдали от стенки. Очевидно, что высокотемпературная область наиболее восприимчива к силовому воздействию, и по мере возрастания ускоренности скорость движения газа в пограничном слое становится выше, чем в набегающем потоке воздуха. На рис. 5 показана деформация профилей поперечной скорости V , найденной по уравнению неразрывности, исходя из измерений продольной компоненты U и температуры с учетом обобщения, продемонстрированного на рис. 3:

$$V = -\frac{1}{\rho} \int_0^y \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} dy. \quad (4)$$

Рис. 5. Профили поперечной скорости в пограничном слое с горением; влияние продольного градиента давления.

Обозначения см. на рис. 4.



Интегрирование (4) заменялось суммированием производных, найденных в виде конечных разностей с шагом $\Delta x = \Delta y = 0,5$ мм. Данные относятся к случаю, когда $Tu = 1\%$, $x = 200$ мм, а высота ребра-стабилизатора пламени составляла $h = 3$ мм. Видно, что в сужающемся канале при $K = 10^{-6}$ поперечная компонента скорости становится отрицательной и направлена к нижней стенке канала, достигая максимума во внешней высокотемпературной части газового потока (положение максимума температуры отмечено стрелками).

Данные, представленные на рис. 4, 5, показывают влияние внешних возмущений на распределение параметров газа в отдельных сечениях пламени этанола. Подобный анализ можно найти в обзоре [2], где приводятся профили локальных параметров в пристенных течениях с горением, в основном этанола и водорода. Профили скорости в пограничном слое с горением, а также изотахи, построенные на их основе, в ускоренном потоке переменной плотности не отражают реальные траектории движения газа. Дальнейшее исследование взаимосвязи динамических и тепловых характеристик пограничного слоя проводится при сопоставлении изотерм и линий тока, найденных с использованием соотношения (2).

Развитие пограничного слоя с горением за преградой

Ниже рассматривается влияние управляющего воздействия (турбулентности, ускоренности, отрыва) на пограничный слой в целом. Оно проявляется в изменении формы линий тока и изотерм, что позволяет отметить наличие областей с кинетическим и диффузионным реагированием, а также переход между ними. Автором представлены наиболее характерные картины течения, соответствующие изменению уровня турбулентности до 18%, ускоренности — до $K = 10^{-6}$ и отрыву за стабилизаторами в виде ребер высотой $h = 3$ и 6 мм. Эти картины относятся к участку течения на удалении от 1 до 10 мм от стенки на промежутке длин от 50 до 250 мм для всех рассматриваемых режимов горения.

Изотермы и линии тока за ребром высотой 3 мм

На рис. 6а серым цветом обозначены линии тока, тонкие черные линии — изотермы, квадратными символами отмечено положение области максимальных температур. Воздушный поток направлен слева направо, степень турбулентности является минимальной ($Tu = 1\%$), высота ребра $h = 3$ мм, ускорение отсутствует.

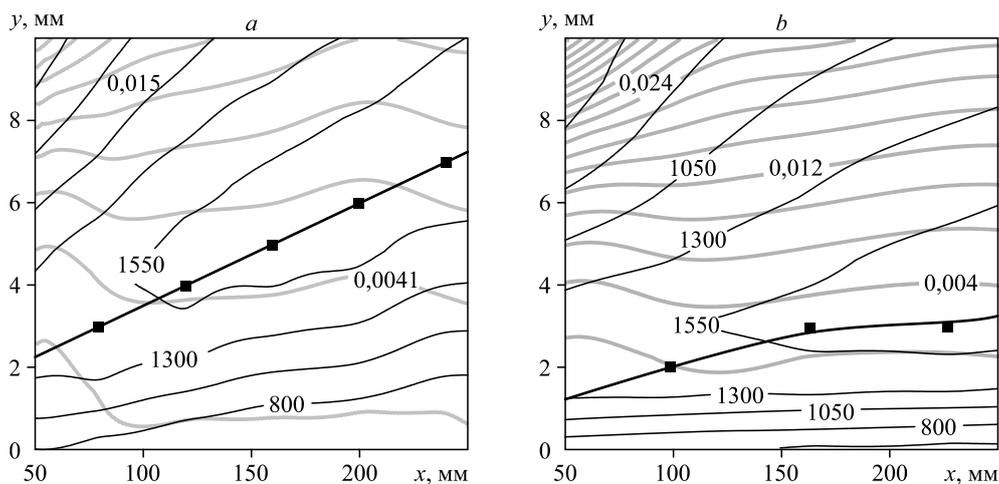


Рис. 6. Картина изотерм и линий тока при минимальной турбулентности ($Tu = 1\%$) при отсутствии верхней стенки ($K = 0$) (а) и в канале постоянной высоты ($K = 0,5 \cdot 10^{-6}$) (б).

