

УДК 536.46

Расчетно-аналитическое исследование рабочего процесса в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Ф. Омми¹, К. Некофар²

¹Инженерный факультет Отделения механики университета
“Тарбиат Модарес”, Тегеран, Иран

²Иранское космическое агентство (Iranian Space Agency — ISA),
Тегеран, Иран

E-mail: fommi@modares.as.ir

Исследованы процессы распыливания газожидкостной форсуночной головки камеры сгорания ЖРД МТ на модельных компонентах (воздух и вода) с использованием бесконтактных методов диагностики на основе лазерных источников. Получены новые количественные зависимости по влиянию различных факторов и параметров на характеристики распыливания.

Ключевые слова: камера сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), форсунка, рабочий процесс, малая тяга.

ВВЕДЕНИЕ

Рабочий процесс (РП), протекающий в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить устойчивую и надежную работу двигательной установки с максимальной полнотой сгорания топлива. Характеристики РП зависят от большого числа параметров и факторов, таких как распыливание и испарение компонентов топлива, первоначальное распределение-разделение окислителя и горючего в объеме камеры, характере течения, смешение и химические реакции в газовой смеси. Все стадии рабочего процесса протекают в камере сгорания одновременно и оказывают большое влияние друг на друга.

В жидкостных ракетных двигателях малой тяги (ЖРД МТ) из-за целого ряда причин наиболее остро стоит проблема совершенствования рабочего процесса в камере сгорания (КС) и обеспечения ее надежной теплозащиты, поскольку, прежде всего, несовершенство процессов смесеобразования приводит к снижению как надежности работы ЖРД МТ, так и полноты сгорания топлива, а, следовательно, и к снижению коэффициента камеры сгорания (φ_k). В настоящей работе рассматриваются процессы, протекающие в камере сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги, работающего на газообразном окислителе (кислороде) и жидком горючем (керосине).

Поскольку огневые испытания ЖРД связаны с большими затратами средств и времени, то целесообразно выявить характер влияния различных факторов на полноту сгорания топлива в камере численными методами, а затем проверить эти выводы экспериментально. При этом достигается возможность при относительно низкой себестоимости получить полную информацию обо всех переменных параметрах в исследуемой области, а также проанализировать влияние на совершенство рабочего процесса как отдельных факторов, так и их совокупности. Таким образом, настоящая работа посвящена исследованию и оптимизации рабочего процесса в камере ЖРД МТ с точки зрения обеспечения наибольшей полноты сгорания топлива и надежной теплозащиты стенок камеры сгорания. Также проведено численное исследование влияния на коэффициент φ_k целого ряда параметров, таких как давление в КС, соотношение компонентов, геометрических характеристик КС и ее элементов и другие.

В работе рассматривается камера сгорания двигателя, в котором подача керосина происходит через одну центробежную форсунку, расположенную в центре форсуночной головки. Кислород подается через концентрическую щель шириной несколько миллиметров, расположенную на периферии форсуночной головки (рис. 1). Эта щель представляет собой прототип струйной форсунки, обеспечивающей подачу окислителя и формирование холодного пристеночного слоя, предохраняющей огневую стенку от прогара. Помимо этого некоторая часть кислорода подается по центробежной форсунке горючего, что необходимо для обеспечения надежного запуска двигателя за счет повышения качества смесеобразования в ядре потока.

При разработке математической модели необходимо учитывать, что исследуемые процессы имеют целый ряд особенностей, полный учет которых неоправданно усложняет решение поставленной задачи. Это приводит к тому, что задача не может быть решена даже на современных ЭВМ. Поэтому в основу математической модели положен ряд допущений, некоторые из которых являются общепринятыми:

- задача стационарна,
- камера сгорания изобарическая,
- теплоотвод в стенку отсутствует,
- коэффициенты переноса массы и энергии равны эффективному коэффициенту турбулентной вязкости,
- влияние гетерогенности на эффективный коэффициент турбулентной вязкости учитывается через плотность смеси,
- газ подчиняется закону состояния идеального газа,
- капли керосина на входе в камеру сгорания монодисперсны,
- в каждой ячейке диаметры капель керосина приводятся к среднемассовому,

