

Математическое моделирование рабочего процесса камеры ракетного двигателя малой тяги на кислородно-водородном топливе

В.Л. Салич

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

Представлены полученные в ходе исследований рекомендации, касающиеся математического моделирования процессов в камерах кислородно-водородных РДМТ: выбор модели турбулентности, модели горения, типа и размерности расчетной сетки, определение параметров камеры РДМТ по результатам численного моделирования. Приводятся сопоставления характеристик камеры на различных режимах, полученных экспериментально и по результатам численного моделирования.

1. Введение

Современные тенденции использования в ракетно-космической технике экологически безопасных и высокоэнергетических компонентов топлива неизбежно приведут к востребованности ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) на кислородно-водородном топливе. Необходимость обеспечения высоких динамических характеристик РДМТ требуют подачи на вход в двигатели криогенных компонентов топлива в газифицированном виде.

Облик современного РДМТ включает в себя камеру, управляющие топливные клапаны, стабилизаторы расхода. В зависимости от назначения и требования заказчика двигатель также может включать в себя ряд других элементов [1-2].

Если учесть возможность применения в РДМТ на газообразных компонентах топлива управляющих клапанов БРТ200 разработки НИИМаш [2], имеющийся опыт в разработке и производстве стабилизаторов расхода, то основной и наиболее сложной задачей является создание камеры, обеспечивающей высокие энергетические характеристики при допустимом тепловом состоянии элементов конструкции. Данная задача осложняется тем, что в РДМТ нежелательно применение традиционного для двигателей больших и средних тяг регенеративного охлаждения, поскольку это ухудшает динамические характеристики. Поэтому для успешного решения задачи создания высокоэффективной камеры РДМТ необходим выбор системы подачи, формирующей взаимное течение, перемешивание и взаимодействие компонентов топлива в объеме камеры с достижением высокой полноты сгорания топлива при допустимом тепловом состоянии элементов конструкции, что значительно осложняется характерными для камер РДМТ ограниченном числе смесительных элементов и малыми размерами конструкции.

К настоящему времени имеются работы, где для изучения процессов, происходящих в камерах РДМТ, успешно применялось математическое моделирование, например [3-8].

С целью создания опережающего научно-технического задела, автором с использованием численного моделирования внутрикамерных процессов в пакете ANSYS CFX была получена высокоэффективная конструкция камеры РДМТ, прошедшая затем огневые испытания, подтвердившие высокие энергетические характеристики. В работах [5-7] представлена математическая модель, описывающая течение многокомпонентного гомогенного рабочего тела в камере с учетом смесеобразования и химических реакций, результаты моделирования рабочего процесса в камерах различных конструкций. В процессе численных экспериментов автором была получена конструкция КВ-16, обеспечивающая высокую полноту сгорания в ядре потока с реализацией вблизи элементов конструкции областей с пониженной температурой. Расчеты проводились на суперкомпьютере «Торнадо» Южно-Уральского государственного университета в квазистационарной постановке с распараллеливанием на 31 ядро. За критерий установления было принято равенство суммарного расхода компонентов топлива на входе и выходе из камеры. При размерности расчетной сетки ~ 3 млн. ячеек расчет одного варианта камеры длился ~

1,5 часа. Результаты моделирования различных вариантов конструкции представлены в работе [6]. В настоящей статье представлены полученные в ходе исследований рекомендации, касающиеся моделирования процессов в камерах кислородно-водородных РДМТ: выбор модели турбулентности, модели горения, типа и размерности расчетной сетки, определение параметров камеры РДМТ по результатам численного моделирования. Приводятся сопоставления характеристик камеры на различных режимах, полученных экспериментально и по результатам численного моделирования.

2. Моделирование турбулентности

В настоящее время в инженерной практике часто применяются и рекомендуются для решения задач с учётом горения модели на основе гипотезы турбулентной вязкости [9]. Недостатком таких моделей является то, что предположение об изотропности турбулентных параметров не всегда может быть применено для закрученных течений [10], используемых в камерах РДМТ для интенсификации процессов. С целью исследования влияния моделей турбулентности на результаты моделирования была создана расчётная область (рис.1), представляющая собой камеру РДМТ, на вход в которую через кольцевую область А подавался расход водорода 0,005 кг/с. Отношение тангенциальной составляющей скорости к осевой (число Френкеля) задавалось равным 4. Как видно из результатов расчёта (рис. 2), только модель рейнольдсовых напряжений RSM BSL показывает наличие обратных токов (наличие областей, где осевая составляющая скорости меняет знак). Модели k-ε и SST, основанные на гипотезе турбулентной вязкости, не выявляют обратных токов, тогда как согласно [11], они должны иметь место при числе Френкеля более 1,92.

