

УДК 536.46:662.611

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМИНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ГОРЕНИИ В НЕМ ВОДОРОДА

Э. П. Волчков, В. В. Лукашов

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

Приведены результаты экспериментального исследования ламинарного пограничного слоя при горении в нем водородозотной топливной смеси, равномерно вдуваемой через пористую стенку в поток воздуха. Получены данные, характеризующие условия воспламенения. На основании зарегистрированных распределений температуры анализируется изменение положения и температуры фронта пламени по длине в зависимости от скорости набегающего потока ($1 \div 4$ м/с), интенсивности вдува и состава топлива. Показано, что теплообмен может быть удовлетворительно описан «стандартной» зависимостью для пограничного слоя с граничными условиями второго рода.

Ключевые слова: пограничный слой, пористый вдув, горение водорода, теплообмен.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов переноса с химическими реакциями в пограничном слое сохраняет свою актуальность в связи с широким распространением такого рода течений в разнообразных технических приложениях, связанных с энергетикой, химическими технологиями и двигательными системами. В настоящее время накоплен определенный экспериментальный и теоретический материал, однако в силу сложности и многофакторности процессов в пограничном слое с горением поле для исследований остается достаточно широким.

В работе [1] в автомоделном приближении получено решение для пограничного слоя с горением на его испаряющейся поверхности. В частности, было показано, что тепловой поток в стенку убывает пропорционально квадратному корню из расстояния от передней кромки.

В работе [2] проведено исследование ламинарного пограничного слоя смеси реагирующих газов при вдуве водорода через проницаемую поверхность в поток воздуха. Отмечено, что при горении водорода учет многокомпонентной диффузии оказывает существенное влияние на результаты расчета профилей средней скорости и коэффициентов обмена на «стенке».

В [3] модель Эммонса [1] была расширена на случай равномерного вдува пропана в пограничный слой с учетом реальных свойств газовой смеси ($Le \neq 1$). По-видимому, впервые было показано, что учет переменности свойств, обусловленный изменением состава, может приводить к снижению максимума температуры до 700°C и к изменению положения вертикальной координаты фронта до 20 %. Причем учет конечности скорости химической реакции отражается на температуре в меньшей степени — не более чем на 100°C . Кроме того, показано, что температура фронта и концентрация топлива на стенке изменяются сходным образом, увеличиваясь вниз по потоку.

Использование автомоделного описания пограничного слоя имеет и свои ограничения. В частности, оно неприменимо вблизи передней кромки, где при таком подходе имеет место сингулярность (тепловой поток устремляется в бесконечность). Передняя кромка пламени обладает и другими особенностями. В экспериментах [4] с горением пропана и метана при равномерном вдуве через пористую стенку обнаружено существование локального максимума в распределении продольной компоненты скорости. Температура фронта пламени в этих опытах возрастала по длине. Напротив, в экспериментальной работе [5] при горении пропана в ламинарном пограничном слое температура фронта оставалась практически постоянной.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства России (№ 11.G34.31.0046) и гранта Президента РФ (НШ-4349.2010.8).

Область применимости модели Эммонса [1] исследована в работе [6]. На примере испарения и горения метанола было показано, что в области устойчивого горения при скоростях обтекания проницаемой пластины воздухом более 0.5 м/с интенсивность испарения топлива линейно связана с коэффициентом трения на стенке.

В численном исследовании [7] горения водорода в ламинарном пограничном слое при равномерном вдуве в поток кислорода рассмотрены особенности протекания химической реакции. Выделено несколько стадий в развитии диффузионного пламени: смешение реагентов и неравновесное горение вблизи передней кромки, установление равновесного (развитого диффузионного) горения далее по потоку, где течение может быть описано автомодельными уравнениями пограничного слоя.

Для моделирования пограничного слоя с горением в нем метана в [8] использовали полную систему уравнений Навье — Стокса. Авторы пришли к выводу, что в рассмотренных условиях приближение Прандтля применимо при удалении от начала пластины на расстояние более 30 мм.