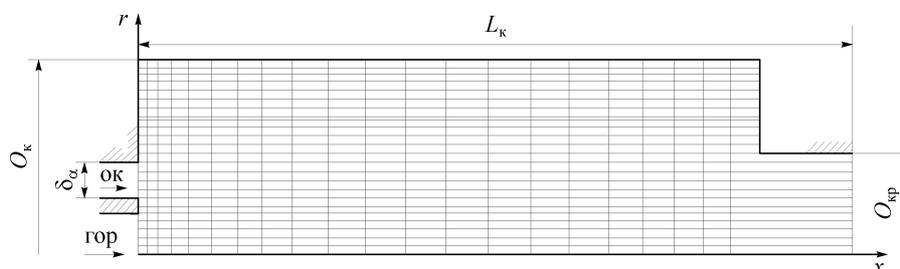


Рис. 1. Расчетная схема.

– между парами керосина и кислородом имеет место одностадийная химическая реакция, которая протекает мгновенно.

Базируясь на предложениях, изложенных в [1], разработана математическая модель и программа расчета характеристик течения химически активной смеси керосина с кислородом в двумерной постановке с учетом турбулентного переноса массы, энергии и количества движения, а также особенностей горения гетерогенной смеси. В этом случае система уравнений, описывающая рабочий процесс в камере сгорания, имеет следующий вид:

– уравнение неразрывности — $\text{div}(\rho_{\text{см}} V) = 0$,

– уравнение сохранения химической компоненты j —

$$\text{div}(\rho_{\text{см}} V Z_j - \Gamma_{j, \text{эфф}} \cdot \text{grad} Z_j) - Q_j = 0,$$

– уравнение сохранения количества капель, переносимого с единицей массы смеси, —

$$\text{div}(\rho_{\text{см}} n_{\text{ж}} - \Gamma_{j, \text{эфф}} \cdot \text{grad}(n_{\text{ж}}/\rho_{\text{см}})) = 0,$$

– уравнение сохранения количества движения —

$$\text{div}\left(\frac{\rho_{\text{см}} V \omega}{r}\right) + \frac{1}{r^3} \text{grad}\left(\frac{V_x^2 + V_r^2}{2}\right) \text{grad} \rho_{\text{см}} - \frac{1}{r^2} \text{div}\left(r^2 \text{grad}\left(\frac{\mu_{\text{эфф}} \omega}{r}\right)\right) = 0,$$

– уравнение сохранения энергии —

$$\text{div}\left(\rho_{\text{см}} V \bar{h} - \Gamma_{h, \text{эфф}} C_{\text{см}} \text{grad} T - \sum_j h_j \Gamma_{j, \text{эфф}} \text{grad} Z_j - \mu_{\text{эфф}} \text{grad}\left(0,5(V_x^2 + V_r^2)\right)\right) = 0,$$

– уравнение напряженности вихря ω —

$$\omega = (dV_r/dx) - (dV_x/dr),$$

– уравнения функции тока ψ —

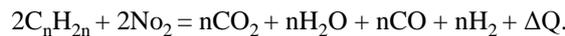
$$\rho_{\text{см}} V_x = (1/r)(d\psi/dr),$$

$$\rho_{\text{см}} V_r = -(1/r)(d\psi/dx).$$

Данная система уравнений записана в двумерной постановке в цилиндрической системе координат. Для определения эффективного коэффициента турбулентной вязкости используется эмпирическая зависимость [1]:

$$\mu_{\text{эфф}} = 0,012 \sqrt[3]{\rho_{\text{см}} \frac{D_{\text{к}}}{L_{\text{к}}} \sum (m_{j, \text{вх}} V_{j, \text{вх}}^2)}.$$

В расчетах принимается, что между горючим и окислителем протекает одностадийная химическая реакция, которую условно можно записать



В этом случае температура смеси определяется как

$$T_{\text{см}} = 273 + \left(\bar{h} - \sum_j h_h Z_j \right) / \left(\sum_j C_{p_j, \text{газ}} Z_j + C_{\text{ж}} Z_{\text{ж}} \right).$$

Для обеспечения согласования температуры, рассчитанной по этой формуле, с температурой для равновесной смеси вводятся поправочные коэффициенты.