Нижняя линия тока на рис. 6а показывает, что стабилизатор пламени, который создаёт область отрыва, искривляет линии тока и отгесняет воздушный поток от стенки. Влияние ребра на пристенное течение прекращается при удалении на 80–100 мм от преграды. Ближе к началу пограничного слоя за стабилизатором, при $x = 50–70$ мм, линии тока пересекают изотермы, определяя тем самым область кинетического реагирования смеси. Ниже фронта пламени линии тока направлены вдоль стенки, но пересекают его на всей длине канала. Очевидно, что даже при минимальном уровне газодинамических возмущений, принятых в настоящей работе, в процессах переноса при горении перемешанных реагентов конвективная составляющая в процессах переноса через фронт пламени полностью не исключается.

Прямоугольный канал без верхней стенки (или лоток) не относится к часто используемым конфигурациям рабочего участка аэродинамических установок. Как правило, исследования проводятся в каналах, ограничивающих газовый поток со всех сторон. На рис. 6b показано течение в рабочем участке с верхней плоской крышкой, расположенной параллельно нижней поверхности. В этом случае параметр ускорения достигает $K = 0,5 \cdot 10^{-6}$. Видно, что течение ниже фронта пламени (в зоне окислителя) становится более организованным, кривизна линий тока уменьшается, а для $x > 150$ мм изотермы и линии тока становятся эквидистантными, как при диффузионном горении.

Наиболее близка к случаю, отвечающему диффузионному горению, ситуация с ускоренным движением воздуха в сужающемся канале, на выходе из которого высота уменьшена и составляет $H = 70$ мм (см. рис. 7a). В окрестности фронта пламени изотермы и линии тока эквидистантны и не пересекаются, но максимум температуры, положение которого отмечено квадратами, приблизился к поверхности испаряющегося горючего. В этом режиме течения градиенты температуры и концентрации существенно возрастают по сравнению с предыдущим случаем, представленным на рис. 6. Горение остается устойчивым, несмотря на появление очевидных пульсаций температуры и скорости, при этом механизм молекулярного переноса внутри образующихся продольных вихрей [10], по-видимому, сохраняется.

Во внешней области пограничного слоя, где $y > 7–10$ мм и горение отсутствует, изолинии пересекаются, т.е. перенос тепла происходит за счет конвекции. Увеличение

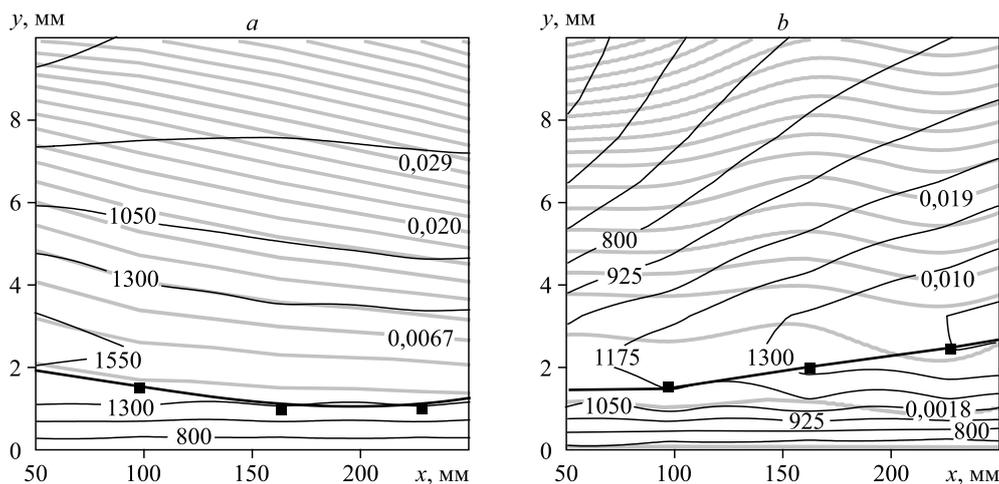


Рис. 7. Изотермы и линии тока в сужающемся канале ($K = 10^{-6}$) с горением этанола в пограничном слое при минимальной турбулентности воздушного потока на входе в канал ($Tu = 1\%$) (a) и при турбулентности $Tu = 18\%$ (b).

