

ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ С ГОРЕНИЕМ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

АННОТАЦИЯ

Цель работы – исследование влияния газодинамических возмущений различного масштаба на процессы переноса в химически реагирующем пограничном слое. Опыты проведены при испарении этанола в воздушный поток со скоростью до 70 м/с при уровне турбулентности до 18 % и его горении за препятствием высотой $h < 15$ мм, параметр ускорения $K < 19 \cdot 10^{-6}$. Измерялась скорость выгорания, продольная компонента скорости, температура и их пульсации, а также распределение радикалов ОН. Установлено, что в турбулизованном пограничном слое за препятствием образуется последовательность областей с повышенным уровнем пульсаций скорости, концентрации ОН и пульсаций температуры, областей с повышенной скоростью выгорания. Определён диапазон изменения скорости выгорания. Показано, что интенсивность массообмена изменяется от уровня характерного для ламинарного пограничного слоя до значений, свойственных потокам с отрывом.

1. ВВЕДЕНИЕ

Турбулизация и ускорение основного течения, как способы управления тепломассообменом и трением в пограничных слоях без горения хорошо известны. При возрастании турбулентности может быть достигнуто увеличение интенсивности теплообмена на 30% [1], а при ускорении турбулентного пограничного слоя — его снижение примерно на такую же величину [2]. Область применения этих средств не ограничена каким-либо уровнем скоростей. Наличие химических превращений может привести свои особенности.

В экспериментальных исследованиях массопереноса в пограничном слое с химическими превращениями было обнаружено, что в случае ускорения внешнего течения происходит не снижение скорости выгорания, а её интенсификация. Коэффициенты переноса возрастают в два-три раза [3]. Скорость выгорания также значительно увеличивается в пограничном слое с замкнутым отрывом [4]. В этих двух случаях причины возрастания массопереноса могут быть разными, важно уточнить пределы, в которых изменяется интенсивность процессов переноса при вынужденной конвекции.

В целях изучения возможностей по интенсификации процессов переноса были проведены систематические исследования структуры течения и тепломассообмена в пограничном слое с горением при наличии внешних газодинамических возмущений разного масштаба: ускорения и турбулизации. Ускорение достигалось сужением канала. Турбулизация набегающего воздушного потока осуществлялась постановкой решёток различной прозрачности в тракте аэродинамической трубы, а также с помо-

щью преграды переменной высоты в начале пограничного слоя, которая служила стабилизатором пламени. В настоящей работе принято, что понятие «сложные условия» включает в себя наличие отрыва, турбулизации, горения, продольного градиента давления, при котором нарушается подобие процессов переноса тепла, импульса и вещества.

Скорость воздуха на входе в рабочий участок не превышала 70 м/с. Исходные параметры внешнего течения ограничивались областью существования пограничного слоя с горением испаряющегося этанола, которая была определена в работе [4]. Высота ребра — стабилизатора пламени варьировалась в пределах 2...15 мм. Основная серия экспериментов выполнена при начальной скорости 10 м/с в сужающемся канале с плоскими стенками, в котором параметр ускорения $K = (v/U_0^2)(dU_0/dx)$ принимал значения $K = (0.5, 1, 5) \cdot 10^{-6}$ для ребра $h=3$ мм.

2. ОБОРУДОВАНИЕ. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Диффузионное горение плоской поверхности жидкого топлива моделировалось в аэродинамической трубе, в которой проволочная сетка с ячейками 1×1 мм устанавливалась на входе в конфузор. Его сужающаяся часть присоединялась к прямоугольному рабочему участку сечением 100×100 мм, степень турбулентности на входе в который составляла $Tu_0=1\%$. Её увеличение ($Tu_0=8$ или 18%) достигалось заменой сетки на решётку с отверстиями диаметром 25 мм, число которых могло изменяться (25, 9 или 5). В опытах без ускорения ($dP/dx = 0$) верхняя крышка канала отсутствовала. Прозрачные боковые стенки составлены из набора кварцевых пластин. Нижняя поверхность образована либо пористыми пластинами, изготовленными из нержавеющей стали 80×80 мм, либо засыпкой из стеклянных шариков диаметром (0.7 ± 0.15) мм.

В качестве горючего использовался этанол. 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 самоустанавливалась в соответствии с условиями конвективного тепломассообмена с зоной горения. Измерялся расход горючего и температура испаряющейся поверхности.

Для измерения концентрации радикалов был применен метод ЛИФ с насыщением, которое достигается использованием высокой плотности мощности излучения и исключением не дающих насыщения краевых пространственных и временных об-

ластей лазерного пучка. Экспериментальная техника описана ранее в [5].