Значение плотности газа и смеси в данной работе вычислялось по формулам:

$$\rho_{\text{газ}} = (\rho_{\text{к}}) / R_{\mu} T_{\text{см}} \sum (Z_j / \mu_j),$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{1 / \sum z_j}{(j / \rho_{\text{газ}}) + (z_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}})},$$

где j относится только к газовым компонентам смеси.

Для определения среднемассового диаметра каплей на выходе из форсунки проведена серия экспериментов на специальной установке, в результате которых показано, что для исследуемой форсунки в требуемом диапазоне изменения параметров диаметр каплей d_m меняется в пределах от 7 до 12 мкм, а его максимальная величина не превышает 30–35 мкм. В процессе расчета в объеме камеры для приведения размера частиц к среднемассовому диаметру использовалась следующая зависимость:

$$d_m = \sqrt[3]{6Z_{\text{ж}} / \pi n_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}.$$

Для определения значения источникового члена в уравнении сохранения керосина как химической компоненты Q_j использовалась методика определения скорости испарения жидкости, изложенная в [2].

Как уже отмечалось выше, степень совершенства рабочего процесса в камере сгорания ракетного двигателя характеризует коэффициент $\varphi_{\text{к}}$. В данном случае он определяется по полноте сгорания одного из компонентов топлива, а именно:

$$\text{при } \alpha > 1 \rightarrow \varphi_{\text{к}} = \sqrt{1 - (m_{\text{гор.вых}} / m_{\text{гор.вх}})},$$

$$\text{при } \alpha \leq 1 \rightarrow \varphi_{\text{к}} = \sqrt{1 - (m_{\text{ок.вых}} / m_{\text{ок.вх}})}.$$

Поскольку задача является стационарной, то решение уравнений в частных производных внутри исследуемой области определяется лишь условиями на границе. То есть граничные условия полностью определяют результаты решения в любой точке области и используются в соответствии с рекомендациями в работе [1].

Одной из особенностей представленной методики является то, что изменение концентрации компонентов газовой смеси в ячейке происходит как за счет испарения, конвективного и диффузионного переноса массы, так и за счет горения. Поэтому возникает необходимость введения в программу блока решения дифференциальных уравнений для определения распределения концентраций компонентов по объему камеры без учета горения. В этом случае соответствующий источниковый член Q_j для определения Z_j принимается равным нулю. Исключение составляет лишь уравнение для газообразного и жидкого керосина, поскольку для них источниковый член определяется скоростью испарения. Затем ведется расчет распределения концентраций компонентов с учетом протекания химической реакции в области, где температура смеси выше температуры воспламенения. В данном случае температура воспламенения принималась постоянной и равной 520 К [3]. Полученные значения концентраций являются исходными для следующей итерации. Такой подход можно принять, если предположить, что скорость протекания химической реакции определяется скоростью испарения и перемешивания паров

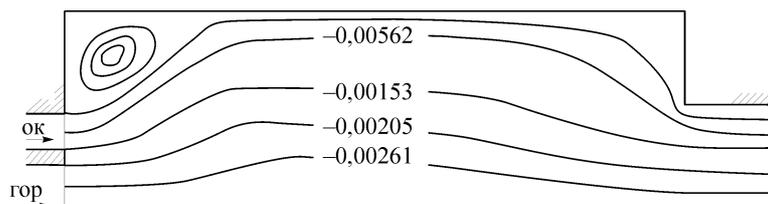


Рис. 2. Распределение функции тока по объему камеры сгорания.

керосина с кислородом. Другими словами, если в ячейке имеется и газообразный керосин и кислород, то химическая реакция между ними протекает мгновенно, а прекращается при полном расходовании одного из компонентов.

