

УДК 629.7.036.54-66.004.8:51.001.57

С. И. Бурдюгов, кандидат технических наук, ОАО «Научно-производственное объединение «Искра», Пермь

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ВНУТРИКАМЕРНОГО ПРОЦЕССА УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ ЗАРЯДОВ МАЛОГАБАРИТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Для обеспечения эффективной очистки продуктов сгорания малогабаритных ракетных двигателей на твердом топливе (МРДТТ) при их утилизации необходимо подобрать технологическое оборудование, наиболее полно отвечающее эффективной очистке. В данной статье представлена математическая модель расчета внутрикамерного процесса установки утилизации зарядов МРДТТ при истечении газозоудной смеси (ГВС) и тепловых потерь.

Ключевые слова: установка утилизации, внутрикамерные процессы.

В разработанную в ОАО НПО «Искра» установку сухой очистки продуктов сгорания малогабаритных ракетных двигателей на твердом топливе (МРДТТ) заложен принцип сжигания МРДТТ в замкнутом объеме с последующим дросселированием, охлаждением газов и пропусканьем газозоудной смеси (ГВС) через блоки очистки [1].

Создание эффективной сухой очистки может быть достигнуто за счет обеспечения необходимых параметров истечения ГВС – скорости истечения, массового расхода, температуры.

Поскольку при утилизации МРДТТ приходится иметь дело с несколькими десятками типов РДТТ, то параметры ГВС будут меняться от двигателя к двигателю, и поэтому нужен аппарат расчета параметров ГВС, а не экспериментальные исследования.

В настоящей статье рассмотрен метод решения задачи на основе расчета внутрикамерного процесса в ресивере с учетом тепловых потерь и истечения через диафрагму.

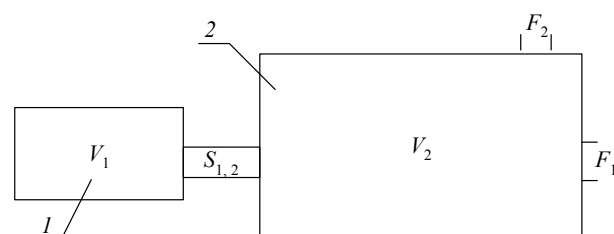
В РДТТ как правило доля тепловых потерь вследствие теплоотдачи в стенки камеры невелика (порядка 1 % и менее) и учитывается при расчетах внутренних баллистических параметров (БП) в виде поправок. В нашем случае при сжигании РДТТ в ресивере, когда объем ресивера значительно превышает объем РДТТ и время нахождения ГВС в ресивере достигает нескольких десятков минут, задача расчета БП становится существенно сопряженной с задачей расчета теплообмена и теплового истечения ресивера. Для проектирования подобных установок необходим инструмент сопряженного расчета внутрикамерных процессов и теплового режима РДТТ – ресивера.

Принятую установку утилизации (УУ) можно схематически представить в виде модели, схема которой представлена на рисунке.

Модель УУ представляет последовательность камеры РДТТ и камеры ресивера, газосвязанных между собой. Камера ресивера имеет расходные отверстия во внешнюю среду для предохранительного клапана и расходное отверстие для истечения ГВС с заданными параметрами: V_i – свободный объем i -й камеры, $i = 1$ – РДТТ, $i = 2$ – ресивер; $S_{1,2}$ – площадь критического сечения РДТТ; F_1 – площадь проходного сечения расходного отверстия для истечения ГВС; F_2 – площадь проходного сечения расходного отверстия во внешнюю среду для предохранительного клапана.

Математическая модель внутрикамерных процессов, излагаемая ниже, исходит из следующих основных допущений:

- распределение температуры по объему камер однородное (нуль-мерный подход);
- процессы истечения из камер в атмосферу и протекания между камерами являются квазистационарными;
- газовая смесь в камерах подчиняется уравнению состояния идеального газа;
- предполагается, что компоненты газовой смеси химически не взаимодействуют между собой;
- максимальное количество компонентов 6.



Расчетная схема установки утилизации

Догорание продуктов сгорания (ПС) в воздухе, первоначально заполняющим ресивер, является су-

ществленным фактором в формировании термодинамических параметров смеси в ресивере. Для приближенного учета этого фактора в рамках модели инертной смеси газов фактические параметры ПС (температура, газовая постоянная, показатели адиабаты) модифицируются таким образом, чтобы смесь газов в ресивере соответствовала термодинамическому расчету равновесной смеси ПС и воздуха в соотношении масса заряда/масса воздуха в ресивере. При таком подходе при окончании работы РДТТ свойства смеси в ресивере точно соответствуют термодинамическому расчету [2], а в период горения заряда максимальная погрешность имеет место в начальный период, когда требование к точности расчета можно предъявлять минимальные.