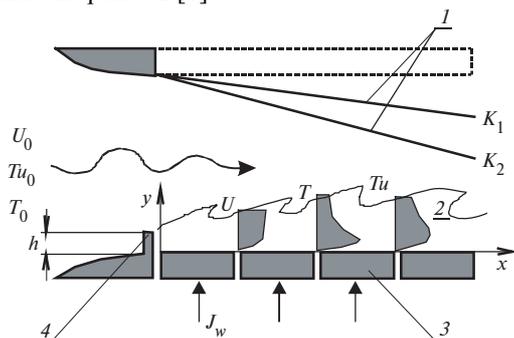


Рис. 1. Схема пограничного слоя в канале с турбулизацией и ускорением основного потока: 1 — верхняя плоская крышка; 2 — пограничный слой с горением; 3 — пористые пластины, 4 — ребро

Возбуждение и регистрация флуоресценции радикала ОН производились в колебательно-вращательной полосе 0-0 системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$. Длина волны лазера настраивалась на спектральный пик 311,3 нм, образованный несколькими переходами, в том числе $P_2(6)$. Монохроматор со спектральным разрешением 0,3 нм был настроен на пик флуоресценции с длиной волны 307,5 нм. Расчеты показывают, что в диапазоне температур 900...3000 К использование указанной линии для возбуждения ОН обеспечивает сигнал флуоресценции, не зависящий от температуры, а только от концентрации этих радикалов. Для получения абсолютных концентраций проводилась калибровка сигнала в диффузионном пламени водорода [6] с известной концентрацией гидроксила.

Для изучения турбулентных пульсаций скорости газа в реагирующих течениях без внесения возмущений в объект использован метод лазерной доплеровской анемометрии (ЛДА), который основан на измерении скорости частиц в газовом потоке. Применялись несгорающие микронные частицы кварцевого порошка [7]. Пространственное и временное разрешение ЛДА соответствует газодинамическим характеристикам турбулентных реагирующих течений. При горении соотношение сигнал/шум уменьшается, и для обеспечения устойчивой работы аппаратуры пороговые значения сигнала увеличены, т.е. до определенного уровня искусственно уменьшены счетная концентрация частиц и измеренная степень турбулентности. Поэтому величина среднеквадратичных пульсаций продольной скорости $(u')^2$ корректировалась до совпадения с измеренной степенью турбулентности $Tu_o = \sqrt{(u')^2} / U_o$ на входе в канал по данным термоанемометрических измерений. При этом считалось, что в разных точках потока изменяется только интенсивность пульсаций скорости. По оценкам авторов данной работы это приводит к увеличению погрешности определения Tu до $\pm 20\%$.

Измерения пульсаций температуры термпарой затруднены из-за необходимости учитывать погрешность, обусловленную тепловой инерцией зонда. В [8] обсуждалась проблема применения метода

рэлеевского рассеяния для измерений температуры в пограничном слое. В опытах с ламинарным пламенем показано, что выбором ракурса возможно уменьшить погрешность метода, обусловленную сажеобразованием в углеводородных пламенах. В турбулентном потоке установлено, что на всех режимах течения ($U_o = 10$ м/с, $Tu_o = 1\%, 8\%, 18\%$) не удаётся получить согласие с термпарными измерениями, если $T > 1000$ К. В настоящей работе эта область пограничного слоя исключалась из рассмотрения в случае применения рэлеевского рассеяния.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Массоперенос

Данные по скорости выгорания, полученные в опытах на испаряющейся поверхности с горением и без него, представлены в виде зависимости $St_d(Re_x)$, где критерий Стентона применялся в форме $St_d = j_w / \rho_o U_o (C_w - C_o)$. Концентрация этанола на стенке, определённая по температуре испаряющейся поверхности с использованием кривой насыщения, без горения $C_w = 0.03$, при горении $C_w = 0.8$, в основном потоке $C_o = 0$. На рис. 2 показаны результаты измерений для этанола в случае отсутствия турбулизации и продольного градиента давления. Данные сопоставляются со стандартными законами для массопереноса в ламинарном ($St_o = 0.332 Re_x^{-0.5} Sc^{-0.66}$, линия 1) и турбулентном ($St = 0.029 Re_x^{-0.2} Sc^{0.6}$, линия 4) пограничных слоях. Зависимости 2 и 3 соответствуют увеличению St_o в два и три раза по отношению к массообмену при ламинарном течении.

