

УДК. 536.461:661.98

## ПРИСТЕННЫЕ ТЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ РЕАГИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ. ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В. В. Лукашов<sup>1</sup>, В. В. Терехов<sup>2</sup>, В. И. Терехов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

<sup>2</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, vt@itp.nsc.ru

Представлен обзор современного состояния исследований аэродинамики и тепло- и массопереноса в пристенных реагирующих потоках при вдуве или испарении топлива со стенки. Рассмотрены ламинарные и турбулентные режимы течения при дозвуковых скоростях потока. Проанализировано влияние большого количества факторов на структуру течения, тепло- и массоперенос, стабильность горения.

Ключевые слова: пристенные течения, тепло- и массоперенос, горение, турбулентность, испарение, пористый вдув, фронт пламени, зажигание и погасание пламени.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов тепло- и массообмена в пограничном слое при наличии фазовых и химических превращений играет важную роль в совершенствовании рабочего процесса различных энергетических установок. Развитие теоретических и экспериментальных методов изучения структуры течения и процессов переноса стимулируется прежде всего потребностями инженерной практики. В то же время подобные задачи чрезвычайно интересны и сложны с точки зрения понимания фундаментальных основ взаимодействия турбулентности и горения, кинетики химического реагирования и наличия сопряженных процессов тепло- и массопереноса.

Вдув химически реагирующих веществ через проницаемую поверхность представляет собой самостоятельное и важное направление теории гомогенного горения, поскольку по подобному механизму происходит горение жидких и твердых топлив, а также разрушение теплозащитных покрытий. В этом случае продукты испарения, пиролиза или разложения вдуваются в пограничный слой и догорают в газовой фазе в потоке обтекающего окислителя. Образующийся фронт пламени является источником тепловыделения и продуктов сгорания, которые диффундируют к поверхности и во

внешнюю область пограничного слоя. Таким образом, картина процесса горения топлива, а также аблирующих теплозащитных покрытий подобна течению в пограничном слое со вдувом горючего через пористую поверхность (рис. 1). В предельном случае, когда фронт реакции располагается на поверхности, реализуется режим гетерогенного горения. Следует отметить, что горение может происходить как перед передней кромкой пластины, обтекаемой потоком, так и существенно ниже по течению, что обусловлено интенсивностью смешения реагентов, а также, в зависимости от интенсивности вдува, скоростями смешения и химического реагирования и геометрией течения. При этом могут наблюдаться различные конфигурации пламени.

Процессы горения в пристенных течениях весьма сложны, что обусловлено взаимодействием большого количества газодинамических, тепловых и диффузионных параметров. Проведение моделирования в таких условиях требует совместного решения динамической, тепловой и диффузионной задач с учетом уравнений химической кинетики, переменности теплофизических свойств, многокомпо-

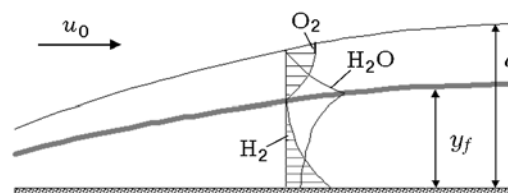


Рис. 1. Схема течения в пограничном слое с горением

Работа выполнена (В. В. Лукашов, В. В. Терехов) при поддержке гранта Правительства РФ (№ 11.G34.31.0046, ведущий ученый К. Ханьялич), а также Российского научного фонда (В. И. Терехов) (№ 14-19-00402).

© Лукашов В. В., Терехов В. В., Терехов В. И., 2015.

нентной диффузии и других факторов. Всё это делает точное решение задачи проблематичным, а имеющиеся модельные представления, содержащие множество допущений, должны быть тщательно экспериментально обоснованы.

Исследованию пограничных слоев с горением посвящено большое число работ, результаты которых обобщены в ряде монографий [1–4]. Однако опубликованные данные весьма противоречивы. Так, например, результаты опытов по тепло- и массообмену при горении в пограничном слое отличаются более чем на порядок [5], что соответственно требует более глубокого анализа и постановки новых расчетных и экспериментальных исследований.

Слабоизученной является турбулентная структура пристенных течений с горением. Это затрудняет понимание механизма взаимодействия турбулентности и горения, что, в свою очередь, сдерживает создание новых теоретических моделей, адекватно отражающих процессы турбулентного переноса в реагирующих потоках.

С момента выхода последнего обзора [6], посвященного анализу состояния исследований пристенных реагирующих течений, прошло более десяти лет. В этот период появилось много новых работ, в которых изучались различные аспекты пристенных течений при наличии вдува и горения. Рассмотрению именно этих последних достижений посвящен настоящий обзор. Вместе с тем, для полноты картины происходящих процессов в работе также кратко представлены основополагающие результаты, которые были получены ранее и не потеряли своей значимости и актуальности до настоящего времени.

В данном обзоре анализируется современное состояние как теоретических, так и экспериментальных исследований пристенных потоков со вдувом химически реагирующих веществ. Не представляется возможным в рамках одного обзора остановиться на большом числе аспектов данной многофакторной проблемы. К таковым можно отнести изучение детальной химической кинетики, влияние числа Льюиса на диффузионный перенос, взаимодействие переноса излучения с пламенем и многие другие. Детальное исследование этих процессов важно для горения как неперемешанных газов, так и топливных смесей, а также рассматриваемого нами случая вдува через пористую стенку ре-

агирующего вещества. Подробная информация по данным проблемам изложена в серии недавних обзоров и статей [7–11]. С перспективами развития теории турбулентного горения и возможностей новых методов экспериментальной диагностики можно ознакомиться в работах [12–14].

Основное внимание в настоящей работе уделено анализу современного состояния и перспективам исследования процессов тепло- и массопереноса и структуры течения в пограничных слоях с горением. Главной целью работы было показать как имеющиеся в данной области противоречия, так и общие закономерности, обнаруженные различными исследователями, и соответственно дать, где это представляется возможным, анализ особенностей тепло- и массопереноса в такого рода течениях.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ С ГОРЕНИЕМ

Анализ пристенных течений со вдувом и горением, как уже было указано выше, представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому при проведении моделирования важную роль играет разработка всевозможных приближений и упрощающих принципов. Одним из наиболее распространенных подходов является использование приближения пограничного слоя. Оно справедливо при больших числах Рейнольдса, при умеренных вдувах и градиентах давления и в отсутствие отрыва потока. При этом уравнения газовой динамики существенно упрощаются, приобретая параболический характер [15]. В одной из первых работ, использовавших такой подход [16], рассмотрена задача о тепло- и массообмене при испарении и горении на испаряющейся плоской поверхности, обтекаемой потоком окислителя. В работе [17] проведено обобщение данного подхода, указаны погрешности, вызываемые приближением пограничного слоя, и определены диапазоны, в которых оно справедливо.

Асимптотический подход к решению задачи о пограничном слое с фронтом горения позволяет достаточно просто и наглядно проанализировать влияние различных факторов на основные характеристики процессов переноса — тепло- и массообмен, профили скорости и температуры, состав и т. п. Это направление развивалось в работах [18–22].

Аналогичный подход использован в работе [23] для анализа процессов тепло- и массопереноса при горении в свободно- и вынужденно-конвективном ламинарном пограничном слое. Показано, что в первом случае расстояние от фронта пламени до стенки вдоль пластины меняется как  $y_f \sim x^{1/4}$ , тогда как во втором — как  $y_f \sim x^{1/2}$ . Особенно эффективны асимптотические методы при использовании диффузионных моделей химического реагирования и, в частности, классической модели Шваба — Зельдовича [24, 25].

Однако данные модели имеют ряд существенных недостатков, в частности, авторами [17, 26] указаны особенности формирования пламени в окрестности передней кромки пластины, где приближение пограничного слоя несправедливо.

Тем не менее, для оценочных расчетов диффузионная модель фронта пламени совместно с асимптотической теорией турбулентности дает приемлемые для инженерной практики результаты.

