

УДК [535.371+536.526].001.5

О ГРАНИЦАХ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА МАССООБМЕНА ПРИ ГОРЕНИИ ЭТАНОЛА НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЕНКАХ ЗА РЕБРОМ И ЗА УСТУПОМ

Б. Ф. Бояршинов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, boyar@itp.nsc.ru

Исследовался массоперенос в пограничном слое за ребром и за обратным уступом при горении испаряющегося этанола на верхней и на нижней горизонтальных стенках канала. Показано, что для каждой преграды существует два значения скорости воздушного потока, при которых происходит срыв пламени. Для обратного уступа высотой 3 мм два критических режима горения реализуются вблизи границ области ламинарно-турбулентного перехода. Для ребра и для уступа срыв пламени при низкой скорости обтекания (≈ 6 м/с) возможен при приближении или отклонении от режима ламинарного массопереноса. При повышенной скорости воздушного потока (≈ 19 м/с в опытах с обратным уступом) срыв пламени связан с изменением механизма массопереноса в переходном на турбулентный.

Ключевые слова: массоперенос, срыв пламени, ламинарно-турбулентный переход, горение, пограничный слой.

DOI 10.15372/FGV20150401

ВВЕДЕНИЕ

В пограничном слое существует три основных вида течения — ламинарное, переходное и турбулентное. Границы переходного течения и его свойства зависят от условий обтекания стенки, в частности от степени турбулентности воздушного потока Tu (отношение среднеквадратичной пульсационной скорости к средней скорости потока). Принято считать, что естественный переход [1, 2] происходит при $Tu < 0.5\%$, байпасный переход [3] — при $Tu > 0.5\%$. Третья разновидность перехода развивается за областью отрыва пограничного слоя [4]. При проектировании летательных аппаратов важно знать локализацию ламинарного и турбулентного течения. В энергетическом оборудовании, в отличие от авиации, чаще встречается промежуточный, т. е. переходный, режим трения и тепло- и массообмена.

В работе [5] с использованием интегральных соотношений пограничного слоя рассматривались все три режима течения. Для переходной области в зависимости от внешних условий теплоотдача могла быть представлена серией кривых. Отмечалось, что предложенный подход применим, если известны числа

Рейнольдса начала Re_1 и конца Re_2 ламинарно-турбулентного перехода. При $Re_1 < Re < Re_2$ коэффициенты ламинарного и турбулентного переносов отличаются в 1.5–2 раза, поэтому погрешность определения границ переходной области приводит к значительной ошибке в расчетах интенсивности тепло- и массообмена.

При отсутствии горения, когда нужно определить Re_1 , возникают затруднения даже в канонических задачах обтекания плоской стенки потоком с низкой турбулентностью. Изучение устойчивости ламинарного пограничного слоя, возникновения волн Толлмина — Шлихтинга и развития турбулентности — это традиционное направление механики сплошной среды. Состояние вопроса можно найти в обзорах [6, 7]. В численных расчетах ламинарно-турбулентного перехода в каналах разного сечения использовалась модель турбулентной вязкости [8], в которой число Re_1 определялось эмпирической зависимостью. По данным [9] начало перехода может сместиться вниз по потоку, так как зависит от условий на входе в канал. В широком (1:12) прямоугольном канале с параболическим профилем скорости на входе границы переходной области сближаются ($Re_1 \approx Re_2$) и при $Re \approx 10^4$ коэффициент трения может измениться скачком практически в три раза. Подобные расчеты основаны на использовании SST-модели турбулентности,

Работа выполнена в рамках интеграционного проекта СО РАН № 24.

© Бояршинов Б. Ф., 2015.

в которой переход моделировался собственным дифференциальным уравнением переноса перемежаемости [10].

При байпасном ламинарно-турбулентном переходе исключается линейная стадия, в которой развиваются волны Толлмина — Шлихтинга, а турбулизация псевдоламинарного пограничного слоя происходит за счет проникновения в него внешних возмущений. Такой переход часто описывают с применением модели [11], основанной на введении понятия «кинетическая энергия пульсаций в ламинарном пограничном слое». Важно отметить, что восстановление пограничного слоя к турбулентному состоянию протекает чрезвычайно медленно [3].

Если пограничный слой развивается за отрывом, то однозначная зависимость интенсивности тепло- и массообмена от числа Рейнольдса нарушается и возможен разброс опытных данных. Известны экспериментальные исследования [12], в которых при поворотах сопла, когда возникал отрыв потока, в опытных данных по теплообмену для переходной области течения отмечалось образование «уровней» интенсивности переноса тепла. Одному и тому же числу Рейнольдса соответствовало несколько значений коэффициентов переноса.

