

РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТРАКТЕ ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕРЫ КИСЛОРОДНО-ВОДОРОДНОГО ЖРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ КОМПЬЮТЕРНОГО 3D МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2012 П. А. Якуб, А. В. Гуменный

Конструкторское бюро химической автоматики, г. Воронеж

Рассмотрено решение задачи сопряжённого теплообмена в тракте охлаждения камеры кислородно-водородного жидкостного ракетного двигателя с помощью компьютерного 3D моделирования в программном комплексе ANSYS CFX. Проведено сравнение полученных расчётных данных с экспериментом.

Сопряженный теплообмен, тракт охлаждения.

Одной из основных проблем создания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) является обеспечение работоспособности конструкции камеры при воздействии на стенку камеры потока газа с температурой 3500 К.

Решение данной проблемы в основном обеспечивается регенеративным охлаждением стенки камеры одним из компонентов топлива (обычно горючим). При выборе режимных и геометрических параметров охлаждающего тракта используются одномерные инженерные методики, основанные на критериальных уравнениях теплообмена и баланса тепла через стенку камеры [1, 2].

Известным недостатком этих методик является погрешность при использовании за пределами экспериментально проверенного диапазона изменения определяющих параметров. В таких случаях одним из способов подтверждения правильности выбора оптимальных параметров камеры на этапе проектирования является компьютерное 3D моделирование физических процессов в тракте охлаждения камеры с использованием методов вычислительной гидродинамики.

Целью данной работы является исследование основных закономерностей протекания физических процессов в тракте охлаждения. Для представления характерной картины течения и для определения параметров охладителя, теплового состояния стенки камеры рассмотрено решение задачи сопряжённого теплообмена в программном комплексе ANSYS CFX применительно к камере кислородно-водородного ЖРД [3].

Камера сгорания включает в себя внутреннюю бронзовую и наружную стальную стенки, которые соединены между собой с

помощью пайки по торцевой поверхности рёбер (рис. 1).

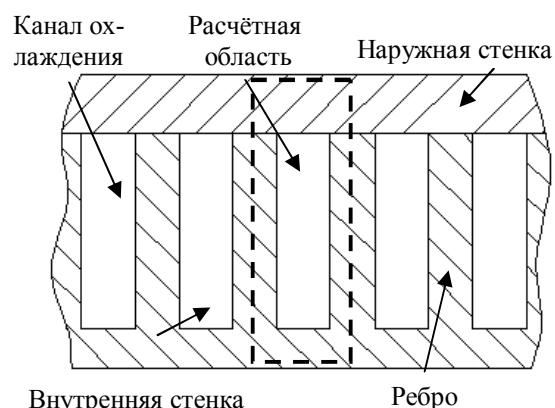


Рис. 1. Эскиз поперечного сечения тракта охлаждения КС

Расчётная область (рис. 2) состоит из одного канала охлаждения и окружающих его стенок: внутренней, наружной и двух рёбер. Для соблюдения условия симметрии с каждой стороны канала охлаждения взята половина ребра.

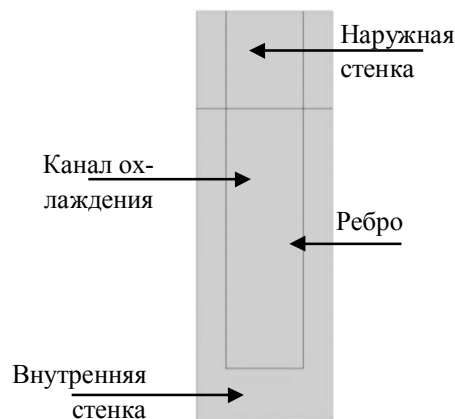


Рис. 2. Поперечное сечение расчётной области

Такая постановка задачи позволяет провести гидродинамический и тепловой расчёты в проточной части расчётной области (канале охлаждения) совместно с тепловым расчётом твёрдых стенок и учесть их взаимное влияние.

Расчётная область представляет собой прямой участок на цилиндрической части камеры сгорания. Соотношение сторон в прямоугольном сечении канала примерно равно 3,4 : 1. Отношение длины расчётной области к гидравлическому диаметру равно 155 (рис. 3).