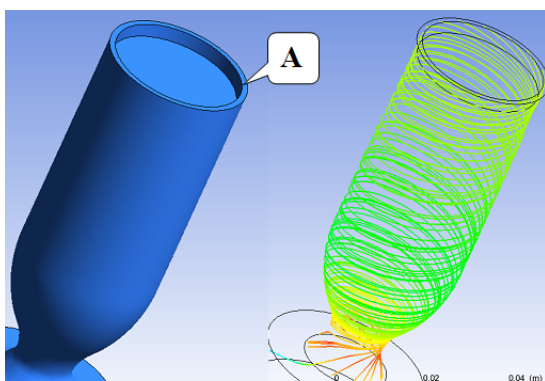


Рис. 1 Расчётная область (слева) и линии тока (справа)

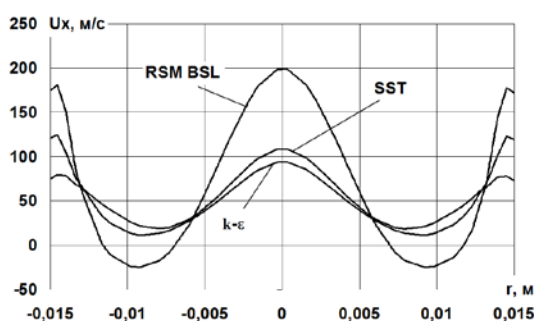


Рис. 2 Распределение осевой составляющей скорости вдоль диаметальной линии

Поэтому для расчётов была принята модель турбулентности RSM BSL. Следует отметить, что расчётно-теоретические исследования горелочного модуля, выполненные авторами работы [12] с использованием различных моделей турбулентности, выявили наилучшую сходимость с экспериментальными данными при использовании именно модели RSM BSL.

3. Моделирование химических реакций

Кинетический механизм окисления водорода к настоящему времени достаточно хорошо изучен. Также из максимально полной схемы горения найдены упрощенные механизмы, описывающие известные экспериментальные данные (например, работа [13]). Однако моделирование с использованием нескольких реакций к настоящему времени представляет собой достаточно сложную задачу. Для моделирования диффузионного горения (характерного для камеры сгорания РДМТ), когда время смешения компонентов топлива значительно превышает время протекания химических реакций, разработаны модели, позволяющие избежать значительных вычислительных трудностей. В настоящей работе использовались два подхода: модель диссипации вихря и модель тонкого фронта пламени [9].

При использовании модели диссипации вихря для существенного упрощения расчёта принято допущение о том, что рабочее тело является смесью трех «веществ» «Окислитель», «Горючее», «Продукты сгорания при стехиометрическом соотношении». Горение моделируется одностадийной необратимой брутто-реакцией:



где k_0 – массовое стехиометрическое соотношение компонентов топлива.

Для учёта реакций диссоциации и рекомбинации принята модель локального термодинамического равновесия рабочего тела, которая позволяет представлять состав как функцию состояния. В этом случае не имеет значения последовательность химических реакций при переходе к равновесию. Особенностью предложенной модели является то, что влияние на процессы реакций диссоциации и рекомбинации учтено через замыкающие зависимости от температуры и давления молекулярных масс и «химически равновесных» теплоемкостей веществ, составляющих газовую среду. Для этого с помощью программы [14] предварительно осуществляется серия термодинамических расчётов равновесного состава веществ «горючее», «окислитель», «продукты сгорания» при различных давлениях и температурах.

При использовании модели тонкого фронта пламени подключалась флеймлет – библиотека ANSYS CFX.