турбулентности воздушного потока до $Tu = 18\%$ (рис. 7b) в наибольшей степени влияет на внешнюю область пограничного слоя выше фронта пламени. Здесь усиливается конвективный перенос кислорода и азота к фронту пламени, но затрудняется отток продуктов сгорания в поперечном направлении.

Изотермы и линии тока за ребром высотой 6 мм

С увеличением размеров преграды растет область отрыва, в которой предварительно перемешиваются пары этанола и воздуха. Увеличивается количество смеси, поступающей в область присоединения, где происходит её сгорание. Возрастает объем расширяющихся продуктов сгорания, усиливается турбулентность газового потока вблизи стенки, возрастает толщина пограничного слоя.

Увеличение высоты преграды, как и увеличение турбулентности, способствует отдалению фронта пламени от стенки. На рис. 8 показана ситуация в канале без верхней стенки ($K = 0$) при степени турбулентности 8% за ребрами разной высоты. Сопоставление рис. 8a с рис. 6a отражает результат повышения турбулентности в канале без ускорения, при этом оба случая соответствуют горению за преградой $h = 3$ мм. Сравнение рис. 8a с картиной течения, представленной на рис. 8b, показывает эффект от увеличения высоты преграды до $h = 6$ мм при прочих равных условиях. Видно, что высота ребра заметно влияет на поле температур и на форму линий тока. Фронт пламени на удалении от стабилизатора $x \sim 150$ мм оттесняется от нижней стенки и далее остается на высоте $y \sim 12$ мм. При $x = 250$ мм одни и те же линии тока (например, для функции тока $\Psi = 0,0067$ кг/м/с) находятся вдвое дальше от стенки по сравнению с линиями, изображенными на рис. 8a. Если область пограничного слоя, возмущенного ребром (см. рис. 6a), при $Tu = 1\%$ составляла $x \sim 100$ мм, то с увеличением турбулентности течение восстанавливалось (линии тока вновь становятся параллельными стенке) значительно дальше, это происходило при $x \sim 200$ мм (рис. 8a). За преградой $h = 6$ мм (рис. 8b) влияние препятствия на пограничный слой выходит за пределы рассматриваемой области, т.е. восстановление происходит при $x > 250$ мм. Пересечение линий тока и изотерм, присутствующих на рис. 8a и 8b, показывает, что в пограничном слое с горением при повышенной турбулентности возрастает конвективный перенос через фронт пламени.

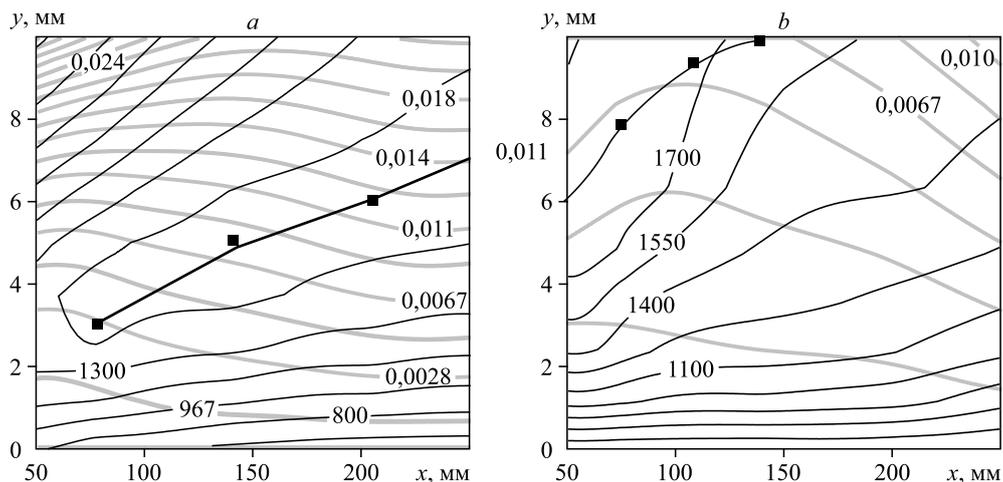


Рис. 8. Изотермы и линии тока в канале без ускорения воздушного потока при степени турбулентности $Tu = 8\%$ за ребрами $h = 3$ мм (a), $h = 6$ мм (b).