Детальный обзор современного состояния подходов к математическому моделированию течений с горением можно найти в [27–30].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ С ГОРЕНИЕМ

Прежде всего, отметим ограниченность экспериментальной информации о структуре реагирующих пограничных слоев и процессах тепло- и массопереноса. Газодинамическая структура пограничных слоев с пористым вдувом газов при отсутствии химических превращений исследована достаточно основательно [31, 32], в то время как число работ по изучению структуры слоев при наличии горения невелико, при этом диапазон параметров вдува ограничен. Объясняется это сложностью проведения исследований в условиях высокого уровня температуры, излучения и химических превращений, а также необходимостью комплексного измерения полей скорости, температуры «замороженного» состава, тепло- и массообмена и турбулентных характеристик. Отсутствие опытных данных по какому-либо параметру существенно осложняет анализ и обобщение результатов. Этим недостатком обладает большинство имеющихся в литературе исследований, число которых также ограничено [33–39].

Детальное описание современных подходов к экспериментальному изучению реагирующих течений изложено в [40, 41].

### 2.1. Определение режимов стабильного горения в пограничном слое

Одним из важнейших факторов при изучении горения является определение условий существования стационарного режима горения и параметров потока, при которых наступает погасание пламени.

Одно из первых исследований условий стабилизации и погасания пламени в конвективном пограничном слое при различных числах Дамкёлера проведено в работе [42]. В работе [43] выполнено численное моделирование (уравнения Навье — Стокса и химической кинетики) пламени в окрестности передней кромки пластины в зависимости от скорости набегающего потока и концентрации кислорода в нем. В [44] численно исследовалось горение в пограничном слое при условиях опытов [26], что позволило оценить влияние силы тяжести на развитие пограничного слоя с горением. Влияние потерь тепла излучением в рамках модели оптически тонкой среды на теплоперенос в реагирующем пристенном течении изучалось в работе [45].

Исследованиям условий погасания пламени в пограничном слое, образующемся при обтекании поверхности жидкого топлива, посвящены работы [46, 47]. В этих работах на основе теоретического анализа установлено, что погасание пламени в пограничном слое происходит по мере увеличения скорости набегающего потока, при этом фронт пламени приближается к стенке и смещается вниз по потоку. В работе [48] показано, что при вдуве топлива в пограничный слой картина в общем не изменяется: пропорциональное увеличение интенсивности вдува при росте скорости набегающего потока сохраняет картину течения, так что величина относительного вдува (расход топлива, отнесенный к расходу окислителя) оказывается определяющей. В этой работе установлены диапазоны интенсивности вдува и его теплофизических свойств (путем разбавления водорода негорючими газами), при которых пламя в пограничном слое гаснет (рис. 2). Кроме того, в [46] и [48] с использованием подхода Шваба — Зельдовича разработаны модели погасания пламени, предсказывающие смещение области горения вниз по потоку в зависимости

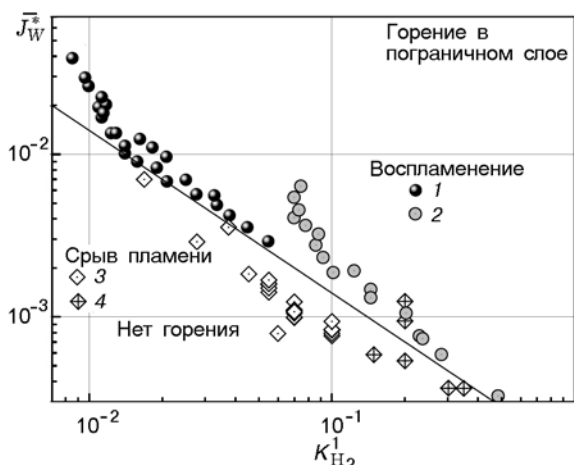


Рис. 2. Диаграмма диапазонов стабильного горения в пограничном слое [48]:

$\bar{J}_W^*$  — безразмерный массовый поток топливной смеси, при котором пламя погасает,  $K_{H_2}^1$  — массовая доля водорода во вдуваемой смеси; 1 и 3 — эксперименты со вдувом смеси  $H_2/N_2$ , 2 и 4 — смеси  $H_2/He$ , линия — теоретическая зависимость

от скорости набегающего потока: в ламинарном режиме течения  $x^* \sim u_0$ , тогда как в турбулентном  $x^* \sim u_0^4$ .

В работе [49] экспериментально изучались условия погасания пламени в пограничном слое, образующемся при обтекании пористого цилиндра, через поверхность которого проводился вдув топлива. Скорость обтекания, при которой пламя погасало, оказалась обратно пропорциональна концентрации топлива в топливной смеси. Такая же закономерность следует из анализа, проведенного в [48].

Исследования [50, 51] посвящены определению зависимости скорости набегающего потока, при которой наступает погасание пламени над поверхностью испаряющегося этанола, от интенсивности внешней турбулентности. По результатам измерений в [51] сделан довольно неожиданный вывод: с увеличением степени турбулентности обтекающего пластину потока скорость, при которой наблюдалось погасание пламени, снижается.

Некоторые способы пассивной стабилизации пламени в пограничном слое рассматривались в работе [52]. В ней проведено сопоставление условий погасания пламени при размещении перед пористой пластиной преград различной геометрии. Авторы [52] отмечают довольно сложную взаимосвязь скорости, при которой наступает погасание, и геометрии преграды. В

[53] изучались различные конфигурации пламени в зависимости от числа Дамкёлера и высоты обращенной против потока ступеньки, установленной перед поверхностью жидкого топлива, обтекаемой потоком окислителя. При достаточно большой высоте преграды пламя располагается за ней и влияние числа Дамкёлера незначительно. При малой высоте преграды пламя располагается выше нее и оказывается весьма чувствительным к изменению числа Дамкёлера, тогда как параметр Сполдинга, характеризующий интенсивность испарения топлива, слабо влияет на стабилизацию пламени.

Работы [54–57] посвящены изучению различных способов тушения пламени в пограничном слое. Так, в работе [54] исследовано горение пропана, вдуваемого в поток за ступенькой, обращенной против потока, и тушение его при помощи дополнительного вдува фреона. В [55] проанализировано влияние аэрозольного потока (частицы воды в потоке воздуха) на горение поверхности полиметилметакрилата. В [56] экспериментально изучалось тушение пламени керосина, метана и этана при добавлении  $CF_3Br$  (хладон 1301) в поток воздуха, исследовалось течение за ступеньками различной геометрии. В рассмотренном случае, в отличие от пограничного слоя со вдувом, механизм тушения объясняется уменьшением числа Дамкёлера до критического значения. В работе [57] показано, что эффективным методом гашения пламени является использование мелкодисперсного водного тумана. Работы данного направления приобретают всё большую практическую значимость в вопросах выработки эффективных методов борьбы с пожарами.

## 2.2. Исследование структуры пограничного слоя с фронтом горения

Имеющиеся экспериментальные исследования отличаются большим многообразием используемых горючих газов (метан [1, 33, 58], пропан [34, 59], *n*-гексан [1], смесь водорода с инертными газами [48, 60–62]), жидкостей (метанол [1, 33], этанол [5, 51, 63]) и твердых топлив [55]. Различной является и геометрия обтекаемых поверхностей: пористый цилиндр, обтекаемый в продольном направлении; прямоугольные каналы, через одну из стенок которых инжестировалось горючее или его имитатор, причем каналы отличались конструктивно — с длинным предвключенным динамическим участком [61, 62], с открытой верхней