В работе [9] также использовали полную систему уравнений Навье — Стокса для исследования горения водорода при равномерном вдуве. Показано, что из-за теплового расширения газа вблизи передней кромки пламени в профиле продольной скорости, так же как и при горении метана и пропана в экспериментах [4], наблюдается максимум. Результаты численного моделирования в [9] подтверждены экспериментальными данными.

В исследовании [10] горения *n*-пентана при вдуве через пористую стенку в ламинарный пограничный слой установлено, что вблизи передней кромки температура фронта максимальна и близка к адиабатической температуре горения. По мере удаления вниз по потоку температура фронта снижается. В профиле продольной скорости, как и в работе [4], отмечается локальный максимум. Полученные распределения веществ позволяют сделать вывод, что на расстояниях вниз по потоку до 15 мм от передней кромки окислитель и топливо проникают за границы максимальной температуры. Более того, топливо и продукты горения проникают вверх по потоку в область непроницаемого предвключенного участка, где тепловыделение еще не происходит.

В работе [11] представлен обзор состояния экспериментальных и теоретических исследований аэродинамики и тепло- и массопереноса при вдуве в пограничный слой, испарении и горении. Отмечается, в частности, что все модели горения, диффузионная, кинетическая или равновесная, дают близкие значения осредненных динамических характеристик течения и теплообмена.

В немногочисленных опубликованных экспериментальных исследованиях ламинарного пограничного слоя при вдуве и горении в нем газообразного топлива, как правило, используется метан или пропан. Это существенно ограничивает диапазон скоростей набегающего потока и интенсивности вдува по сравнению со случаем водородного топлива. Кроме того, при горении метана наблюдается широкий спектр режимов течения, в зависимости от геометрических параметров стабилизаторов пламени. По-видимому, известные на сегодняшний день данные не позволяют однозначно ответить на вопрос о характере изменения по длине пластины температуры фронта пламени. В данной работе за координату фронта пламени принимается расстояние от стенки, на котором температура в рассматриваемом сечении максимальна.

Цель данного исследования заключалась в том, чтобы получить опытные данные о тепловой структуре ламинарного пограничного слоя при горении в нем топливной водородоазотной смеси, равномерно вдуваемой через пористую горизонтальную поверхность. Особое внимание при этом уделено характеристикам области максимальных температур.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Эксперименты проводили в рабочей части аэродинамической трубы сечением 105 × 105 мм. Скорость воздушного потока, обтекающего пластину, варьировалась в диапазоне 2 ÷ 4 м/с. Температура основного потока воздуха 293 К. Для того чтобы не допустить возникновения продольного градиента давления, верхнюю крышку в рабочей части не устанавливали. Топливо вдувалось в пограничный слой равномерно через нижнюю горизонтальную пористую пластину размером в плане 95 × 145 мм. В качестве топлива использовалась смесь водорода с азотом. Массовая доля водорода менялась в диапазоне 1 ÷ 11 %. При такой по-

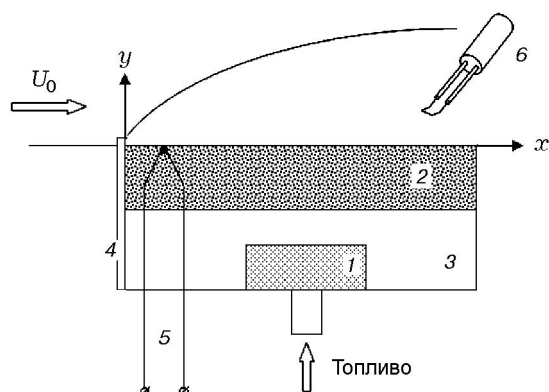


Рис. 1. Схема рабочего участка:

- 1 — пористый цилиндр, 2 — пористая пластина,
3 — газовая полость, 4 — стабилизатор пламени,
5 — термопары, 6 — термопарный зонд

становке эксперимента можно изменять положение фронта пламени как за счет интенсивности вдува, так и за счет концентрации горючего во вдуваемой смеси.

