

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЖРД МАЛЫХ ТЯГ

Алексей Геннадиевич ВОРОБЬЕВ родился в 1978 г. в городе Подольске Московской области. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области жидкостных ракетных двигателей. Автор одной научной работы.

Alexey G. VOROBIOV, was born in 1978, in the Moscow Region. He is a Postgraduate Student at the MAI. His research interests are in liquid rocket engines. He has published one technical paper.

Статья посвящена описанию разработанной математической модели теплового состояния жидкостных ракетных двигателей малых тяг. Основное внимание уделяется физическим составляющим модели, используемым методикам расчета, возможностям модели для прогнозирования работоспособности камеры по тепловому режиму, возможностям модели по анализу эффективности двигателя при выбранной схеме смесеобразования.

Введение

Большое количество испытаний, необходимых для проверки работоспособности жидкостных ракетных двигателей малых тяг (ЖРД МТ), существенно увеличивает стоимость разработки двигателя в целом.

Математическая модель теплового состояния ЖРД МТ, которая учитывает специфику данных типов двигателей и рассматривает большинство факторов, влияющих на рабочий процесс в камере двигателя, позволяет добиться большей эффективности испытаний и значительного сокращения их числа, а значит, и стоимости разработки двигателя.

Постановка задачи

Математическая модель теплового состояния ЖРД МТ решает следующие задачи:

- прогнозирование теплового состояния апогейного ракетного двигателя малых тяг при различных параметрах рабочего процесса;
- исследование рабочих процессов в камере сгорания двигателя;
- оптимизация значений рабочих параметров двигателя;
- получение граничных условий теплообмена продуктов сгорания с корпусом камеры сгорания;
- выработка рекомендаций для совершенствования конструкции и сокращения количества огневых доводочных испытаний.

Такая модель должна учитывать специфику двигателей данных типов и рассматривать большинство из факторов, влияющих на рабочий процесс в камере двигателя [1, 2]:

- импульсный и стационарный режимы работы;

- малый размер камеры сгорания;
- завесное внутреннее охлаждение и отсутствие наружного проточного охлаждения камеры сгорания и сопла;
- небольшое число топливных форсунок в камере сгорания.

Работа по созданию математической модели теплового состояния ЖРД МТ была разделена на следующие этапы:

- формулировка задач математической модели;
- описание физических процессов, исследуемых в математической модели;
- разработка концепции математической модели, физико-математического аппарата модели;
- создание программного комплекса математической модели;
- тестирование модели на модельных примерах;
- проведение огневых испытаний на натуральных объектах;
- верификация модели по эксперименту;
- применение модели, выработка рекомендаций по усовершенствованию конструкции объектов.

Методы решения задач прогнозирования и технические принципы построения математических и физических моделей могут быть самыми разнообразными [3, 5]. Принципиальная схема математической модели теплового состояния ЖРД МТ представлена на рис. 1.

Математическая модель позволяет рассчитывать параметры ЖРД МТ (газодинамический профиль, расходы компонентов, схему расположения форсунок, смесеобразование, тепловое состояние) по начальным данным технического задания или задавать напрямую часть данных с уже существующих дви-