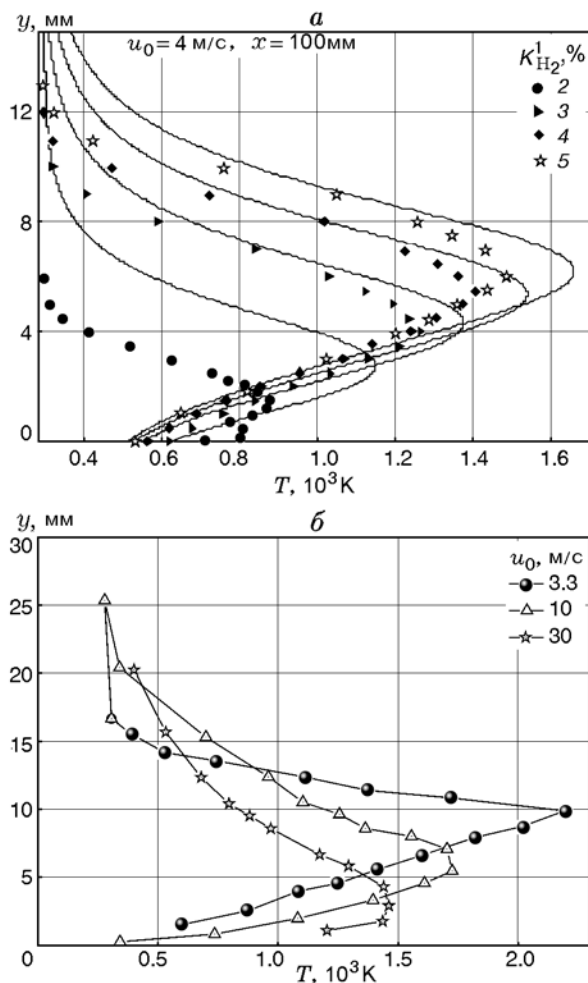


Рис. 3. Профили температуры в ламинарном пограничном слое при вдуве и горении водородоазотной смеси (а) и в турбулентном пограничном слое при испарении и горении этанола (б)

крышкой [5] для исключения продольного градиента давления потока, с наложенным продольным градиентом давления [60, 63].

Все отмеченные особенности постановки экспериментальных исследований затрудняют обобщение опытных данных и выявление общих закономерностей влияния горения на структуру пограничного слоя. Не имея достаточно полной экспериментальной информации о средних и особенно турбулентных характеристиках течения, проанализируем наиболее характерные особенности, которые подтверждаются результатами измерений различных исследователей.

Распределение температуры по толщине пограничного слоя дает важную информацию

о структуре пограничного слоя с горением. На рис. 3 в качестве примера приведены экспериментальные распределения температуры при горении водородоазотной смеси, вдуваемой через пористую поверхность в ламинарный пограничный слой [48] (рис. 3,а), и температуры в турбулентном пограничном слое на испаряющейся поверхности этанола [64] (рис. 3,б). Наблюдается развитие пограничного слоя вдоль пластины, приводящее к тому, что фронт пламени удаляется от пластины, а его температура возрастает. Существенным отличием случаев вдува и испарения является распределение температуры поверхности. В первом случае поверхность может разогреваться до достаточно высокой температуры и она снижается вниз по потоку (по мере удаления фронта пламени от стенки), тогда как во втором случае температура испаряющейся поверхности практически постоянна по длине и не превышает температуру кипения. Среднеквадратичные пульсации температуры по оценочным опытным данным [64] и измерениям [62] могут превышать  $200 \div 500 \text{ K}$ , а значения пульсаций относительно температуры в низкотемпературных областях пограничного слоя (во внешней и пристеночной зонах) могут достигать 200 % и более.

Распределение концентрации веществ по толщине пограничного слоя с горением этанола демонстрирует рис. 4 по данным, заимствованным из работы [64]. Для ламинарного режима (рис. 4,а) фронт пламени (штриховая линия) совпадает с максимальными значениями концентрации продуктов сгорания ( $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ ). Это обстоятельство, как и профиль температуры, свидетельствует в пользу диффузионного механизма горения при ламинарном режиме. Однако в области между стенкой и фронтом пламени как в ламинарном, так и в турбулентном режиме (рис. 4,б) образуются промежуточные продукты — оксид углерода и уксусный альдегид  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ . По данным работы [1] в этой области наблюдается многостадийность химических превращений и для ее расчета необходимо воспользоваться двух- или многофронтальными моделями.

Основным вкладом, который вносит в пограничный слой фронт тепловыделения, является сильное уменьшение плотности смеси газов по всей толщине пограничного слоя и особенно в зоне фронта пламени. Как видно из рис. 4,в, плотность во фронте ниже, чем в основном потоке, примерно в шесть раз. Это яв-

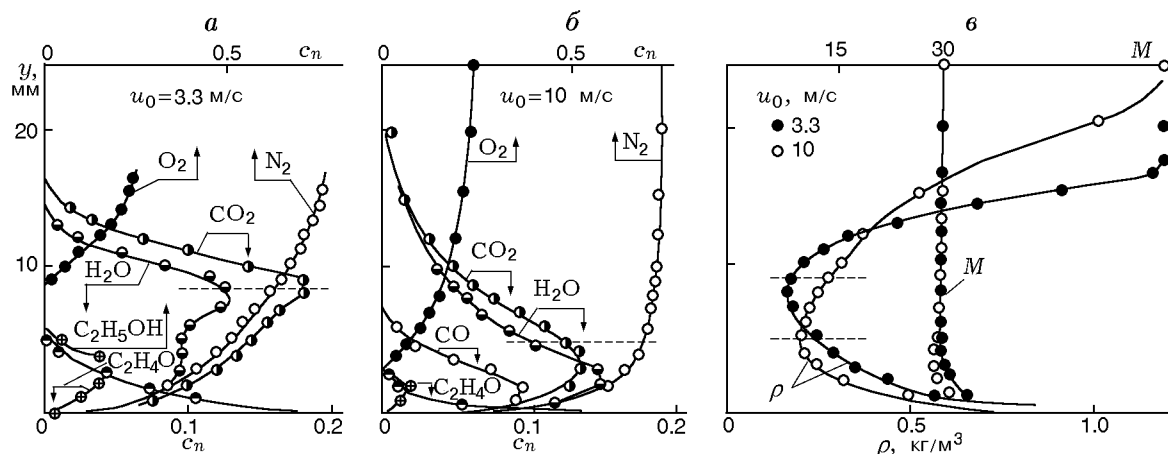


Рис. 4. Профили концентрации (а, б) и плотности (в) в ламинарном (а) и турбулентном (б) пограничном слое [64]

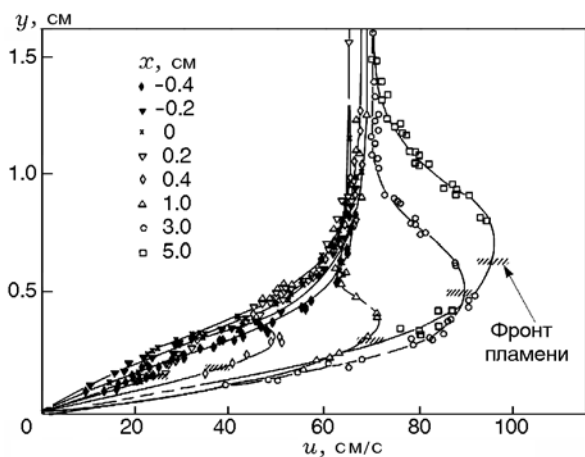


Рис. 5. Профили скорости в ламинарном пограничном слое с горением [58]:

приведены различные сечения  $x$  по длине,  $x < 0$  соответствует непроницаемому предвключенному участку

ляется принципиальным моментом при формировании течения и тепло- и массообмена в потоках с экзотермическими реакциями. При этом молекулярная масса смеси, за исключением области, непосредственно прилегающей к стенке, остается практически постоянной и близкой к молекулярной массе воздуха. Это связано с тем, что при горении углеводородов в воздухе определяющий вклад в состав смеси вносит инертный азот, а влияние на молекулярную массу смеси других веществ может взаимно компенсироваться. Этот результат представляется важным для построения теоретических моделей процессов переноса в погранич-

ных слоях с горением.

При опытном изучении аэродинамической структуры ламинарных пламен обнаружено [58, 65, 66], что в зоне тепловыделения за счет уменьшения плотности локальные градиенты давления определяют одну из особенностей пограничного слоя с диффузионным горением — локальное ускорение потока в области фронта пламени. Типичная картина полей скорости, заимствованная из работы [58], показана на рис. 5. Как видно, локальный максимум скорости может существенно превышать скорость в ядре потока, а его величина и местоположение зависят от скорости вдува горючего и продольного градиента давления.

Как показано в работе [66] (рис. 6), продольный отрицательный градиент давления усиливает эффект локального ускорения потока во фронте пламени, но существует он, как видно из того же рисунка, и при нулевом и положительном градиентах давления.