Массообмен за преградой

Результаты воздействия на скорость испарения этанола, вызванные повышенной турбулентностью воздушного потока, увеличением размеров области отрыва, ускорением в сужающемся канале и горением, приведены на рис. 9а. Линии 1 и 3 соответствуют известным закономерностям, связывающим диффузионное число Стантона $St_d = j_w / \rho_0 U_0 / (C_w - C_0)$ с критерием Рейнольдса $Re = x U_0 / \nu$ для массопереноса в пограничном слое без горения. Здесь j_w (кг/м²/с) — поток этанола, испаряющегося со стенки, C_w — массовая концентрации этанола на стенке (при испарении и горении $C_w = 0,8$). Линия 1 соответствует степенному закону для стандартного ламинарного пограничного слоя $St_d = 0,332 \cdot Re^{-0,5} \cdot Sc^{-0,66}$, линия 3 — массопереносу в турбулентном пограничном слое [9], в котором $St_d = 0,028 \cdot Re^{-0,2} \cdot Sc^{-0,6}$, а число Шмидта $Sc = 1,3$. Линией 2 показана эмпирическая зависимость $St_d = \psi \cdot 0,332 \cdot Re^{-0,5} \cdot Sc^{-0,66}$. Целочисленный множитель $\psi = 2$ используется для описания процессов переноса в пограничном слое с вихрями Тейлора–Гёртлера, которые возникают при горении [10] и без горения [11]. Светлыми маркерами показаны данные из работ [12, 13], где рассматривались другие режимы массообмена, реализованные на этой же установке (рис. 1). Символы 4 относятся к горению в ламинарном пограничном слое с неподвижным фронтом пламени «на потолке» рабочего участка, когда $U_0 = 2,5$ м/с, а символы 5 показывают массообмен при скорости $U_0 = 7,6$ м/с, когда образуются вихри Тейлора–Гёртлера. Остальные данные, приведенные на рис. 9а, получены для режимов, относящихся к настоящей работе. Символы 6 соответствуют режиму, представленному на рис. 8б, 7 — картине течения, изображенной на рис. 8а, 8 — массообмен в случае, показанном на рис. 7а.

На рисунках 6–8, отражающих эффекты турбулизации, отрыва и ускорения, видно, что массоперенос при всем многообразии условий горения в пограничном слое наиболее консервативен к изменению газодинамических параметров воздуха. Для $Re > 2 \cdot 10^5$ влияние реагирующего газа на изменение тепловых характеристик стенки, защищенной испаряющимся горючим, остается минимальным и сохраняется на уровне погрешности

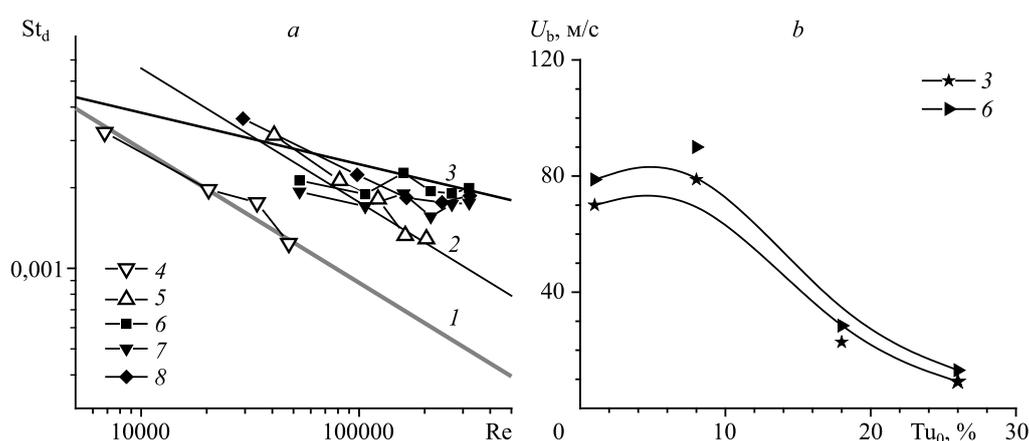


Рис. 9. Влияние турбулентности, ускорения и отрыва воздушного потока на пределы интенсивности массопереноса (а) и область существования пограничного слоя с горением этанола (б).

