

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЭТИЛЕНА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА

. А. Фирсов^{1,a}, Д. А. Яранцев¹, С. Б. Леонов¹, В.В. Иванов²

¹ Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН), Москва

² Центральный аэрогидродинамический институт (ЦАГИ)

В представленной работе обсуждается возможность упрощенного трехмерного нестационарного моделирования процесса плазменно-стимулированного горения газообразного топлива в сверхзвуковом потоке воздуха. Подробно описывается предложенный подход, а также приводится обоснование сделанных допущений. Результаты моделирования сравниваются с данными экспериментального исследования газодинамических процессов в скоростной камере сгорания, воспламенения и стабилизации пламени, осуществляемых с помощью генератора плазмы. На базе геометрии аэродинамического стенда ИАДТ-50 ОИВТ РАН проведена калибровка и параметрическая оптимизация подачи газообразного топлива в сверхзвуковой поток. Результаты численного исследования использованы для прогноза плазменно стимулированного горения в геометрии скоростной камеры сгорания Т131 ЦАГИ. Проведено сравнение данных моделирования горения этилена в потоке воздуха с результатами экспериментов в Т131.

Работа ведется при финансовой поддержке Программы ЦАГИ — РАН.

Введение

Численное моделирование является одним из ключевых инструментов при исследовании физических процессов в современной аэродинамике, а также при разработке узлов и агрегатов летательных аппаратов. Это обусловлено рядом факторов, таких как простота постановки и реализации расчетной задачи по сравнению с классическим экспериментом, возможность решения задач оптимизации без необходимости изменения экспериментального стенда, получение существенно большего объема данных об отдельно взятом эксперименте. Последний пункт наиболее важен в задачах с подводом тепла в реагирующих смесях, когда затруднительно получить ключевую информацию о потоке, такую как локальная скорость и температура, а также концентрация компонент смеси. При этом зачастую основным источником данных в подобном эксперименте является система регистрации давления вдоль аэродинамического канала, что делает использование численного моделирования незаменимым инструментом [Liwei Zhang et al., 2013].

Задачам воспламенения и горения различных видов топлива в сверхзвуковом потоке посвящено большое количество работ [Леонов С.Б. и др. 2010; Vinogradov V.A. et al., 2013; Корупл Р.В. et al., 2013]. В основном, технологии плазменного поджига базируются на применении электрического разряда высокой мощности для нагрева и ионизации смеси [Adamovich I.V. et al., 2009; Fei Li et al., 2013]. Также определенных успехов удалось достичь при использовании микроволнового разряда для воспламенения газообразного и жидкого топлива в скоростном потоке [Shibkov V.M. et al., 2009].

Представленная работа является продолжением цикла экспериментальных исследований, проводимых в ОИВТ РАН, посвященных плазменно-инициированному воспламенению и горению газообразного топлива с помощью разряда постоянного тока в сверхзвуковом потоке [Леонов С.Б. и др., 2010; Leonov S.B. et al., 2012; Firsov A.A. et al., 2014]. В настоящее время сделанные ранее наработки проходят активную экспериментальную проверку в камере сгорания ЦАГИ. Однако данной статье основное внимание уделяется развитию использования численного моделирования, как мощного инструмента, дополняющего экспериментальную работу.

Постановка задачи

Выбор расчетной области. При выборе геометрии расчетной области необходимо учитывать следующие варианты постановки задачи: двухмерная задача с заданием осредненного по ширине сверхзвукового канала расхода топлива и энерговклада; трехмерная задача с выделением из полной геометрии некоторой характерной области, например, если в геометрии присутствует периодическая структура; трехмерная задача с полной геометрией (или частью геометрии, если имеются плоскости симметрии). Рассмотрим каждый вариант более подробно.

Двухмерный расчет позволяет обеспечить либо максимальную скорость получения приближенного решения при использовании расчетной сетки небольшой размерности, либо получить максимальное пространственно-временное разрешение при использовании расчетной сетки с размерностью, ограниченной вычислительными ресурсами рабочей станции. В связи с тем, что газодинамический стенд ИАДТ-50 имеет прямоугольное сечение и рабочая секция профилирована только в одной плоскости, двухмерное моделирование дает результаты, удовлетворительно согласующиеся с результатами экспериментов. Экономичную двумерную сетку с при-

менением адаптации во FlowVision можно создать, воспользовавшись методикой, описанной в работе [Фирсов, Москалев, 2013]. Однако в экспериментах с дискретной подачей топлива требуется знать особенности поперечной структуры течения, поэтому требуется выполнение трехмерного моделирования.