Опыты [58] показали, что влияние локального ускорения заметно на большом удалении от передней кромки пластины в ламинарном пограничном слое. В экспериментах [62] эффект локального ускорения потока был замечен и в турбулентном пограничном слое (рис. 7). В то же время в [67] получено, что «прострел» наблюдается только при малых скоростях обтекания. В [68] авторы обращают внимание, что в опытах [67], в силу конструктивных особенностей, существенное влияние могла оказать отрывная зона, формирующаяся на передней кромки пластины.

В турбулентных пламенах формирование

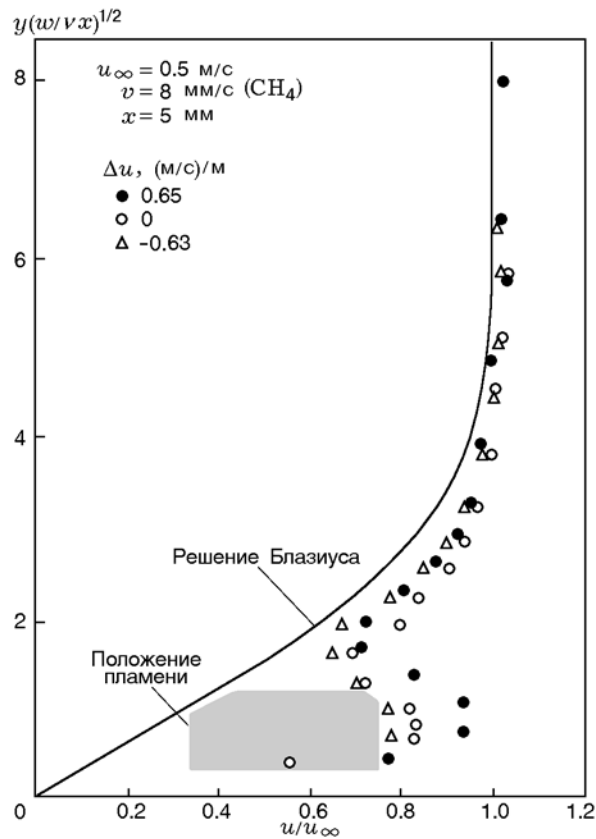


Рис. 6. Аэродинамика пограничного слоя с горением под воздействием продольного градиента давления [65] ( $\Delta u$  — параметр градиента давления)

структуры течения осложнено воздействием многих факторов, в том числе и эффектами ламинаризации за счет тепловыделения, собственно влиянием инжектирования вещества через пористую стенку, а также турбулизацией течения во фронте пламени [62]. В этом можно убедиться, обратившись к рис. 7, где показаны экспериментальные профили [62] средней скорости и продольной компоненты турбулентных пульсаций при горении азотодородной смеси и при отсутствии горения. Опыты были проведены при очень больших параметрах вдува ( $J_W/\rho_0 u_0 \approx 0.01$ ), а пористой пластине предшествовал длинный предвключенный непроницаемый участок. Рис. 7, а соответствует началу развития пограничного слоя ( $x = 60$  мм). Если профили осредненных скоростей при горении и без горения практически мало отличаются друг от друга, то среднеквадратичные турбулентные пульсации при горении существенно (почти в два раза) ниже, чем без горения. Это говорит о ламинаризации течения за счет теп-

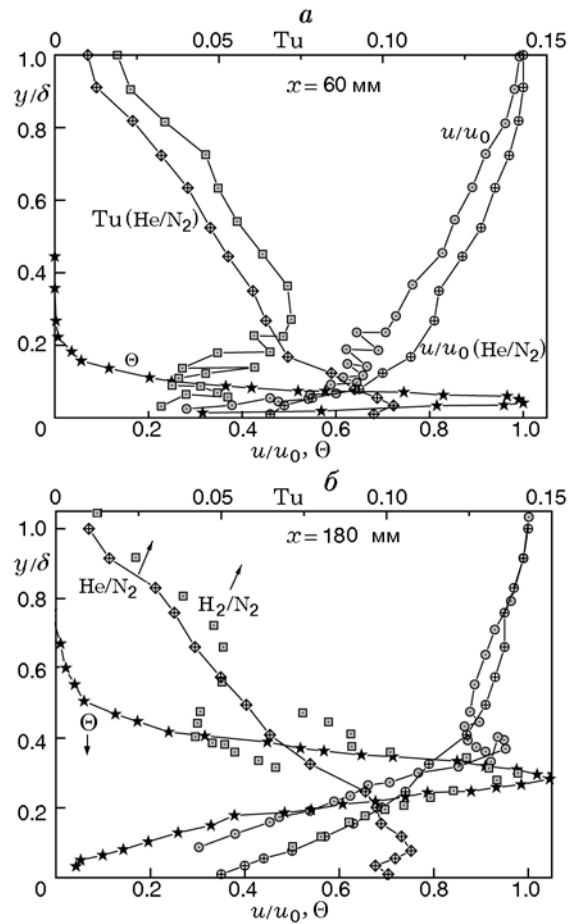


Рис. 7. Распределения средней и пульсационной составляющих продольной скорости в двух сечениях турбулентного пограничного слоя по данным опытов [62]. Сопоставление реагирующего (сплошные линии) и инертного (пунктирные) потоков

ловыделения, зона которого в данных экспериментах располагалась вблизи стенки. По этой причине в распределении турбулентных пульсаций наблюдается двойной максимум.

По мере удаления от начала пограничного слоя происходит постепенная турбулизация течения за счет неустойчивости фронта пламени [69]. Это наглядно следует из данных рис. 7, б, полученных на расстоянии  $x = 180$  мм. Теперь уже при горении уровень турбулентности становится выше, чем в отсутствие горения, а наличие продольного благоприятного градиента давления (течение в канале) приводит к появлению перегиба и локального ускорения в профиле продольной скорости.

В работе [70] проведено детальное численное исследование влияния различных факто-

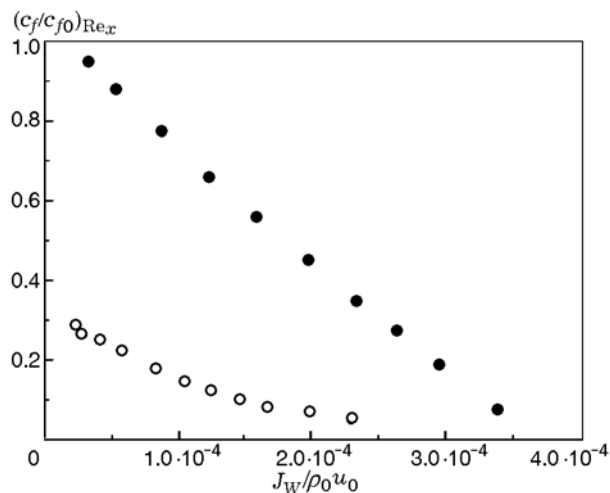


Рис. 8. Зависимость относительного коэффициента трения от интенсивности вдува [70]: темные точки — вдув водорода без горения, светлые — с горением

ров на сопротивление трения в пограничном слое. Отдельно изучены течения в турбулентном режиме при вдуве топлива без горения и с горением. Авторами показано, что и горение, и вдув существенно снижают сопротивление трения (рис. 8). Видно, что совместное воздействие вдува и горения (светлые точки) оказывается гораздо более сильным, особенно в области небольших вдувов. Это объясняется тем, что при малых вдувах фронт пламени располагается непосредственно в окрестности стенки и влияние тепловыделения (т. е. снижения плотности обтекающей пластину потока) на пристенные процессы при этом максимально. В случае больших вдувов фронт пламени удаляется от стенки, его воздействие на стенку снижается и основной вклад в снижение трения уже вносит вдув. На рис. 8 наблюдается некоторое сближение кривых при вдуве инертного газа и при горении в области больших поперечных потоков массы на стенке.