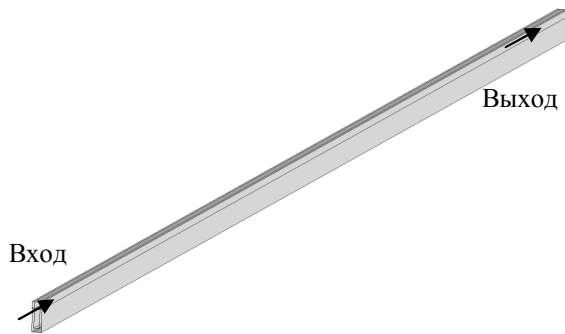


Рис. 3. Изометрический вид расчётной области

При построении сеточной модели целесообразно разбить расчётную область на гексаэдрические элементы. Такое разбиение характеризуется наилучшим качеством сетки при наименьшем количестве элементов (по сравнению с тетраэдрическими элементами того же размера). Проведение численного эксперимента требует получения результата, не зависящего от разбиения расчётной области, поэтому расчёты течения и теплообмена проводились на трёх различных сетках, параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры сеток

Линия	Количество элементов		
	Сетка № 1	Сетка № 2	Сетка № 3
Половина толщины ребра	6	9	6
Ширина паза	15	24	15
Толщина внутренней стенки	10	16	10
Высота ребра	50	80	50
Толщина внешней стенки	19	30	19
Длина канала охлаждения	71	71	283
Суммарное кол-во элементов сетки	151443	375732	603639

Как видно из табл. 1, сетка № 1 и сетка № 2 отличаются между собой разбиением поперечного сечения, при этом разбиение по длине расчётной области одинаковое (рис. 4). Сетка № 1 и сетка № 3 отличаются между собой разбиением по длине расчётной области и совпадают разбиением поперечного сечения. Все три сетки имеют хорошее качество.

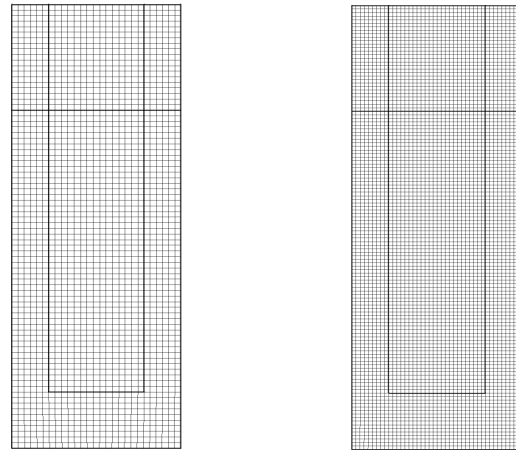


Рис. 4. Внешний вид расчётных сеток (сетка № 1 слева, сетка № 2 справа)

Расчётная область состоит из трёх различных по свойствам подобластей – проточной части (канала охлаждения), в которой течёт водород, внутренней стенки, выполненной из бронзы, и наружной стенки, выполненной из стали. Такое разбиение расчётной области позволяет использовать интерфейсы (жидкость – твёрдое тело и твёрдое тело – твёрдое тело) для передачи тепловых потоков между подобластями.

Согласно проведённым инженерным расчётам, давление в расчётной области изменяется в пределах 5 %, при этом средняя по сечению температура охладителя увеличивается более чем в 1,5 раза. В данных условиях необходимо учитывать влияние температуры на теплофизические свойства водорода, бронзы и стали. Коэффициент динамической вязкости, удельная теплоёмкость при постоянном давлении и теплопроводность водорода, а также теплопроводность бронзы и стали задавались в виде табличных функций температуры [4]. Водород задавался как идеальный газ, т.е. его плотность определялась соотношением

$$\rho = p / RT. \quad (1)$$

Система уравнений баланса массы, тепла и импульса решалась методом контрольных объёмов. Для замыкания системы уравнений использовалась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Параметры потока вблизи твёрдых стенок определялись с помощью масштабируемых пристеночных функций.

Необходимо отметить, что плотность теплового потока от продуктов сгорания к внутренней стенке меняется по длине камеры. Поэтому по одномерной теории было рассчитано распределение плотности теплового потока по длине камеры, соответствующее экспериментальному значению подогрева водорода в тракте охлаждения на огневых испытаниях двигателя. Данное распределение в виде табличной функции $q = f(z)$ задавалось в качестве граничного условия на внутренней стенке со стороны газа. Общий вид данной зависимости показан на рис. 5.