В случае если в геометрии можно выделить периодическую структуру, например, эквидистантно расположенные трубки подачи топлива и плазменные образования, то хорошим вариантом постановки расчетной задачи является выделение периодического фрагмента и заключение его между идеально гладкими стенками. Такой подход не учитывает влияние боковых стенок аэродинамического канала, однако расчет является существенно трехмерным, что позволяет получить поперечные профили параметров, минимизировав время вычислений. Например, на рисунке 1 из полной геометрии с помощью плоскости (6) можно выделить тонкий трехмерный слой, содержащий половину трубки подачи топлива. Данный подход рассматривается как основной при решении задач плазменно-стимулированного горения, т.к. геометрии вставок для стендов ИАДТ-50 и Т-131 содержат периодическую структуру из трубок топлива и электродов.

Полная трехмерная постановка используется на финальном этапе исследования для ограниченного количества выбранных режимов работы камеры сгорания. Геометрия тестовой секции газодинамического стенда ИАДТ-50 в большинстве экспериментов обладает одной плоскостью симметрии, что позволяет использовать в качестве расчетной области только половину геометрии канала с использованием идеально гладкой стенки на плоскости симметрии. Пример расчетной области для моделирования горения в ИАДТ-50 показан на рис. 1.

В ходе решения задачи объем расчетной сетки достигал 2 млн. ячеек. Расчет выполнялся в параллельном режиме на рабочей станции, оснащенной 6-ти ядерным процессором Intel Core i7 с 16 ГБ оперативной памяти.

Расстановка граничных условий. Расстановка граничных условий на примере одной из конфигураций экспериментального стенда ИАДТ-50 показана на рис. 1. На входе заданы скорость, давление и температура воздуха такие, что число Маха M и полная температура T_0 соответствуют параметрам потока из эксперимента. Параметры потока воздуха в канале: $M = 2.5$; $P_{st} = 200$ Торр; $T_0 = 300$ К.

Во FlowVision существует несколько возможностей задать условие на выходе из канала. Первый вариант – сверхзвуковой выход – без проблем позволяет выпустить сверхзвуковую струю, однако не годится для дозвуковых областей выхода, т.к. не задает температуру и давление. Дозвуковые области необходимы для корректного моделирования горения, когда в канале реализуется длинная дозвуковая зона, которая может соединиться с дозвуковой областью на выходе из канала. Второй вариант – статическое давление – позволяет задать температуру и статическое давление на выходе в дозвуковых зонах, однако использование данного условия может привести к разгону до сверхзвуковых скоростей входящего через выход газа. Поэтому единственным применимым в данном случае условием является полное давление. Вход газа через выход действительно имеет место, т.к. газ увлекается сверхзвуковой струей, однако в этом случае скорость втекания газа будет ограничена полным давлением. При этом данное граничное условие автоматически переключится на ГУ «сверхзвуковой выход» в той области, через которую выходит сверхзвуковая струя.

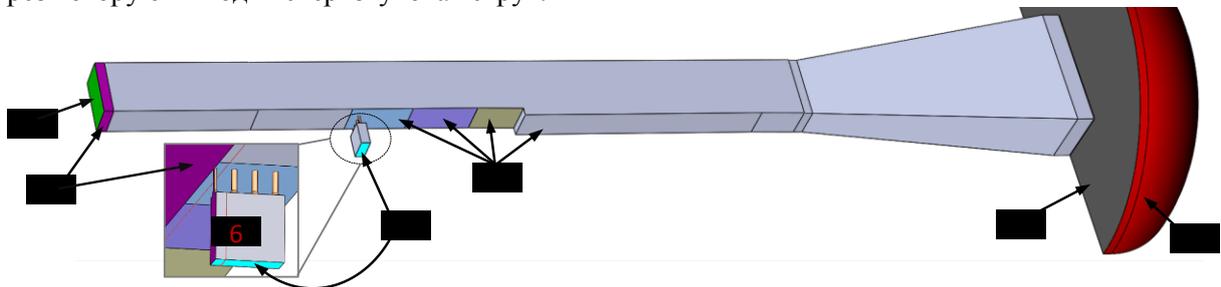


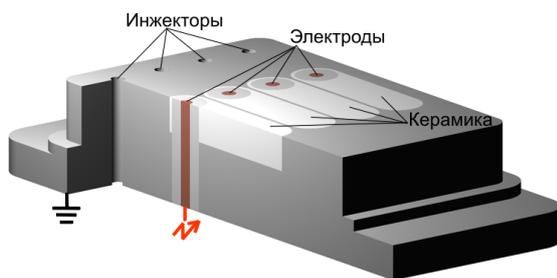
Рис. 1. Геометрия расчетной области. 1 – вход сверхзвукового потока, 2 – выход, 3 – вход топлива, 4 – плоскость симметрии на боковых стенках. На остальных границах (5) установлено ГУ «стенка». 6 – секущая плоскость, позволяющая выделить из геометрии тонкий трехмерный слой.