Подобное «расслоение» характерно для пограничного слоя с горением за преградой [13]. В работе [14] скорость выгорания этанола «расслаивалась», отклоняясь от расчетной зависимости для ламинарного массопереноса в два и три раза. Отрыв потока в начале пограничного слоя создавался либо ребром, либо обратным уступом высотой до 7 мм. Степень турбулентности воздуха достигала 26 %, а скорость воздуха увеличивалась до срыва пламени. Независимо от типа преграды и газодинамических свойств набегающего потока массоперенос оставался переходным во всей области горения. Режим турбулентного массопереноса в таком пограничном слое не был достигнут. В переходной области отмечались «следы» предыдущей (ламинарной) стадии массообмена. Диффузионные числа Стантона $St_d = J_w / \rho_0 U_0 \Delta C$, характеризующие интенсивность переноса вещества (скорость выгорания), обобщены зависимостью, в которой показатель степени характерен для ламинарного пограничного слоя: $St_d \approx \psi Re_x^{-0.5}$. Здесь множитель $\psi = 1, 2, 3, \dots$ используется для описания расслоения интенсивности массопереноса на «уровни», J_w [кг/м²/с] — поток этанола на стенке, отнесен-

ный к потоку воздуха $\rho_0 U_0$ и разности массовых концентраций этанола на стенке и в воздухе $\Delta C = C_w - C_0$. Число Рейнольдса по продольной координате $Re_x = x \rho_0 U_0 / \mu_0$, μ — динамическая вязкость.

По мнению авторов [15], причиной расширения переходной области массообмена могло быть наличие продольных структур в пламени. Газодинамические образования, протяженность которых сопоставима с длиной канала, препятствовали хаотизации течения и затягивали ламинарно-турбулентный переход. Измерения полей температуры и поперечной скорости, выполненные лазерным доплеровским анемометром, показали, что продольные структуры представляют собой парные вихри со встречным вращением. Продольные крупномасштабные вихри, подобные тем, что образуются за преградами, отмечались в целом ряде других случаев движения газа по искривленным траекториям [16, 17].

Причиной образования крупномасштабных структур может быть проявление смешанной конвекции. Известно [18], что при обтекании верхней поверхности нагретой пластины или нижней поверхности охлаждаемой стенки поток становится неустойчивым. В нем образуются продольные вихри (шнуры), оси которых параллельны основному потоку и периодически расположены вдоль поверхности. В работе [19] отмечалось, что по мере развития течения над нагретой горизонтальной стенкой силы Архимеда могут вызвать отрыв пограничного слоя. Очевидно, что подобное осложнение тепло- и массопереноса наиболее вероятно при горении над горизонтальной поверхностью испаряющегося горючего. Таким образом, существует достаточно оснований для образования крупномасштабных структур, которые затягивают ламинарно-турбулентный переход, а также для проявления плавучести в пограничном слое с горением. Важно знать, в каких пределах, при каких скоростях обтекания существует такой пограничный слой, от чего зависят эти пределы.

В работе [20] при численном исследовании пограничного слоя с горением использовалась k - ε -модель, модифицированная для низких чисел Рейнольдса. Получены данные о трении в ламинарном, переходном и турбулентном режимах течения при вдуве со стенки газообразного водорода в поток воздуха. Отмечено существенное затягивание ламинарно-

турбулентного перехода, который происходил при $Re_x = (3 \div 5) \cdot 10^6$, что на порядок больше, чем при отсутствии горения. Образование структур, срыв пламени и проявление плавучести в подобных расчетах не рассматривались, поэтому имеет смысл продолжать накопление и обобщение эмпирической информации.

В экспериментах [14] было показано, что за обратным уступом срыв происходит раньше, чем за ребром. Срывы пламени имели место при сравнительно высокой скорости, $U_b \approx 25 \div 70$ м/с. Известны исследования [21–23], в которых рассматривался срыв пламени при $U_b < 7$ м/с. В наших экспериментах также отмечалось, что при $U_b = 5 \div 7$ м/с передняя кромка пламени может внезапно отсоединиться от стабилизатора. На $1 \div 2$ с она задерживается на расстоянии $100 \div 150$ мм от входа в канал, а затем уносится воздушным потоком. Такой срыв легко преодолевается при непрерывном увеличении скорости. Учитывая эти наблюдения и данные [21–23], можно сделать вывод, что наряду с высокоскоростным срывом есть срыв низкоскоростной.