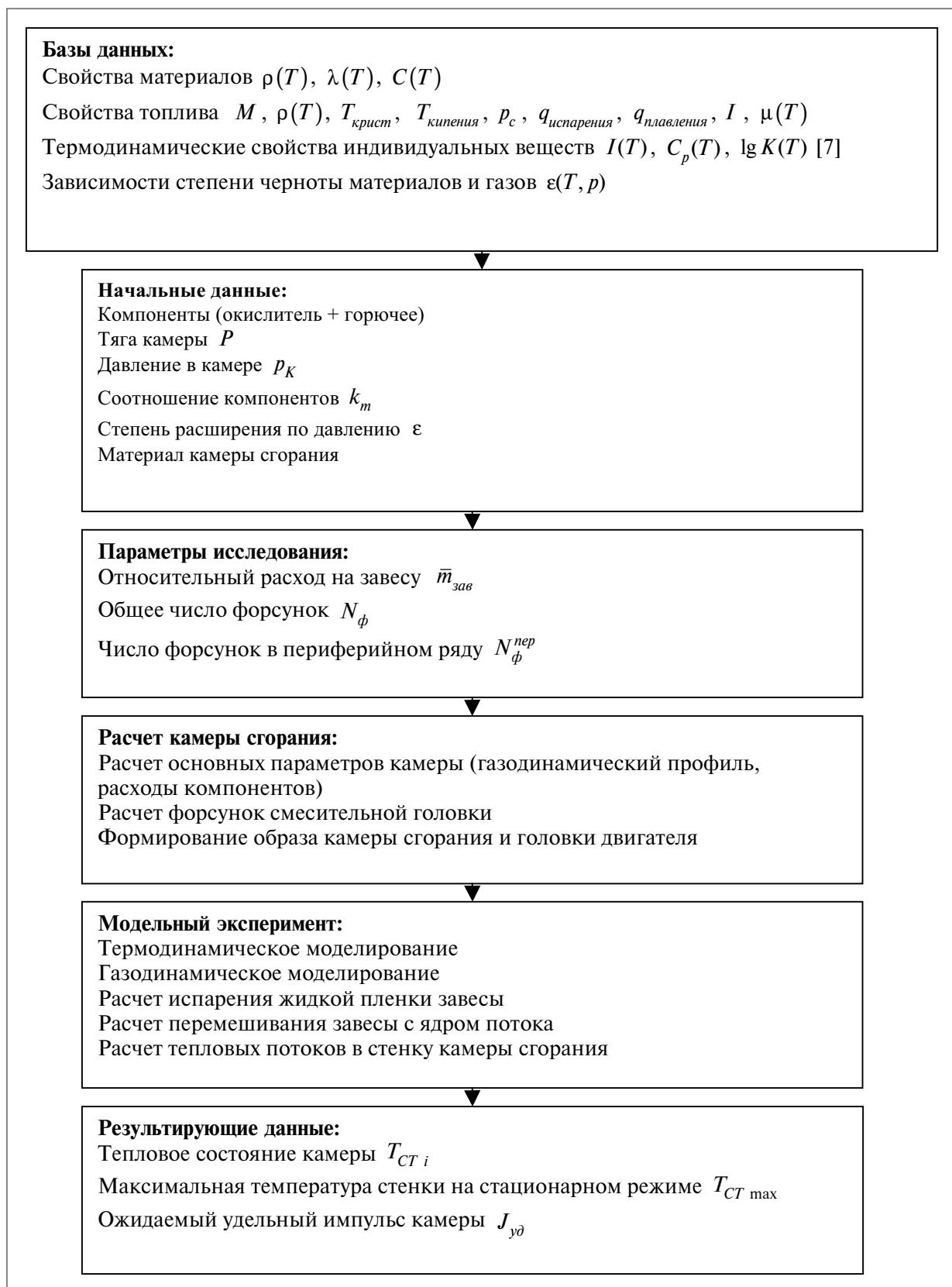


Рис. 1. Принципиальная схема моделирования теплового состояния ЖРД МТ

двигателей. Это позволяет проводить моделирование вновь разрабатываемых двигателей и анализировать работу уже существующих ЖРД МТ.

Расчет теплового состояния ЖРД МТ

Суммарный тепловой поток, передаваемый от продуктов сгорания в стенку, складывается из двух

частей: конвективного и радиационного тепловых потоков. Потери тепла, отдаваемого наружной поверхностью камеры во внешнюю среду, имеют аналогичные составляющие. Эти потери могут быть рассчитаны при известных значениях тепловых потоков, поступающих в стенку камеры сгорания от продуктов сгорания. Поэтому первоначальным в решении задачи теплового состояния ЖРД МТ является определение внутренних конвективного и радиационного тепловых потоков на нестационарном режиме работы двигателя.

При расчете конвективной составляющей при условии $T_{CT.G} = \text{const}$ используется уравнение (5) [4]. Такое приближение не может быть полностью применимо при $T_{CT.G}(\tau)$ из-за следующей причины: граничные условия (температура стенки со стороны газа, скорость продуктов сгорания и др.) существенно меняются за достаточно короткий интервал времени, что существенно влияет на тепловой поток, поступающий в стенку.