Экспериментальные исследования горения газообразного топлива в пограничном слое требуют применения ряда специфических мер для обеспечения равномерности вдува по пластине. Схема рабочего участка показана на рис. 1. Топливная смесь, проходя сквозь цилиндр из пористой нержавеющей стали, распределялась в газовой полости и поступала через проникающую пластину в пограничный слой. Как показали наши тестовые измерения, такая конструкция обеспечивает равномерность вдува на уровне $\pm 15\%$ от среднего значения.

Для подготовки топливной смеси использовали регуляторы расхода газа производства MKS Instruments. Для водорода это был регулятор типа 1179А, который позволял устанавливать массовый расход с точностью $\pm 0.15 \cdot 10^{-6}$ кг/с в диапазоне $(2.7 \div 27) \cdot 10^{-6}$ кг/с. Для подачи азота применялся регулятор 1579А. Расход азота устанавливался с точностью $\pm 0.04 \cdot 10^{-3}$ кг/с в диапазоне $(0.2 \div 1.5) \cdot 10^{-3}$ кг/с. Погрешность определения состава топливной смеси не превышала $\pm 0.4\%$.

Перед участком вдува топлива устанавливалась пластина из нержавеющей стали толщиной 0.8 мм, служащая стабилизатором пламени. Ее высота над плоскостью пористой поверхности H могла меняться в диапазоне $0 \div 3$ мм. В качестве газопроницаемой поверх-

ности использован материал ТЗМК-10 на основе кварцевого волокна, разработанный для теплозащиты космического корабля многоцелевого использования «Буран». Коэффициент теплопроводности этого материала при 20°C — 0.05 Вт/(м·К), его пористость $90 \div 95\%$. Пористый материал способен выдерживать температуру до 1370 К. При этом он сохраняет диэлектрические свойства, что позволяет размещать в нем хромель-алюмелевые термопары диаметром 100 мкм без использования электрической изоляции. В наших опытах максимальные значения температуры поверхности не превышали 1100 К. Распределение средней температуры в различных сечениях пограничного слоя измеряли хромель-алюмелевой термопарой диаметром 200 мкм. Провода сваривались встык, так что диаметр горячего спая оставался равен диаметру проволоки. П-образный участок термопарных проводов, примыкающий к спая, был ориентирован по изотерме, что позволило минимизировать искажения показаний зонда, вызываемые теплопроводностью материала проволоки. Тесты показали, что в диапазоне температур до 1400 К измерения зондом совпадают с результатами измерения платиноплатинородиевой термопарой с диаметром проволоки 60 мкм. Показания термопары систематически занижают температуру пламени на величину ΔT вследствие радиационных потерь. Величина потерь $\Delta T \approx AT^4$ зависит от степени черноты материала спая и интенсивности конвективной теплоотдачи от газового потока к спая. Значение коэффициента A может быть определено на основе эмпирических данных. По нашим оценкам $\Delta T/T \leq 2\%$ при $T \leq 1500$ К и $\Delta T/T \leq 8\%$ в диапазоне температур $1500 \div 1700$ К. Поправок показаний термопарного зонда на излучение не делалось.

В данной работе исследовались условия воспламенения в пограничном слое. Для определения момента воспламенения фиксировались условия, при которых от пламени горелки, поднесенной к задней кромке пористой пластины, горение распространялось в пограничный слой. При этом скорость основного потока и массовый расход инертного компонента (азота) топливной смеси задавались постоянными. Расход водорода постепенно увеличивался до тех пор, пока не происходило воспламенение. Индикатором воспламенения служили показания термопар, встроенных в поверхность пластины. Перед началом каждого сле-