Знание пределов по скорости, в которых существует химически реагирующий пограничный слой, кроме прикладного, имеет значение для понимания особенностей взаимодействия турбулентности и горения. Существуют различные точки зрения на природу срыва горения. Авторы работы [24] полагают, что определяющую роль в устойчивости диффузионного пламени при стабилизации уступом играют газодинамические свойства газового потока за преградой. Невозможно исключить влияние факторов, обусловленных особенностями химической кинетики и процессов теплопереноса. Влияние тепло- и массообмена на горение также может быть весьма существенным и вызывать погасание пламени. Конкуренция между тепловыделением и интенсивным отводом тепла из зоны горения исследовалась при изучении пределов распространения пламени в узких каналах [25].

Из обзора представленных исследований следует, что горение испаряющейся жидкости за преградой происходит в переходном режиме массообмена. Факторы, определяющие границы переходного режима в пограничном слое с химическими превращениями, не выявлены. Область существования горения ограничена ситуациями срыва пламени при низкой и повышенной скорости воздуха (нижний и верхний

пределы). Чтобы изучить, какова связь между массопереносом и явлениями срыва, необходимо располагать данными о потоках вещества в режимах, которые близки к срыву, в том числе в режиме низкоскоростного срыва пламени, когда скорость воздуха уменьшена до $2 \div 3$ м/с. Это невозможно осуществить при горении «на полу» из-за отрыва пограничного слоя вследствие проявления плавучести. В работах [26–28] для исключения отрыва опыты проводили при вдуве газообразного горючего сквозь проницаемую верхнюю стенку прямоугольного канала, т. е. исследовалось горение в пограничном слое «на потолке». Очевидно, чтобы изучить массоперенос во всей области существования горения, необходим объект с четко заданными граничными условиями, а также преграда, которая понижает скорость срыва на верхнем пределе. По данным [15] такой преградой может быть обратный уступ.

Цель работы состоит в анализе связи между срывами пламени и массопереносом в пограничном слое. Для этого предполагается получить данные о скорости срыва пламени за ребром и за обратным уступом, в том числе при горении испаряющегося этанола «на потолке», когда исключен отрыв пограничного слоя из-за плавучести. Предполагается исследовать массоперенос под испаряющейся поверхностью жидкого горючего, когда для режимов, близких к границам области существования пламени, хорошо известны концентрация горючего и температура стенки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Горение вблизи плоских горизонтальных поверхностей жидкого топлива исследовалось в аэродинамической трубе [14, 15] с рабочим участком прямоугольного сечения 100×100 мм длиной 700 мм (рис. 1). Степень турбулентности воздушного потока комнатной температуры составляла $Tu = 1$ %. Рабочий участок, непосредственно состыкованный с конфузуром (степень поджатия 6.8), обеспечивал наиболее благоприятные условия для наблюдения за горением на нижней горизонтальной стенке канала, т. е. «на полу» при отсутствии верхней стенки.

При изучении тепло- и массообмена «на потолке» верхняя горизонтальная поверхность рабочего участка была образована четырьмя пористыми пластинами размеров 80×80 мм

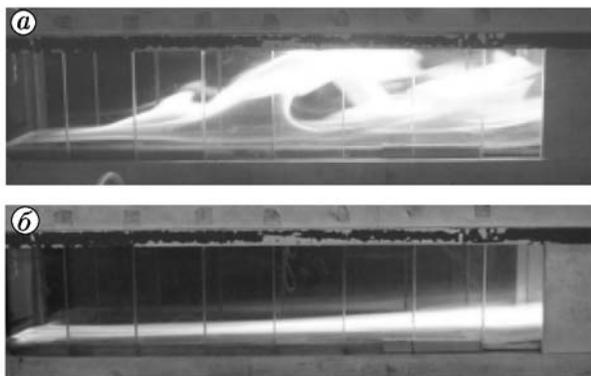


Рис. 1. Внешний вид пламени при горении этанола «на полу» за уступом:

верхняя стенка канала отсутствует, воздушный поток слева направо; *a* — скорость обтекания 2.5 м/с (отрыв, как проявление плаучести), *b* — скорость воздуха 10 м/с

(толщина $10 \div 15$ мм, пористость $\approx 60\%$), изготовленными спеканием шариков из нержавеющей стали. Верхняя поверхность конфузора была покрыта второй стенкой, которая повторяла ее контур и могла отклоняться от него. На входе в канал эта подвижная стенка имела поперечный участок, вместе с которым образовывала уступ переменной высоты $h < 7$ мм. На рис. 2 показано поперечное сечение рабочего участка при проведении опытов с горением этанола «на потолке». Нижняя стенка канала отсутствовала, под проточной частью рабочего участка 11 на всю его длину располагались поддон с водой 13 и фотоаппаратура 12 для регистрации структур в пограничном слое при горении «на потолке». Прозрачные боковые стенки 1, составленные из набора кварцевых пластин 3, были дополнены продольными зеркалами 2 для наблюдения за пламенем 5 и за степенью увлажнения пористых пластин. Зона горения по всей длине канала ограничивалась ребрами 4, выступающими за плоскость пористых пластин на 10 мм.