Для математического описания модели используются уравнения сохранения масс, сохранения энергии, теплопроводности, критического и докритического истечения, теплообмена [3].

Уравнения сохранения масс компонентов в камере РДТТ:

$$\frac{dM_{1,j}}{dt} = -C_{1,j}G_{1,2} + Ct_{1,j}Gt_1 + Cb_{1,j}Gb_1.$$

Уравнения сохранения масс компонентов в ресивере:

$$\frac{dM_{2,j}}{dt} = -C_{2,j}Gu_2 + C_{1,j}G_{1,2} + Ca_jGa_2,$$

где $M_{i,j}$ – масса j -го компонента в i -й камере; $C_{i,j}$ – массовая концентрация j -го компонента в i -й камере; Cu_2 – массовый расход истечения ГВС из ресивера в атмосферу; $G_{1,2}$ – массовый расход из РДТТ в ресивер; Gt_1 , Gb_1 – массовый газоприход от горения заряда и воспламенителя соответственно; Ga_2 – массовый расход подсоса из внешней атмосферы в ресивер (при $\Delta P < 0$).

$$\sum_{j=1}^n M_{i,j} = M_i,$$

где M_i – масса газа в i -й камере; $M_{i,j}$ – масса j -го компонента в i -й камере.

Уравнение сохранения энергии в РДТТ и ресивере соответственно:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{V_1 P S_1}{k_1 - 1} \right) = Gt_1 I z_1 + Gb_1 I b_1 - G_{1,2} I s_1 - Qw_1 - P S_1 \frac{dV_1}{dt};$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{V_2 P S_2}{k_2 - 1} \right) = -Gu_2 I s_2 + G_{1,2} I s_1 + Ga_2 I a - Qw_2,$$

где Iz , Ib , Ia , $I s_i$ – удельные энтальпии продуктов сгорания твердого топлива, воспламенителя, внешней атмосферы и газовой смеси в i -й камере соответственно; k_i – показатель адиабаты газовой смеси в i -й камере; Ga_i – расход подсоса из атмосферы; Gb_i –

газоприход от инициатора; $P S_i$ – давление в i -й камере; Qw_i – тепловые потери в i -й камере вследствие теплообмена со стенами камеры; V_i – свободный объем i -й камеры.

Уравнение состояния газовой смеси в i -й камере:

$$P S_i = \frac{M_i}{V_i} R S_i T S_i,$$

где $T S_i$ – среднеобъемная температура смеси в i -й камере; $R S_i$ – газовая постоянная смеси в i -й камере.

Газоприход от горения заряда рассчитывается по формуле стационарного горения

$$Gt = St \rho_1 u_1 \left(\frac{P S}{P_{atm}} \right)^v,$$

где St – площадь поверхности горения; ρ_1 – плотность топлива заряда; v , u_1 – коэффициенты.

Газоприход от воспламенителей рассчитывается по формулам, полученным в предположении, что зерна ВС одинаковы и имеют форму куба или шара, а скорость горения следует степенному закону:

$$Gb = 3\omega_0 (1-z)^2 Zb;$$

$$Zb = \frac{u_{1b}}{e_{0b}} \left(\frac{P}{P_{atm}} \right)^{v_b} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{t_p} \right) \right],$$

где $z = e_b / e_{0b}$ – относительная толщина сгоревшего свода зерна ВС; e_b , e_{0b} – текущая толщина сгоревшего свода и полный свод зерна ВС; ω_0 – масса ВС; t_p – характерное время распространения пламени.

Расчет расхода газа через проходное отверстие ресивера проводится по следующим формулам. При малых перепадах давления:

$$G = \mu F \sqrt{2\rho \Delta P},$$

где F – площадь проходного сечения отверстия; $\mu = 1/\sqrt{s}$ – коэффициент расхода отверстия (s – эквивалентный коэффициент местного гидравлического сопротивления); ρ – плотность газа со стороны большего давления; ΔP – перепад давления.

При сверхкритическом перепаде давления ($\pi_* > Pa/Ps$) расчет проводится по формуле для критического истечения:

$$G = \mu F \sqrt{P S \rho_s} \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad \pi_* = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

где k – средний показатель изоэнтальпии расширения.

При $\pi_* < Pa/Ps < 0,99$ расчет проводится по формулам для докритического истечения:

$$G = \mu F \sqrt{\frac{2k}{k-1} P S \rho_s} \left(\frac{Pa}{Ps} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{Pa}{Ps} \right)^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Распределение температуры в стенках ресивера определяется решением уравнения теплопроводности

$$\rho_k C_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \lambda_k \frac{\partial^2 T_k}{\partial x^2},$$

где $T_k(x, t)$ – распределение температуры в k -й стенке; ρ_k , C_k , λ_k – плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность материалов k -й стенки.