Поэтому была принята следующая схема. Для расчета конвективного потока в начальный момент времени $\tau = 0$ при $T_{CT.G} = T_{\text{нач}}$ используется уравнение (5), лучистый поток отсутствует. В последующие моменты $\tau > 0$ $q_{\text{луч.внутр}}$ можно представить постоянным, опуская единственный изменяющийся член $A_G(T_{CT}/100)^4$ в (6) (принимается, что лучистый теплообмен постоянен на всем временном промежутке). Для определения $q_{\text{конв.внутр}}$ ($\tau \neq 0$) был введен экспоненциальный закон изменения теплового потока по времени:

$$q_{\text{конв.внутр}}(\tau) = (q_{\text{конв.внутр}}(0) - q_{\text{равн}}) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_{\text{эф}}}\right) + q_{\text{равн}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{конв.внутр}}$ — конвективный тепловой поток в камеру сгорания; $\varepsilon_{\text{эф}}$ — аналог постоянной или показателя термической инерции ε ; $q_{\text{равн}}$ — равновесный тепловой поток в стенку, подсчитанный для стационарного режима:

$$q_{\text{равн}} = q_{CTG} = q_{CT} = q_{CTВНЕШ}; \quad (2)$$

$$q_{CTG} = q_{\text{конв.внутр}} + q_{\text{луч.внутр}}; \quad (3)$$

$$q_{CTВНЕШ} = q_{\text{конв.внеш}} + q_{\text{излуч.внеш}}; \quad (4)$$

$$q_{\text{конв.внутр}} = B \frac{\tau(\lambda)}{D^{1,82}} \frac{P_k^{0,85}}{d_{\text{кр}}^{0,15}} \frac{S}{Pr^{0,58}}; \quad (5)$$

$$q_{\text{луч.внутр}} = \varepsilon_{\text{ст.эф}} C_0 \left[\varepsilon_G (T_G/100)^4 - A_G (T_{CT}/100)^4 \right]; \quad (6)$$

$$q_{CT} = \frac{\lambda}{\delta} \frac{dT}{dr}; \quad (7)$$

$$q_{\text{конв.внеш}} = \alpha_{\text{естк}} (T_{CTX} - T_H); \quad (8)$$

$$q_{\text{излуч.внеш}} = \varepsilon_{\text{ст.эф}} C_0 \left(\frac{T_{CTX}}{100} \right)^4, \quad (9)$$

где B — коэффициент перехода при вязкостях; S — функция теплофизических параметров газа; $\varepsilon_{\text{ст.эф}}$ — эффективная степень черноты стенки; C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; ε_G — излучательная способность газа; A_G — поглощательная способность газа; $\alpha_{\text{естк}}$ — коэффициент теплоотдачи между стенкой и наружным газом; $q_{\text{равн}}$ — равновесный тепловой поток.

На рис. 2 представлено изменение тепловых потоков на стенке по времени. Тепловой поток, поступающий в стенку, уменьшается с ростом температуры стенки со стороны газа. Тепловой поток, исходящий из стенки во внешнюю среду, увеличивается с ростом температуры внешней поверхности стенки.

В математической модели теплового состояния двигателя использовался численный метод (на основе метода конечных разностей) решения задач нестационарной теплопроводности с учетом кривизны поверхности камеры сгорания ЖРД МТ. Пример расчетной сетки камеры сгорания с подрезанным соплом приведен на рис. 3.

Разностный аналог численного решения имеет вид

$$\frac{1}{\Delta\delta} (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \times \left[\frac{1}{\Delta r_i^2} (T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}) + \frac{1}{r_{i,j}} \cdot \frac{1}{2\Delta r_i} (T_{i,j+1,k} - T_{i,j-1,k}) + \frac{1}{\Delta z^2} (T_{i+1,j,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i-1,j,k}) + \frac{\cos\beta_{ij}}{4\Delta z_i^2} \times \left(\frac{1}{\cos\beta_{i+1,j}} - \frac{1}{\cos\beta_{i-1,j}} \right) (T_{i+1,j,k} - T_{i-1,j,k}) \right], \quad (10)$$