Для заполнения этанолом каждая пористая пластина 6 откачивалась через вентиль 7, который в ходе опытов был закрыт. Отсутствие воздуха в полости над пористыми пластинами и в магистрали 8 контролировалось, благодаря прозрачным элементам топливной системы. В заправленном состоянии пролив этанола исключался, если его уровень в поплавковой камере 10 совпадал с плоскостью пластин. Как и в опытах с горением «на полу», постоянное увлажнение пористых пластин

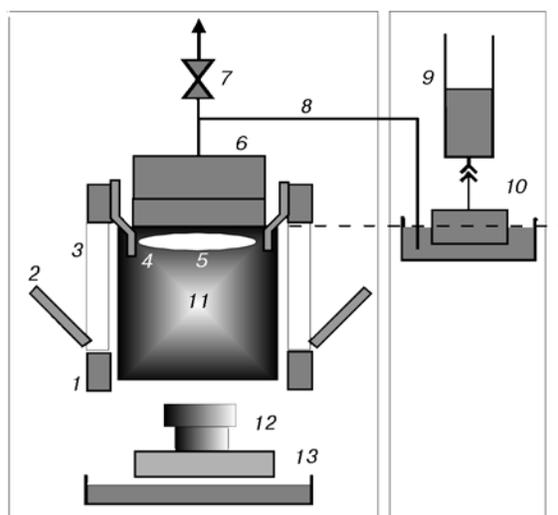


Рис. 2. Схема топливной системы и поперечное сечение рабочего участка при изучении горения жидкого топлива «на потолке»:

1 — съемная боковая стенка, 2 — продольное зеркало, 3 — окно, 4 — ограничительное ребро, 5 — пламя, 6 — вставка с пористой стенкой, 7 — вентиль, 8 — топливопровод, 9 — мерный сосуд, 10 — поплавковая камера с игольчатым клапаном, 11 — проточная часть канала, 12 — фотоаппаратура, 13 — защитный поддон

обеспечивалось смещением и подбором положения поплавковой камеры с игольчатым клапаном. Поверхность этанола поджигалась открытым пламенем при пониженной скорости обтекания. Затем скорость воздуха увеличивалась, а необходимый ее уровень задавался по измерениям полного давления трубкой Пито — Прандтля на входе в канал.

Расход этанола для каждой пористой пластины определялся по изменению его уровня в мерных сосудах 9, погрешность измерений не хуже 10 %.

Тепловые условия на поверхности испаряющегося этанола, консервативные к условиям обтекания, сохранялись такими же, как в работе [14] в опытах «на полу» ($T_w = 341 \pm 1$ К), что соответствует массовой концентрации этанола $C_w = 0.8$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Испытания показали, что при горении «на потолке» допустимо уменьшение скорости воздуха до 0.5 м/с без отрыва пограничного слоя. При таком уровне скоростей пламя приобретает вид ячеек (рис. 3, *a*), которые движутся

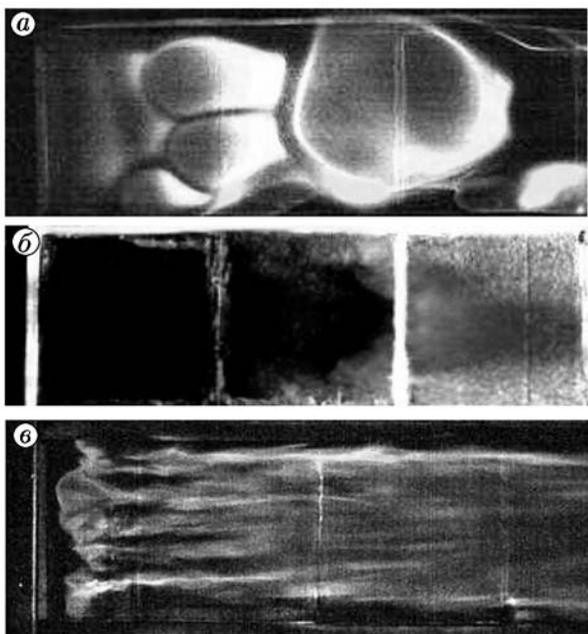


Рис. 3. Внешний вид пламени при увеличении скорости:

уступ 3 мм, горение «на потолке», воздушный поток движется слева направо; *a* — образование ячеек в замедленном движении (0.5 м/с), выдержка 1/200 с, *b* — срыв на низкой скорости (6 м/с), *v* — высокоскоростной срыв (20 м/с); камера Canon EOS 1000D, выдержка 1/400 с