Влияние ускорения потока на структуру потока в реагирующем пограничном слое исследовалось в работах [60, 62, 66, 71]. Отрицательный градиент давления оказывает сильное влияние на распределение скоростей в пограничном слое. В целом картина напоминает перестройку структуры течения в ламинарных пламенах, однако в турбулентных режимах взаимодействие турбулентности, горения и инерционных сил значительно сложнее. К числу неожиданных можно отнести результаты

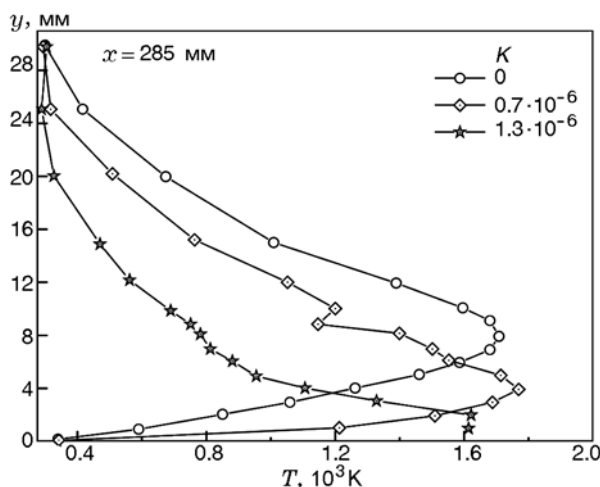


Рис. 9. Экспериментальные данные [63] по профилям температуры в безградиентном и ускоренном турбулентном пограничном слое:  $K = (\nu/u_\infty^2)(du_\infty/dx)$  — параметр Кейса (параметр ускорения потока)

[63] по влиянию ускорения и горения на теплообмен. Известно [72], что ускорение потока приводит к снижению интенсивности теплообмена, а при достаточно сильном ускорении возможна ламинаризация течения. Вдув и горение также снижают теплоотдачу. Наложение продольного отрицательного градиента давления на пограничный слой с горением, наоборот, приводит к существенному росту теплообмена. В работе [63] экспериментально показано, что ускорение потока может более чем на порядок интенсифицировать теплоотдачу. Одной из возможных причин этого явления авторы [63] называют деформацию профиля скоростей, а также тот факт, что фронт пламени приближается к стенке по мере роста ускорения потока (рис. 9). Об этом же свидетельствуют и расчетные данные работы [73].

### 2.3. Тепло- и массоперенос в пограничном слое с горением

Один из важных вопросов теории пограничного слоя — анализ подобия процессов переноса импульса, энергии и вещества. Как отмечалось выше, уравнения переноса энергии и вещества, записанные для полных энтальпий и концентраций химических элементов, не содержат источников членов и по форме совпадают с уравнением сохранения импульса. Для подобных граничных условий при  $Pr = Sc = 1$



должна выполняться тройная аналогия Рейнольдса [74].

Очевидно, что эта аналогия имеет границы применимости, установить их из имеющихся сейчас экспериментальных данных не представляется возможным. К сожалению, отсутствие полных данных не позволило провести такой анализ для большинства экспериментальных работ.

Тем не менее в настоящее время проводится детальное изучение подобия процессов тепло- и массопереноса при горении. Так, авторы [75] указывают, что правильный учет коэффициентов переноса весьма важен при моделировании горения водорода и углеводородных топлив, поскольку наблюдается большое различие их значений для радикалов Н, молекул  $H_2$  и остальных компонентов смеси. Это приводит к повышенному диффузионному переносу последних [76], что, в свою очередь, может приводить к температурам во фронте горения, превышающим адиабатическую температуру сгорания исходного топлива [76, 77]. Подавление этого переноса снижает температуру пламени и, как следствие, количество образующихся оксидов азота [75].

В работе [78] экспериментально и численно исследовалось диффузионное горение водорода в пограничном слое с целью выявить влияние избирательной диффузии на процессы тепло- и массопереноса в пристенных течениях и условия, в которых справедливо предположение о подобии процессов тепло- и массообмена.

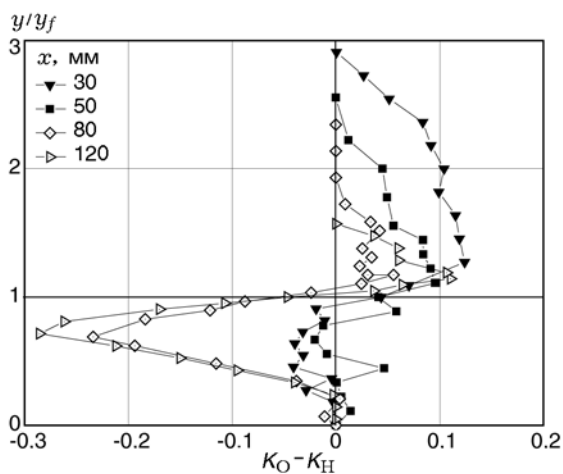


Рис. 10. Распределение разности безразмерных атомарных концентраций по толщине пограничного слоя [78]

Степень различия в диффузионном переносе топлива и окислителя оценивалась по разности безразмерных атомных концентраций водорода и кислорода, представленной на рис. 10. На основании полученных данных можно сделать вывод о заметном нарушении подобия при оттеснении потока от стенки. Однако авторы [78] отмечают важный результат, полученный при обобщении экспериментальных данных и результатов численного моделирования, — близость к нулю значений  $\overline{K}_O - \overline{K}_H$  в окрестности фронта пламени ( $y/y_f \approx 1$ ) во всех исследованных режимах.

Работа [17] посвящена численному исследованию ламинарного пограничного слоя с испарением и горением метанола в условиях опытов [33]. Несмотря на то, что получено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных по распределению температур, численные результаты по массовым потокам горючего оказались в 1.4 раза завышены по сравнению с экспериментом. Основной причиной такого расхождения авторы считают конденсацию паров воды на поверхности жидкого топлива.

В работах [74, 79] экспериментально и численно проанализировано влияние различных факторов на величину локального и среднего по длине пластины тепловых потоков. Показано, что в распределении теплового потока вдоль пластины наблюдается максимум (рис. 11). Наличие максимального локального теплового потока (рис. 11,а) авторы объясняют особенностями течения вблизи передней кромки пластины, где концентрация вдуваемого топлива мала для обеспечения стабильного горения, и оттеснением пограничного слоя и, соответственно, фронта пламени от стенки, что приводит к существенному снижению теплообмена, а в предельных случаях (например, критического вдува) и к его отсутствию. Аналогично, максимум среднего по длине теплового потока в зависимости от интенсивности вдува топлива (рис. 11,б) обусловлен тем, что при малых его расходах горение невозможно, а при больших наступает оттеснение пограничного слоя.

Еще одним важным фактором, зачастую сопутствующим горению при испарении или вдуве как в экспериментальных установках, так и в реальных энергетических устройствах, является наличие динамической предыстории течения. Изучению влияния длины непроницаемого предвключенного участка на структуру течения, тепло- и массоперенос посвящена ра-

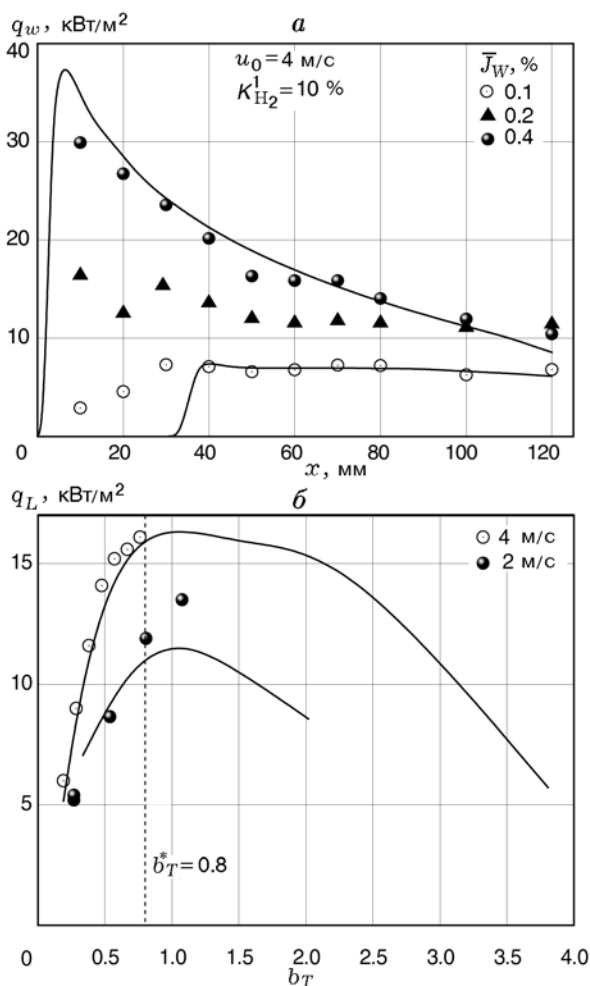


Рис. 11. Распределение теплового потока по длине пластины (а) и среднего теплового потока в зависимости от интенсивности вдува водородоазотной смеси (б) согласно данным [74, 79]:

линии — результаты численного моделирования, точки — эксперимент,  $b_T$  — тепловой параметр проницаемости

бота [80]. В ней проведено численное моделирование течения в ламинарном пограничном слое на пористой пластине со вдувом и горением при различной длине непроницаемой предвключенной секции. Показано, что динамическая предыстория оказывает меньшее влияние на теплообмен и трение в пограничном слое с горением, чем в нереагирующем течении. При этом в обоих случаях влияние динамической предыстории на теплообмен существенно слабее, чем на трение (рис. 12).

Пристенные реагирующие течения, как правило, развиваются в условиях повышенной

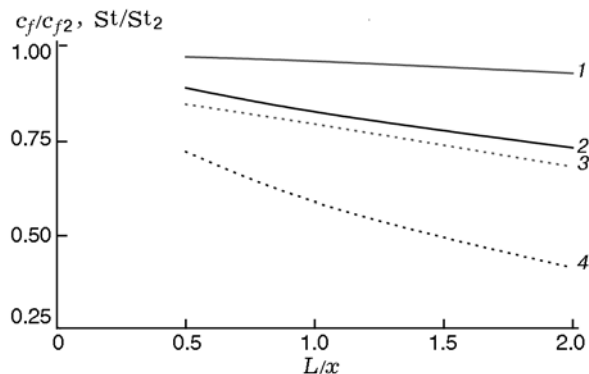


Рис. 12. Влияние длины предвключенного участка на трение (линии 3, 4) и теплообмен (линии 1, 2) при вдуве (линии 2, 4) и горении (линии 1, 3) в ламинарном пограничном слое при наличии предвключенного участка длиной  $L$ :

$c_f/c_{f2}$ ,  $St/St_2$  — отношение коэффициентов трения и чисел Стэнтона к аналогичным величинам в случае отсутствия предвключенного участка

турбулентности набегающего потока. Несмотря на большую научную и практическую важность этой проблемы, количество работ по влиянию уровня турбулентности на пограничный слой с горением крайне ограничено [51, 81, 82]. Механизм воздействия высокой турбулентности набегающего потока еще окончательно не выяснен для нереагирующих течений. Естественно, что картина значительно усложняется при наличии в пограничном слое вдува и горения. В цитируемых экспериментальных работах процесс изучения усложнен еще и тем, что на входе в рабочий участок непосредственно перед пористыми пластинами располагался стабилизатор пламени (ребро) различной высоты. В итоге совокупность всех факторов приводила к чрезвычайно сложному аэродинамическому и тепловому процессу с образованием локальных минимумов и максимумов тепло- и массоотдачи, а также поля турбулентных пульсаций. Отметим, что влияние высокой турбулентности на структуру отрывного течения является в настоящее время предметом интенсивных исследований [83, 84] и даже для этих более простых по сравнению с реагирующим пограничным слоем условий многие проблемы остаются невыясненными.

Внешняя турбулентность кардинально влияет на скорость срыва пламени. Это следует из данных [51], представленных на рис. 13 в виде зависимости скорости срыва пламени

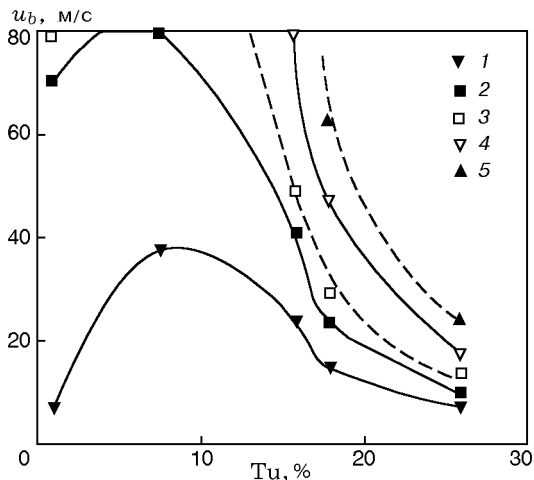


Рис. 13. Зависимости скорости набегающего потока, при которой наступает погасание пламени, от интенсивности турбулентности [51]: высота ребра стабилизатора пламени  $h$ : 1 — 2 мм, 2 — 3 мм, 3 — 6 мм, 4 — 9 мм, 5 — 15 мм

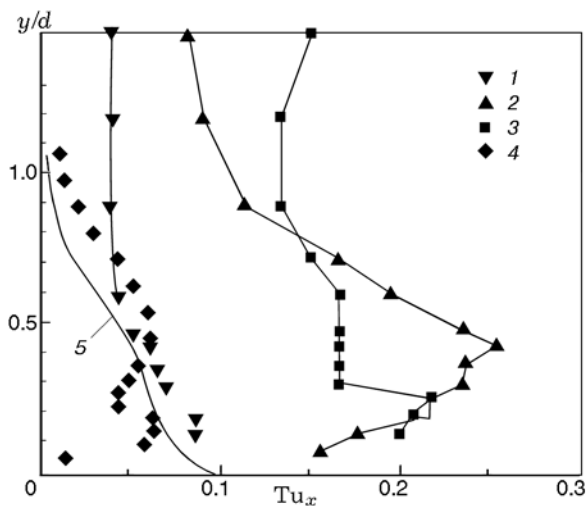


Рис. 14. Профили турбулентных пульсаций в реагирующем пограничном слое при различных интенсивностях турбулентности набегающего потока [51, 82]:

1 —  $Tu_0 = 2.7\%$ , 2 —  $8\%$ , 3 —  $18\%$ , 4 — данные [60], 5 — данные Клебанова [15]

от степени турбулентности при различных высотах  $h$  ребра-стабилизатора. При малой высоте ( $h = 2$  мм) кривая немонотонна и максимум скорости срыва достигается при  $Tu \approx 10\%$ , а при малой и высокой турбулентности срыв происходит уже при скоростях  $3 \div 5$  м/с. Наибольший диапазон устойчивого горения имеет место при высоте ребра  $h = 3$  мм. С ростом турбулентности этот диапазон

уменьшается и несколько увеличивается в случае более высоких ребер.

Повышенная внешняя турбулентность отражается на распределении турбулентных пульсаций по толщине пограничного слоя. Это следует из опытных данных [51], представленных на рис. 14. Видно, что с ростом внешней турбулентности продольная компонента пульсаций возрастает, причем максимум пульсаций располагается вблизи фронта горения. При этом с ростом  $Tu$  максимальные значения температур снижаются и смещаются к стенке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Сергеев Г. Т.** Основы тепло- и массообмена в реагирующих средах. — Минск: Наука и техника, 1977.
2. **Сполдинг Д.** Основы теории горения. — Л.: Госэнергоиздат, 1959.
3. **Лапин Ю. В., Стрелец М. Х.** Внутренние течения газовых смесей. — М.: Наука, 1989.
4. **Лиз Л.** Конвективный теплообмен при наличии подвода вещества и химических реакций // Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций: сб. — М.: Изд-во иностр. лит., 1962. — С. 13–69.
5. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И.** Тепло- и массообмен в пограничном слое с испарением и горением этанола // Физика горения и взрыва. — 1994. — Т. 30, № 1. — С. 8–15.
6. **Волчков Э. П., Терехов В. И., Терехов В. В.** Структура течения, тепло- и массоперенос в пограничных слоях со вдувом химически реагирующих веществ (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 3–20.
7. **Lipatnikov A. N., Chomiak J.** Effects of pre-mixed flames on turbulence and turbulent scalar transport // Prog. Energy Combust. Sci. — 2010. — V. 36. — P. 1–102.
8. **Masri A. R., Kalt P. A. M., Al-Abdeli Y. M., Barlow R. S.** Turbulence-chemistry interactions in non-premixed swirling flames // Combust. Theory Model. — 2007. — V. 11, N 5. — P. 653–673.
9. **Giacomazzi E., Picchia F. R., Arcidiacono N.** A review of chemical diffusion: Criticism and limits of simplified methods for diffusion coefficient calculation // Combust. Theory Model. — 2008. — V. 12, N 1. — P. 135–158.
10. **Hilbert R., Tap F., El-Rabii D. H., Thévenin D.** Impact of detailed chemistry and transport models on turbulent combustion simulations // Prog. Energy Combust. Sci. — 2004. — V. 30. — P. 61–117.
11. **Snegirev A. Yu.** Statistical modeling of thermal radiation transfer in buoyant turbulent diffusion