Из рис. 2 видно, что отличие реального процесса от расчёта для ламинарного пограничного слоя может сохраняться постоянным в некотором диапазоне чисел Re . Опытные данные расслаиваются на «уровни» ламинаризованного теплообмена, когда $St \sim Re^{-0.5}$, которые сохраняется до $Re \sim 10^6$. В [9] показано, что подобное расслоение отмечается в опытах без горения при $Re_x \sim 10^7$.

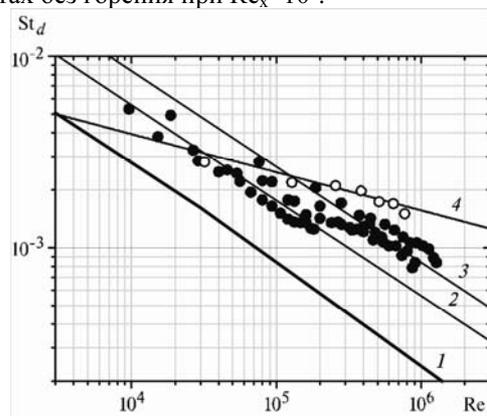


Рис. 2. Массоперенос при испарении и горении этанола в отсутствии турбулизации и ускорения. Расслоение опытных данных на серию зависимостей $St_d \sim Re^{-0.5}$. Светлые точки — испарение без горения

Для отрывных течений без горения в работе [10] предложено обобщение опытных данных, которое с точностью 38,5 % описывает теплообмен в области присоединения. Применительно к данным по массопереносу в реагирующем течении числа Стентона $St_m = 0.192 Re_x^{-0.335} Sc^{-0.66}$ показаны на рис.3 линиями (3). Из этого рисунка видно, что коэффициенты переноса изменяются от уровня в ламинарном пограничном слое до значений в потоке с отрывом. По данным рис. 3, а при увеличении высоты преграды расслоение усиливается. Из рис. 3, б следует, что массоперенос в ускоренном пограничном слое с горением консервативен к изменениям степени турбулентности набегающего потока $Tu_0 < 18\%$ и ускорения $K < 5 \cdot 10^{-6}$.

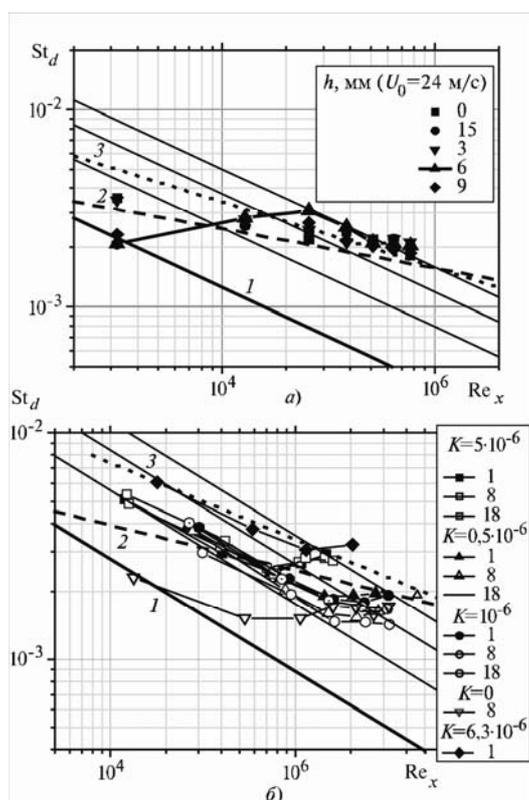


Рис. 3. Массообмен при наличии возмущающих факторов: а — без горения: влияние турбулизации и размеров преграды; б — с горением: влияние ускорения и турбулизации. Условия опытов приведены в таблице. Линии 1 и 2 относятся к массопереносу в ламинарном и турбулентном пограничных слоях. Линия 3 — обобщение [10] для массопереноса в области отрыва

Таким образом, наиболее вероятный верхний предел интенсивности массопереноса при вынужденной конвекции — это интенсивность в области отрыва, нижний предел — это массоперенос в ламинарном пограничном слое.

