

духе (справедливо для диапазонов T_b : 2400 – 3300 К; r_0 : 5 – 20 мкм; n_{O_2} : 0,1 – 0,23).

Для оценки точности и корректировки модели требуется проведение экспериментов с целью определения времени задержки воспламенения и времени горения частиц различного диаметра. В дальнейшем представляется целесообразным переход от одиночной частицы к совокупности частиц, а так же описание воспламенения и горения частицы совместно с описанием её движения в камере сгорания летательного аппарата.

*Работа выполнена при поддержке Гранта
Ведущей научной школы России, проект НШ-9774.2016.8.*

Список литературы

1. *King M.K.* Boron Ignition and Combustion in Air-Augmented Rocket Afterburners // Combustion, Science and Technology – 1972. V. 5. № 4. P. 155-164.
2. *Вовчук Я.И., Золотко А.Н., Клячко Л.А.* Время горения частиц бора с учетом влияния диффузионного и кинетического факторов // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем. Черноголовка, 1977. С. 90 – 93.
3. *Гуревич М.А., Озеров Е.С., Юринов А.А.* О влиянии плёнки окисла на характер воспламенения алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. №4. С. 50-55.
4. *Бекстед М.В.* Анализ данных по времени горения частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41. № 5. С. 55 – 69.

УДК 621.454.2

МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ ЖРД

Шаблий Л.С., Самарский университет, г. Самара, shabliy@ssau.ru
Зубанов В.М., Самарский университет, г. Самара, waskes91@gmail.com
Степанов Д.В., Самарский университет, г. Самара, crey93.stepanov@yandex.ru

Применение технологий компьютерного моделирования при исследовании рабочих процессов в камере ЖРД позволяет повысить качество проектирования новых ЖРД и улучшить существующие. В настоящее время направление науки, связанное с исследованием химической кинетики горения, достаточно подробно освещено как на уровне описания эмпирических моделей [1, 2], так и методик моделирования различных го-

релочных устройствах [3, 4]. Что же касается практического применения численного моделирования для анализа процессов горения в ЖРД – здесь вопрос пока ещё остается недостаточно изученным. В данной работе был проведён анализ основных возможностей программных продуктов, позволяющих реализовать моделирование рабочего процесса камеры ЖРД, и на базе ANSYS CFX были созданы две методики моделирования процесса горения в камерах ЖРД, работающих на компонентах «водород-кислород» и «керосин-кислород».

Среди программных продуктов, реализующих моделирование процесса горения в камере ЖРД, можно выделить следующие:

1. Программа «ТЕРРА», разработанная в МГТУ им. Баумана. В данном программном комплексе реализован расчет параметров равновесия продуктов сгорания, достигаемого в результате химической реакции по длине сопла ЖРД в трех сечениях: камера сгорания, критическое сечение сопла, срез сопла. Течение считается одномерным, т.е. распределение продуктов сгорания по срезу сопла не учитывается.

2. Программа «SPPS PMX», разработанная на кафедре теории двигателей летательных аппаратов в Самарском университете. В данном программном комплексе наряду с моделью идеального ЖРД реализована двумерная газодинамическая модель с учетом вязкости в приближение пограничного слоя. Также учитывается двумерный характер течения в сверхзвуковой профилированной части сопла путем решения уравнений Эйлера.

3. Программа FlowVision, разработанная компанией ООО «ТЕСИС». Данный программный продукт дает возможность пользователю решать задачи, связанные с горением, моделированием течения в газовых горелках, котлах, камерах сгорания. В FlowVision реализованы следующие модели горения: «Зельдович», «Магнуссен», «Аррениус», «Аррениус-Магнуссен», упрощенная модель Eddy Dissipation Concept.

4. Программа ANSYS CFX разработчика ANSYS Inc. (SAS Inc.). В данном программном продукте можно смоделировать трёхмерное течение рабочего тела с учётом всех внутрикамерных процессов (подача компонентов топлива, смешение, гомогенное горение, диффузия, турбулентное перемешивание, образование продуктов сгорания). Наиболее широко в ANSYS CFX используются модели горения Eddy Dissipation Model (EDM), Finite Rate Chemistry (FRC) и Laminar Flamelet.

Детально была рассмотрена только методика расчета горения в ANSYS CFX, причём в двух вариантах: для ЖРД, работающих на топливных парах «водород-кислород» и «керосин-кислород».