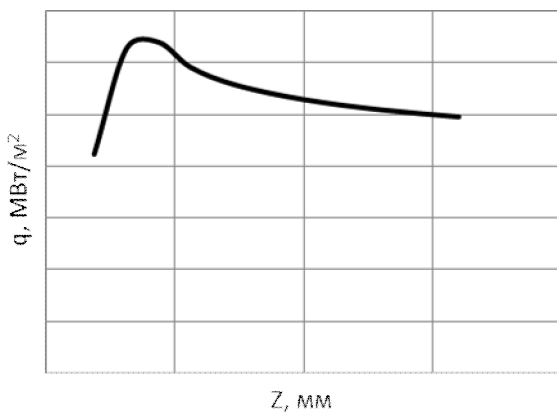


Рис. 5. Общий вид зависимости плотности теплового потока по длине расчетной области

На торцах расчетной области, на твёрдых стенках и на внешней стенке принято условие адиабатной стенки ($q = 0$). На стенках канала охлаждения задано условие прилипания (равенство нулю компонент скорости) и равномерно-зернистая шероховатость, равная 0,02 мм. На боковых поверхностях внутренней стенки, рёбер и внешней стенки задано условие симметрии (рис. 6).

На выходе из расчетной области задана средняя величина статического давления.

Для исключения влияния начального участка течения, на котором происходит формирование гидродинамического и теплового пограничных слоёв, на входе в расчетную область задавались поля скоростей и

температур, полученные методом последовательных приближений.

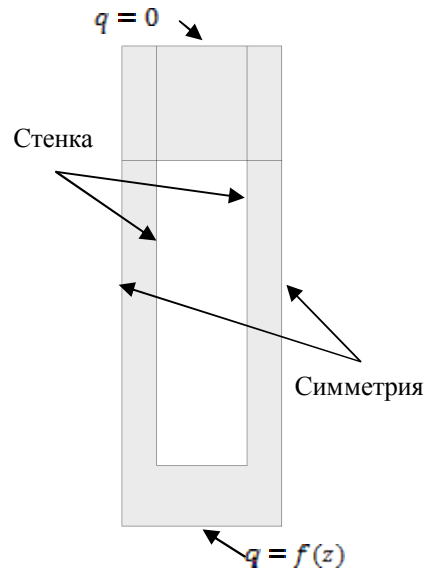


Рис. 6. Граничные условия

Рассматривалось стационарное течение водорода с использованием схемы решения второго порядка точности.

Полученные в процессе решения средние значения невязок в уравнениях сохранения массы, энергии и количества движения опустились ниже величины $3 \cdot 10^{-5}$, максимальные значения невязок — ниже величины $1 \cdot 10^{-3}$. График сходимости невязок показан на рис. 7.

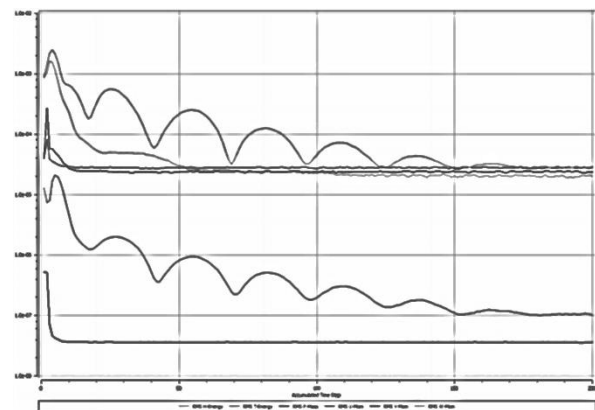


Рис. 7. График сходимости невязок

В результате проведенного расчета получены температура внутренней стенки со стороны газа и со стороны охладителя, а также температура на вершине ребра. Результаты трёхмерного расчета сравнивались с результатами, полученными по одномерной инженерной методике [2].

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Результаты расчётов подогрева охладителя по одномерной методике и с помощью программного комплекса ANSYS CFX совпадают, что соответствует граничному условию $q = f(z)$.

2. Потери давления, полученные с помощью $k-\varepsilon$ модели турбулентности, удовлетворительно совпадают с рассчитанными по одномерной методике [2] (отличие менее 2%).

3. Результаты расчётов на разных сетках отличаются между собой незначительно – в пределах 1%. На основании этого можно сделать вывод о независимости полученного решения от разбиения расчётной области. Поэтому оптимальной является сетка № 1 с наименьшим количеством элементов.

4. Полученная в результате численного расчёта температура стенки КС со стороны газа на 8 % больше значения, рассчитанного по одномерной методике.