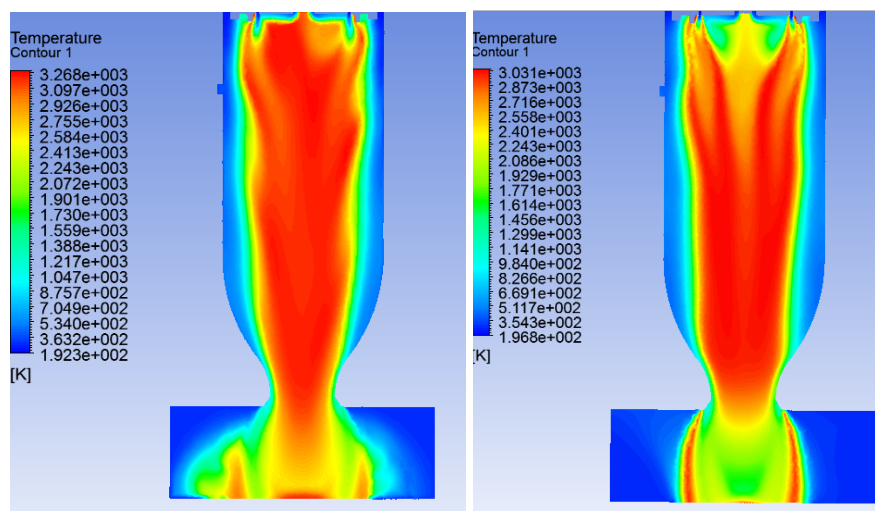


Рис.3. Поле температур в камере КВ-16, полученное при использовании модели диссипации вихря (слева) и модели тонкого фронта пламени.

Как видно из результатов расчета (рис. 3), максимальная температура при использовании модели тонкого фронта пламени составляет ~3000 К, тогда как использование модели диссипа-

ции вихря с брутто-реакцией дает максимальную температуру ~ 3300 К, что соответствует результатам термодинамического расчета. Следовательно, данные флеймлет – библиотеки нуждаются в уточнении, и использование модели диссипации вихря является более надежным.

4. Тип и размерность расчетной сетки

В процессе численных экспериментов использовалась тетраэдрическая расчетная сетка (рис. 4). При числе расчетных ячеек более 3 млн. решение можно считать сеточно независимым. В качестве примера на рис. 5 приведены поля температур камеры КВ-16, полученные на тетраэдрических сетках различной размерности.

