

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДОТОПЛИВНОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЯГОЙ

С.А. Биткин

Представлена математическая модель твердотопливной энергоустановки с регулируемым модулем тяги. Проведены исследования динамических процессов при переходе с одного уровня тяги на другой в зависимости от постоянной времени камеры сгорания и коэффициента усиления. Для глубокого регулирования тяги показана необходимость введения в систему управления контура регулирования.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, регулирование модуля тяги, регулятор расхода, изменяемое критическое сечение, математическая модель в отклонениях, постоянная времени, коэффициент усиления.

Принцип работы РДТТ с регулированием модуля тяги основан на изменении расходных характеристик путем регулирования площади критического сечения сопла (или блока сопел). При этом диапазон рабочих давлений, ограниченный снизу пределом устойчивого горения топлива, а сверху массовыми характеристиками, определяет пределы регулирования расхода и тяги. РДТТ такого типа характеризуются периодами устойчивой газификации в промежутках между участками большой тяги и не обеспечивают пауз при работе. Изменение площади газорасходных сечений сопел обеспечивается клапанной системой регулирования по заданному закону, формируемому системой управления.

Система уравнений внутренней баллистики ЭУ записывается при следующих допущениях:

- 1) в объеме камеры сгорания и регуляторов расхода применен нульмерный подход, т.е. все газодинамические параметры осреднены по объему;
- 2) механическая смесь продуктов сгорания топлива является идеальной газовой смесью;
- 3) изменение внутреннего объема камеры сгорания обусловлено изменением объема топливного заряда.

Система уравнений внутренней баллистики на полное время работы содержит в общем случае дифференциальные уравнения [1]:

1) уравнение изменения горящего свода:

$$\frac{de}{dt} = u_1 p^\nu;$$

2) уравнение изменения свободного объема:

$$-\frac{dV}{dt} = S(e) \frac{de}{dt};$$

3) уравнение сохранения количества вещества (баланс массы):

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V} \left(\sum_i G_i - \rho \cdot \frac{dV}{dt} \right);$$

4) уравнение изменения давления (закон сохранения энергии):

$$\frac{dp}{dt} = \frac{k-1}{V} \sum_i C_{P_i} T_i G_i;$$

5) изменение массовой доли компонента (продукты сгорания топлива и воспламенителя):

$$\frac{dg_j}{dt} = \frac{1}{\rho V} \left(\sum g_j G_{ex} - g_j \sum G_{вых} \right) - \frac{g_j}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad j=1,2,$$

которые дополняются уравнением состояния идеального газа Менделеева – Клапейрона

$$p = \rho RT$$

для определения температуры по известным давлению и плотности, и алгебраическими соотношениями для определения свойств газовой смеси при изменении соотношения компонентов:

$$C_P = C_{P,воспл} g_{воспл} + C_{P,топл} g_{топл} + C_{P,нач} (1 - g_{воспл} - g_{топл}),$$

$$C_V = C_{V,воспл} g_{воспл} + C_{V,топл} g_{топл} + C_{V,нач} (1 - g_{воспл} - g_{топл}),$$

$$k = C_P / C_V, \quad R = C_P - C_V.$$

Здесь u_1 – единичная скорость, ν – показатель степени в законе горения, e – горящий свод, C_P , C_V – газовые теплоемкости, g – массовые доли топлива и воспламенителя.

Поверхность горения в зависимости от свода для топливного заряда ДУ определяется табличной зависимостью $S(e)$.

Газоприток от горения топлива определяется как

$$G_T = \rho_T S(e) \frac{de}{dt}.$$

Расход газа через сопловые блоки определяется по формуле для сверхзвукового перепада:

$$G = ApF,$$

где $A=f(k, R, T)$ – коэффициент истечения, $F(t)$ – закон изменения суммарной площади критических сечений работающих сопел.

Не умаляя общности, в дальнейшем не рассматривается участок запуска и выхода ЭУ на режим, а исследуются переходные процессы на основном режиме работы при регулировании уровня тяги изменением суммарной площади критических сечений блока сопел.

Уравнения динамики камеры сгорания в отклонениях записываются в безразмерном виде:

$$T_k \frac{d\bar{p}}{dt} + \bar{p} = K_f \bar{F}; \quad (1)$$

$$\bar{p} = \frac{\partial p}{p^\circ}, \quad \bar{F} = \frac{\partial F}{F^\circ};$$

$$K_f = \frac{1}{\nu - 1}, \quad T_k = \frac{p^0 V^0}{(RT)^0 G} \left(\frac{1}{1 - \nu} \right);$$

$$G = AF^0 p^0,$$

где $\bar{p} = p - p^\circ$ – текущее отклонение давления в камере от программного, $\bar{F} = F - F^\circ$ – текущее отклонение площади критического сечения от программного, K_f – коэффициент усиления по площади критического сечения сопла T_k – постоянная времени камеры, G – секундный массовый расход.

Рассмотрим влияние изменения постоянной камеры, обусловленного увеличением свободного объема по мере выгорания топлива на продолжительность переходных процессов в камере модельной энергоустановки, параметры которой приведены в табл.