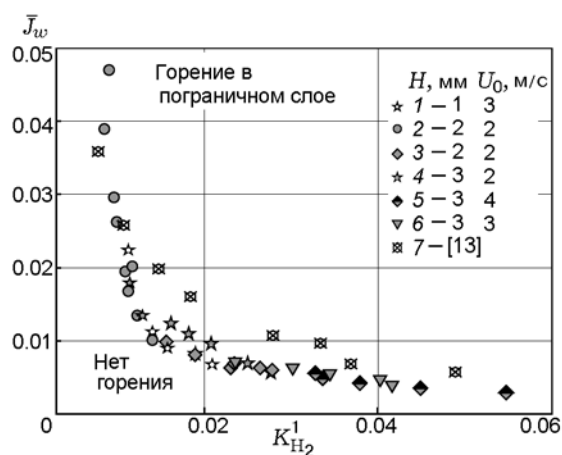


Рис. 2. Область параметров, обеспечивающих воспламенение водорода в ламинарном пограничном слое

дующего опыта пористая стенка охлаждалась до комнатной температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные, характеризующие границу значений параметров, при которых происходит воспламенение водорода в пограничном слое, представлены на рис. 2 в виде зависимости относительного вдува $\bar{J}_w = j_w / \rho_0 U_0$ от массовой концентрации водорода в топливной смеси $K_{H_2}^1$. Здесь j_w — массовый поток со стенки, ρ_0 — плотность основного потока, U_0 — его скорость.

С увеличением содержания водорода в смеси интенсивность вдува, необходимая для воспламенения, снижается. Заметим, что при $K_{H_2}^1 < 0.3$ % воспламенение не происходит при любых расходах топлива. Это значение близко к нижнему пределу воспламенения предварительно перемешанной водородовоздушной смеси.

В экспериментах с горением метана в пограничном слое [12] наблюдались разнообразные неустойчивые режимы горения, а при разбавлении метана азотом устойчивое горение было возможно только при молярной доле CH_4 в топливе ≈ 30 % вне зависимости от относительной интенсивности вдува. В работе [13] исследовались условия устойчивости и срыва горения при поперечном обтекании пористого цилиндра потоком окислителя. При использовании топливной смеси метана с инертным газом в диапазоне скоростей обтекания $1 \div 5$ м/с режимов неустойчивого горения не обнаружено.

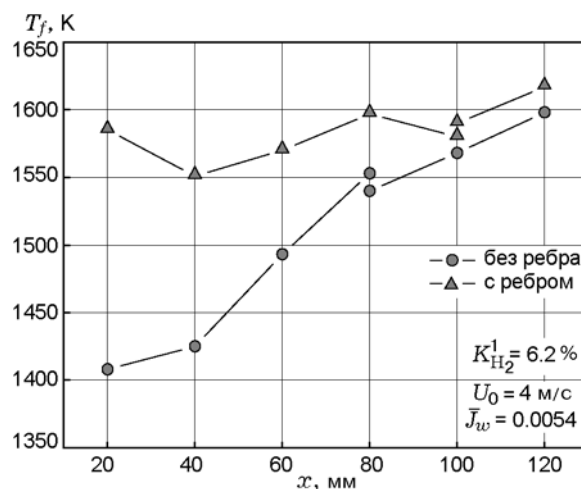


Рис. 3. Влияние установки ребра-стабилизатора пламени на характеристики фронта пламени

В случае же горения водородных смесей с азотом или аргонном при определенных условиях мог происходить срыв пламени.

В наших опытах каких-либо режимов неустойчивого горения водорода не замечено. Приведенные на рис. 2 экспериментальные точки в диапазоне скоростей обтекания $2 \div 4$ м/с при высоте стабилизатора $H = 0 \div 3$ мм обобщаются единой зависимостью. Этой же зависимостью удовлетворительно описываются результаты работы [13] (см. рис. 2, точки 7).

