

Расчет перемешивания бинарной смеси в запальном устройстве

Носач С.М., Молчанов А.М., Московский авиационный институт

Часто перед разработчиками смесительных теплообменников, камер сгорания, карбюраторов, ректификаторов и многих других систем встает вопрос о том, как рассчитать и обеспечить оптимальное смешение компонентов при неизменности граничных условий, заданных другими элементами системы. При этом разработчик может варьировать лишь изменение геометрии конструкции смесителя. В этом вопросе программный пакет ANSYS CFX помогает значительно облегчить получение правильного решения.

Точное описание смешения компонентов газовой смеси позволяет значительно упростить процесс конструирования, повысить надежность проектируемых систем, реализовать технологические упрощения, оптимизировать массогабаритные характеристики, и как итог — получить экономию капитальных вложений при проектировании, изготовлении и эксплуатации. Например, в практике разработки и конструирования камер сгорания ЖРД часто наблюдается эффект образования застойных зон, не поджигаемых факелом запального устройства. Это происходит из-за одномерной направленности факела и недостаточного перемешивания компонентов в области воспламенения. Значительную роль в этом процессе играют обратные токи в застойные области огневого днища.

Рассмотрим пример, в котором происходит смешение двух газообразных компонентов в модели реального запального устройства. Запальное устройство представляет собой трубу внутренним диаметром 10 мм с одним глухим торцом и двумя патрубками подводов компонентов диаметром 7 мм для газообразного кислорода и диаметром 2 мм для водорода. Конструкция и размеры такого запального устройства делают практически невозможным не только проведение каких либо измерений для отработки конструкции, но и доработку опытных образцов. Общий вид запального устройства с патрубками

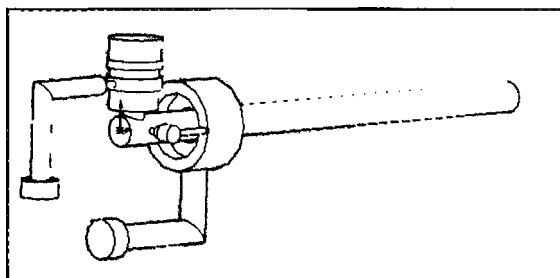


Рис. 1. Трехмерная модель запального устройства

подводов и направлением внутреннего течения показан на рис. 1.

Таким образом, для проектирования и доработки устройства перед разработчиком остается только один путь — компьютерное моделирование. Задачей исследования является получение полей массовых долей водорода и кислорода в смеси и анализ влияния расположения канала подвода водорода вдоль оси течения на смешивание.

Для рассмотрения области течения требуются допущения, которые позволят с необходимой точностью оценить локальные изменения параметров модели для оптимизации использования аппаратных ресурсов вычислительной техники при построении сеточной модели и проведения расчетов. В связи с вышесказанным, мы упрощаем модель, представленную на рис. 1, пренебрегая патрубками подводов, и останавливаемся на рассмотрении лишь камеры смешения.

Используя ANSYS ICEM CFD, строится предварительная тетраэдральная сеточная модель, приведенная на рис. 2, которая состоит из 29 тысяч узлов и позволяет получить грубое решение.

Такое решение может служить начальным условием для получения более точного результата. Кроме того, данное решение позволяет определить возможность упрощения имеющейся модели. В нашем случае градиент давления ста-

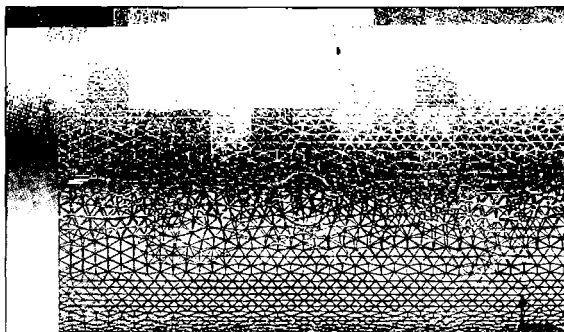


Рис. 2. Предварительная сеточная модель, наложенная на геометрию течения

новится одномерным на расстоянии 50 мм от торца при общей длине запальника в 180 мм (рис. 3), что позволяет нам укоротить модель более чем в 3 раза с условием наложения нового граничного условия выхода, соответствующего величине статического давления на уровне установления одномерного градиента давления.