вниз по потоку, сливаются, увеличивая свой размер. Образование ячеек и концентрических колец наблюдалось в опытах [28] с нисходящим вдувом газовой смеси (этан с азотом) сквозь пористую стенку. По нашим данным ячейки исчезают при увеличении скорости воздуха $U_0 > 1$ м/с и пламя приобретает вид гладкой тонкой неподвижной поверхности (не показано). Если $U_0 \approx 6$ м/с, возможен низкоскоростной (нижний) срыв пламени (рис. 3, *b*). Пламя отсоединяется от преграды, его передняя кромка колеблется, а затем уносится вниз по потоку в соответствии с представлениями [21] о срыве горения испаряющейся жидкости. На рис. 3, *v* представлена фотография пламени перед высокоскоростным (верхним) срывом ($U_0 \approx 20$ м/с). Видно, что при горении за уступом «на потолке» на режимах, близких к высокоскоростному срыву, проявляются продольные вихри (жгуты) и разрывы между ними. После срыва горение может продолжаться в ограниченной области за преградой.

В работе [14] описан вариант срыва пламени «на полу», когда происходит «обращение»

областей с горением. Пламя присоединяется к преграде перед срывом, а после срыва горение сохраняется непосредственно за преградой в пределах $10 \div 15$ мм и отсутствует в пограничном слое. До срыва локализация пламени была обратной.

На рис. 4 показана зависимость скорости срыва пламени от высоты ребра и обратного уступа при горении испаряющегося этанола. Представлены данные для верхнего и нижнего срывов при горении «на полу» и «на потолке». Скорость срыва пламени (треугольники) не зависит от того, на какой горизонтальной поверхности (над нижней или под верхней) происходит горение. Верхняя скорость срыва за ребром $h = 3$ мм значительно превосходит верхнюю скорость срыва пламени за обратным уступом такой же высоты. Нижняя скорость срыва (ромбики) для $h < 5$ мм в пределах погрешности проведенных оценок (± 1 м/с) не зависит от преграды и от направления вектора силы тяжести.

Из рис. 4 следует, что удержать переднюю кромку пламени этанола без применения стабилизаторов ($h = 0$ мм) нельзя, если скорость воздуха больше $4 \div 5$ м/с. Чтобы сравнить результаты исследования массообмена с известными данными [29], имеет смысл рассматривать горение за преградами высотой 3 мм. Исследовать массообмен за ребром вблизи верхнего срыва затруднительно из-за высокого уровня скорости воздуха. При изучении массопереноса за обратным уступом диапазон скоростей

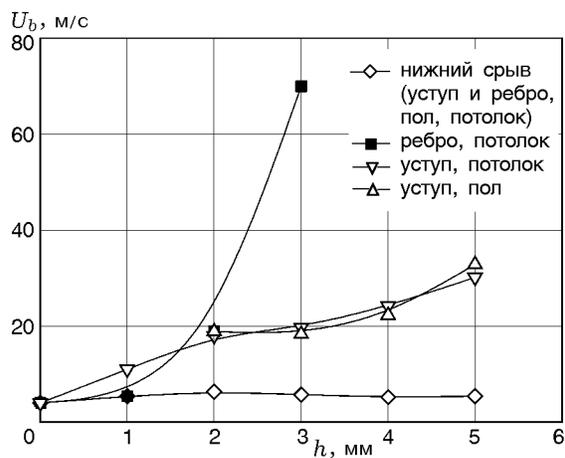


Рис. 4. Зависимость скорости срыва пламени от высоты преграды при горении испаряющегося этанола за ребром и за обратным уступом в потоке воздуха с турбулентностью 1 %

ограничивается значениями вблизи 19 м/с, а в опытах «на потолке» становятся доступными режимы безотрывного обтекания на предельно низких скоростях.

На рис. 5 показана скорость выгорания этанола $St_d(Re_x, Sc)$. Данные получены при исследовании горения этанола на горизонтальных поверхностях за ребром (рис. 5,а) и за уступом (рис. 5,б) высотой 3 мм. Для проведения их анализа в первом приближении предлагается использовать сетку известных закономерностей массопереноса. Линия 1 представляет расчет для «стандартного» закона ламинарного массообмена без вдува паров горючего:

$$St_d = 0.332 Re_x^{-0.5} Sc^{-0.66}. \quad (1)$$

Здесь $Sc = \mu/\rho D$ — число Шмидта (D — коэффициент диффузии). Линии 2 и 3 отража-