Граничные условия внутри ресивера:

$$-\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_{uk} (T_{s_k} - Twu_k) + \varepsilon_{prk} \sigma (T_{s_k}^4 - Twu_k^4);$$

на наружных поверхностях стенок ресивера:

$$-\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_{ak} (Ta_k - Twa_k) + \varepsilon_{prak} \sigma (Ta_k^4 - Twa_k^4),$$

где α_{uk} и α_{ak} коэффициенты конвективного теплообмена внутри ресивера и снаружи соответственно; Twu_k и Twa_k – температура поверхностей стен внутри и снаружи ресивера соответственно; ε_{pr} – приведенная степень черноты; σ – постоянная Стефана – Больцмана.

Коэффициент теплообмена в ресивере может быть определен либо директивным заданием его величины во входных данных, либо рассчитан в процессе работы программы по формуле свободной конвекции или по формулам вынужденной конвекции для течения в трубе.

При директивном способе определения коэффициентов теплообмена задается значение α_0 , соответствующее давлению P_0 , а значение α , соответствующее текущему значению P , пересчитывается по формуле

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^m, \quad m = 0,8.$$

При определении α по модели свободной конвекции используются формулы:

$$Nu = 0,15 (Gr Pr)^{0,333}; \quad Nu = \frac{\alpha H}{\lambda_s}; \quad Gr = g \beta \frac{\Delta T H^3}{\nu^2},$$

где λ , ν – теплопроводность и кинематическая вязкость газа в камере; β – коэффициент температурного расширения; H – характерный размер камеры; Pr – число Прандтля газа.

При определении α исходя из модели течения в трубе используются формулы:

$$Nu = 0,018 Re^{0,8} Pr^{0,43}; \quad Re = \frac{WX}{\nu} = \frac{GxX}{\mu Sk},$$

где Gx – характерный массовый расход газа через ресивер; X – характерный размер; μ – динамическая вязкость газа; S_k – проходные сечения ресивера.

Текущая степень черноты газовой смеси в ресивере рассчитывается по формуле, приближенно учитывающей изменение ε с давлением:

$$\varepsilon(p) = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{P}{P_0},$$

где ε_0 – директивно задаваемое значение степени черноты газа, соответствующее давлению P_0 .

Расчет тепловых потерь в стенке ресивера производится по формуле

$$Q_{wi} = \sum_k S_k \left[\alpha_{uk} (T_{s_i} - Twu_k) + \varepsilon_{prk} \sigma (T_{s_i}^4 - Twu_k^4) \right],$$

где S_k – площадь поверхности k -го участка поверхности стенок.

Программа предусматривает возможность моделирования работы регулируемой РДТТ, в которой при $P > P_*$ открывается дополнительный предохранительный клапан выпуска газа для поддержания давления равным P_* .

Максимальное значение площади проходного сечения клапана ограничивается величиной F_{max} , задаваемой во входных данных. Алгоритм работы клапана, заложенный в расчет, записан в виде таблицы.

Площадь проходного сечения клапана, м ²	Условия
0	При $P < P_*$
$\eta(P - P_*)$	При $P > P_*$ и $\eta(P - P_*) < F_{max}$
F_{max}	При $P > P_*$ и $\eta(P - P_*) > F_{max}$
η – коэффициент пропорциональности, задаваемый во входных параметрах; величина выбирается эмпирически или рассчитывается по параметрам клапана.	

Разработанная методика позволяет определить:

- изменение давления и температуры в ресивере во времени истечения ГВС;
- изменение массового расхода ГВС через дроссель;
- изменение температуры внутренней и наружной поверхности стенок ресивера.

Библиографические ссылки

1. Бурдюгов С. И. Разработка технологии и методов утилизации элементов малогабаритных ракетных двигателей на твердом топливе // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 1(37). – С. 31–34.
2. Университетская программа определения параметров равновесия многокомпонентных гетерогенных систем. – М.: МВТУ им. Баумана, 1983. – 60 с.
3. Ерохин Б. Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирования РДТТ. – М.: Машиностроение, 1991. – 560 с.

S. I. Burdyugov, Candidate of Technical Sciences, OJSC Research and Production Association "Iskra", Perm

Mathematical Model of Intrachamber Process Calculation in Utilization Unit of Small-Size SRM Charges

To provide effective combustible products purification in the process of small-size SRM (SSRM) utilization it is necessary to select the most appropriate technological equipment. The mathematical model of calculation of the process in utilization unit of small-size SRM charges during the gas-air mixture efflux and calculation of heat losses are presented.

Key words: utilization unit, intrachamber processes.