В области параметров, обеспечивающих горение, получены распределения температуры в различных сечениях пограничного слоя. Как видно из данных, представленных на рис. 3, при установке ребра-стабилизатора температура фронта пламени увеличивается. Основные различия заметны в начальной части пластины.

В отсутствие стабилизатора передняя кромка пламени в местах контакта с пористой пластиной при скоростях обтекания более 3 м/с приобретала стационарную нерегулярную двумерную структуру, приводя к неопределенности в определении координаты начала фронта пламени. Отметим, что при горении водородо-азотной смеси влияние скорости основного потока и интенсивности вдува топлива на характер изменения температуры фронта пламени не зависит от наличия ребра-стабилизатора пламени. В связи с этим основной объем опытных данных получен при установке стабилизатора.

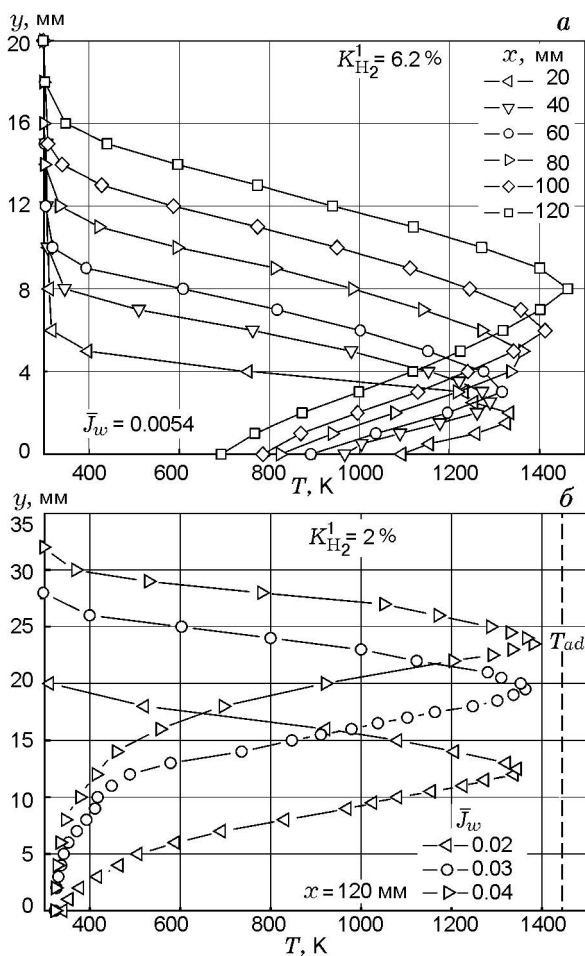


Рис. 4. Распределения температуры в пограничном слое при горении в нем водорода ($H = 3$ мм, $U_0 = 2$ м/с)

Типичные распределения температур в пограничном слое при горении в нем водорода показаны на рис. 4. Уровень максимальных температур ниже адиабатической температуры горения в воздухе водородоазотной смеси соответствующего состава (рис. 4,а). При большой интенсивности вдува топлива (рис. 4,б) распределение температуры приобретает вид, характерный для случая критического вдува в пограничный слой. Появляется перегиб в окрестности стенки. Температура стенки приближается к температуре вдуваемого топлива. При этом температура фронта приближается к адиабатической температуре горения $T_{ad} = 1440$ К для топливной смеси с массовым содержанием водорода 2 %.

Как без стабилизатора, так и при его установке имеются режимы, при которых температура фронта несколько снижается вниз по по-