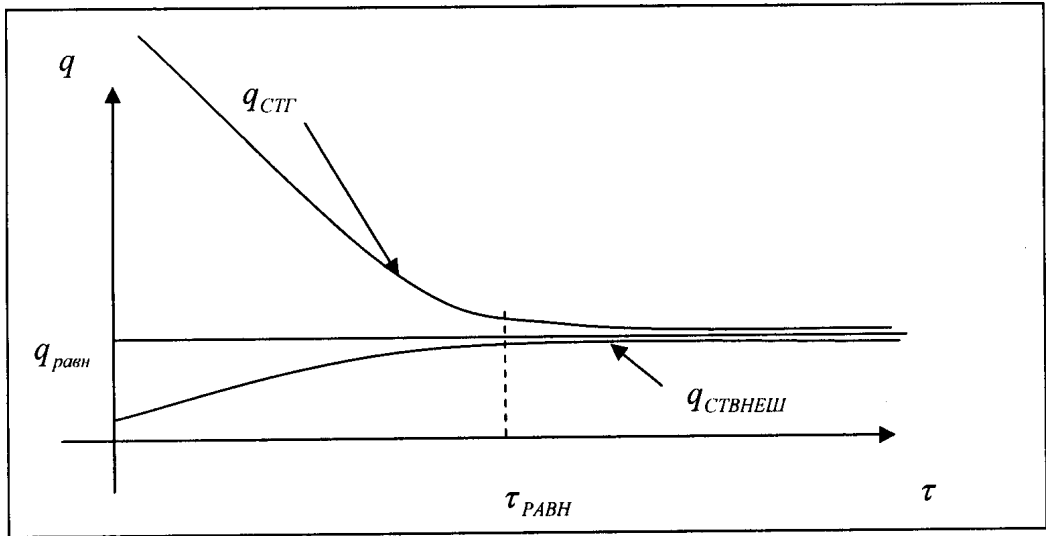


Рис. 2. Изменение тепловых потоков на стенке

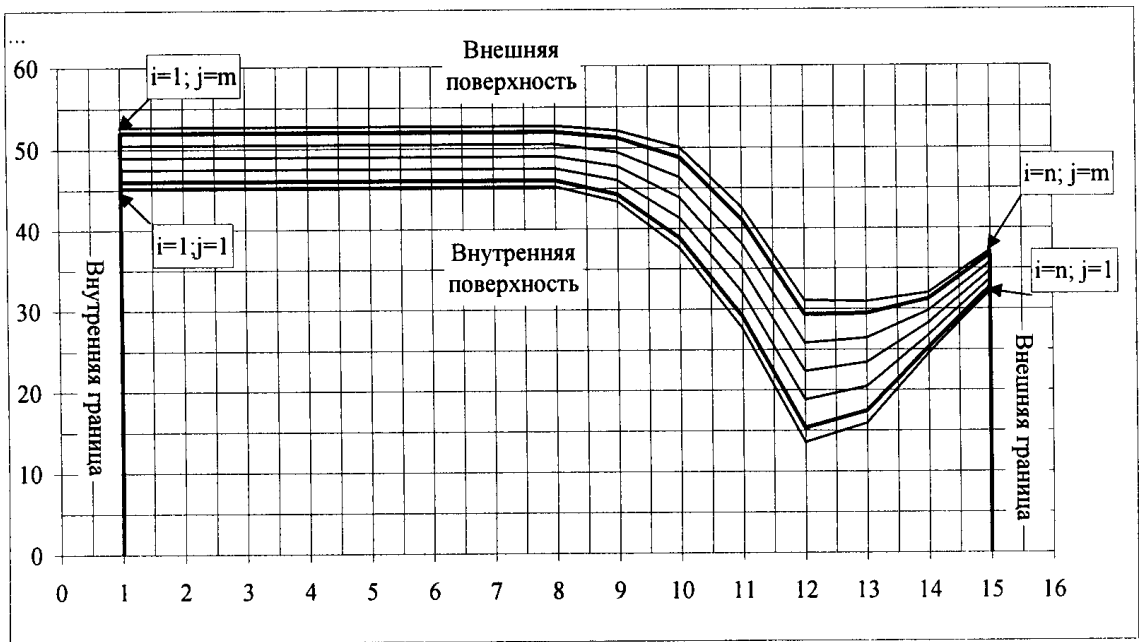


Рис. 3. Сетка для расчета теплового состояния ЖРД МТ

где δ — толщина слоя стеки; λ , C_p , ρ — теплопроводность, теплоемкость и плотность материала соответственно; z — координата сечения камеры.

