

# МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВЫХ ЗАВЕС В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ ТЯГИ

Винокуров М. В., Дружин А. Н., Рыжков В. В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Проблемы создания ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) нового поколения, работающих на несамовоспламеняющихся высокоэнергетических компонентах топлива, связаны в первую очередь с необходимостью решением двух задач. С одной стороны, - получение максимальных энергетических характеристик двигателей за счет реализации потенциальных возможностей используемого химического топлива, а с другой – обеспечение требуемого теплового состояния конструкции. Одним из способов компромиссного решения этих задач является организация охлаждения камеры сгорания РДМТ с помощью газовых завес. Такой способ представляется перспективным, так как позволяет получить низкотемпературный пристенный слой охлаждающего газа без вмешательства в оптимально организованный рабочий процесс в остальном объеме камеры.

Математическое моделирование внутрикамерных процессов позволяет оценить эффективность газозавесного способа охлаждения и выбрать его количественные параметры. Предлагаемая модель основана на решении системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса в частных производных [1].

Уравнения записаны в осесимметричной системе координат ( $x$  – осевое,  $r$  – радиальное,  $\tau$  – окружное направления), в стационарной постановке, для шести независимых переменных:

- напряженность вихря  $\omega$ :

$$r^2 \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[ r^3 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{эфф} \omega}{r} \right) \right] -$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mu_{эфф} \omega}{r} \right) \right] - r \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x^2) - r^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{V_x^2 + V_r^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} +$$

$$+ r^2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_x^2 + V_r^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x} - r^3 S = 0;$$

- функция тока  $\psi$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \omega = 0;$$

- окружная составляющая скорости  $V_\tau$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( r V_\tau \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( r V_\tau \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left[ r^3 \mu_{эфф} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{V_\tau}{r} \right) \right] - \\ - \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^3 \mu_{эфф} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_\tau}{r} \right) \right] = 0;$$

- концентрация компонентов топлива  $\xi$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \xi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \xi \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{r \mu_{эфф} \partial \xi}{S_c \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r \mu_{эфф} \partial \xi}{S_c \partial r} \right) = 0;$$

- кинетическая энергия турбулентных пульсаций  $K$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{r \mu_{эфф} \partial K}{\sigma_K \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r \mu_{эфф} \partial K}{\sigma_K \partial r} \right) - r(W - \rho \varepsilon) = 0;$$

- и скорость ее диссипации  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \varepsilon \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{r \mu_{эфф} \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r \mu_{эфф} \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial r} \right) - r \left( C_1 \frac{dW}{K} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{K} \right) = 0.$$

Для определения переносных свойств рабочего тела применяется феноменологический подход с использованием эффективных коэффициентов переноса  $\mu_{эфф}$ , у которых турбулентная составляющая находилась по результатам решения двух последних уравнений системы.

Термодинамические свойства рабочего тела описаны уравнением состояния для смеси идеальных газов, используемым при расчете плотности  $\rho$ . При этом распределение давления в потоке находится интегрированием трех первых уравнений системы, а распределение температуры и молекулярной массы рабочего тела – по результатам решения четвертого уравнения системы путем аппроксимации данных термодинамического расчета, выполненного по методике [2].

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений проводилось конечно-разностным итерационным методом последовательных смещений Гаусса-Зайделя.

В качестве объекта исследования выбрана камера сгорания с типичной для РДМТ, работающего на несамовоспламеняющихся компонентах топлива, схемой смесеобразования и воспламенения: в центре огневого днища расположен воспламенитель, а по окружности – пояс двухкомпонентных центробежных форсунок, формирующих закрученное течение рабочего тела в основном потоке.

Тепловая защита организована путем вдува в качестве охладителя газообразного окислителя, подаваемого двумя потоками: по периферии камеры для охлаждения ее стенок (пристенная завеса) и вокруг воспламенителя для охлаждения воспламенителя и огневого

днища (завеса воспламенителя). Характерная структура течения представлена на рис. 1.

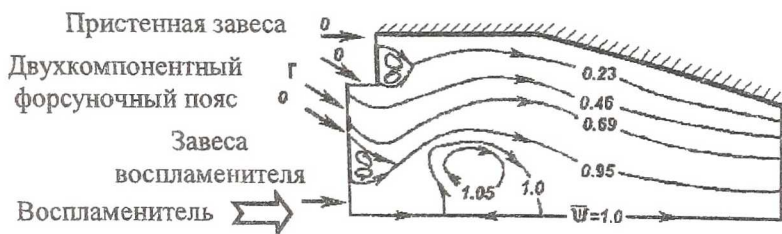


Рисунок 1 - Структура течения рабочего тела в камере сгорания

$\bar{\psi} = \psi / \psi_0$  ( $\psi_0$  - значение функции тока на оси симметрии)

В результате проведения расчетных исследований получены структуры течения рабочего тела и распределение локальных параметров потока по тракту камеры сгорания.

Устойчивая зона возвратных токов в приосевой области камеры обусловлена значительной закруткой потока, являющейся следствием работы форсуночного пояса.

Характерное распределение температуры рабочего тела ( $T^{cm}$  - температура горения стехиометрической смеси компонентов топлива,  $K_m$  - коэффициент соотношения компонентов топлива) по тракту приведено на рис.2. Штриховыми линиями показано положение двух коаксиальных фронтов пламени, между которыми рабочее тело имеет избыток горючего компонента, а в периферийной и приосевой областях камеры - избыток окислителя.