Описание 1–3 см. в тексте; 4 — ламинарный пограничный слой, 5 — горение с продольными вихрями, 6 — горение за ребром высотой 6 мм в турбулентном ($Tu = 8\%$) воздушном потоке без ускорения, 7 и 8 — соответственно горение без ускорения и при ускорении в сужающемся канале ($K = 10^{-6}$) в потоке с турбулентностью $Tu = 1\%$ за ребром 3 мм.

измерений. С точки зрения управления горением (управление потерями энергии из зоны горения и передачей тепла в стенки канала) наиболее благоприятные условия относятся к переходной области, когда $Re < 50000$, а коэффициенты, характеризующие перенос тепла, могут изменяться в два раза.

Из опытных данных, приведенных на рис. 9, видно, что известные закономерности поведения пограничного слоя без горения применимы для описания массопереноса в пограничном слое с горением испаряющегося этанола. Линии 1 и 3 фактически представляют пределы, в которых возможно изменение интенсивности массопереноса в газовом потоке с химическими превращениями. В ламинарном пограничном слое (линия 1) перенос реагентов и продуктов сгорания происходит в силу теплового движения молекул, и поэтому дальнейшего ослабления переноса быть не может. Линия 3 соответствует верхнему пределу, когда перенос реагентов определяется не взаимодействием молекул, а взаимодействием объемов газа вследствие турбулентных пульсаций. Такое изменение масштабов и усиление обменных процессов на поверхности пламени объясняет известную зависимость скорости срыва пламени от степени турбулентности [10] (см. рис. 9b). Видно, что с увеличением турбулентности в интервале $Tu < 8\%$, когда улучшается перемешивание реагентов, скорость срыва (U_b (м/с)) возрастает. Дальнейший рост турбулентности ($Tu > 8\%$) приводит к избыточному усилению переноса через фронт пламени теплоты и вещества, интенсивность которого превышает возможности процессов горения, и химическое реагирование в турбулентном потоке прекращается.

Таким образом, рис. 9a показывает диапазон изменений характеристик объекта при внешнем воздействии на него с точки зрения управления горением. В переходной области между ламинарным и турбулентным режимами массообмен, характеризуемый числами St_d , может изменяться в два раза при изменении газодинамических условий, зависящих от критерия Re . Вне переходной области, когда возрастает турбулентность и усиливаются процессы переноса через фронт пламени, горение прекращается.

Отметим, что дисбаланс интенсивности газодинамических и физико-химических процессов не является единственной причиной прекращения горения. Срыв пламени в случае приближения к концентрационным пределам химического реагирования в пограничном слое рассматривался в работе [14], но обзор работ по устойчивости горения выходит за рамки настоящего исследования.

Выводы

В работе рассматривались результаты экспериментов [6], полученные в ходе исследований пограничного слоя с испарением и горением этанола. В исходном состоянии горючее и окислитель были пространственно разделены, но по мере развития химического реагирования за ребром в пламени выявилось сочетание свойств, характерных для горения перемешанных и неперемешанных реагентов, т.е. характерных для кинетического и диффузионного реагирования. С точки зрения управления горением представлялось интересным изучить возможности воздействия на процесс с целью изменения соотношения между механизмами диффузионного и конвективного переносов. В качестве инструментов для изменения газодинамических свойств пограничного слоя рассматривались три мероприятия: ускорение газового потока в сужающемся канале, изменение турбулентности во внешнем потоке постановкой решеток в проточной части канала, повышение турбулентности пограничного слоя вблизи стенки за счет изменения размеров зоны отрыва за стабилизатором пламени. Скорость на входе в рабочий участок

во всех опытах оставалась постоянной — ~ 10 м/с. В результате этих исследований получены данные о воздействии различных комбинаций внешних газодинамических факторов на структуру пограничного слоя в отдельных его сечениях и для всего пограничного слоя в целом.

При анализе взаимодействия газодинамики и горения применялся метод, в котором в качестве определяющих параметров использовались скорость и температура. Газодинамические свойства совокупным образом представлены на рисунках осредненными линиями тока, а характеристики горения отражены изотермами в пламени этанола, испаряющегося с нижней стенки горизонтального канала. Изменение взаимного расположения изолиний в ходе развития пограничного слоя по длине канала служило основанием, чтобы делать вывод о характере горения (кинетическое или диффузионное реагирование), о наличии или отсутствии конвективного переноса через фронт пламени.