На рис. 8,9 представлен характерный вид поля безразмерной температуры, вычисленной по формуле (1), и её профиль по высоте в поперечном сечении расчётной области:

$$\bar{T} = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, \quad (1)$$

где T – температура в конкретной точке, К;

T_{\min} – минимальная температура в данном сечении, К;

T_{\max} – максимальная температура в данном сечении, К.

Как видно из рисунков, имеет место расслоение течения по температуре охладителя по высоте канала охлаждения. Изломы на рис. 9 связаны с переходом от твёрдых стенок к области течения охладителя.

По дну каналов охлаждения в результате теплообмена через оребрённую поверхность наблюдается зона повышенных температур. Расслоение течения также способствует увеличению температуры по дну канала. В условиях высоких тепловых нагрузок такой эффект может приводить к дефектам внутренней стенки (рис. 10), описанным в [6].

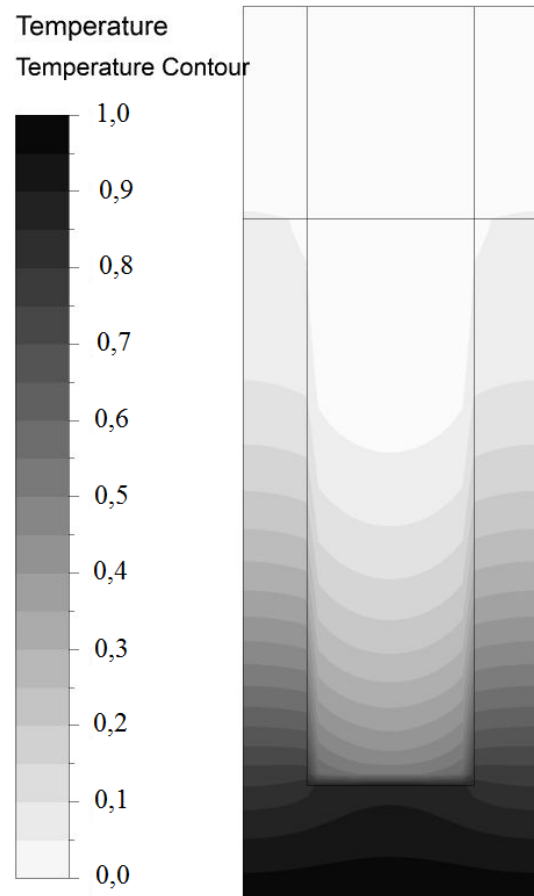


Рис. 8 Поле безразмерной температуры в сечении расчётной области



Рис. 9 Профиль безразмерной температуры по высоте сечения расчётной области

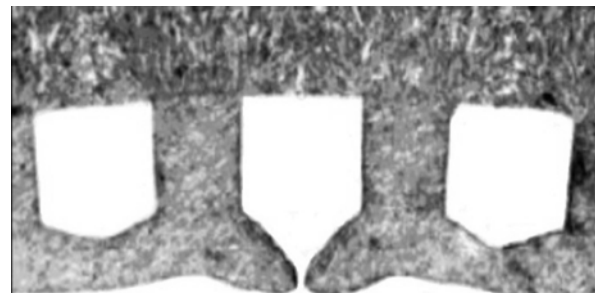


Рис. 10. Дефект внутренней стенки в условиях высоких тепловых нагрузок

Поле безразмерной скорости, вычисленной по формуле (2), при течении водорода в прямоугольном канале в условиях несимметричного подвода тепла приведено на рис. 11.

$$\bar{w} = \frac{w}{w_{\max}}, \quad (2)$$

где w – скорость в конкретной точке, м/с;
 w_{\max} – максимальная скорость в данном сечении, м/с.