- flames // *Combust. Flame.* — 2004. — V. 136. — P. 51–71.
12. **Miyauchi T., Tanahashi M.** Current state and perspective of turbulent combustion research // *J. Fluid Sci. Technol.* — 2007. — V. 2, Iss. 3. — P. 514–524.
  13. **Bilger R. W.** Future progress in turbulent combustion research // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2000. — V. 26. — P. 367–380.
  14. **Tanahashi M., Shimura M.** DNS and advanced laser diagnostics of turbulent combustion // *Proc. of the 15th Intern. Heat Transfer Conf., IHTC-15, August 10–15, 2014, Kyoto, Japan, KN-22.*
  15. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. — М.: Наука, 1974.
  16. **Emmons H. W.** The film combustion of liquid fuel // *Z. Angew. Math. Mech.* — 1956. — Bd 36. — S. 60.
  17. **Raghavan V., Rangwala A. S., Torero J. L.** Laminar flame propagation on a horizontal fuel surface: Verification of classical Emmons solution // *Combust. Theory Model.* — 2009. — V. 13, N 1. — P. 121–141.
  18. **Сполдинг Д., Ауслендер Т., Сандэрэм Т.** Расчет тепло- и массообмена в турбулентном пограничном слое на плоской пластине при больших числах  $M$  как при наличии, так и отсутствии химических реакций // *Перевод ЦАГИ.* — 1966. — № 180.
  19. **Волчков Э. П.** Пристенные газовые завесы. — Новосибирск: Наука, 1983.
  20. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И., Шутов С. А.** Турбулентный пограничный слой со сдувом реагирующих веществ // *Физика горения и взрыва.* — 1981. — Т. 17, № 6. — С. 21–28.
  21. **Волчков Э. П., Терехов В. И.** Турбулентный тепло- и массоперенос в пограничном слое при наличии химических реакций // *Процессы переноса в высокотемпературных и химически реагирующих потоках: сб.* — Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1982. — С. 13–39.
  22. **Terekhov V. I.** Heat and mass transfer on permeable surface involving phase transaction and chemical reactions // *Heat Transfer Res.* — 1992. — V. 24, N 2. — P. 139–171.
  23. **Rangwala A. S., Buckley S. G., Torero J. L.** Analysis of the constant  $B$ -number assumption while modeling flame spread // *Combust. Flame.* — 2008. — V. 152. — P. 401–414.
  24. **Шваб В. А.** Связь между температурными и скоростными полями газового факела // *Исследование горения натурального топлива: сб.* — М.: Госэнергоиздат, 1948. — С. 231–248.
  25. **Зельдович Я. Б.** К теории горения неперемешанных газов // *Журн. техн. физики.* — 1949. — Т. 19, № 10. — С. 1199–1210.
  26. **Torero J. L., Bonneau L., Most J. M., Joulain P.** On the geometry of diffusion flames established over a flat plate burner // *Adv. Space Res.* — 1995. — V. 16, N 7. — P. 149–152.
  27. **Poinsot T., Veynante D.** *Theoretical and Numerical Combustion.* — Philadelphia, PA: Edwards, 2005.
  28. **Riley J. J.** Review of large-eddy simulation of non-premixed turbulent combustion // *J. Fluids Eng.* — 2006. — V. 128. — P. 209–215.
  29. **Pitsch H.** Large-eddy simulation of turbulent combustion // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2006. — V. 38. — P. 453–482.
  30. **Терехов В. В.** Теплообмен в пристенных течениях со вдувом, фазовыми превращениями и горением: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Новосибирск, 2014.
  31. **Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И.** Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. — М.: Энергия, 1972.
  32. **Ерошенко В. М., Зайчик Л. И.** Гидродинамика и теплообмен на проницаемых поверхностях. — М.: Наука, 1984.
  33. **Батиевский В. Л., Сергеев Г. Т.** Исследование процесса горения углеводородов в пограничном слое на проницаемой поверхности // *Физика горения и взрыва.* — 1978. — Т. 14, № 4. — С. 13–23.
  34. **Беспалов И. В.** Конвективный теплообмен на проницаемой пластине при горении в пограничном слое // *Тепло- и массоперенос: материалы IV Всесоюз. совещ.* — Минск, 1972. — Т. 1, № 3. — С. 48–56.
  35. **Kulgein N.** Transport processes in a combustible turbulent boundary layer // *J. Fluid Mech.* — 1962. — V. 12, N 3. — P. 417–437.
  36. **Ерошенко В. М., Кузнецов В. Е., Мотулевич В. П. и др.** Экспериментальное исследование теплообмена в химически реагирующем ламинарном пограничном слое // *Теплофизические свойства и газодинамика высокотемпературных сред.* — М.: Наука, 1972. — С. 162–167.
  37. **Paul P. J., Mukunda H. S., Jain V. K.** Regression rates in a boundary layer combustion // *19th Symp. (Intern.) on Combustion.* — The Combustion Inst., 1982. — P. 717–729.
  38. **Шабалин Н. И., Финаев Ю. А.** Некоторые вопросы тепло- и массопереноса в реагирующем пограничном слое // *Весті академії наук БССР. Сер. физ.-енергет. наук.* — 1975. — № 1. — С. 90–96.
  39. **Marxman G., Gilbert M.** Turbulent boundary layer combustion in the hybrid rocket // *9th Symp. (Intern.) on Combustion.* — 1963. — P. 371–383.
  40. **Варнац Ю., Маас У., Диббл Р.** Физико-химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / пер. с англ. Г. В. Агафонова / под ред. П. А. Власова. — М.: Физматлит, 2003.
  41. **Ueda T., Shimura M., Tanahashi M., Miyauchi T.** Measurement of three-dimensional flame structure by combined laser diagnostics // *J. Mech. Sci. Technol.* — 2009. — V. 23. — P. 1813–1820.