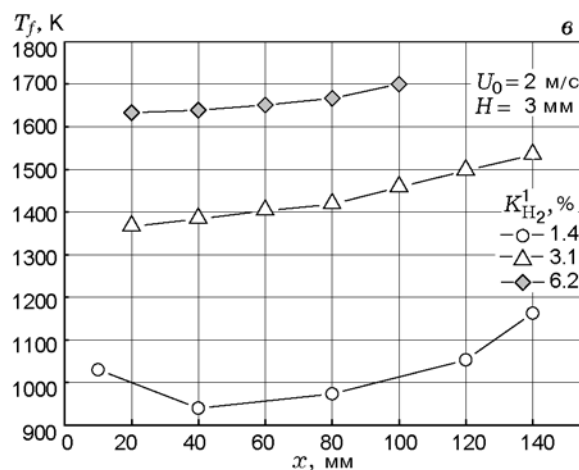
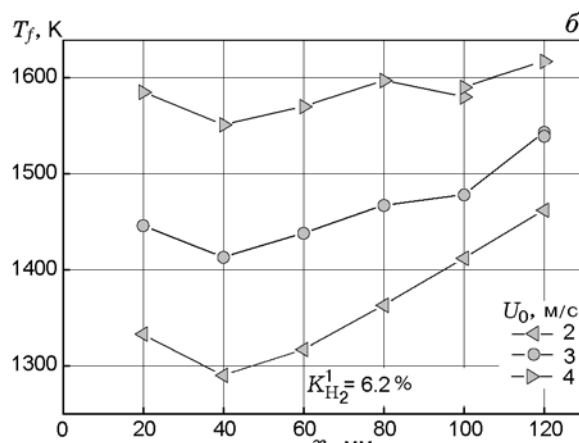
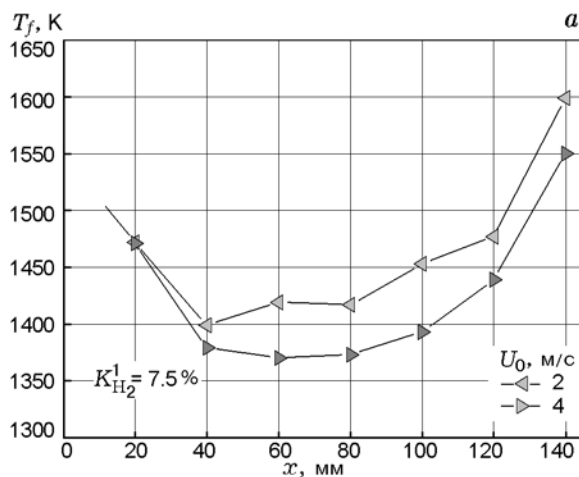


Рис. 5. Изменение температуры фронта пламени вдоль пластины:

а — интенсивность вдува $J_w = 0.014$ кг/(м²·с), б — относительный вдув $\bar{J}_w = 0.0054$, в — $\bar{J}_w = 0.011$

току от передней кромки $x < 40$ мм (рис. 5). Далее при $x > 60$ мм температура фронта возрастает. Область «повышенных» температур вблизи передней кромки исчезает при увеличении интенсивности вдува или доли водорода в топливной смеси. Возможно, это связано с влиянием особенностей течения вблизи передней кромки пламени, где согласно данным [10] температура в области химического реагирования может быть близка к адиабатической.

При фиксированной интенсивности вдува $J_w = 0.014$ кг/(м²·с) изменение скорости основного потока от 2 до 4 м/с приводит к уменьшению температуры фронта (рис. 5, а). При фиксированном же значении $J_w = 0.0054$ увеличение скорости основного потока при остальных постоянных параметрах, наоборот, способствует росту температуры фронта (рис. 5, б). Представленные на рис. 5, а, б результаты можно объяснить, если предположить, что температура фронта в данном сечении изменяется пропорционально концентрации топлива на стенке, которая, как известно, повышается с увеличением безразмерного параметра $\bar{J}_w \sqrt{Re_x}$. При увеличении скорости основного потока и постоянном значении \bar{J}_w величина $\bar{J}_w \sqrt{Re_x}$ возрастает, а также увеличивается и концентрация топлива на стенке. Сходный характер изменения по длине температуры фронта и концентрации водорода на стенке позволяет предположить существование зависимости между ними.