3.2. Структура течения

Развитие течения по длине канала показано на рис. 4 и 5. Здесь представлены количественные данные о неоднородностях в пограничном слое за ребром высотой $h=3$ мм, которые наблюдаются в плоскостях $Y-X$ (рис. 4) на оси канала, а также в плоско-

сти $Y-Z$ на выходе из канала (рис. 5). Две серии данных получены в разных условиях, т.к. продольные неоднородности более контрастно выделяются в сужающемся потоке, когда их подвижность в Z -направлении снижается. В опытах (рис.4) $U_0=10$ м/с, $Tu_0=8\%$, $K=0$, поле течения получено на основании измерений профилей в различных сечениях с шагом $\Delta x=32$ мм. В случае, представленном на рис.5, шаг $\Delta z = 5$ мм, скорость на входе в сужающийся канал $U_S=4$ м/с, $Tu_0=1\%$, $K=5 \cdot 10^{-6}$.

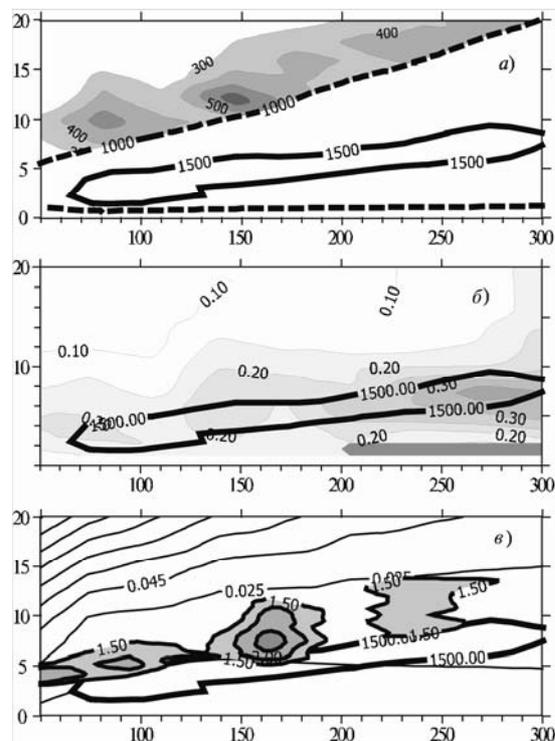


Рис. 4. Распределение пульсаций температуры (а), пульсаций скорости (б) и средней концентрации радикала ОН (в) в турбулизованном пограничном слое. $U_0 = 10$ м/с, $Tu_0 = 8\%$. Ось абсцисс соответствует продольной координате X

На рис. 4, а изотерма 1000 К (штрих) устанавливает пределы области с интенсивным сажеобразованием, которая ограничивает применимость метода рэлеевского рассеяния. Изотерма 1500 К — окрестность «фронта пламени». Из рис. 4, б видно, что амплитуда пульсаций скорости наибольшая во «фронте пламени». Семейство кривых на рис.4, в — линии тока (кг/(м·с)). Области серого цвета показывают распределение радикала ОН ($\times 10^{-16}$, $см^{-3}$). Линии тока пересекают изотермы. Как и в ламинарном пограничном слое [5], область определения гидроксила смещена в сторону окислителя.

Из рис. 4 и 5 следует, что в сложных условиях за препятствием формируются поперечные и продольные структуры. Поперечные структуры (в опытах рис. 4) по своим свойствам аналогичны областям присоединения, в которых повышенный уровень пульсаций скорости, температуры и концентрации гидроксила. Они ограничены в продольном направлении и вызывают местное возрастание скорости выгорания.

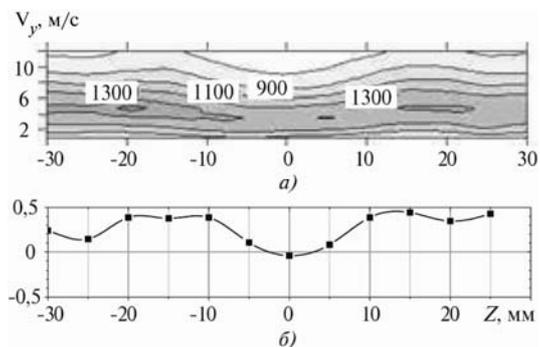


Рис. 5. Изотермы (верхний рисунок) на выходе из сужающегося канала в координатах Y - Z (Y – соответствует оси ординат). Неоднородности поля температур при $Tu_0 = 1\%$ и ускорении воздушного потока $K = 5 \cdot 10^{-6}$ коррелируют с изменениями поперечной компоненты скорости (рисунок внизу: измерения для $y = 8$ мм)

Протяжённость продольных структур в направлении X сопоставима с размерами канала. Прямые измерения поперечной скорости указывают на наличие вблизи оси канала парных вихрей с встречным вращением, рис. 5, б. С присутствием таких вихрей связана ламинаризация течения и теплообмена, когда $St_d \sim Re^{-0.5}$. По-видимому, одновременное существование продольных и поперечных структур вызывает двойственность поведения опытных данных, когда вместе с проявлением общей тенденции к турбулизации процессов переноса ($St_d \sim Re^{-0.2}$) они расслаиваются на дискретные уровни ламинаризованного массообмена ($St_d \sim \Psi_p Re^{-0.5}$, $\Psi_p = 2, 3, 4$). Совместным действием продольных и поперечных структур можно объяснить специфические ступенчатые изменения величины коэффициентов переноса на рис. 2 и 3.