Важным отличием предложенной схемы решения от классической является введение переменной толщины, которая характеризуется углом наклона расчетной линии в теле:

$$\beta_{i,j} = \arctg \frac{1}{2\Delta z} (r_{i+1,j} - r_{i-1,j}). \quad (11)$$

На рис. 4 дано сравнение результатов расчета температуры внешней поверхности стенки камеры сгорания в зависимости от времени с результатами экспериментов [8, 9] (для двигателя с тягой $P = 200$ Н,

давление в камере сгорания $p_k = 10$ атм, топливо АТ+НДМГ, материал — жаропрочная сталь ХН60В, соотношение компонентов $k_m = 1,85$, восстановительная завеса, однофорсуночная головка, завеса ламинарная, относительный расход на завесу $\dot{m}_{зав} = 10\%$).

На рис. 5 показано подсчитанное по математической модели распределение стационарной температуры внешней и внутренней стенок по длине камеры сгорания (для двигателя $P = 500$ Н, $p_k = 10$ атм, топливо ВПВ+Кер, материал — жаропрочная сталь ХН60В, коэффициент избытка окислителя $a = 1$, окислительная завеса, однофорсуночная головка, начальная толщина пристеночного

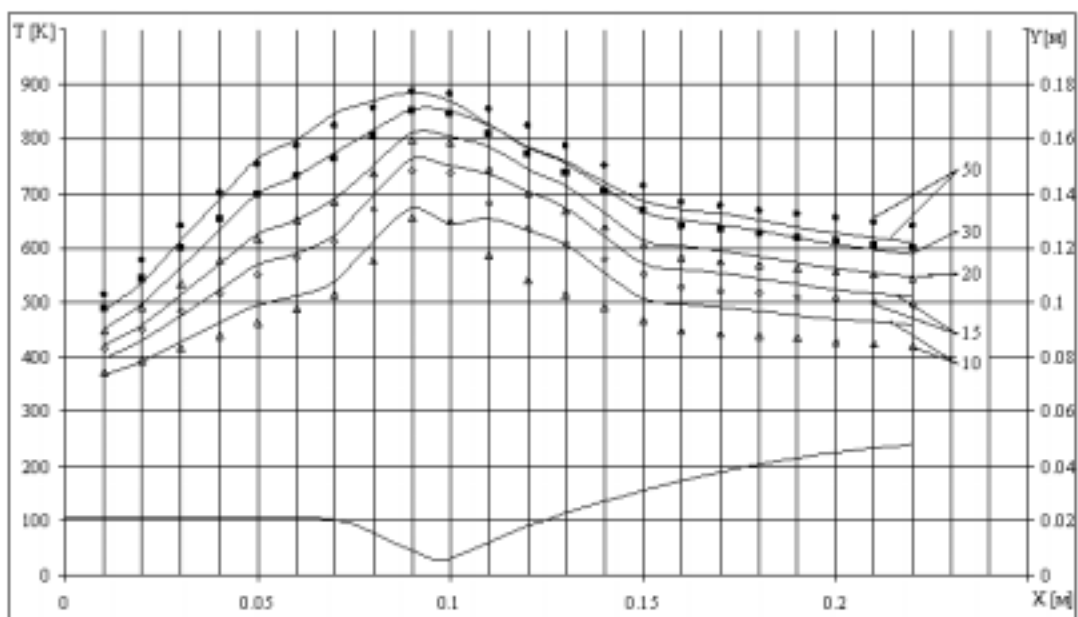


Рис. 4. Зависимость температуры внешней поверхности стенки камеры сгорания от времени. Сравнение результатов расчета (сплошная линия) с экспериментом