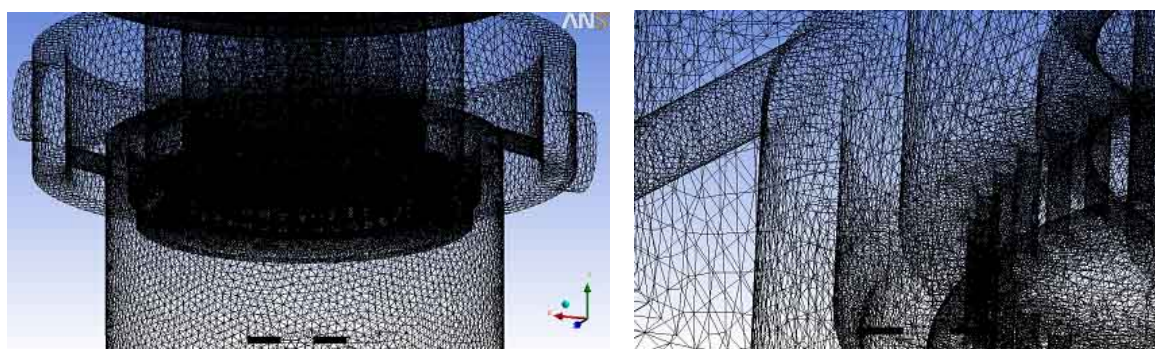


Рис.4. Фрагменты расчетной сетки

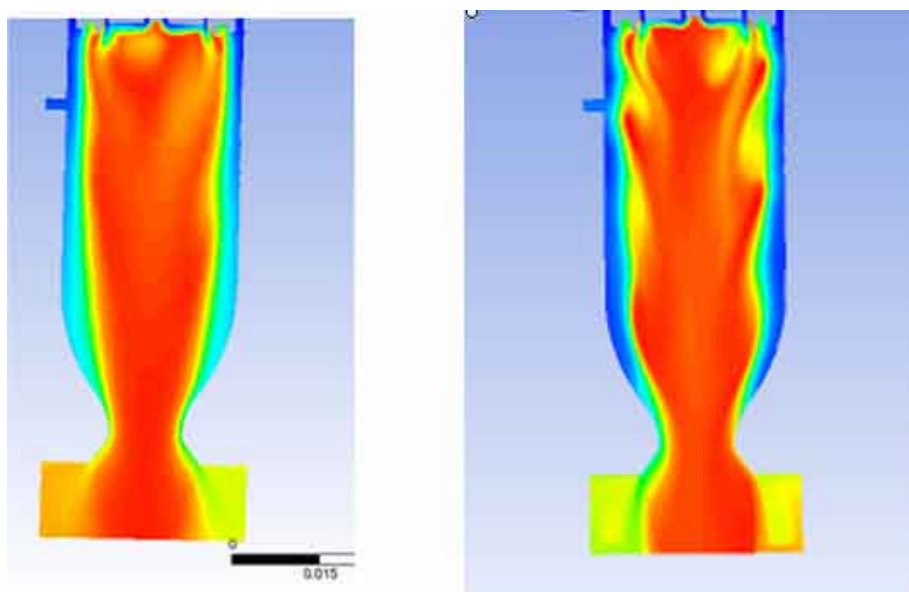


Рис. 5. Поля температур в камере КВ-16, полученные на тетраэдрических сетках различной размерности. Слева: ~ 3 млн. ячеек, справа ~ 7 млн. ячеек

Видно, что более мелкая сетка позволяет подробнее разрешить некоторые особенности течения. Несмотря на это картины течения качественно схожи; распределения параметров в характерных сечениях камеры близки.

На рис. 6 представлена шестая часть расчетной области с разбиением на блоки и фрагмент блочной сетки. В этом случае использовались периодические граничные условия.

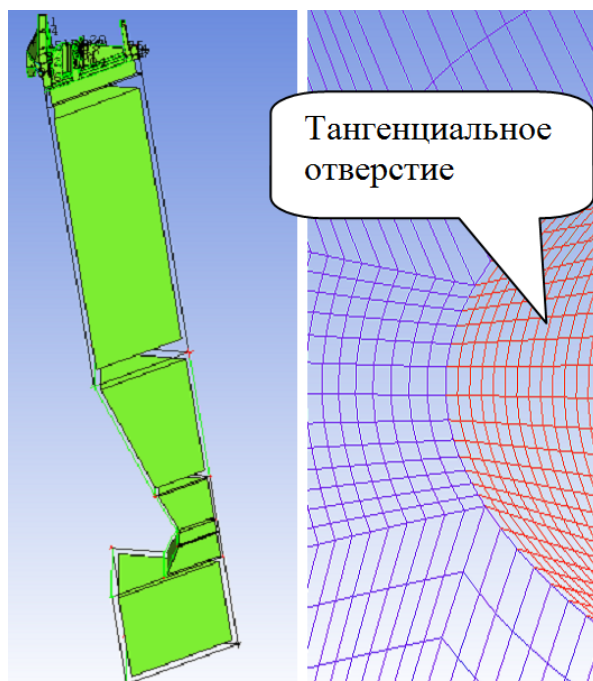


Рис. 6. Разбиение расчетной области на блоки (слева) и фрагмент блочной сетки

Сравнивая результаты расчетов (рис. 7), можно сделать вывод о том, что выбор типа расчетной сетки не оказывает значительного влияния на результаты моделирования