Вход топлива в канал также моделируется с помощью граничного условия «полное давление», установленного на дозвуковой части инжектора. Далее по тракту в зависимости от заданного давления реализуется дозвуковой или трансзвуковой режим истечения струи. При этом мгновенный расход топлива определяется с помощью программной характеристики, заданной на срезе инжектора у входа в канал.

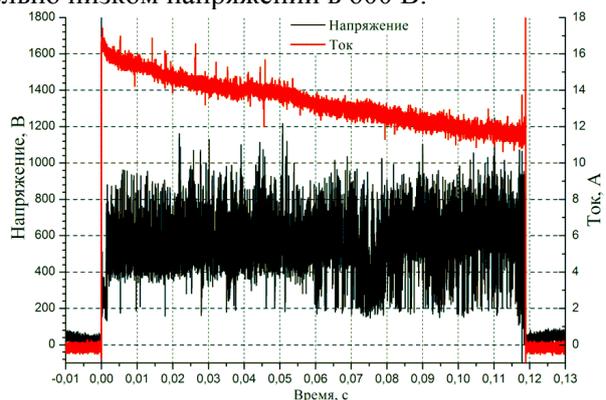
На боковых стенках в случае моделирования тонкого трехмерного слоя установлено граничное условие «симметрия» - т.е. идеально гладкая стенка. Небольшие вставки с данным ГУ также установлены на верхней и нижней стенках между сверхзвуковым входом и ГУ «стенка», чтобы избежать конфликта между жестко заданной скоростью на входе, и прилипанием ($V=0$) на стенке.

На всех остальных поверхностях задано граничное условие «стенка». При этом вся геометрия заранее разбита так, что стенка канала представляет собой набор состыкованных областей (рис.1 п.5). Это позволяет для каждой отдельной части стенки использовать свои уникальные настройки: уровень пристенной адаптации, опции для моделирования пограничного слоя, шероховатость поверхности. Например, в дальних от области инжекции зонах можно использовать грубую пристенную сетку, обеспечивающую безразмерное расстояние до стенки $Y^+ < 200$, и пограничный слой моделировать с использованием пристенных функций. А в непосредственной близости к инжектору можно использовать мелкую пристенную сетку, обеспечивающую $Y^+ < 10$ совместно с отказом от использования пристенных функций. Для расчетов была выбрана модифицированная k-ε модель KEFV. Выбор сделан на основании сравнения результатов предварительного расчета течения сверхзвукового потока в медленно расширяющемся канале (угол расширения 2°) для разных моделей турбулентности, для разных диапазонов Y^+ как с пристенными функциями, так и без них. Расчеты проводились для 3х модификаций k-ε модели (классическая, квадратичная и KEFV), а также для SST модели турбулентности. В результате было обнаружено, что для KEFV модели профиль скорости в пограничном слое слабо зависит от Y^+ в диапазоне $20 < Y^+ < 200$ при использовании пристенных функций, а без них KEFV модель раньше других - при $Y^+ < 20$ (в отличие от $Y^+ < 2$ для других моделей) начинает достаточно точно воспроизводить профиль пограничного слоя. Таким образом, для KEFV модели практически отсутствует диапазон Y^+ , для которого её можно было бы считать неприменимой в условиях сверхзвукового течения.

Моделирование разрядного воздействия и горения. Воспламенение этилена в сверхзвуковом воздушном потоке осуществляется с помощью электрического разряда постоянного тока. Принципиальная электрическая схема представлена на рисунке 2(а). В керамические вкладки, смонтированные в металлическом фланце, установлены медные электроды. Напряжение прикладывается между электродами и заземленным фланцем. Сопротивление в анодной цепи R_1 (по одному перед каждым анодом) равнялось 1 кОм, оно предназначено для ограничения разрядного тока. В момент подачи высокого напряжения на анод происходил пробой разряда поперек потока к ближайшей металлической стенке, после чего разряд сносится потоком, увеличиваясь в длину. Когда точка привязки разряда к катоду достигала дальнего от анода стыка с керамикой, разряд становился практически полностью продольным. В этом режиме разряд становится похож на дуговой, что подтверждается осциллограммой полного тока в цепи и напряжения на одном разрядном промежутке для этого режима, приведенной на рис.2(б). Видно, что ток разряда довольно высок, 15 А, при относительно низком напряжении в 600 В.