Как видно из представленного анализа, комплекс $\bar{J}_w \sqrt{Re_x}$ может быть использован для оценки изменения температуры фронта пламени при вариации интенсивности вдува или скорости обтекания проницаемой пластины. Вместе с тем необходимо отметить, что зависимость температуры фронта от $\bar{J}_w \sqrt{Re_x}$ достаточно сложная. Так, данные, представленные на рис. 5, в, показывают, что при постоянном значении относительного вдува и фиксированном значении скорости обтекания увеличение содержания водорода в топливной смеси приводит практически к постоянной по длине температуре фронта.

О связи температуры фронта с концентрацией топлива на стенке сообщалось в работе [14], где моделировалось течение в пограничном слое с горением в нем водорода, вдуваемого через пористую стенку, что обеспечивало постоянство концентрации водорода на стенке. В частности, отмечалось, что при достаточ-

но больших концентрациях водорода на стенке ($K_{H_2}^w \geq 0.5$) температура фронта стабилизируется и приближается к адиабатической температуре горения водорода в воздухе.

Заметим, что существование связи между температурой фронта и концентрацией на стенке находится в противоречии с используемым в модели Шваба — Зельдовича подобием атомарных концентраций. В рассматриваемом случае горения водородоазотной смеси в воздухе из равенства безразмерных атомарных концентраций азота и водорода во фронте реакции следует, что массовое содержание воды во фронте может быть выражено следующим образом:

$$K_{H_2O}^f = \frac{9K_{H_2}^1 K_{O_2}^\infty}{8K_{H_2}^1 + K_{O_2}^\infty},$$

где $K_{O_2}^\infty$ — концентрация кислорода в воздухе. Это соотношение в точности соответствует выражению, которое получается из стехиометрического соотношения для сжигания исходной топливной смеси в воздухе. Таким образом, в приближении подобия состав газовой смеси во фронте реакции определяется только составом подаваемого топлива и воздуха, вне зависимости от условий обтекания. Соответственно и температура фронта должна быть равна адиабатической температуре горения и не изменяться по длине.

Полученные в экспериментах распределения температуры на поверхности проницаемой

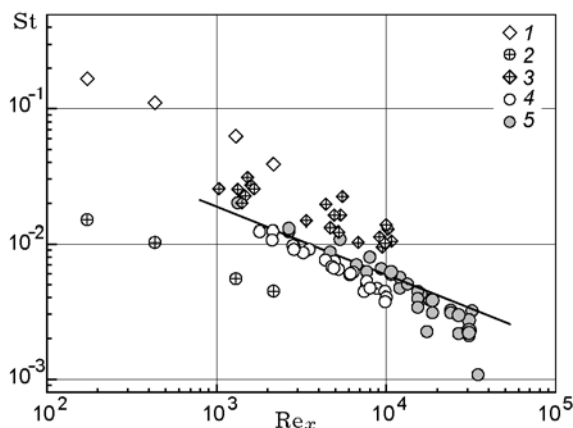


Рис. 6. Теплообмен при горении водорода в пограничном слое при равномерном вдуве через нижнюю горизонтальную стенку:

1 — [4], пропан; 2 — [4], метан; 3 — [5], пропан; 4 — [15], метан; 5 — данные авторов, водород

пластины (T_w) дают возможность обобщить опытные данные по теплообмену, применив в качестве определяющего параметра температуру фронта пламени (T_f):

$$St = \frac{J_w c_p^1 (T_w - T^1)}{\rho U_0 c_{p0} (T_f - T_w)},$$

где c_{p0} — теплоемкость воздуха в ядре потока, c_p^1 — теплоемкость топливной смеси при постоянном давлении, T^1 — температура топливной смеси. Такая обработка традиционна и удобна, так как величины, входящие в это соотношение, сравнительно просто определяются в эксперименте. Недостатки такого подхода к описанию теплообмена подробно обсуждаются в [11]. В частности, отмечается, что если исходить из выводов теории пограничного слоя, то значение температуры фронта не является граничным условием для него. Однако, как видно из рис. 6, опытные данные (наши и других авторов) в такой обработке удовлетворительно обобщаются стандартной зависимостью теплообмена в пограничном слое для граничных условий второго рода $St = 0.47 Re_x^{0.5} Pr^{0.6}$ (сплошная линия на рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены экспериментальные данные по тепловой структуре ламинарного пограничного слоя при горении в нем водорода.