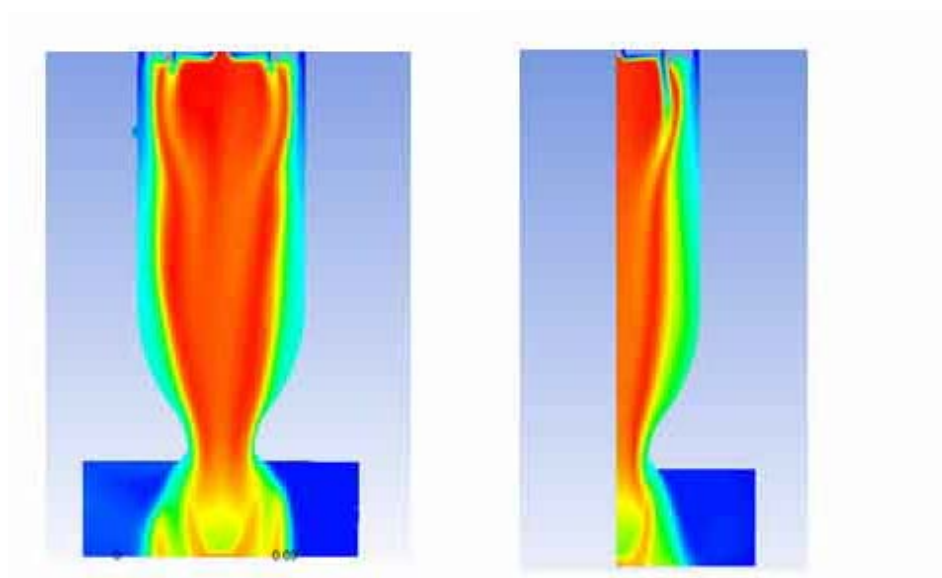


Рис. 7. Поля температур, полученные на тетраэдрической (слева) и блочной (справа) сетках

5. Определение характеристик РДМТ

О качестве организации рабочего процесса в камере сгорания принято судить по величине расходного комплекса [15]

$$\beta = \frac{p_{кв} F_{min}}{\dot{m}_{\Sigma}}, \quad (2)$$

где $p_{кс}$ – давление в камере сгорания, F_{min} – площадь минимального сечения сопла, \dot{m}_{Σ} – суммарный массовый расход компонентов топлива.

Из рис. 8 видно, что определение расходного комплекса камеры KB-16 при экспериментальных исследованиях затруднительно. Причиной является подача в камеру значительной доли расхода водорода вблизи периферии в закрученном виде и высокой скоростью. Поэтому было принято решение проводить экспериментальные исследования с замером тяги.

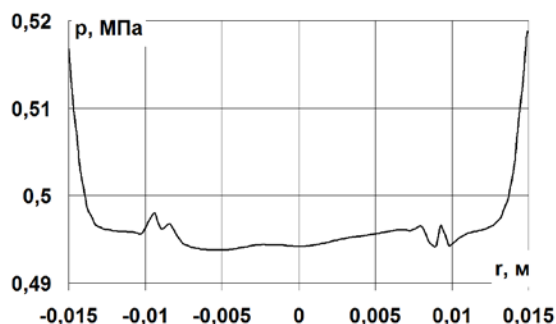


Рис. 8. Распределение статического давления вдоль диаметральной линии вблизи огневого днища камеры

Изготовленная камера KB-16 прошла огневые испытания [16] (рис. 9), которые подтвердили ее работоспособность при длительных включениях на режимах с $k_m < 6$ (десятки секунд). Длительность пусков при $k_m > 6$ составляла ~ 1 с.

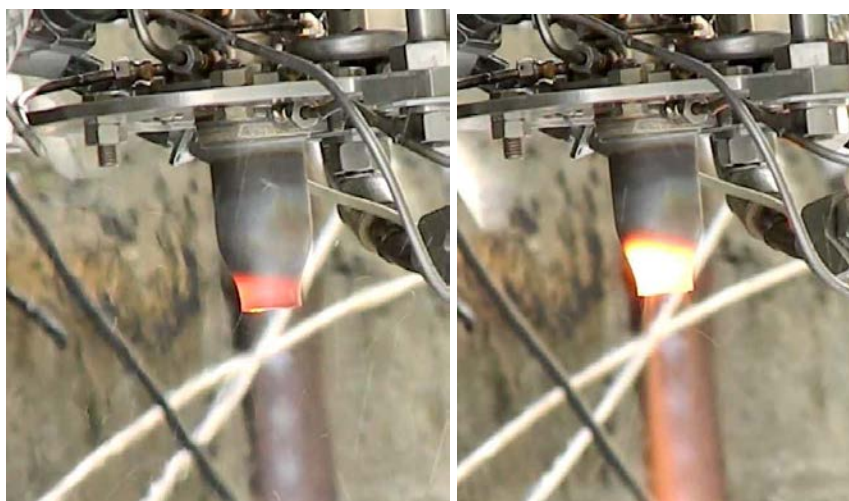


Рис. 9. Огневые испытания камеры KB-16 при различном соотношении компонентов топлива.
Слева: $k_m \approx 4$, справа: $k_m \approx 6$

В таблице 1 представлены некоторые результаты испытаний, где k_m – массовое соотношение компонентов топлива, α – коэффициент избытка окислителя, P – тяга, измеренная при испытаниях в земных условиях, P_n – пустотная тяга, \dot{m}_{Σ} – суммарный массовый секундный расход топлива, $I_{y.n}$ – пустотный удельный импульс, $I_{y.n}^m$ – теоретический пустотный удельный импульс, φ – коэффициент удельного импульса, $\varphi_{рас}$ – коэффициент потерь из-за рассеяния.