а

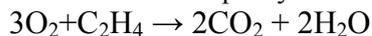


б

Рис. 2. Фланец с электродами (а) и осциллограмма тока и напряжения на разряде (б)

По фотографии разряда (см. рис.3(а)) создана приблизительная форма объемного источника тепла (ОИТ), который имитирует в расчете плазму электрического разряда. Геометрия ОИТ показана на рис.3(б). Показанное нитевидное тело $\varnothing 2$ мм не существует с точки зрения потока, однако являются зоной активного тепловыделения. При этом мощность $W_{\text{оит}}$ выбрана исходя из экспериментальных значений и составляет 1-2 кВт на один элемент. Подобный подход ранее успешно применялся при решении различных задач плазменной аэродинамики, например, для управления сверхзвуковым потоком с помощью разряда [Falempin F. et al., 2015], а также при исследовании распада послеразрядного канала в неподвижном воздухе [Шурупов М.А. и др., 2014].

В расчет учитываются следующие вещества: C_2H_4 , O_2 , CO_2 , H_2O , N_2 , плотность которых определяется по закону идеального газа, а для остальных характеристик веществ заданы табличные зависимости от температуры и давления, которые подготовлены с применением программного комплекса Terra 6.3 [Трусов Б.Г., 2005]. Сверхзвуковой поток воздуха моделируется как смесь N_2 и O_2 , массовая доля последнего во входящем потоке составляет 0,235. Процесс горения этилена в сверхзвуковом потоке рассматривается как одна брутто-реакция:



при этом скорость химического преобразования определяется с помощью модели EDC (Eddy Dissipation Concept). Настройка скорости реакции выполнена с помощью подбора коэффициентов, при которых адекватно моделируется горение предварительно перемешанной смеси в горелке Бунзена. Методика настройки изложена в работе [Фирсов и др., 2014].

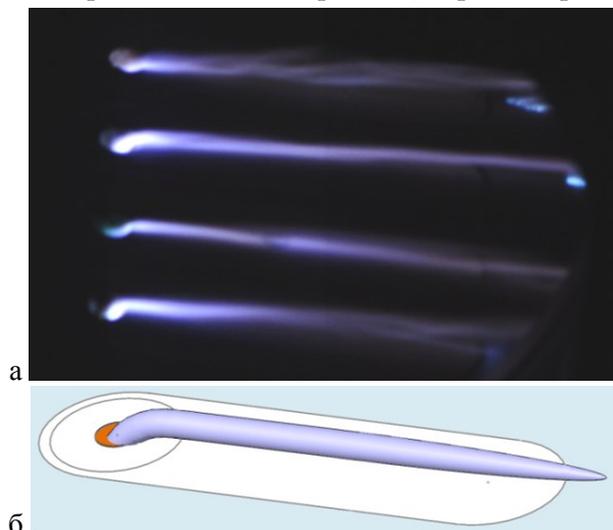


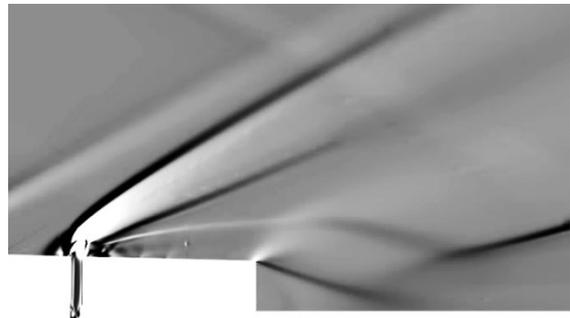
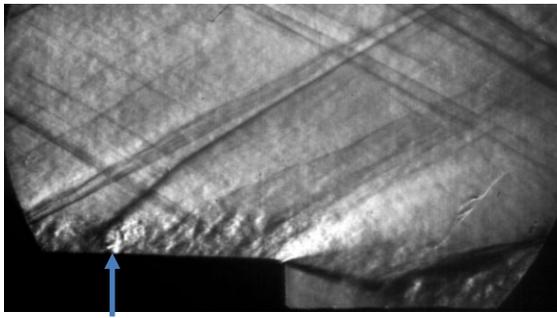
Рис. 3. Фотография разряда в потоке (а) и геометрия объемного источника тепла (б)

Основные результаты расчета

Калибровка и оптимизация подачи топлива на базе канала ИАДТ-50 ОИВТ РАН

Большая часть наших экспериментальных исследований проводится на аэродинамическом стенде ИАДТ-50 в ОИВТ РАН. Длительность сверхзвукового режима в большинстве случаев составляет ~300 мс. Инжекция топлива в канал осуществляется 50-100 мс в зависимости от рассматриваемой конфигурации. При этом расход топлива определяется по разнице давлений в контрольном объеме, из которого осуществляется подача топлива в канал. Однако электромагнитный клапан, отвечающий за подачу топлива, имеет значительное время открытия и закрытия, что приводит к погрешности определения расхода. Для определения погрешности был выполнен модельный эксперимент: в канал через одно отверстие $\varnothing 2$ мм подавалась струя CO_2 , при этом регистрировалось давление в дозвуковой части инжектора, а также велась съемка теневой картины течения.