ют расслоение данных для потоков за отрывом и на криволинейных поверхностях. Из работы [13]

$$St_d = 0.332 \psi Re_x^{-0.5} Sc^{-0.66}, \quad (2)$$

где $\psi = 2$ и 3 соответственно. Линия 4 соответствует «стандартному» турбулентному массообмену:

$$St_d = 0.028 Re_x^{-0.2} Sc^{-0.6}. \quad (3)$$

Из рис. 5,а видно, что при горении «на потолке», если скорость обтекания мала (светлые треугольники), опытные данные соответствуют расчету (1) для «стандартного» ламинарного массообмена на непроницаемой стенке (линия 1). Это означает, что вдув, как механизм переноса, на испаряющейся поверхности отсутствует. При увеличении скорости измеренные потоки вещества (темные треугольники) сближаются с общей зависимостью для переходных течений (линия 2), содержащих продольные структуры. Темными квадратами показаны измерения в опытах «на полу». Тенденция к переходу на кривую 4, которая описывает турбулентный массообмен, не проявляется. Влияние плавучести сильное в том смысле, что при горении «на потолке», когда исключается отрыв, при $Re_x < 50\,000$ происходит двукратное снижение скорости выгорания.

На рис. 5,б показаны данные по интенсивности массопереноса в опытах с уступом, когда горение происходит «на потолке». Из четырех пластин рассматриваются только две внутренние для исключения возможных проявлений концевых эффектов. Видно, что все данные располагаются между линиями 1 и 4, т. е. относятся к переходной области. Они расслаиваются, и нет однозначной связи с числом Рейнольдса.

Чтобы обнаружить тенденцию к сближению с известными закономерностями (1)–(3), измерения проводили с шагом по скорости воздуха $\Delta U_0 \approx 2$ м/с. Видно, что при $U_0 = 2$ и 4 м/с числа Стантона близки к линии 1. При $U_0 = 8$ и 10 м/с данные по скорости выгорания сближаются с линией 2. На последующих шагах одновременно достигается турбулентный массообмен (линия 4) и происходит высокоскоростной срыв пламени (по данным рис. 4, $U_b \approx 19$ м/с). Из рис. 5,б также видно, что опытные данные по массообмену при $U_0 =$

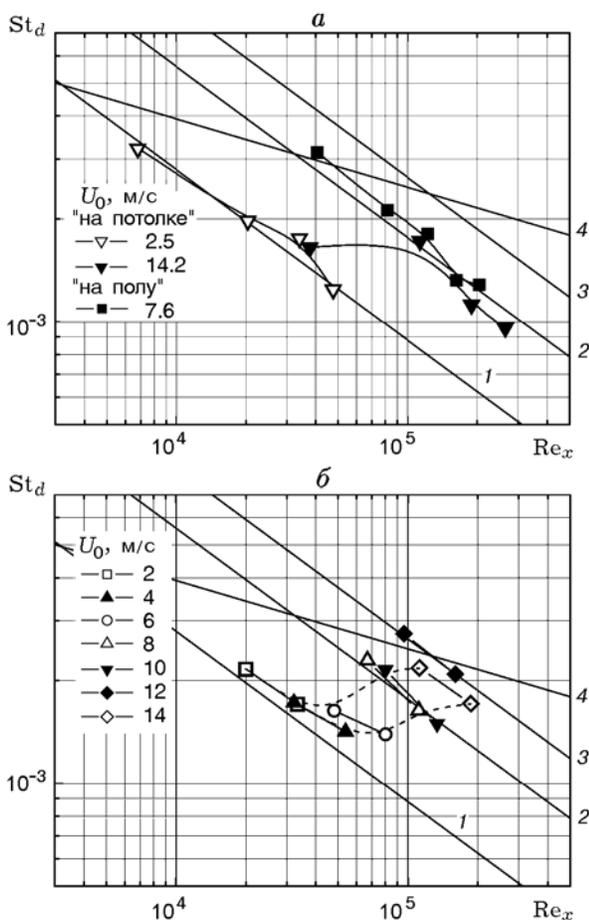


Рис. 5. Интенсивность массопереноса при горении этанола на горизонтальных поверхностях за преградами высотой 3 мм:

а — за ребром «на полу» и «на потолке», б — за уступом «на потолке»

6 м/с (низкоскоростной срыв, рис. 4) соответствуют отклонению от расчета для ламинарного массопереноса. Такая особенность пограничного слоя дает основание для вывода о том, что начало и конец переходного массообмена при горении отмечены срывами пламени, а область турбулентного массообмена либо крайне ограничена, либо не существует вовсе.