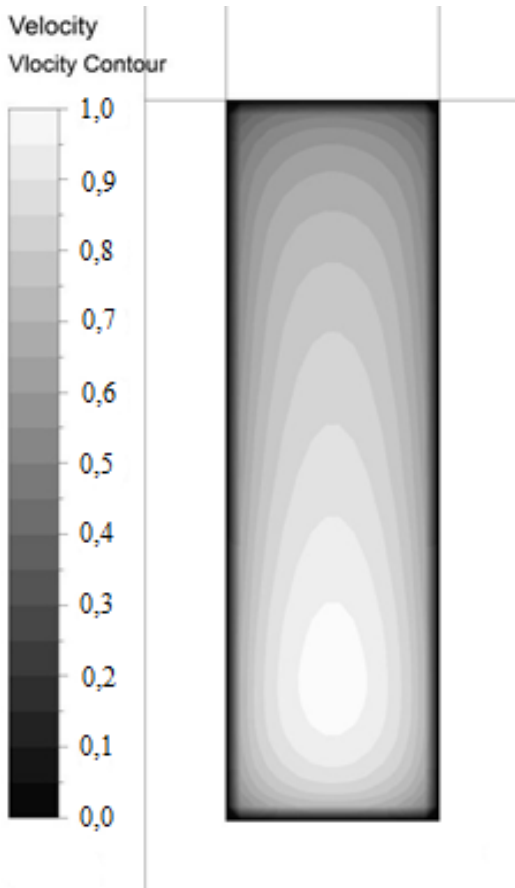


Рис. 11. Поле скорости в сечении расчётной области

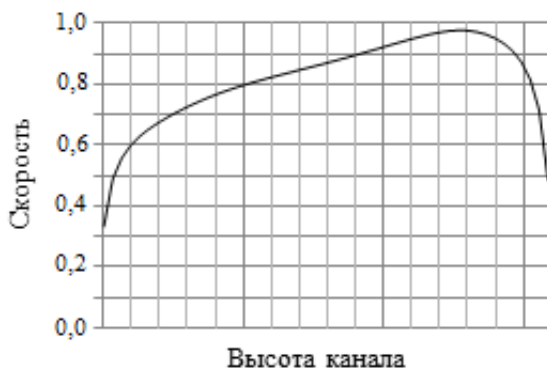


Рис. 12. Профиль безразмерной скорости по высоте сечения расчётной области

С помощью моделирования течения водорода и теплообмена в тракте охлаждения на цилиндрической части камеры в программном комплексе ANSYS CFX показана качественная возможность расслоения течения по температуре водорода по высоте каналов охлаждения на цилиндрической части КС ЖРД.

Расслоение течения по температуре охладителя в тракте камеры подтверждается и экспериментальными данными (измеренные в КБХА значения температуры водорода при огневом испытании двигателя). Эффект расслоения течения по температуре приводит к увеличению температуры стенки со стороны газа на 8 % по сравнению с результатом расчёта с помощью инженерной методики, что уменьшает фактические запасы по охлаждению стенки камеры.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании различных тепловых аппаратов и для уточнения используемых методик при проектировании камер ЖРД.

Библиографический список

1. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена [Текст] / С.С. Кутателадзе. - М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.
2. Кудрявцев, В.М. Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей [Текст]: учебн. для авиац. спец. вузов. Кн. 2. / В.М. Кудрявцев. - М.: Высш. шк. 1993. – 368 с.
3. ANSYS CFX Version 14.0 Documentation, 2011.
4. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик.- М.: Наука, 1972. – 720 с.
5. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г.Шлихтинг. - М.: Наука, 1974. – 713 с.
6. Kuhl, D. Thermomechanical analysis and optimization of cryogenic liquid rocket engines [Text] / D. Kuhl, J. Riccius // Journal of Propulsion and Power – 2002. - V.18. - №4.

**NUMERICAL INVESTIGATION OF PHYSICAL PROCESSES
IN COOLING JACKET OF THRUST CHAMBER
OF LO_x – LH₂ LRE USING 3D COMPUTER SIMULATION METHODS**

© 2012 P. A. Yakub, A. V. Gumennyu

OSC KBKhA, Voronezh

The problem solution of conjugate heat transfer in thrust chamber cooling jacket of liquid rocket engine is considered. Finding design data is compared with experiment.

Conjugate heat transfer, cooling jacket.

Информация об авторах

Якуб Павел Александрович, инженер-конструктор Конструкторского бюро химической автоматики, г. Воронеж. E-mail: pavel-vrn@list.ru. Область научных интересов: жидкостные ракетные двигатели.

Гуменный Андрей Викторович, начальник сектора газодинамических, гидравлических и тепловых расчётов Конструкторского бюро химической автоматики, г. Воронеж. E-mail: gav126@mail.ru. Область научных интересов: жидкостные ракетные двигатели.

Yakub Pavel Aleksandrovich design-engineer OSC KBKhA, E-mail: pavel-vrn@list.ru. Area of research: liquid rocket engine.

Gumennyu Andrey Victorovich, chief of gas dynamics, fluid dynamics and thermal design department OSC KBKhA. E-mail: gav126@mail.ru. Area of research: liquid rocket engine.