Для аналогичных условий течения, в том числе при давлении CO_2 в дозвуковой части инжектора, соответствующем измеренному в эксперименте, было выполнено численное моделирование. Сравнение визуализации методом Теплера с результатами моделирования показано на рис. 4. Необходимо отметить, что в эксперименте визуализация является интегральной через весь канал (72 мм), в то время как для моделирования представлено локальное поле градиента плотности. Однако, несмотря на эти различия, основные элементы структуры течения хорошо видны, имеет место качественное совпадение результатов; расстояние, на которое струя выходит в поток, составило 4 мм. Установившийся мгновенный расход топлива в моделировании составил 1,25 г/с, в то время как средний расход, определенный экспериментально по разнице давлений в контрольном объеме, оказался выше более чем на 50%.



а
б
Рис. 4. Сравнение визуализации методом Теллера в эксперименте (а) с полем градиента плотности, полученным с помощью моделирования (б).

По результатам данного тестирования было принято несколько решений для увеличения точности определения расхода топлива. Регистрация давления в дозвуковой части инжектора теперь выполняется во всех экспериментах. Это позволяет более точно определять среднее время подачи топлива в канал, которое отличается от времени между сигналами на открытие и закрытие клапана. Также была выполнена оптимизация дозвуковой части тракта подачи топлива, а именно минимизирован объем системы подачи топлива между клапаном и выходом в поток. Давление газа в инжекторе для представленного теста, а также для одного из последующих экспериментов с этиленом показано на рис. 5(а).

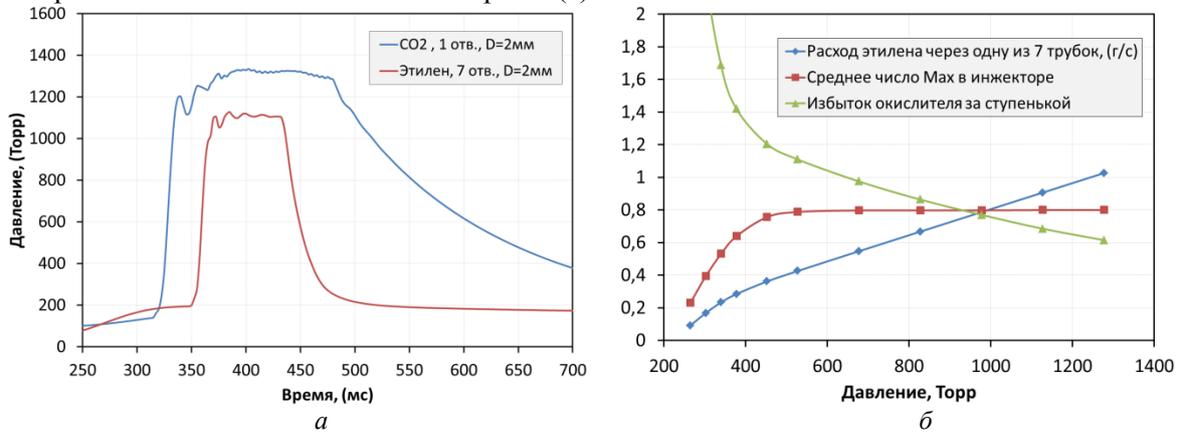


Рис. 5. Давление газа в инжекторе (а) и результаты параметрического исследования подачи топлива для рассматриваемой геометрической конфигурации камеры сгорания (б).

Для более точного определения мгновенного расхода в выбранной экспериментальной конфигурации, показанной на рис. 1, было проведено параметрическое исследование, в ходе которого была получена калибровочная кривая - зависимость мгновенного расхода топлива от давления в инжекторе, а также зависимость коэффициента избытка окислителя за ступенькой в области планируемого размещения плазмы электрического разряда. Это позволило получить более точное представление об условиях будущих экспериментов, т.к. определение данных параметров в эксперименте затруднительно. Результаты параметрического исследования рассматриваемой геометрической конфигурации камеры сгорания показаны на рис.5(б). Трехмерное распределение топлива, характеризуемое коэффициентом избытка окислителя, показано на рис.6 для массового расхода этилена 2,98 г/с. На представленной иллюстрации хорошо видна дискретная структура струй топлива, которая сменяется достаточно однородным распределением в области за ступенькой. Оптимизация состава смеси, натекающей в область за ступенькой, позволит получить газодинамическую стабилизацию фронта пламени.

