

УДК 621.454.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ
В ФОРСУНКЕ КАМЕРЫ ЖРД С ПОМОЩЬЮ ANSYS CFD**

© 2013 В.С. Егорычев, Л.С. Шаблей, И.В. Кудинов

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 02.12.2013

В данной статье описаны основные приемы работы с программным комплексом ANSYS для моделирования рабочих процессов двухкомпонентных форсунок ЖРД.

Ключевые слова: CFD, форсунка, ЖРД, расчётная модель.

В самом общем случае рабочий процесс в камере сгорания ЖРД представляет собой совокупность сложных, взаимосвязанных физико-химических процессов преобразования топлива в конечные продукты сгорания, а именно: подача (впрыск) топлива; распыление и дробление компонентов; первоначальное смешение; распределение компонентов в объёме КС; прогрев и испарение капель за счёт теплоты из зоны горения; смешение газообразных горючего и окислителя; горение, т.е. протекание экзотермических химических реакций как гомогенных, так и гетерогенных; турбулентное и диффузное перемешивание продуктов сгорания; выравнивание состава продуктов сгорания перед входом в сопло.

Эффективность работы камеры сгорания ЖРД зависит, прежде всего, от качества протекания процессов смесеобразования и горения.

Смесеобразование – это комплекс процессов, протекающих от момента подвода к камере компонентов топлива до образования в КС однородной гомогенной топливной смеси с требуемым соотношением компонентов. Система смесеобразования осуществляет ввод, распыление, смешение и первоначальное распределение компонентов топлива или продуктов газогенерации в камере сгорания. Она должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить высокую полноту сгорания топлива, минимальные потери энергии в камере, надёжную защиту её стенок от прогара и устойчивое протекание рабочего процесса [1].

Проектирование системы смесеобразования в камере современных ЖРД требует качественного моделирования всех составляющих рабочего процесса.

Одним из перспективных компьютерных средств исследования рабочего процесса камеры ЖРД, в частности гидродинамики смесительной головки и её форсунок, является использование CFD-пакета (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидрогазодинамика) ANSYS CFX. Для однофазных течений применение такого моделирования позволяет получать достаточно достоверные данные [2], в том числе при расчётах с горением [3]. Использование таких моделей для расчётов ГТД [4] позволяет добиваться ранее недостижимых результатов [5].

В настоящей статье приведены результаты предпринятой попытки моделирования рабочего процесса смесительной головки и форсунок в ANSYS CFD и выработки основных положений методики такого моделирования.

Применение компьютерных технологий при разработке системы смесеобразования ЖРД и её элементов позволяет не только автоматизировать процесс разработки, но и повысить качество проектируемых изделий, существенно сократить сроки их создания и привести к снижению затрат на весь жизненный цикл.

Насколько тщательно будут выполнены все проектные работы по смесительной головке и форсункам, правильно построена методика проведения численного эксперимента в значительной степени зависят надёжность двигателя, возможность сокращения сроков каждого из этапов работ и в конечном счёте сроки создания и стоимость двигателя.

Главным элементом смесительной головки камеры ЖРД, определяющим эффективность процесса смесеобразования являются форсунки.

В данной работе описаны основные приемы работы с программным комплексом ANSYS для моделирования рабочих процессов двухкомпонентных форсунок ЖРД. Моделирование форсунок разных типов: струйно-струйной, струйно-центробежной, центробежно-центробежной, как с внешним смешением компонентов, так и с внут-

Егорычев Виталий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, E-mail: tdl@ssau.ru

Шаблей Леонид Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент. E-mail: afroaero@hotmail.ru

Кудинов Илья Владимирович, студент. E-mail: catrigik@hotmail.com

ренним, – осуществляется в сущности по одному алгоритму.

Процесс моделирования двухфазных потоков в двухкомпонентной форсунке с внутренним смешением состоит из пяти основных этапов: создание геометрической модели (CAD-модели) проточной части форсунки; создание и наложение сетки в проточной части форсунки на базе геометрической модели; создание и наложение начальных и граничных условий моделирования исследуемых процессов; поиск решения и анализ его результатов.

Далее каждый этап описан подробно.

Для большей достоверности моделирования в расчёт включаются зоны, из которых рабочее тело поступает в форсунку, а также зону, в которую происходит истечение (рис. 1).

Для этого, используя инструменты эскизирования Design Modeler (Sketching), формируется эскиз половины расчётной зоны – построением двух замкнутых контуров (рис. 2).

Чаще всего целесообразно использовать секторную модель проточной части - это уменьшает время расчёта без потери качества решения при условии корректного выбора сектора.

Следует выделять моделируемую часть форсунки течения так, чтобы поверхности разделения не касались краёв отверстий, непарных границ форсунки и т.п., иначе в паре периодических границ может возникнуть несоответствие (рис. 3).

Построенная секторная геометрическая модель струйно-центробежной форсунки имеет вид, представленный на рис. 4.