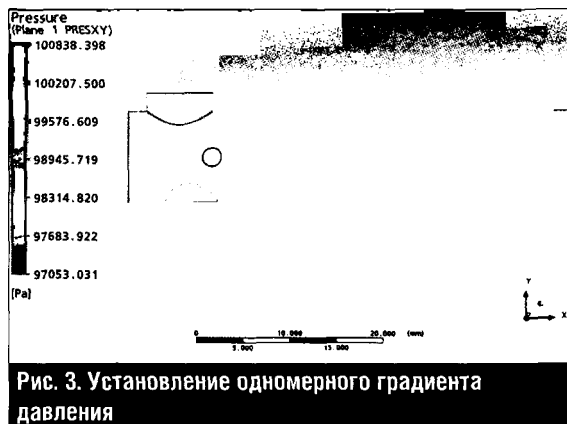


Рис. 3. Установление одномерного градиента давления

Нужно быть осторожным при подобных упрощениях, так как грубое решение отражает лишь приближенное установление градиента давления, а значит, его использование вносит определенную погрешность. Экспертно оценив данный риск как минимальный, увеличиваем область одномерного градиента давления до 60 мм.

После проведенных упрощений геометрической области и расчета величины размера элемента, согласно формулам у+ строим новую гексаэдральную сеточную модель с 420 тысячами узлов (рис. 4, 5).

Поперечный дув газа — это сложный газодинамический процесс, требующий верификации, которая была проведена на основании экспериментальных данных, опубликованных в журнале Fluid Mechanics [1]. Сравнение данных численного и реального экспериментов дали точность с погрешностью в 5-10% (рис. 5). Верификация была необходима в первую очередь

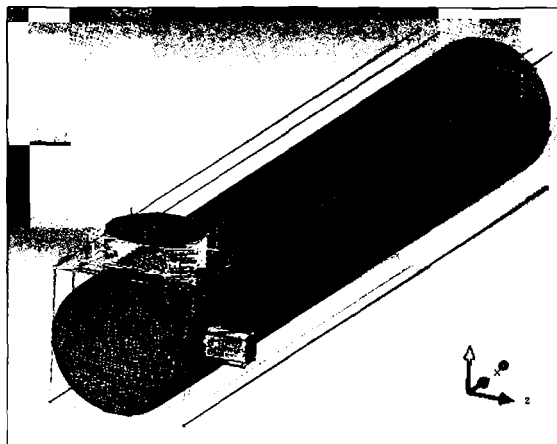


Рис. 4. Уточненная сеточная модель. Вид 1

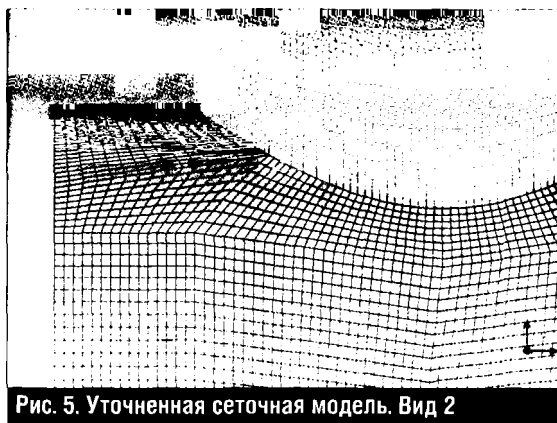


Рис. 5. Уточненная сеточная модель. Вид 2

для определения модели турбулентности, позволяющей получить необходимую для решения задачи точность. В верификационном расчете хорошую сходимость и высокую точность показала модель k-ε, которая хорошо описывает турбулентные течения вдали от поверхностей, на которых образуются так называемые зоны ламинарного подслоя.

В итоге при расчете смесителя мы получили достаточные данные о стехиометрических соотношениях в тракте запального устройства на разных геометрических моделях при сдвиге канала подвода водорода по оси течения в трубе (рис. 6 и 7).

Наличие водорода на противоположной стенке во втором варианте геометрии не является ошибкой или недостаточной сходимостью, а говорит о трехмерности течения, что иллюстрирует рис. 8.

Из рис. 8 видно, что «артефакт», появившийся на рис. 7 говорит о растекании водорода по противоположной входу водорода стенке. Это может быть использовано в случае с лазерным воспламенением, фокусирующимся на стенку.