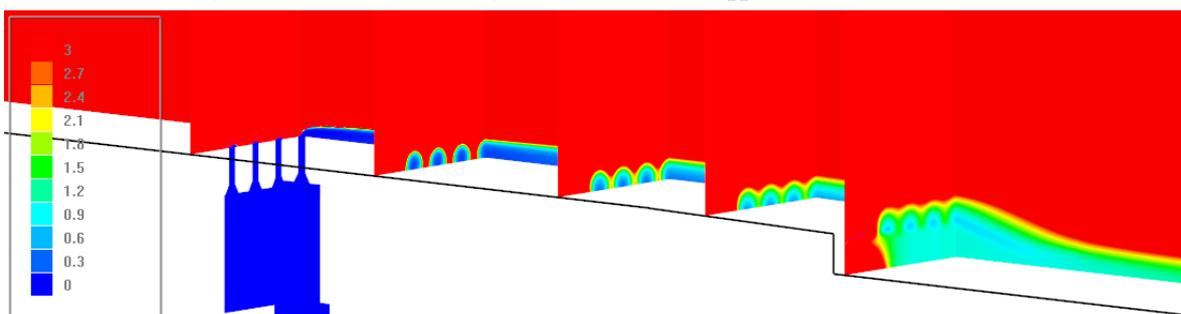


Рис.6. Трехмерное распределение избытка окислителя в конфигурации со ступенькой.

Расчет горения этилена в канале Т131 ЦАГИ

В ЦАГИ большое внимание уделяется исследованию воспламенения газообразных топлив и керосина с помощью электрического разряда в сверхзвуковом потоке. Например, в работе [Ефимов и др., 2012] проведены сравнительные исследования горения разряда при подаче разрядную область пропана и керосина.

Скоростная камера сгорания ЦАГИ Т131 предназначена для проведения исследований в области воспламенения и горения различных типов топлива в потоке воздуха. Отличительной особенностью данной установки является большая длительность одного теста, составляющая более 15 с, а также возможность работы в широком диапазоне температур, в том числе при высокой температуре торможения $T_0=700\div 1100$ К. Однако, сильная тепловая нагрузка накладывает ограничения на применение методов диагностики и визуализации, в частности, из-за этого у канала отсутствуют оптические окна для скоростной фотосъемки разряда и теневой визуализации течения. Основу диагностической системы составляет система датчиков давления, расположенных вдоль канала. Поэтому важной задачей является выполнение численного моделирования течения и горения в канале в условиях, максимально приближенных к эксперименту, для получения объемного распределения параметров течения. В частности, это позволит восполнить отсутствие средств визуализации в канале. При этом корректность результатов компьютерных расчетов можно проверить, сопоставив распределения давления, полученные в эксперименте и в моделировании.



Рис.7. Расчетная сетка в тестовой секции

При выполнении моделирования горения этилена в трубе Т131 были использованы подходы, предварительно опробованные для геометрии канала ИАДТ-50 в ОИВТ РАН. Учитывая периодическую симметрию расположения инжекторов и плазменных нитей электрического разряда (см. рис.2 и рис.3), камера сгорания моделируется с помощью трехмерного слоя толщиной 7,5 мм, включающего половину одного инжектора $\varnothing 2$ мм и половину одного объемного источника тепла. Массовый расход этилена в моделировании составил 1 г/с, что приблизительно соответствует полному расходу 8 г/с в эксперименте. Были установлены следующие параметры потока на входе в расчетную область: $P=100000$ Па, $V=1008$ м/с, $T_0=870$ К, $M\sim 2,5$ в соответствии с условиями эксперимента.

При выполнении моделирования использовалась адаптация расчетной сетки: ручная в заданном объеме – в области расположения объемного источника тепла, имитирующего плазму разряда; и адаптация по решению, повышающая пространственное разрешение в областях сильного градиента давления. Фрагмент расчетной сетки и геометрия ОИТ показаны на рис.7. Общее количество ячеек в данном расчете не превышало 800 тыс. штук.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Повышение пространственного разрешения в области положения разряда привело к проявлению горячей застойной зоны пониженной плотности у стенки ниже по течению относительно инжектора. Наличие этой зоны позволяет воспламенить и стабилизировать горение газообразного топлива на плоской стенке, и данная способность была подтверждена как в эксперименте, так и в численном моделировании.

Необходимо отметить, что в секции канала, в которой установлен фланец с генератором плазмы, во всех рассмотренных в моделировании режимах присутствует сложная структура скачков уплотнения (см. рис.7). Это вызвано тем, что в моделирование заложены стыки секций, стыки между фланцем и секцией, а также зазоры в исполнении самой вставки генератора. В данной серии моделирований было показано, что скачок от стыка секций попадает в область зажигания разряда, приводя к образованию небольшой отрывной зоны, которая может привести к нештатной работе генератора плазмы, а именно к пробое разряда против потока. В последующих экспериментах длина керамической вставки в направлении против потока была увеличена, и было показано экспериментально, что на работу обновленной версии вставки этот эффект не оказывает значительного влияния.