При наложении сетки конечных элементов рекомендуется учитывать ряд особенностей, а именно:

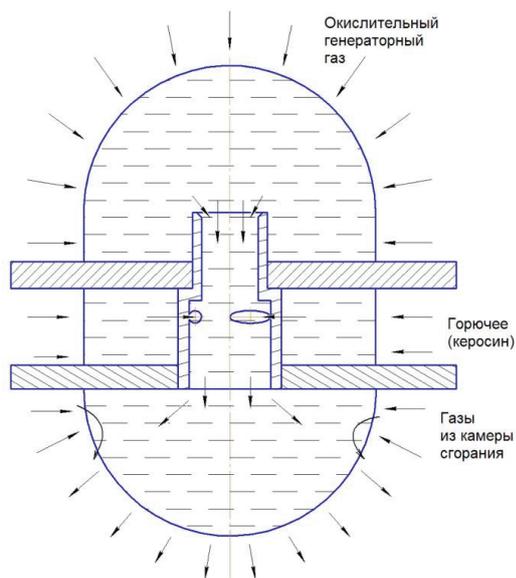


Рис. 1. Расчётная зона струйно-центробежной форсунки

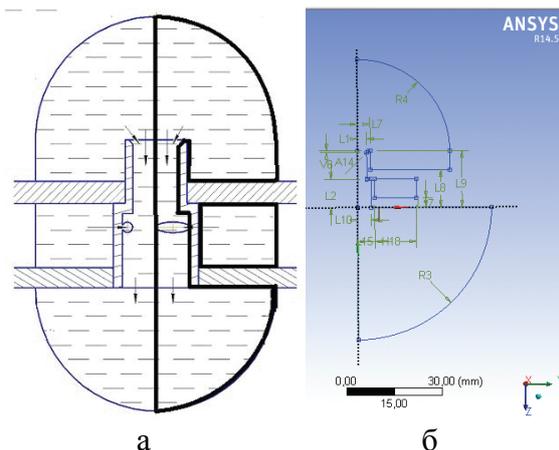


Рис. 2. Эскиз проточной части: а – схема; б – эскиз в Design Modeler

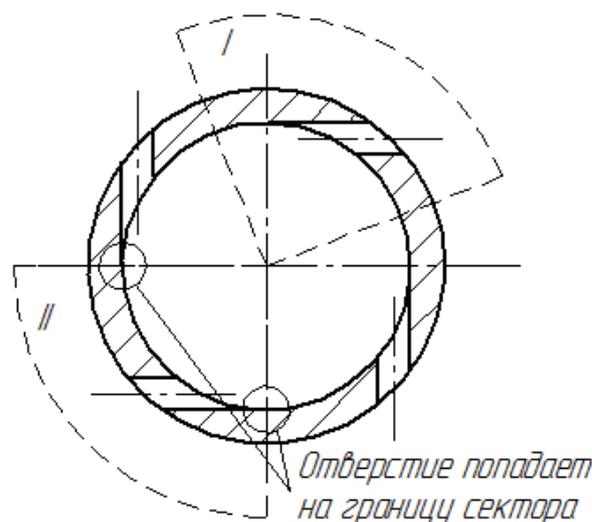


Рис. 3. Схема выделения секторной модели форсунки: I – правильно, II – неправильно (на границы попадают тангенциальные отверстия)

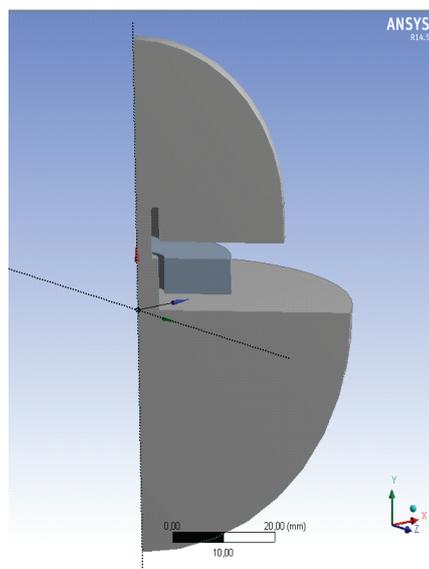


Рис. 4. Геометрическая модель струйно-центробежной форсунки

1) Для более подробного разрешения пограничного слоя потока вдоль непроницаемых стенок, рекомендуется накладывать призматические слои сетки.

2) Необходимо измельчать расчётную сетку в областях концентрированного течения, что необходимо для более правильного расчёта высоких градиентов потока (в пограничном слое, например). Для первоначального выбора размера элементов в каналах форсунки можно использовать ячейки 1/40...1/20 диаметра.

При создании расчётной модели форсунки также имеется ряд параметров, которые нужно учитывать для получения расчёта с высокой степенью точности, например:

1) При низких скоростях газа (до 0,3 числа Маха) можно не учитывать изменение плотности газа. Это оправдано на начальных этапах расчёта.

2) При использовании секторных моделей на гранях разреза предпочтительнее применять периодические границы, а не условия скользящих стенок.