ОБСУЖДЕНИЕ

В пограничном слое с химическими и фазовыми превращениями представлен целый спектр различных проявлений объемных и массовых сил. Потoki вещества на стенке отражают действие молекулярного и конвективного тепло- и массопереноса, а также радиационного теплообмена. Известны работы [20], в которых для описания массообмена при горении жидкостей и описания горения газов, вдуваемых со стенки, используются одинаковые подходы. Это не вполне корректно, так как из рис. 5 следует, что в этих двух ситуациях действуют разные механизмы переноса. В самоподдерживающемся режиме испарения и горения жидкости потоки вещества описываются закономерностями, которые близки к наблюдаемым в «стандартном» пограничном слое на непроницаемой стенке, т. е. без вдува.

Срыв пламени происходит по разным причинам (влияние газодинамики, химической кинетики, теплообмена). За каждой из них стоит целое направление в теории горения. В настоящей работе рассматривалось влияние массопереноса, который имеет место в ламинарной, а также в переходной области и сопровождается целым рядом особенностей. В их числе расслоение опытных данных как проявление признаков предыдущей (ламинарной) стадии переноса в последующем переходном режиме, а также ограниченность или полное отсутствие режима турбулентного тепло- и массообмена.

Полученные данные имеют значение с точки зрения методики проведения исследований переходного режима тепло- и массопереноса. На рис. 5, б штриховыми линиями соединены данные для $x = \text{const}$, $U_0 = \text{var}$, сплошными линиями — данные, отражающие развитие течения по длине: $U_0 = \text{const}$, $x = \text{var}$. В первом случае, при использовании единственного датчика с фиксированной координатой, получается обычная кривая переходного процесса (или серия кривых, как отмечено в работе

[5]). Во втором случае, при использовании системы датчиков, расположенных вдоль потока [12], получен разброс опытных данных в области ламинарно-турбулентного перехода.

Горение, как физико-химический процесс, протекает при взаимодействии молекул (а не объемов газа — «молей»). Возможно, что в этом состоит главная причина отсутствия турбулентного массопереноса, которая проявилась в настоящей работе и в данных по диффузионному горению жидкости [14, 15]. Если газодинамика становится определяющим механизмом переноса, происходит срыв пламени. Соотношение между характерными временами конкурирующих процессов дается числом Дамкёлера $Da = \tau_{ph} / \tau_{ch}$ (здесь приведено отношение характерных времен физического и химического взаимодействия). Для горения критическая ситуация наступает при $Da \approx 1$. В рассматриваемом случае, когда срыв пламени совпадает с границами ламинарно-турбулентного перехода, в число Дамкёлера, по-видимому, могут входить характерные времена молекулярного и конвективного (турбулентного) массопереноса.

ВЫВОДЫ

В работе [15] впервые было проведено экспериментальное исследование горения жидкости «на потолке» с целью оценить влияние сил плавучести на массообмен и на структуру течения. В настоящей работе продолжено изучение особенностей пограничного слоя с горением. Очевидно, что общность выводов ограничена условиями, в которых проведены опыты. Кроме того, данные о потоках вещества на стенке рассматривались вне зависимости от структуры пограничного слоя.

Простые сопоставления горения «на полу» и «на потолке», за ребром и за обратным уступом, сравнение данных по срыву пламени и по массопереносу вблизи срыва показали:

— в пограничном слое за ребром и за обратным уступом при горении испаряющегося этанола на горизонтальных стенках канала существует два уровня скорости воздушного потока, при которых происходит срыв пламени;

— срывы пламени имеют место вблизи начала и конца переходной области массообмена. Для обратного уступа высотой 3 мм срыв на высокой скорости (≈ 19 м/с) связан с изменением механизма массообмена с переходного на турбулентный. При низкой скорости обтекания

(≈ 6 м/с) возможен срыв при приближении или отклонении от ламинарного массопереноса;

— режим турбулентного массопереноса отсутствует при диффузионном горении этанола за ребром и за уступом на горизонтальных поверхностях;

— при горении жидкого этанола в пограничном слое «на потолке» закономерности массопереноса соответствуют обтеканию непроницаемой стенки, когда с ее поверхности нет конвективного вдува паров горючего.