На рис.8 показано распределение числа Маха и температуры в области генератора и за ступенькой для случая горения этилена. Видно, что при горении этилена на некотором расстоянии за ступенькой возникает отрывная горячая зона, которая тянется до выхода из канала, что приводит к существенному росту давления.

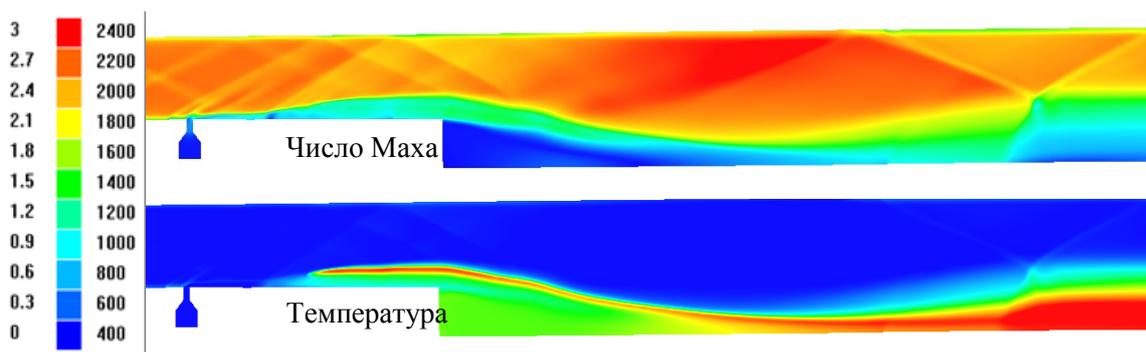


Рис.8. Распределение числа Маха (а) и температуры (б) по каналу.

На рис.9 показано сравнение распределений давления вдоль канала в моделировании и эксперименте для случаев разряда в потоке без подачи топлива, и для плазменно-стимулированного горения этилена. В случае без подачи топлива ниже по течению относительно ступеньки в моделировании отчетливо видна ступенчатая структура распределения давления, обусловленная отражениями скачка уплотнения, вызванного наличием ступеньки. На экспериментальной кривой эта структура прослеживается хуже из-за ограниченного количества датчиков давления.

И в моделировании, и в эксперименте при горении этилена наблюдается рост давления ниже по течению относительно ступеньки. Можно отметить удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов, несмотря на крайне упрощенную постановку компьютерной задачи. Таким образом, можно утверждать, что распределения других термодинамических и газодинамических величин, полученные в моделировании, приблизительно соответствуют значению в эксперименте, и анализ численной картины течения может быть в дальнейшем использован для оптимизации рассматриваемой системы.

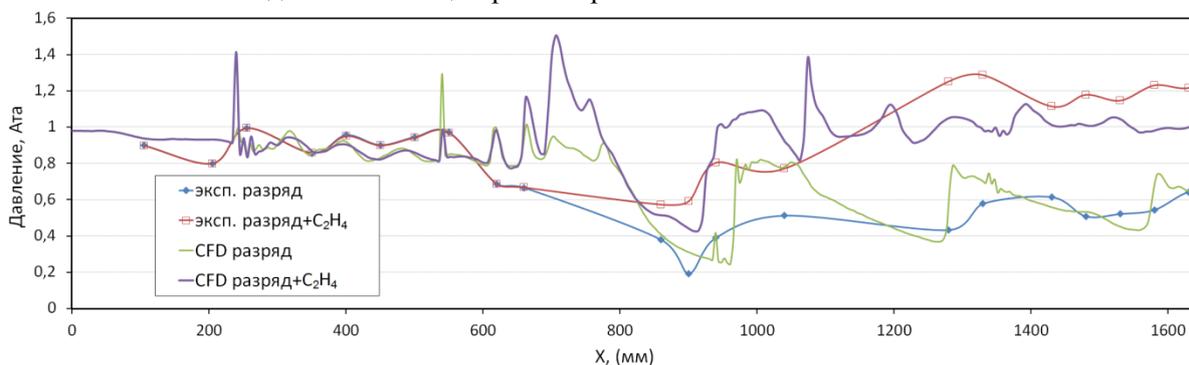


Рис.9. Распределение давления вдоль канала.