ВЫВОДЫ

Получены количественные данные о влиянии внешних газодинамических возмущений на распределение параметров в пограничном слое, о влиянии турбулизации и ускорения на массоперенос в реагирующем пограничном слое. Показано, что при вынужденной конвекции интенсивность массообмена изменяется от значений, которые характерны для ламинарного пограничного слоя до уровня, который соответствует области отрыва. В турбулентном пограничном слое, как и в ламинарном пламени, положение максимумов гидроксила смещено относительно положения максимума температуры.

В пограничном слое за преградой обнаружены стационарные неоднородности в распределении пульсаций скорости, температуры и средней концентрации гидроксила. Они свидетельствуют в пользу существования за препятствием продольных и поперечных крупномасштабных структур. Поперечные структуры по своим свойствам близки к областям присоединения и вызывают местное увеличение интенсивности теплообмена. С про-

дольными структурами связана ламинаризация процессов переноса, когда $St \sim Re^{-0.5}$.

Таким образом, полученные данные показывают, что причина расслоения, при котором отмечается образование уровней интенсивности теплообмена и переходов между ними, связана с наличием в пограничном слое крупномасштабных структур. Результат воздействия структур – это повторяющаяся ламинаризация теплообмена. Эти выводы согласуются с данными [11] о возможном проявлении механизмов молекулярного переноса в развитом турбулентном течении при наличии в нём крупномасштабного движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blair M.F. Influence of free stream turbulence on turbulent boundary layer heat transfer and mean profile development. Part 2. Analysis of results // Trans. ASME. J. Cer C, 1983. 105. No.1. P. 41.
2. Kearly D.W., Moffat R.J., and Kays W.M. The turbulent boundary layer: experimental heat transfer with strong favorable pressure gradients and blowing. Report No. HMT-12, Stanford Univ., Thermoscience Div., Department of Mech. Eng. (1970)
3. Бояршинов Б.Ф., Волчков Э.П., Лукашов В.В. Теплообмен в ускоренном реагирующем пограничном слое // Докл. РАН. Т.350. № 6. 1996. С.763—765.
4. Бояршинов Б.Ф. Некоторые особенности тепло- и массопереноса при обтекании поверхности воздушным потоком // Прикл. механика и техн. физика. 2000. Т.41. №4. С.124—130.
5. Бояршинов Б.Ф., Федоров С.Ю. Измерение методом ЛИФ температуры и концентрации радикала ОН при горении водорода и этанола // Физика горения и взрыва. 2004. №5. С. 16—20.
6. Drake M.C., Pitz R.W., Lapp M., Fenimore C.P., Lucht R.P., Sweeney D.W., Laurendeau N.M. Measurements of superequilibrium hydroxyl concentrations in turbulent nonpremixed flames using saturated fluorescence // 20-th Intern. Symp. On Combust., the Combustion Institute, Pittsburgh: 1984. P. 327—335.
7. Бояршинов Б.Ф., Титков В.И. Влияние турбулентности набегающего потока на структуру пограничного слоя с диффузионным горением этанола // Прикл. механика и техн. физика. 2001. Т.42. № 6. С. 55—63.
8. Boyarshinov B.F., Fedorov S.Yu. Studying the distribution of radicals, heat and gas-dynamic characteristics within the boundary layer with combustion // Nonequilibrium Processes. Vol.1. Combustion and Detonation / [Ed. by G.D. Roy, S.M. Frolov, A.M. Starik]. Moscow: TORUS PRESS Ltd., 2005. 440 p.
9. Boyarshinov B.F. Analysis of Experimental Data on Heat and Mass Transfer in a Boundary Layer // Comb., Explos. and Shock Waves. 1998. Vol.34. No.2. P. 183—190.
10. 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.
11. Бродуэлл Дж.Э., Димотакис П.Э. Значение новых экспериментальных результатов для моделирования реакций в турбулентных потоках // Аэрокосмическая техника. 1987. №2. С. 42—47.