Для решения системы дифференциальных уравнений эллиптического типа используется конечно-разностный аналог, вывод которого содержится в работе [1]. При этом используется сетка с переменным шагом. Шаг сетки уменьшается возле смесительной головки камеры, т. к. эта область является зоной больших градиентов основных параметров (см. рис. 1). Расчет ведется итерационным методом последовательных смещений Гаусса–Зейделя. Каждый цикл итерации состоит из K подциклов, где K — количество дифференциальных уравнений. В каждом подцикле сетка сканируется по узлам, в которых определяется окончательное значение одной переменной в данной итерации. Вновь полученное значение переменной в узле используется для определения переменной в следующем узле и т. д.

После нахождения значений переменной во всей исследуемой области выполняется новый подцикл для другой зависимой переменной. После завершения всех подциклов начинается новый итерационный цикл. Расчет ведется до тех пор, пока разность значений переменных между двумя последовательными итерациями не станет меньше некоторой заданной величины. В данном случае точность в 0,0035 достигалась за 150–200 итераций. В результате одного расчета характеристик РП в камере сгорания получаем распределение по объему таких параметров, как концентрация всех компонентов (массовые доли), энтальпия торможения смеси, температура смеси, плотность смеси, соотношение компонентов, функция тока, напряженность вихря, осевая и радиальная составляющие скорости, текущее значение коэффициента турбулентной вязкости, значение коэффициента совершенства рабочего процесса в камере сгорания и т. д.

На рис. 2, 3 в качестве примера приведено распределение функции тока и температуры по объему камеры сгорания, полученное в результате одного из базовых вариантов расчета. Из графиков видно, что в камере сгорания, особенно вблизи форсуночного коллектора, имеют место большие градиенты параметров в радиальном направлении. Особенно это касается поля скоростей, поскольку именно в районе форсунки окислителя образуются интенсивные обратные токи.

По разработанной программе проведено расчетно-теоретическое исследование влияния различных факторов на коэффициент ϕ_k . В качестве факторов рассмотрены

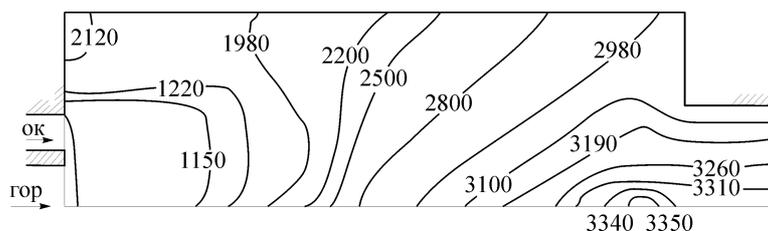


Рис. 3. Распределение температуры смеси по объему камеры сгорания (К).

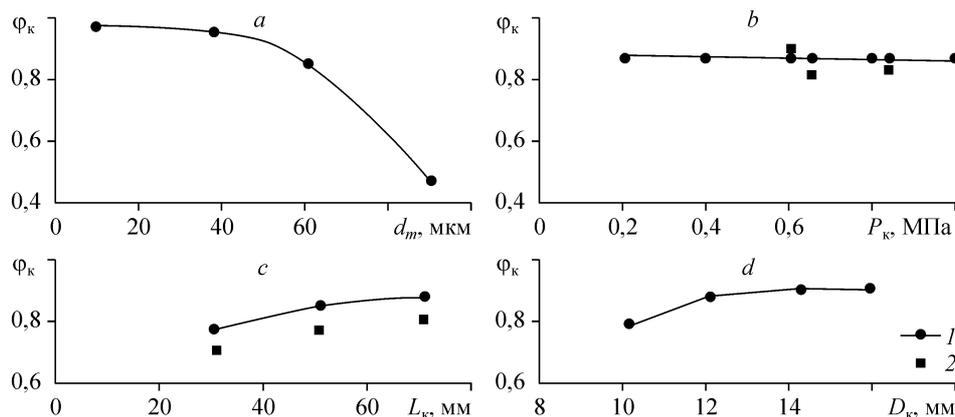


Рис. 4. Зависимость коэффициентов камеры: *a* — от исходного диаметра капле керосина; *b* — от давления, расчет (1), эксперимент (2); *c* — от длины камеры сгорания, расчет (1), эксперимент (2); *d* — от диаметра камеры сгорания.