Экспериментально найдена граница воспламенения топливной смеси водорода с азотом в виде зависимости относительного вдува от концентрации водорода.

Температура фронта в данном сечении изменяется пропорционально концентрации топлива на стене, которая, как известно, возрастает с увеличением безразмерной величины $\bar{J}_w \sqrt{Re_x}$.

Теплообмен при горении смеси водорода с азотом в пограничном слое удовлетворительно описывается стандартной зависимостью пограничного слоя для граничных условий второго рода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Emmons H.** The film combustion of liquid fuel // *Z. Angew. Math. Mech.* — 1956. — Bd 36. — S. 60–71.
2. **Libby P. A., Pierucci M.** Laminar boundary layer with hydrogen injection including multicomponent diffusion // *AIAA Journal.* — 1964. — V. 2. — P. 2118–2126.
3. **Kikkava S., Yoshikawa K.** Theoretical investigation on laminar boundary layer with combustion on a flat plate // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* — 1973. — V. 16. — P. 1215–1229.
4. **Hirano T., Kanno Y.** Aerodynamics and thermal structure of the laminar boundary layer over a flat plate with a diffusion flame // *14th Symp. (Intern.) on Combustion.* — 1973. — P. 391–398.
5. **Батиевский В. Л., Сергеев Г. Т.** Тепло- и массообмен в реагирующем пограничном слое на пористой поверхности // *Изв. АН БССР. Сер. физ.-энерг. наук.* — 1975. — № 1. — С. 61–67.
6. **Raghavan V., Rangwala A. S., Torero J. L.** Laminar flame propagation on a horizontal fuel surface: Verification of classical Emmons solution // *Combust. Theory and Modelling.* — 2009. — V. 13, N 1. — P. 121–141.
7. **Peters N.** Analysis of a laminar flat plate boundary layer diffusion flame // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* — 1976. — V. 19. — P. 385–393.
8. **Chen C.-H., Tien J.** Diffusion flame stabilized at the leading edge of a fuel plate // *Combust. Sci. and Technol.* — 1986. — V. 50. — P. 283.
9. **Ha S. J., Shim H. S., Shin D. H.** Boundary layer diffusion flame over a flat plate in the presence and absence of flow separation // *Combust. Sci. and Technol.* — 1991. — V. 75. — P. 241.
10. **Ananth R., Tatem P. A., Ndubizu C. C.** A numerical model for the development of a boundary layer diffusion flame over a porous plate // *Naval Research Laboratory Memorandum Report NRL/MR/6183-01-8547.* — 2001.
11. **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.
12. **Rohmat T. A., Katoh H., Obara T., Yoshohashi T., Ohyagi S.** Diffusion flame stabilized on a porous plate in a parallel airstream // *AIAA Journal.* — 1998. — V. 36, N 11. — P. 1945–1952.
13. **Ishizuka S., Tsudji H.** An experimental study of effect of inert gases on extinction of laminar diffusion flames // *18th Symp. (Intern.) on Combustion.* — Pittsburgh, PA: The Combustion Inst., 1981. — P. 695–703.
14. **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.
15. **Ерошенко В. М., Кузнецов Е. В., Щенников В. В., Ярославцева В. В.** Исследование тепло- и массообмена при горении в канале на пористой поверхности в ламинарном

пограничном слое // Тепломассообмен в условиях вдува различных сред через пористые поверхности. — М.: ЭНИИ, 1973. — С. 3–13.

*Поступила в редакцию 2/VI 2011 г.,
в окончательном варианте — 11/I 2012 г.*