Решая поставленную таким образом задачу в ANSYS CFX можно получать сведения о работе исследуемой форсунки:

1) параметры и картину контура концентрации окислителя, горючего и продуктов сгорания (поступающих из камеры сгорания);

2) линии тока окислителя, горючего и продуктов сгорания (рис. 5);

3) угол выхода топлива из форсунки;

4) параметры работы форсунки (расходы компонентов топлива, значения их давления, коэффициент расхода форсунки и др.).

Сравнение полученных результатов с имеющимися данными аналитического расчёта приведено в табл. 1.

Замечено, что при повышении сложности моделей результаты расчёта асимптотически приближаются к аналитическому расчёту (табл. 2).

Таким образом, проведенная работа позволяет сформулировать следующие выводы:

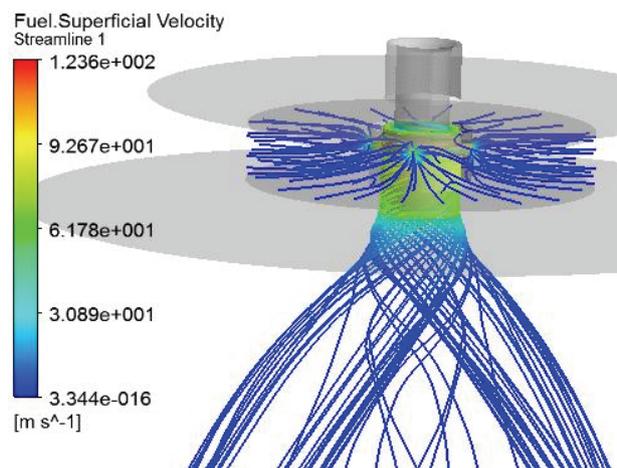


Рис. 5. Картина линий тока горючего

Таблица 1. Результаты моделирования

Параметр	Результат аналитического расчёта [1]	Результат CFD-расчёта
Расход окислителя, г/с	279,7	279,7
Расход горючего, г/с	274,0	274,0
Давление на входе окислителя, МПа	18,09	17,19
Давление на входе горючего, МПа	18,08	22,66
Давление на выходе из форсунки, МПа	17,09	17,09
Средний угол факела распыла, градусы	55,8	45,0

Таблица 2. Сравнение вариантов расчёта струйной форсунки

Вариант расчёта (тыс. элементов)	Перепад давления на форсунке $\Delta p_{ф}$, МПа	Массовый расход $\dot{m}_{ф}$, г/с	Коэффициент расхода форсунки μ
CFD-расчёт (10)	0,5565	316,2	0,8087
CFD-расчёт (100)	0,4931	303,7	0,8672
CFD-расчёт (500)	0,4531	301,7	0,8872
Аналитический расчёт	0,4403	300,0	0,8991

1. Сравнительный анализ результатов моделирования рабочего процесса двухкомпонентных газожидкостных форсунок в ANSYS CFD с применяемыми проектными методами показал, что он может быть применён при проектировании форсунок камеры ЖРД для моделирования внутри форсунки.

2. Выработаны основные положения методики моделирования двухфазных потоков двухкомпонентных газожидкостных форсунок в ANSYS CFD.

3. В рамках данной работы не удалось корректно смоделировать дробление пелены компонента топлива за срезом сопла форсунки в камере сгорания. Дальнейшая работа должна быть направлена на разработку математической модели дробления струи или пелены на капли из-за воздействия на неё внешних и внутренних сил.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании Постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егорычев В.С. Расчёт и проектирование смесеобразования в жидкостном ракетном двигателе: учеб. Пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2011. 100 с.
- Матвеев В.Н. Шаблий Л.С. Оценка адекватности электронной модели потока и КПД характеристики центростремительного микротурбинного привода //

- Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. 2011 №2 (26). Часть 2. С. 194-199.
3. Моделирование процессов горения пропана при переводе камеры сгорания ГТД на газообразное топливо // С.Г. Матвеев, А.М. Ланский, М.Ю. Орлов, В.Ю. Абрашкин, Д.Н. Дмитриев, И.А. Зубрилин, А.В. Семёнов / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 5. С.168-178.
 4. *Кривцов А.В.* Технология моделирования рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ-системах // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №3 (34). Часть 2. С.197-202.
 5. Оптимизация параметров первых ступеней семи-ступенчатого компрессора авиационного двигателя / Г.М. Попов, В.Н. Матвеев, О.В. Батулин, Д.А. Колмакова // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени акад. С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. №5 (36). Часть 2. Самара. С. 191-198.

MODELING OF TWO-PHASE FLOW IN THE INJECTOR OF LRE CAMERA WITH ANSYS CFD

© 2013 V.S. Egorychev, L.S. Shabliy, I.V. Kudinov

Samara State Aerospace University named after Academician S. P. Korolyov
(National Research University)

This article describes the basic techniques for working with software ANSYS to simulate two-component injectors workflow engines.

Key words: CFD, injector, LRE, calculation model.

Vitaly Egorychev, Candidate of Technical Sciences, Associated Professor. E-mail: tdla@ssau.ru.

Leonid Shabliy, Candidate of Technical Sciences, Assistant Lecturer. E-mail: afroaero@hotmail.ru.

Ilya Kudinov, Student. E-mail: catrigik@hotmail.com.