Эксперимент – расход C_2H_4 9.2 г/с, моделирование – расход C_2H_4 8 г/с

Закключение

В данной работе изложены результаты моделирования и экспериментального исследования газодинамических процессов в сверхзвуковой камере сгорания, воспламенение и стабилизация пламени в которой осуществляются с помощью генератора плазмы. Моделирование было выполнено для двух геометрических конфигураций, первая из которых соответствует аэродинамическому каналу ИАДТ-50 из ОИВТ РАН, а вторая является упрощенной версией геометрии камеры сгорания Т131 ЦАГИ. Продемонстрированы результаты калибровки и предварительной оптимизации подачи топлива в сверхзвуковой поток. Представлен упрощенный подход к расчету плазменно-инициированного горения этилена в сверхзвуковом потоке в существенно трехмерной постановке. Показано, что, несмотря на сделанные допущения, качественные и количественные результаты моделирования находятся в удовлетворительном соответствии с результатами экспериментов.

Список литературы

- Ефимов Б.Г., Иванов В.В., Иншаков С.И., Климов А.М., Ларин Б.В., Рожков А.Ф., Самойлов И.Н., Скворцов В.В., Успенский А.А. Экспериментальное исследование нестационарного течения в рециркуляционной зоне за электроразрядным модулем // Ученые записки ЦАГИ, 2012. — Т. XLIII — № 3. — С. 3-15.
- Леонов С.Б., Савелкин К.В., Фирсов А.А., Яранцев Д.А. - Зажигание топлива и стабилизация фронта пламени в сверхзвуковом потоке при помощи электрического разряда // ТВТ, 2010 — Т.48 — №6 — С.941-947
- Трусов Б.Г. Программная система Терра для моделирования фазовых и химических равновесий в плазмохимических системах // 4 Международный симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии, 13-18 Мая 2005, г. Иваново
- Фирсов А. А., Исаенков Ю. И., Филимонова Е. А., Крупский М. Г., Яранцев Д. А., Рудаков В. Ю., Леонов С. Б. Неравновесная инициация объемного горения в двигателе внутреннего сгорания: моделирование и постановка эксперимента // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. — Т. 6. — № 6. — С. 911-922
- Фирсов А.А., Москалев И.В. Создание двумерной расчетной сетки в программном комплексе FlowVision с использованием адаптации // Инженерные системы 2013: труды международного форума, Москва, 15-16 апреля 2013. — С. 65-69
- Шурупов М.А., Леонов С.Б., Фирсов А.А., Яранцев Д.А., Исаенков Ю.И. Газодинамические неустойчивости при распаде канала субмикросекундного искрового разряда // ТВТ, 2014. — Т.52. — №2. — С.186-197
- Adamovich I.V., Choi I., Jiang N., J.-H Kim, S. Keshav, W.R. Lempert, E. Mintusov, M. Nishihara, M. Samimy, and M. Uddi - Plasma Assisted Ignition and High-Speed Flow Control: Non-Thermal and Thermal Effects // Plasma Sources Sc. and Tech., vol. 18, 2009, p. 034018
- Falempin F., Firsov A.A., Yarantsev D.A., Goldfeld M.A., Timofeev K., Leonov S.B. Plasma control of shock wave configuration in off-design mode of M = 2 inlet // Experiments in Fluids, 2015 — 56:54
- Fei Li, Xi-long Yua, Ying-gang Tong, Yan Shen, Jian Chen, Li-hong Chen, Xin-yu Chang - Plasma-assisted ignition for a kerosene fueled scramjet at Mach 1.8 // Aerospace Science and Technology 28 (2013) — 72–78
- Firsov A.A., Shurupov M.A., Yarantsev D.A., Leonov S.B. - Plasma-assisted combustion in supersonic airflow: optimization of electrical discharge geometry // AIAA 2014-0988
- Kopyl P.V., Baurov A.Yu, Shibkova L.V., Shibkov V.M., Surkont O.S., Fedoskin V.N. - External Combustion of High-Speed Multicomponent Hydrocarbon-Air Streams under Conditions of Low Temperature Plasma // AIAA 2013-1049
- Liwei Zhang, Vigor Yang, Kuo-Cheng Lin - Transient Operation of an Ethylene-Fueled Scramjet Engine with Fuel Staging // AIAA 2013-0118
- Shibkov V.M., Aleksandrov A.F, Chernikov V.A., Ershov A.P., Shibkova L.V. - Microwave and Direct-Current Discharges in High-Speed Flow: Fundamentals and Application to Ignition // J. prop and pow., — vol. 25, — No. 1 — 2009
- Vinogradov V. A., Goldfeld M. A, Starov A. V. - Ignition and Combustion of Hydrogen in a Channel with High Supersonic Flow Velocities at the Channel Entrance // Combustion, Explosion, and Shock Waves, Vol. 49, No. 4, pp. 383–391, 2013.