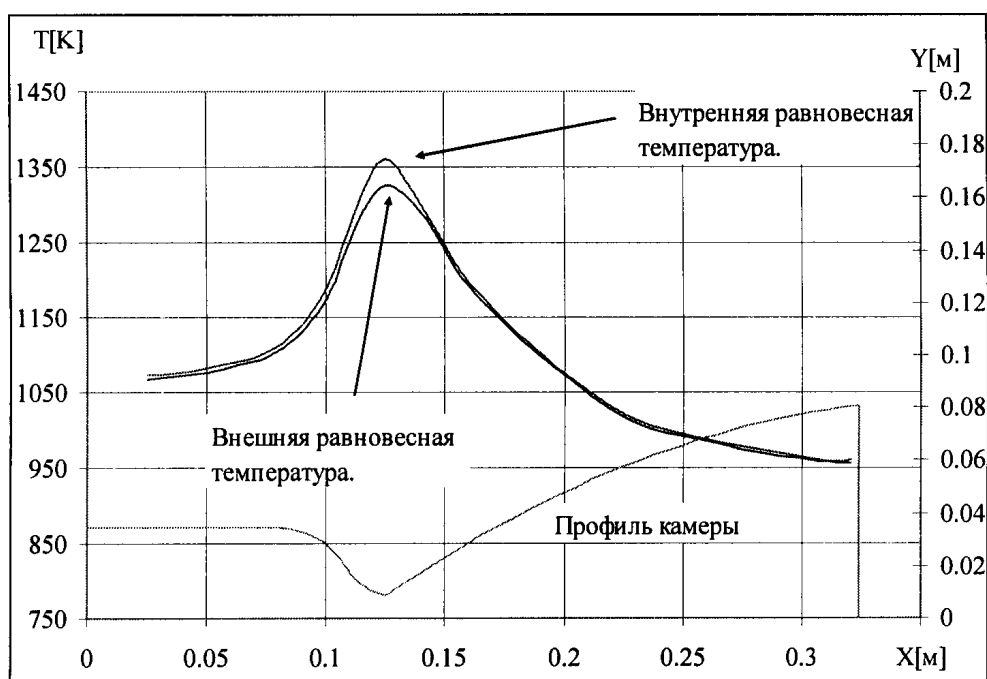


Рис. 5. Распределение температуры внешней и внутренней стенки по длине

слоя $H_{CT} = 0,009$ м, завеса ламинарная, коэффициент перемешивания завесы $K = 0,0005$). Температура принимает свое максимальное значение в районе критического сечения сопла. Разница между температурами внутренней и внешней поверхности стенки составляет $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчет тепловых потоков на стационарном и нестационарном режимах позволяет определить тепловое состояние камеры сгорания в нужный момент в зависимости от рабочих параметров ЖРД МТ.

Выбор оптимальных параметров работы камеры

Отличительной особенностью ЖРД МТ является защита стенок камеры сгорания пристеночным слоем газа с более низкой температурой, чем в ядре потока. В результате теплообмена между пристеночным слоем и ядром к концу камеры сгорания формируются определенные профили соотношения компонентов k_m и скорости газа w , от которых зависят, в основном, энергетические характеристики двигателя: расходный комплекс β и удельный импульс тяги в пустоте $I_{уд.п}$.

В общем случае профили соотношения компонентов по сечению камеры могут быть достаточно произвольные. Считается, что такая неравномерность, имеющая место у смесительной головки, к концу камеры практически исчезает.

Оптимизация параметров камеры сгорания по математической модели производится по максимальному значению расходного комплекса β в критическом сечении с учетом перемешивания завесы с пристеночным слоем.

Для вычисления β используется алгоритм расчета удельного импульса по местным соотношениям компонентов топлива k_{mi} в заданных площадках камеры сгорания [6]. В качестве площадок выбраны соответствующие зоны камеры сгорания: ядро и пристенок. Для ядра соотношение компонентов $k_{мя}$ не меняется вдоль камеры. Для пристенка $k_{мпристенок}$ меняется вдоль камеры, согласно закону перемешивания завесы с пристеночным слоем.

В общем виде для монотонных профилей расчет β , $I_{уд}$ и k_m проводится по формулам:

$$\beta = \frac{\int_0^{r'} \frac{\beta r}{RT} w dr}{\int_0^{r'} \frac{r}{RT} w dr}; \quad I_{уд} = \frac{\int_0^{r'} \frac{I_{уд} r}{RT} w dr}{\int_0^{r'} \frac{r}{RT} w dr};$$

$$k_m = \frac{\int_0^{r'} \frac{k_m r}{(k_m + 1) RT} w dr}{\int_0^{r'} \frac{r}{(k_m + 1) RT} w dr}, \quad (12)$$

где r' — радиус камеры; r — радиус текущей площадки; R — газовая постоянная; T — температура.

С увеличением числа форсунок в смесительной головке понижается роль пристеночного слоя в формировании интегрального удельного импульса камеры. В этом случае соотношение компонентов в форсунках должно стремиться к оптимальному, дающему максимальную эффективность камеры. Здесь основное значение пристеночного слоя — совместно с завесой обеспечить рабочий тепловой режим.