Пустотная тяга определялась как

$$P_n = P + p_h F_a, \quad (3)$$

где P – значение тяги, измеренной в наземных условиях, p_h – атмосферное давление, F_a – фактическая площадь среза сопла.

Таблица 1

$k_m (\alpha)$	\dot{m}_Σ , кг/с	P , Н	P_n , Н	$I_{y.n}$ М/с	$I_{y.n}^m$ М/с	φ	$\varphi/\varphi_{рас}$	P_n^{mod}	$\frac{ P_n - P_n^{mod} }{P_n} \cdot 100, \%$
3,55 (0,444)	0,02678	62,53	79,2	2958	3475	0,851	0,898	80,76	1,97
5,59 (0,699)	0,024938	54,18	70,86	2841	3230	0,88	0,928	71,21	0,49
6,66 (0,833)	0,024632	50,06	66,7	2709	3090	0,877	0,925	68,06	2,04
7,11 (0,889)	0,024193	49,29	66	2727	3040	0,897	0,946	65,15	1,28
7,53 (0,941)	0,023884	48,5	65,17	2729	2999	0,91	0,96	63,86	2,01

В таблице 1 также представлена пустотная тяга P_n^{mod} , определенная по результатам моделирования как

$$P_n^{mod} = \iint_{F_a} (\rho_a u_{ax}^2 + p_a) dF, \quad (4)$$

где ρ_a , u_{ax} , p_a – соответственно плотность, осевая составляющая скорости и давление продуктов сгорания на срезе сопла, F_a – площадь среза сопла.

Как видно, получено удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных. Для наглядности сравнение расчётных и экспериментальных данных представлено также на рис. 10.

Судя по значениям φ (табл. 1), в камере КВ-16 реализуется не очень высокое качество организации рабочего процесса. Однако, если принять во внимание, что полуугол раскрытия сопла составляет 26° (в конструкции применён корпус камеры РДМТ 11Д428А-16 [1-2], демонтированный с двигателя после контрольно-выборочных испытаний; для испытаний в земных условиях сверхзвуковая часть сопла была обрезана), и потери удельного импульса на рассеяние, определенные согласно [15], составляют $\varphi_{рас} = 0,948$, то, судя по отношению $\varphi/\varphi_{рас}$, можно сделать заключение о высоком качестве организации внутрикамерных процессов.

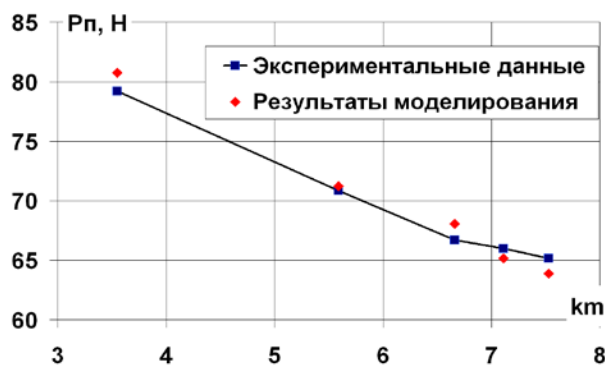


Рис. 10. Сравнение расчётных и экспериментальных данных

С целью более детального анализа были проведены расчёты камеры КВ-16 с коническим соплом, имеющим полуугол раскрытия 10^0 при тех же диаметрах минимального сечения и среза сопла для режима с $k_m = 3,55$.