42. **Chen H. C., T'ien J. S.** Diffusion flame stabilization at the leading edge of a fuel plate // *Combust. Sci. Technol.* — 1986. — V. 50. — P. 283–306.
43. **Kodama H., Miyasaka K., Fernandez-Pello A. C.** Extinction and stabilization of a diffusion flame on a flat combustible surface with emphasis on thermal controlling mechanisms // *Combust. Sci. Technol.* — 1987. — V. 54. — P. 37–50.
44. **Wang X., Suzuki T., Ochiai Y., Ohyagi S.** Numerical studies of reacting flows over flat walls with fuel injection. Part 1: Velocity anomaly and hydrodynamic instability // *JSME Intern. J. Ser. B. Fluids and Thermal Eng.* — 1998. — V. 41. — P. 19–27.
45. **Gopalakrishnan E. D., Raghavan V.** Numerical investigation of laminar diffusion flames established on a horizontal flat plate in a parallel air stream // *Intern. J. Spray Combust. Dynamics.* — 2011. — V. 3, N 2. — P. 69–98.
46. **Мао С.-Р., Kodama H., Fernandez-Pello A. C.** Convective structure of a diffusion flame over a flat combustible surface // *Combust. Flame.* — 1984. — V. 57. — P. 209–236.
47. **Ярин А. Л.** О срыве пламени горячей жидкости воздушным потоком // *Физика горения и взрыва.* — 1983. — Т. 19, № 1. — P. 3–12.
48. **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 // *Combust. Flame.* — 2013. — V. 160. — P. 1999–2008.
49. **Ishizuka S., Tsudji H.** An experimental study of effect of inert gases on extinction of laminar diffusion flames // 11th Symp. (Intern.) on Combustion. — Pittsburgh, PA: The Combustion Inst., 1981. — P. 695–703.
50. **Бояршинов Б. Ф.** Некоторые особенности тепло- и массопереноса при обтекании поверхности турбулизированным воздушным потоком // *ПМТФ.* — 2000. — Т. 41, № 4. — С. 124–130.
51. **Бояршинов Б. Ф., Титков В. И.** Влияние турбулентности набегающего потока на структуру пограничного слоя при диффузионном горении этанола // *ПМТФ.* — 2001. — Т. 42, № 6. — С. 55–63.
52. **Rohmat T. A., Katoh H., Obara T., Yoshohashi T., Ohyagi S.** Diffusion flame stabilized on a porous plate in a parallel airstream // *AIAA J.* — 1998. — V. 36, N 11. — P. 1945–1952.
53. **Juniper M., Candel S.** Edge diffusion flame stabilization behind a step over a liquid reactant // *J. Propul. Power.* — 2003. — V. 19, N 3. — P. 332–341.
54. **Grosshandler W., Hamins A., Mcgrattan K. K., Charagundl A. S. R., Presser C.** Suppression of a non-premixed flame behind a step // *Proc. Combust. Inst.* — 2000. — V. 28. — P. 2957–2964.
55. **Ndubizu C. C., Ananth R., Tatem P. A.** The effects of air-borne water mist on a forced convection boundary layer flame over a non-charring solid // *Naval Research Laboratory Report NRL/MR/6180-03-8682.* — 2003.
56. **Takahashi F. W., Schmoll J., Strader E. A., Belovich V. M.** Suppression behavior of obstruction-stabilized pool flames // *Combust. Sci. Technol.* — 2001. — V. 163. — P. 107–130.
57. **Ananth R., Mowrey R.** Ultra-fine water mist extinction dynamics of a co-flow diffusion flame // *Combust. Sci. Technol.* — 2008. — V. 180. — P. 1659–1692.
58. **Hirano T., Kanno Y.** Aerodynamic and thermal structures of the laminar boundary layer over a flat plate with a diffusion flame // 14th Symp. (Intern.) Combustion. — 1973. — P. 391–398.
59. **Кумар И. Д.** Экспериментальное исследование тепло- и массообмена в реагирующем пограничном слое при пористом вдуве // *Инж.-физ. журн.* — 1969. — Т. 17, № 4. — С. 622–632.
60. **Джонс Д., Изааксон Л., Врик С.** Турбулентный пограничный слой при наличии подвода массы горения и градиента давления // *Ракет. техника и космонавтика.* — 1971. — Т. 9, № 9. — С. 122–129.
61. **Ueda T., Mizomoto M., Ikai S.** Velocity and temperature fluctuations in a flat plate boundary layer diffusion flame // *Combust. Sci. Technol.* — 1982. — V. 27, N 3-4. — P. 133–142.
62. **Ueda T., Mizomoto M., Ikai S.** Thermal structure of a flat plate turbulent boundary layer diffusion flame // *Bull. JSME.* — 1983. — V. 26. — P. 399–405.
63. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Лукашов В. В.** Теплообмен в ускоренном химически реагирующем пограничном слое // *Докл. АН.* — 1996. — Т. 350, № 6. — С. 736–765.
64. **Бояршинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И.** Структура пограничного слоя со вдувом и горением этанола // *Физика горения и взрыва.* — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 29–36.
65. **Nakagawa Y., Nishiwaki N., Hirata M.** Effect of combustion on a laminar boundary layer // 13th Symp. (Intern.) Combustion. — 1971. — P. 813–819.
66. **Ueda T., Ooshima A., Saito N., Mizomoto M.** Aerodynamic structure of a laminar boundary layer diffusion flame over a horizontal flat plate (experimental analysis) // *JSME Intern. J. Ser. II.* — 1991. — V. 34, N 4. — P. 527–532.
67. **Andreotti S., Andreussi P., Petarca L.** Boundary layer burning of fuel surfaces: Thermal and aerodynamic structure of flame // *Combust. Sci. Technol.* — 1984. — V. 40. — P. 279–291.
68. **Ha J. S., Shim S. H., Shin H. D.** Boundary layer diffusion flame over a flat plate in the presence and absence of flow separation // *Combust. Sci. Technol.* — 1991. — V. 75. — P. 241–260.

69. **Цуруда Т., Хараяма М., Харано Т.** Рост турбулентности на фронте пламени // Теплопередача. — 1986. — Т. 4. — С. 126–132.
70. **Волчков Э. П., Терехов В. В., Терехов В. И.** Структура пограничного слоя с горением водорода при различных интенсивностях вдува // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 3. — С. 20–29.
71. **Чен Т., Тунг Т.** Обтекание клина потоком газа с образованием ламинарного пограничного слоя при наличии процессов испарения и горения // Гетерогенное горение: сб. — М.: Мир, 1967. — С. 450–468.
72. **Кейс В., Моффет Р., Тилбар В.** Теплообмен в турбулентном пограничном слое сильноускоренного течения с вдувом и отсосом // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Сер. С: Теплопередача. — 1970. — Т. 92, № 3. — С. 190–198.
73. **Терехов В. В.** О влиянии продольного отрицательного градиента давления на горение в турбулентном пограничном слое // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепло- и массообмена в энергетических установках: сб. тр. XIII школы-семинара под рук. А. И. Леонтьева, 2001. — СПб., 2001. — Т. 1. — С. 258–261.
74. **Volchkov E. P.** Concerning the heat and mass transfer features on permeable surfaces // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2006. — V. 49. — P. 755–762.
75. **Kim J. S., Park J., Kwon O. B., Yun J. H., Keel S. I., Kim T. K.** Preferential diffusion effects on NO formation in methane/hydrogen-air diffusion flames // Energy Fuels. — 2008. — V. 22, N 1. — P. 278–283.
76. **Замашиков В. В., Намятов И. Г., Бунев В. А.** Особенности механизма распространения пламени в богатых смесях водород — пропан — воздух // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 5. — С. 30–41.
77. **Fengshan Liu, Ömer L. Gülder.** Effects of  $H_2$  and H preferential diffusion and unity Lewis number on superadiabatic flame temperatures in rich premixed methane flames // Combust. Flame. — 2005. — V. 143. — P. 264–281.
78. **Лукашов В. В., Терехов В. В.** Исследование влияния избирательной диффузии на пограничный слой со вдувом и горением водорода // Всерос. конф. «XXXI Сибирский теплофизический семинар», 17–19 ноября 2014, Новосибирск.
79. **Лукашов В. В., Терехов В. В., Ханьялич К.** Теплообмен в пограничном слое на проникаемой поверхности при вдуве и горении // Теплофизика и аэромеханика. — 2013. — Т. 20, № 6. — С. 705–712.
80. **Волчков Э. П., Терехов В. В., Терехов В. И.** Влияние предыстории течения на горение в ламинарном пограничном слое // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 6. — С. 3–11.
81. **Виллюнов В. Н., Дик И. Г.** О влиянии турбулентности на теплообмен, структуру и химическое реагирование в пламени // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 3. — С. 359–366.
82. **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 // Combust. Flame. — 2010. — V. 157. — P. 1496–1509.
83. **Терехов В. И., Смульский Я. И., Ярыгина Н. И.** Особенности теплообмена в отрывном течении за плоским ребром, расположенным под углом к основному потоку, при изменении внешней турбулентности // Теплофизика и аэромеханика. — 2008. — Т. 15, № 2. — С. 219–227.
84. **Terekhov V. I., Yarygina N. I., Zhdanov R. F.** Heat transfer in turbulent separated flows in the presence of high free-stream turbulence // Intern. J. Heat Mass Transfer. — 2003. — V. 46, N 23. — P. 4535–4551.

*Поступила в редакцию 3/IX 2014 г.*