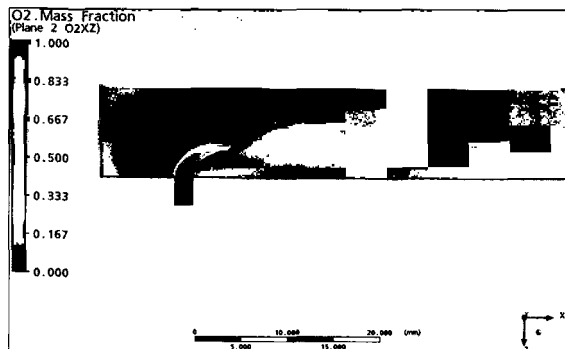


Рис. 6. Поле массовой доли кислорода в тракте смесителя. Вариант геометрии 1

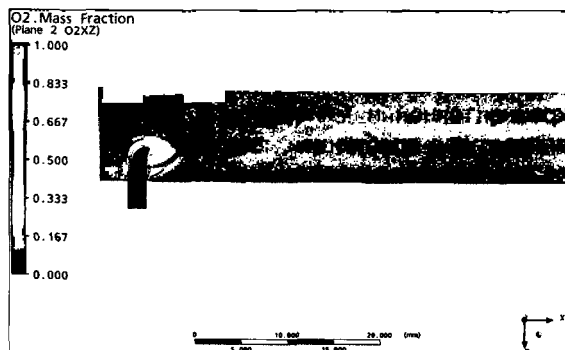


Рис. 7. Поле массовой доли кислорода в тракте смесителя. Вариант геометрии 2

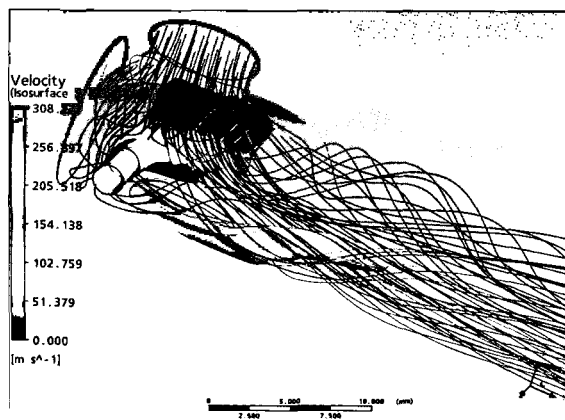


Рис. 8. Распределение скорости вдоль линий тока. Изоповерхность, образованная скоростью 100 м/с.

Трехмерные и двухмерные изображения бывают полезны с точки зрения наглядности и оценки смешения, но их крайне сложно представить в аналитической форме. Применяя экспорт данных с использованием ANSYS CFX-Post, полученные данные можно представить в виде таблиц параметров, зависящих от координат исходной области, либо в виде двумерных графиков — рис. 9 и 10, где ось абсцисс — расстояние от граничного условия подачи кислорода до противоположной стенки по оси патрубка,

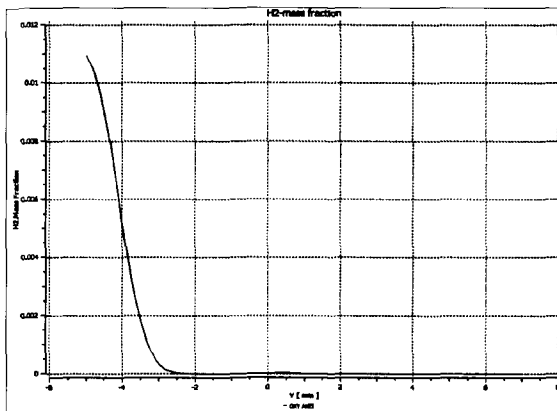


Рис. 9. Распределение массовой доли водорода вдоль оси подачи кислорода. Вариант 1

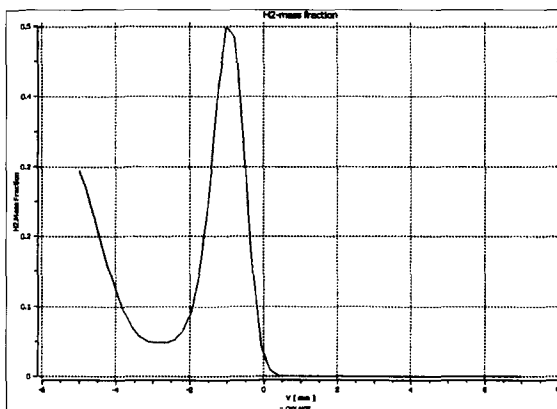


Рис. 10. Распределение массовой доли водорода вдоль оси подачи кислорода. Вариант 2

что соответствует размещению зажигающего устройства.