При уменьшении числа форсунок в камере ЖРД МТ, значение соотношения компонентов в форсунках необходимо выбирать с учетом возрастающего влияния перемешивания пристенка с завесой на интегральный удельный импульс камеры.

Рассмотрим задачу нахождения минимального относительного расхода на завесу \bar{m}_3 при условии соблюдения теплового режима

$$T(k_{mрасч})_{X=X_{КРИТИКА}} < T_{ДОПУСТИМОЕ}$$

Решаем последовательно обратные задачи. С учетом перемешивания завесы с пристеночным слоем определяем соотношения компонентов в пристеночном слое непосредственно возле стенки

$k_{mрасч} = f(T_{ДОПУСТИМОЕ})$ в наиболее теплонапряженном месте камеры сгорания. Далее определяем то значение относительного расхода на завесу

$\bar{m}_3 = f(k_{mрасч}, k_{m0}, \bar{m}_{СТ})$, которое и обеспечит нам

это соотношение компонентов $k_{mрасч}$.

На рис. 6 показана расчетная зависимость температуры газа со стороны стенки от относительного расхода на завесу (для двигателя $P = 500$ Н, $p_k = 10$ атм, топливо ВПВ+Кер, материал — жаропрочная сталь ХН60В, окислительная завеса, однофорсуночная головка, начальная толщина пристеночного слоя $H_{СТ} = 0,009$ м, завеса ламинарная, коэффициент перемешивания завесы $K = 0,0005$) при различных значениях коэффициента избытка окислителя α .

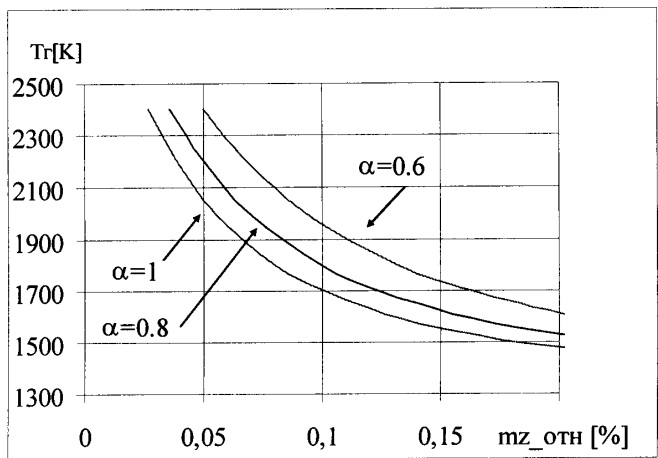


Рис. 6. Расчетная зависимость $T_{стенки}$ от \bar{m}_3

На рис. 7 показана расчетная зависимость удельного импульса двигателя от коэффициента избытка окислителя для различной максимальной температуры стенки камеры сгорания, на рис. 8 показана расчетная зависимость удельного импульса двигателя от коэффициента избытка окислителя для различного числа форсунок в смесительной головке (для двигателя $P = 500$ Н, $p_k = 10$ атм, топливо ВПВ+Кер, материал — жаропрочная сталь ХН60В, окислительная завеса, однофорсуночная головка, начальная толщина пристеночного слоя $H_{СТ} = 0,009$ м, завеса ламинарная, коэффициент