На рис. 11...13 представлены результаты расчёта. Как видно, эффективность фактического сопла гораздо ниже конического. При этом тяга, определенная для сопла с углом 10^0 составила $P_n^{mod} = 87,81 Н$, что соответствует удельному импульсу $I_{y,n}^{mod} = 3278$ м/с и коэффициенту удельного импульса 0,94. Судя по последнему значению можно заключить о достижении предельных для класса РДМТ энергетических характеристик.

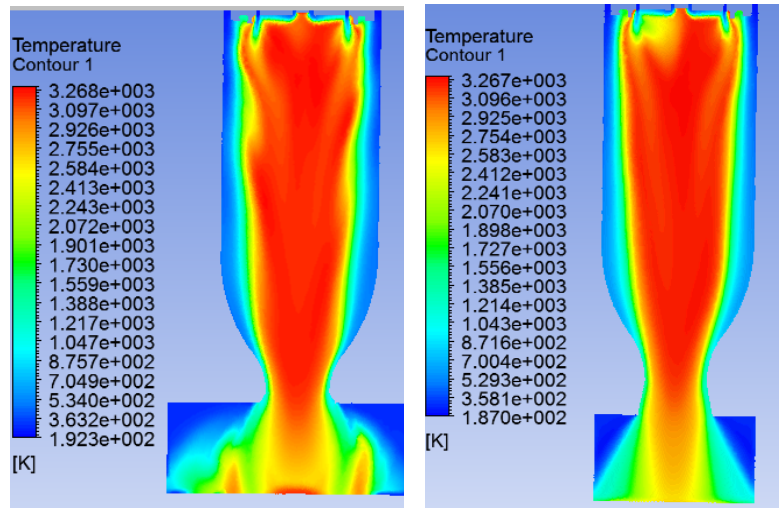


Рис. 11. Поля температур в камере КВ-16 с фактическим(слева) и коническим (справа) соплом при $k_m = 3,55$

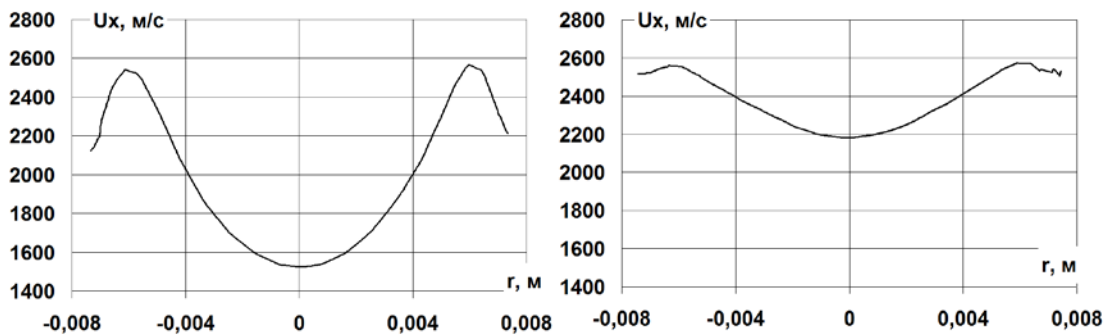


Рис. 12. Распределение осевой составляющей скорости на срезе сопла камеры КВ-16 вдоль диаметральной линии. Слева – фактическое сопло, справа – коническое сопло. $k_m = 3,55$

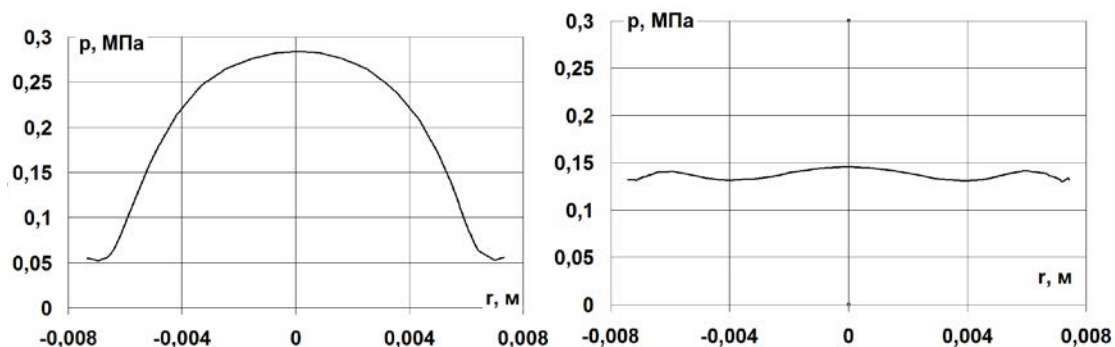


Рис. 13. Распределение статического давления на срезе сопла камеры КВ-16 вдоль диаметральной линии. Слева - фактическое сопло, справа – коническое сопло, $k_m = 3,55$