Обнаружено, что высокотемпературная область течения наиболее восприимчива к силовому воздействию, и по мере возрастания ускоренности во фронте пламени газ может двигаться быстрее, чем в набегающем потоке воздуха, а его поперечная компонента скорости направляется к нижней стенке канала.

Показано, что непосредственно за преградой (рис. 6а) линии тока и изотерма фронта пламени пересекаются под углом до 90° , что характерно для кинетического реагирования в газовой смеси. В сужающемся канале при низкой степени турбулентности на входе ($Ti = 1\%$) в окрестности фронта пламени осредненные изотермы и линии тока становятся эквидистантными, как в режиме диффузионного горения. В рассмотренных случаях в разной степени отмечается наличие конвективного переноса вещества через фронт пламени. Наибольшее рассогласование и пересечение линий тока с изотермами отмечается в зоне окислителя. Увеличение высоты преграды, как и увеличение турбулентности (рис. 8б), способствует отдалению фронта пламени от стенки.

Изменение уровня турбулентности, размеров зоны отрыва и степени ускорения в рассмотренных пределах существенным образом меняет газодинамическую структуру пограничного слоя и в меньшей степени влияет на процессы переноса. Массообмен на поверхности жидкого горючего остается консервативным к изменению газодинамических параметров воздушного потока. С точки зрения управления потерями тепла при горении наиболее благоприятные условия относятся к переходной области течения, когда число Рейнольдса $Re < 50000$.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 478 с.
2. Лукашов В.В., Терехов В.В., Терехов В.И. Пристенные течения химически реагирующих веществ. Обзор современного состояния проблемы // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 2. С. 23–36.
3. Raghavan V., Rangwala A.S., Torero J.L. Laminar flame propagation on a horizontal fuel surface: Verification of classical Emmons solution // Combustion Theory and Modelling. 2009. Vol. 13, No. 1. P. 121–141.
4. Бояршинов Б.Ф., Фёдоров С.Ю. Тепломассоперенос и стабилизация пламени в пограничном слое за ребром и за уступом // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 5. С. 3–7.
5. Абдрахманов Р.Х., Бояршинов Б.Ф. Тепловая и динамическая структура пламени этанола в пограничном слое вблизи преграды // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52, № 1. С. 30–39.
6. База данных по характеристикам турбулентного пограничного слоя с химическими и фазовыми превращениями. Режим доступа: <https://www.itp.nsc.ru/labs/flame/index.html>.
7. Бояршинов Б.Ф. Пограничный слой с крупномасштабными структурами, с испарением и горением: Дис. ... док. техн. наук: защищена 11. 04. 07 (на правах рукописи): утверждена 09.11.2007. Новосибирск, 2007. 380 с.

8. **Boyarshinov V.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.
9. **Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов, Леонтьев А.И., Мионов Б.М., Никитин В.М., Петражицкий Г.Б., Самойлов М.С., Хвостов В.И., Шишов Е.В.** Теория тепломассообмена / Под ред. Леонтьева А.И. М.: Высш. школа, 1979. 495 с.
10. **Бояршинов Б.Ф.** Экспериментальное исследование пределов горения этанола в пограничном слое за преградой // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т. 25, № 1. С. 49–56.
11. **Маккормак П.О., Уилкер Х., Келхер М.** Вихри Тейлора–Гёртлера и их влияние на теплообмен // *Теплопередача*. 1970, Т. 92, № 2. С. 106–118.
12. **Бояршинов Б.Ф.** Влияние препятствия на структуру течения и массообмен в пограничном слое с горением этанола на горизонтальной поверхности // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 6. С. 713–722.
13. **Бояршинов Б.Ф.** О границах переходного режима массообмена при горении этанола на горизонтальных стенках за ребром и за уступом // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 4. С. 3–10.
14. **Volchkov E.P., Lukashov V.V., Terekhov V.V., Hanjalic K.** Characterization of the flame blow-off conditions in a laminar boundary layer with hydrogen injection // *Combustion and Flame*. 2013. Vol. 160. P. 1999–2008.

*Статья поступила в редакцию 28 декабря 2021 г.,
после доработки — 31 января 2022 г.,
принята к публикации 22 марта 2022 г.*