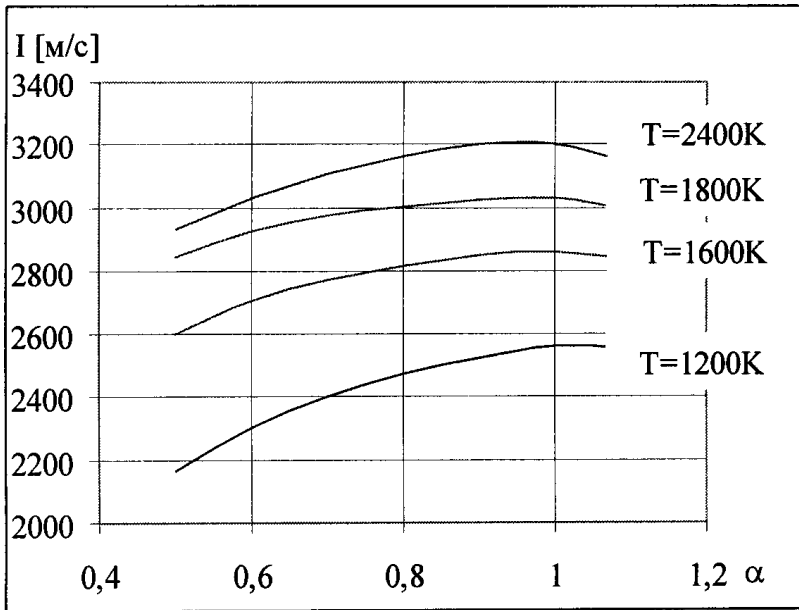


Рис. 7. Расчетная зависимость удельного импульса двигателя от коэффициента избытка окислителя для различной максимальной температуры стенки камеры сгорания



Рис. 8. Расчетная зависимость удельного импульса двигателя от коэффициента избытка окислителя для различного числа форсунок в смесительной головке

перемешивания завесы $K = 0,0005$, степень расширения сопла по площадям $\epsilon = 220$).

Полученные по математической модели расчетные данные позволяют делать вывод о приемлемости выбранного режима работы двигателя по тепловому состоянию стенки камеры сгорания и при этом определить энергетические характеристики двигателя.

Выводы

Обоснована и создана математическая модель теплового состояния ЖРД МТ, позволяющая решать следующие задачи:

- определение теплового состояния двигателя;
- оптимизация значений рабочих параметров двигателя по максимальному удельному импульсу;
- исследование влияния основных параметров рабочего процесса в камере на тепловое состояние ЖРД МТ;
- выработка рекомендаций для создания новых ЖРД МТ и совершенствования конструкции существующих ЖРД МТ.

Возможности математической модели позволяют добиться существенного сокращения количества огневых доводочных испытаний, а значит, и стоимости разработки двигателя в целом.

Разработанная математическая модель используется сейчас для разработки двигателей серии ДМТ МАИ-200, разрабатываемых в МАИ, а также для исследования уже отработанных и прошедших испытания двигателей той же серии [8, 9]. Предварительное моделирование позволило еще на стадии проектирования выбрать оптимальные значения параметров ЖРД МТ и послужило основой для разработки программы огневых испытаний данных типов ЖРД МТ.

В дальнейшем планируется совершенствование математической модели, ее апробация на новых объектах и включение в систему автоматизированного проектирования ЖРД МТ.

Summary

A mathematical model is suggested to describe a thermal state of low-thrust liquid rocket engines. Main attention is focused on such topics as physical meaning of model components, techniques used for analysis of engine properties, model capabilities to predict operational efficiency of combustion chamber in regard to its thermal mode, model capabilities to analyze engine efficiency for predefined propellant mixing scheme.

Библиографический список

1. Козлов А.А., Абашев В.М. Расчет и проектирование жидкостного ракетного двигателя малой тяги. — М.: Изд-во МАИ, 2006.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: Учебник / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др.; Под ред. В.М. Кудрявцева. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. школа, 1983.

3. Беляев Е.Н., Чванов В.К., Черваков В.В. Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей. — М.: Изд-во МАИ, 1999.

4. Березанская Е.Л., Курпатенков В.Д., Надеждина Ю.Д. Расчет конвективных тепловых потоков в сопле Лавалья. — М.: МАИ, 1976.

5. Волкова Л.И. и др. Математическое моделирование теплообмена и тепловой защиты в двигателях // Двигатель. 2000. № 1(7).

6. Кочетков Ю.Н., Савельев Г.Я., Аверкина В.Н. Методика определения энергетических характеристик ЖРД МТ//Ракетно-космическая техника. 1992. Вып. 3 (136). НИИ тепловых процессов.

7. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания: Справочник в 10 томах / Под редакцией академика Глушко В.П. — М.: Изд-во ВИНТИ АН СССР, 1971.

8. Kozlov A.A., Abashev V.M., Denisov K.P. etc. Experimental finishing of bipropellant apogee engine with thrust 200 N. 51st International Astronautical Congress. Rio de Janeiro, Brazil. October 2-6, 2000.

9. Kozlov A.A., Abashev V.M., Hinckel J.N. Organization of the working process in the small thrust engine LRESTH МАИ-200. 52nd International Astronautical Congress. Toulouse, France. October 1-5, 2001.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 20.09.2007