давление в камере, длина и диаметр камеры, диаметр критического сечения $D_{кр}$, суммарное соотношение компонентов $K_{\Sigma m}$, соотношение компонентов в отверстии форсунки $K_{m, отв}$, ширина щели вдува основного расхода окислителя $\delta_{щ}$. Поочередно исследовалось влияние каждого фактора при условии неизменности остальных определяющих параметров. Результаты расчетов представлены на рис. 4–5.

Анализируя результаты, полученные на основе 70 вариантов расчетов, можно выделить ту совокупность параметров, которая оказывает доминирующее влияние на величину φ_k . К ним прежде всего относятся исходный диаметр капле керосина, поскольку этот параметр в наибольшей мере определяет время испарения горючего, а также геометрические размеры камеры сгорания — L_k , D_k , $D_{кр}$, которые в данном случае определяют время пребывания топлива в камере ЖРД МТ. Влияние, которое оказывает соотношение компонентов, объясняется зависимостью скорости испарения горючего от температуры. При этом необходимо учитывать, что из условия надежности воспламенения отношение расхода окислителя и горючего в центробежной форсунке находится в диапазоне $K_{m, отв} = 0,1–0,2$.

Как видно из рис. 4, *b* давление в камере сгорания на φ_k практически не оказывает, что обусловлено, в соответствии с классической диффузионной теорией, слабым влиянием p_k на скорость испарения.

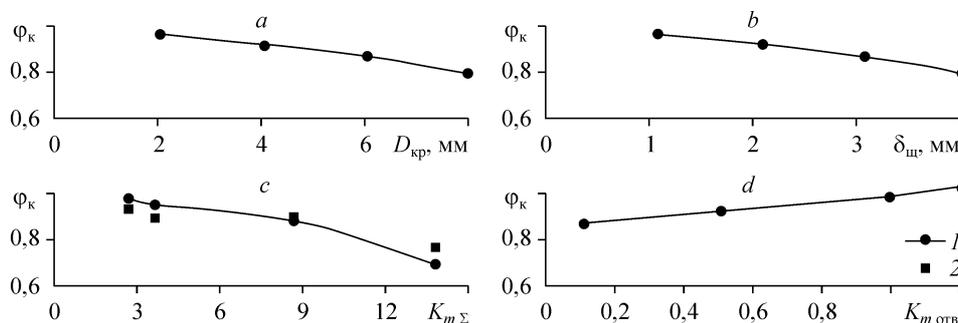


Рис. 5. Зависимость коэффициента камеры: *a* — от диаметра критического сечения; *b* — от ширины щели форсунки окислителя; *c* — от суммарного соотношения компонентов, расчет (1), эксперимент (2); *d* — от соотношения компонентов в отверстии форсунки.

Для проверки полученных расчетных данных создан специальный стенд ЖРД МТ, на котором проведена серия экспериментов с параметрами, соответствующими расчетным. На рис. 4, б, с, 5, с представлены результаты, показывающие удовлетворительное согласование экспериментальных и расчетных данных, что свидетельствует о достаточной надежности этой расчетной методики.

Таким образом, разработанная методика и программа расчета позволяют на этапе проектирования ЖРД МТ выработать предварительные рекомендации по организации рабочего процесса в камере сгорания, которые дают возможность получить максимальные значения удельного импульса двигателя при обеспечении необходимой надежности его работы как с точки зрения устойчивости при запуске двигательной установки и на основном режиме ее работы, так и с точки зрения теплозащиты камеры сгорания ЖРД МТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Госмен А.Д., Пан В.М., Ранчел А.К. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир, 1972. 326 с.
2. Сухов А.В., Богайсков В.П., Павлов Д.Г. Расчет характеристик испарения жидких топлив. М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. 16 с.
3. Сарнер С. Химия ракетных топлив. М.: Мир, 1969. 488 с.

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2008 г.