Автор признателен коллегам С. Ю. Федорову и Р. Х. Абдрахманову за помощь в подготовке материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поляков Н. Ф. Ламинарный пограничный слой в условиях «естественного» перехода к турбулентному течению // Развитие возмущений в пограничном слое. — Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1979. — С. 23–67.
2. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Возникновение турбулентности в пограничном слое. — Новосибирск: Наука, 1982.
3. Дыбан Е. П., Эпик Э. Я. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизованных потоков. — Киев: Наук. думка, 1985.
4. Терехов В. И., Ярыгина Н. И., Жданов Р. Ф. Особенности течения и теплообмена при отрыве турбулентного потока за уступом и ребром. 2. Теплообмен в отрывном течении // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 4. — С. 83–94.
5. Зысина-Моложен Л. М. Приближенный метод расчета теплового пограничного слоя // Журн. техн. физ. — 1959. — Т. 29, № 5. — С. 632–639.
6. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974.
7. Грек Г. Р., Козлов В. В., Чернорай В. Г. Гидродинамическая неустойчивость пограничных слоев и отрывных течений (современное состояние исследований) // Успехи механики. — 2005. — Т. 3, № 4. — С. 3–40.
8. Себеси Т., Брэдшоу П. Конвективный теплообмен. — М.: Мир, 1987.
9. Minkowycz W. J., Abraham J. P., Sparrow E. M. Numerical simulation of laminar breakdown and subsequent intermittent and turbulent flow in parallel-plate channels: Effects of inlet velocity profile and turbulence intensity // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2009. — V. 52. — P. 4040–4046.
10. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Turbulence, Heat and Mass Transfer 4: Proc. of the Fourth Intern. Symp. on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Antalya, Turkey, 12–17 October, 2003.
11. Walters D. K., Cokljat D. A three-equation eddy-viscosity model for Reynolds-Averaged Navier — Stokes simulations of transitional flow // Trans. ASME, J. of Fluids Eng. — 2008. — V. 130, N 12.
12. Зайковский В. Н., Трофимов В. М. Расслоение турбулентного теплообмена на дискретные уровни при акустическом взаимодействии в сверхзвуковом канале // Теплофизика высоких температур. — Т. 34, № 3. — 1996. — С. 413–418.
13. Бояршинов Б. Ф. К анализу опытных данных по тепло- и массопереносу в пограничном слое // Физика горения и взрыва. — 1998. — Т. 34, № 2. — С. 73–81.
14. 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.
15. Бояршинов Б. Ф., Федоров С. Ю. Тепло- и массоперенос и стабилизация горения в пограничном слое за ребром и за уступом // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 3–7.
16. Запругаев В. И., Киселев Н. П., Павлов А. А. Влияние кривизны линий тока на интенсивность продольных вихрей в слое смешения сверхзвуковых струй // ПМТФ. — 2004. — Т. 45, № 3. — С. 32–43.
17. Маккормак, Уилкер, Келхер. Вихри Тейлора — Гертлера и их влияние на теплообмен // Теплопередача. — 1970. — Т. 92, № 2. — С. 106–118.
18. Петухов Б. С., Поляков А. Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. — М.: Наука, 1986.
19. Чжэнь, Спэрроу, Мукоглу. Смешанная конвекция в пограничном слое на горизонтальной пластине // Теплопередача. Сер. С. — 1977. — Т. 99, № 1. — С. 70–76.
20. Волчков Э. П., Терехов В. В., Федоров С. Ю., Бояршинов Б. Ф. Пограничный слой с горением на проницаемой поверхности // Законы горения / под общ. ред. Ю. В. Полежаева. — М.: Энергомаш, 2006. — С. 63–90.
21. Ярин А. Л. О срыве пламени горячей жидкости воздушным потоком // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 1. — С. 3–12.
22. Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения. — М.: Химия, 1977.
23. Rohmat N. A., Katoh H., Obara T., Yoshibashi T., Ohyagi S. Diffusion flame stabilized on porous plate in a parallel airstream // AIAA J. — 1998. — V. 36, N 11. — P. 1945–1952.
24. Coats C. M., Richardson A. P. Nonpremixed combustion in turbulent mixing layers. Pt 1: Flame characteristics // Combust. Flame. — 2000. — V. 122. — P. 253–270.

25. **Zamashchikov V. V.** An investigation of gas combustion in a narrow tube // *Combust. Sci. Technol.* — 2001. — V. 166. — P. 1–14.
26. **Wooldridge C. E., Muzzy R. J.** Measurements in a turbulent boundary layer with porous wall injection and combustion // *Tenth Symp. (Intern.) on Combustion.* — Pittsburgh: The Combustion Inst., 1965. — P. 1351–1362.
27. **Джонс, Изааксон, Врик.** Турбулентный пограничный слой при наличии подвода массы, горения и градиента давления // *Ракет. техника и космонавтика.* — 1971. — Т. 9, № 9. — С. 122–129.
28. **Orloff L., De Ris J.** Cellular and turbulent ceiling fires // *Combust. Flame.* — 1972. — V. 18. — P. 389–401.
29. **База данных по характеристикам турбулентного пограничного слоя с химическими и фазовыми превращениями.** — http://www.itp.nsc.ru/Laboratory/LAB_2_1/Flame/First%20page.html.

*Поступила в редакцию 11/II 2014 г.,
в окончательном варианте — 2/IV 2014 г.*