Перемешивание компонентов улучшается во втором варианте, что заметно при сравнении полей массовых долей на рисунках 6 и 7. Если в первом варианте вдоль течения встречаются высокие концентрации компонентов, то во втором случае наличие компонентов размывается быстрее. Аналитически это отражается на графиках, построенных по линии тока водорода (рис. 10 и 11). Аналитически это отражается на графиках, построенных по линии тока водорода (рис. 10 и 11). Массовое отношение подаваемых компонентов составляет 41.5, что составляет примерно 97.65% кислорода + 2.35% водорода. На графиках видно, что уже на расстоянии 10 мм происходит полное распределение водорода по массе кислорода во втором варианте, в то время как в первом варианте это размытие устанавливается на уровне 25-30 мм от входа водорода и медленно стремится к минимуму. Это происходит вследствие сильных турбулентных завихрений, происходящих у глухого торца конструкции.

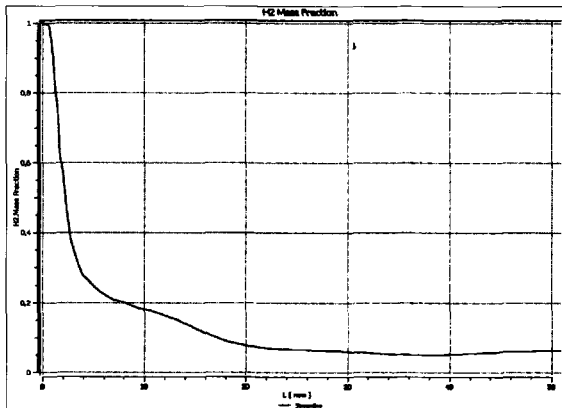


Рис. 11. Изменение массовой доли по линии тока в зависимости от координаты. Вариант 1

Подводя итоги необходимо заметить, что численное моделирование, проведенное с использованием программного комплекса ANSYS CFX, позволило рассчитать оптимальную конструкцию смесительного элемента с меньшими временными и финансовыми затратами. Удалось избежать разработки конструкторской и технологической документации для каждого варианта изделия, их изготовления в единичных экземпля-

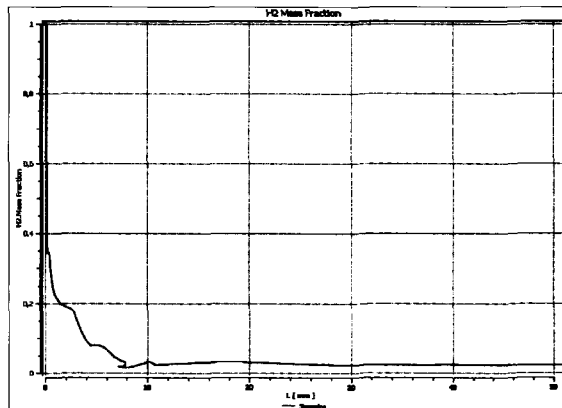


Рис. 12. Изменение массовой доли по линии тока в зависимости от координаты. Вариант 2

рах, проведения испытаний с использованием крайне точной и миниатюрной измерительной аппаратуры, требующей настройки и юстировки при проведении каждого эксперимента.

Литература

- 1 Chassaing P., George J., Claria A., Sananes F. Physical characteristics of subsonic jets in a cross-stream // J. Fluid Mech. 1974, v. 62, Pt.1. p. 41-64.

Расчёт системы плёночного охлаждения в ANSYS FLUENT

Матушкин А. А., Московский авиационный институт

Газовые турбины относятся к числу самых напряженных узлов конструкции ГТД, ограничивающих в большинстве случаев надежность двигателя и его ресурс. Это связано с большими значениями температуры и давления газа перед турбиной и окружной скорости на среднем диаметре рабочих лопаток. Рабочие и сопловые лопатки турбины работают в непосредственном соприкосновении с высокотемпературным газом, при этом его температура в перспективных двигателях достигает уровня 1900...2150K на входе в турбину. Наиболее распространенной системой охлаждения современных турбин является схема открытого (с выпуском охладителя в проточную часть турбины) воздушного охлаж-

дения. При пленочном охлаждении теплозащитный пристеночный слой образуется в результате взаимодействия системы струй охладителя, вытекающих через отверстия, со сносимым газовым потоком. Струи охладителя проникают в основной поток газа, постепенно размываются, после чего необходимо дополнительное количество охлаждающего воздуха, подаваемого через последующий ряд отверстий. В настоящее время, с появлением новых производственных технологий, появилась возможность создания каналов пленочного охлаждения разнообразных форм, в частности *anti-vortex* и *fan-shapes*. Таким образом, для обеспечения равномерного охлаждения лопатки актуально опре-