Моделирование варианта «водород-кислород» проводилось как с использованием одной глобальной реакции (брутто-формула), так и с ис-

пользованием разветвленной системы химических уравнений [5]. Использование брутто-реакции по сравнению с системой химических реакций имеет преимуществами высокую скорость расчета и простоту постановки задачи. Система реакций даёт более точные результаты (рис. 1), но меньшую стабильность решения.

Моделирование процесса горения в камере на компонентах «керосин-кислород» было реализовано только по брутто-реакции горения керосина, поскольку не удалось найти набор реакций, описывающий горение керосина, который бы приводил к стабильному решению. Тестовые попытки использования разных наборов реакции окончились неудачами. Тем не менее, поскольку процесс горения керосина в камере ЖРД происходит с высокой интенсивностью и практически весь керосин сгорает, не выходя за пределы камеры сгорания, то через критическое сечение сопла и далее проходят уже продукты его горения. Поэтому в [6] было предложено использовать комбинированный подход: продукты горения получать из программы ТЕРРА, основанной на эмпирических зависимостях, а в ANSYS CFX считать «замороженное» течение уже этих продуктов без моделирования горения (рис. 2).

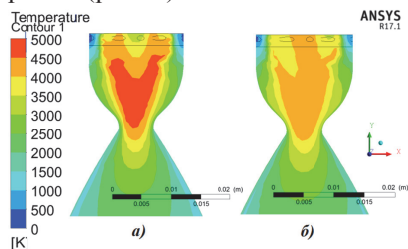


Рис 1. Распределение температуры по камере компонентов «кислород-водород» при использовании:
 а – 1 брутто-реакции;
 б – схемы из 18-ти реакций

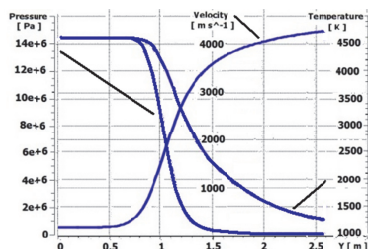


Рис 2. Изменение параметров потока вдоль камеры ЖРД

Сравнение удельного импульса, полученного при расчёте «замороженного» течения в ANSYS CFX и удельного импульса, рассчитанного в программе ТЕРРА по аналогичному «замороженному» течению, показало адекватность данного комбинированного метода (разница не превышает 3-5%). При этом, сравнение результатов расчёта «замороженного» и равновесного течения (с учётом вторичных химических реакций между продуктами основной реакции), полученных из программы ТЕРРА, показывает, что отсутствие учёта вторичных химических реакций

само-по-себе даёт погрешность 5-10%. Поэтому задача поиска набора реакций (или иной модели горения) для пары «керосин-кислород» остаётся актуальной.

Список литературы

1. *Гардинер У.* Химия горения [под ред. У. Гардинера]. М.: Мир, 1988. 464 с.
2. *Gerasimov G.Ya., Shatalov O.P.* Kinetic mechanism of combustion of hydrogen-oxygen mixtures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V. 86. No. 5. P. 929-936.
3. Определение размеров зоны обратных токов трехмерной модели камеры сгорания ГТД с помощью пакета ANSYS Fluent / *В.В. Бирюк, М.Ю. Орлов, И.А. Зубрилин, Ю.А. Синеговский, А.В. Кривцов* // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. № 5(29). С. 44-48.
4. 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 университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. № 5 (29). С. 168-178.
5. *Zubakov V., Egorychev V., Shabliy L.* Hydrogen-oxygen rocket engine design using CFD-modeling // Research Journal of Applied Sciences. 2014. V. 9. № 10. P. 660-663.
6. *Егорычев В.С., Шаблий Л.С., Зубанов В.М.* Моделирование внутрикамерного рабочего процесса РДМТ на газообразных кислороде и водороде в ANSYS CFX: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2016. 140 с.

УДК 536.46

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СВОБОДНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ

Дермер П.Б., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, dermer@bmstu.ru

Ключевые слова: огненные смерчи, огненные вихри, физическое моделирование.

Огненные смерчи наряду с воздушными смерчами являются примерами экологических катастроф, наносящими колоссальный ущерб окружающей среде и приводящими к многочисленным разрушениям и жертвам. Огненные вихри – вертикально ориентированные вращающиеся огненные факелы, драматически увеличивающие опасность природных и техноген-