

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 водородоазотной 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 испаряющей 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).

© Волчков Э. П., Лукашов В. В., 2012.

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 автомоделными 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-