6. Заключение

Подводя итоги выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Применение численного моделирования позволяет создать в короткий срок при минимальных финансовых затратах высокоэффективную конструкцию камеры кислородно-водородного РДМТ.
2. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили высокие энергетические характеристики созданного РДМТ.
3. Получена хорошая сходимость экспериментальных данных с результатами моделирования.
4. Продемонстрирована возможность замены натуральных испытаний численным экспериментом в процессе создания РДМТ на газообразных компонентах топлива.

Литература

1. Салич В.Л., Шмаков А.А., Ваулин С.Д. Жидкостные ракетные двигатели малой тяги: Учебное пособие – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 52 с.
2. Архипов Ю.С., Кутуева Е.В., Кутуев Р.Х. Огненные колесницы космических орбит. – Нижний Тагил: «Репринт», 2014. – 242 с.
3. Новиков А.В. Математическая модель и расчёт характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на компонентах топлива метан-кислород / А.В. Новиков, Д.А. Ягодников, В.А. Буркальцев, В.И. Лапицкий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение», 2004 – С.8-17
4. Ваулин С.Д., Салич В.Л. Методика проектирования высокоэффективных ракетных двигателей малой тяги на основе численного моделирования внутрикамерных процессов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение», №12 (271), выпуск 19 – Челябинск.: ЮУрГУ, 2012 – С.43-50
5. Салич В.Л. Численное моделирование смесеобразования и горения в камере кислородно-водородного ракетного двигателя тягой 100 Н в процессе проектирования // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ' 2014): труды международной научной конференции (г. Ростов-на-Дону, 1-3 апреля 2014 г.). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014 – С.309-318.
6. Салич В.Л. Численное моделирование смесеобразования и горения в камере кислородно-водородного ракетного двигателя тягой 100 Н в процессе проектирования // CAD/CAM/CAE Observer. Выпуск # 3 (87) / 2014 – С.82-88

7. Салич В.Л. Проектирование камеры кислородно-водородного ракетного двигателя тягой 100Н на основе численного моделирования внутрикамерных процессов // Вестник УГАТУ. Серия «Авиационная и ракетно-космическая техника», 2014. Т.18, №4(65) – С.20-26.
8. Коватева Ю.С., Богачева Д.Ю. Оценка теплового состояния камеры сгорания ЖРДМТ, работающего на экологически чистых компонентах топлива. [Электронный ресурс] // Электронный журнал «Труды МАИ», №65 (19 июня 2013 г) URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=40191>
9. ANSYS CFX-Solver, Release 10.0: Theory. – ANSYS Europe Ltd, 2005. – 266p
10. Юн А.А., Крылов А.И. Расчёт и моделирование турбулентных течений с теплообменом, смешением, химическими реакциями и двухфазных течений в программном комплексе FASTEST-3D. – М.: МАИ, 2007 – 116 с
11. Пирумов У.Г. Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990 – 368 с.
12. Пиралишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Бадерников А.В. Численное исследование интегральных газодинамических характеристик противоточного горелочного модуля с использованием анизотропных моделей турбулентности // Вестник СГАУ №3(27) – Самара, 2011 – С.123-130
13. Матвеев В.Г. Упрощение механизма горения водорода // Физика горения и взрыва, 2011, т. 37, №1 – С.3-5
14. Корепанов М.А. Программа «Термодинамика» // Каталог инновационных разработок Ижевского государственного технического университета. – 2 изд., доп. и перераб. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2001. – С.95
15. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей: Учебник для ВТУЗов. Под ред. В.П. Глушко – М.: Машиностроение, 1989. – 464с.: ил
16. Салич В.Л. Экспериментальные исследования по созданию кислородно-водородного ракетного двигателя тягой 100Н // Наука и технологии. Материалы XXXIV Всероссийской конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. Том 2. – М.: РАН, 2014 – С.45-52