Расчеты показывают, что в отсутствие пристенной газовой завесы внешний фронт пламени может замыкаться на стенку камеры сгорания. Физически эта а соответствует месту наиболее теплонапряженного состояния стенки. Зависимость ее положения по длине камеры от относительного расхода охладителя в пристенную завесу  $\bar{m}_3$  (по отношению к общему расходу окислителя) можно определить из рис. 3. Относительная длина камеры  $\bar{L}$  определялась в калибрах диаметра минимального сечения сопла.

Видно, что лишь при  $\bar{m}_3 \geq 0,3$  (30% от общего расхода окислителя через двигатель) максимум температуры стенки выходит за пределы минимального сечения сопла.

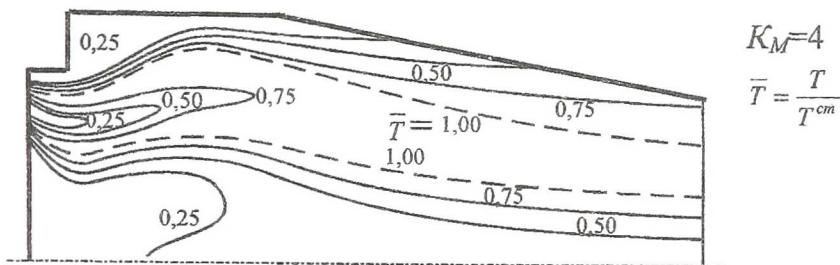


Рисунок 2 - Распределение температуры рабочего тела ( $\bar{T}$ ) по тракту камеры сгорания

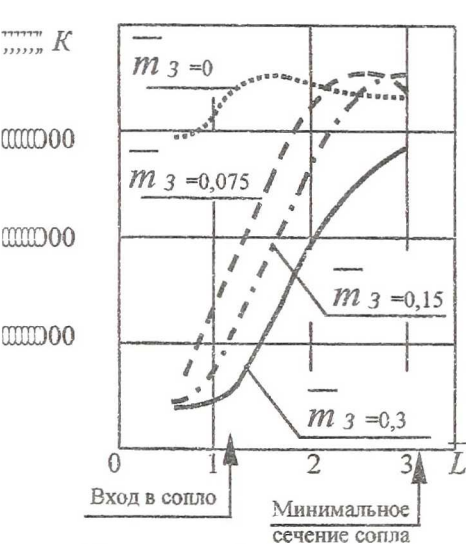


Рисунок 3 - Распределение температуры стенки по длине камеры при наличии пристенной завесы

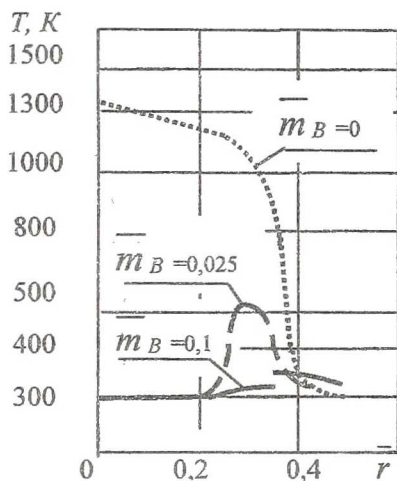


Рисунок 4 - Распределение температуры по радиусу огневого дна при наличии завесы вокруг воспламенителя

В отсутствие завесного охлаждения воспламенителя зона возвратных токов (рис.1) вместе с внутренним фронтом пламени (рис.2) располагается в непосредственной близости от огневого дна, тем самым повышая его теплонапряженность.

Влияние относительного расхода окислителя в завесу вокруг воспламенителя  $\bar{m}_B$  на температуру дна показано на рис. 4. Видно, что даже при  $\bar{m}_B=0,025$  (2,5% от общего расхода окислителя через

двигатель) температура конструкции снижается до безопасной величины.

Представляет интерес оценка влияния дополнительного расхода окислителя для решения задачи охлаждения на интегральные характеристики РДМГ.

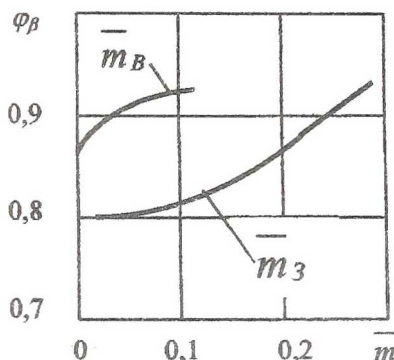


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента полноты расходного комплекса от относительного расхода окислителя в завесе.

На рис. 5 показана зависимость коэффициента полноты расходного комплекса камеры  $\phi_{\beta}$  от относительного расхода в обе завесы  $\bar{m}$  при постоянном расходе компонентов в форсуночный пояс.

Интересно отметить, что организация тепловой защиты конструкции РДМТ с рассмотренной схемой смесеобразования описанным способом не снижает, а повышает расчетные значения  $\phi_{\beta}$ , что объясняется увеличением уровня турбулизации потока и выравниванием эюры концентрации компонентов топлива по сечению камеры.

Таким образом, в работе показана возможность количественной оценки параметров газозавесного охлаждения и интегральных характеристик двигателя на этапе его проектирования на основе представленной математической модели.

Получены результаты численного исследования влияния газовых завес на температуру конструкции камеры сгорания и эффективность рабочего процесса РДМТ, работающего на несамовоспламеняющихся компонентах топлива.

#### Список литературы

1. Госмен А. Д., Пан В. М., Ранчел А. К., Сполдинг Д. Б., Вольфштейн М., Численные методы исследования течений вязкой жидкости: Пер. с англ./ Под ред. Тирского Г. А., -М.: Мир, 1972.-328 с.
2. Алемасов В. Е. и др. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Том 1. Методы расчета / Под ред. Глушко В. П. -М.: ВИНТИ. -266 с.