Таблица

Параметры энергоустановки

Температура в камере	T, К	2400
Газовая постоянная	R, дж/(кг*град)	377
Коэффициент истечения	A, с/м	0,0007
Плотность топлива	ρ , кг/м ³	1600
Единичная скорость горения	u_1 м/с/9,81*10 ⁵	3,8*10 ⁻⁷
Барический показатель	ν	0,6
Поверхность горения	S, м ²	0,2

Решение дифференциального уравнения динамики камеры (2) получено в программной среде Mathcad.

На рис. 1, 2 и 3 представлены графики зависимости изменения отклонений давления в камере и тяги энергоустановки при внезапном (красная линия) и программируемом (синяя линия) изменении площади критического сечения сопла. Приращение площади критического сечения составляет $\Delta F=0,2$. Во втором случае продолжительность увеличения составляет 0,1 с.

Рис. 1 соответствует началу работы ЭУ и свободному объему $V^0 = 0,005 \text{ м}^3$, рис. 2 – пятикратному увеличению свободного объема $V^0 = 0,025 \text{ м}^3$ (примерно половина времени работы) и рис. 3 – десятикратному увеличению свободного объема $V^0 = 0,05 \text{ м}^3$ (окончание времени работы).

Результаты расчетов показывают, что время перехода с первого уровня тяги на второй увеличивается от 0,3 с в начале работы до 1,1 с в середине работы и до 2,5 с в конце работы ЭУ. При этом в случае введения программируемого изменения критического сечения существенно уменьшается либо полностью нивелируется начальный заброс тяги при переключении органа управления (перемещении заслонки регулирующего клапана).

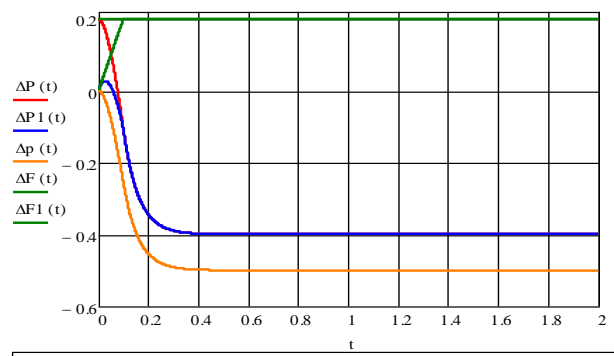


Рис. 1. Изменение отклонений давления и тяги при $V=0,005 \text{ м}^3$

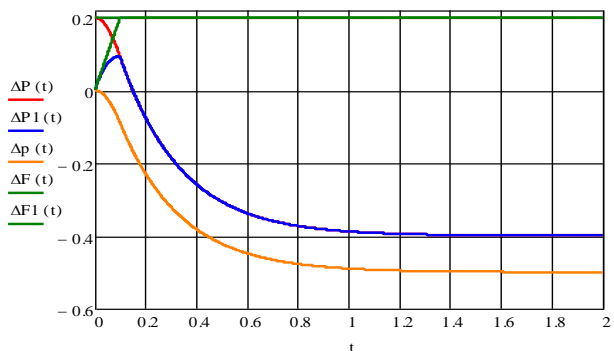


Рис. 2. Изменение отклонений давления и тяги при $V=0,025 \text{ м}^3$

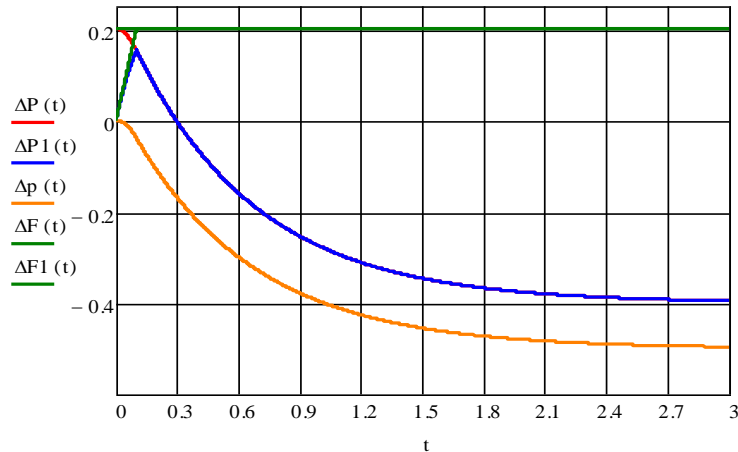


Рис. 3. Изменение отклонений давления и тяги при $V=0,05 \text{ м}^3$

Для энергоустановки, обеспечивающей как минимум два уровня тяги, исследованы вопросы возможной глубины регулирования тяги и лимитирующие факторы, минимальное время перехода с одного уровня на другой и факторы, способствующие его минимизации.

Решить проблему глубокого регулирования тяги можно только на базе высокочувствительного топлива, имеющего барический показатель $\nu = 0,8 \dots 1,0$, в этом случае в ЭУ вводится контур управления с системой стабилизации давления. Для функционирования автомата стабилизации давления, а также для оценки времен перехода с режима на режим необходимо знать динамику камеры сгорания двигателя. В соответствии с уравнением динамики (1) для камеры определяющими являются два параметра: постоянная времени камеры T_k и коэффициент усиления камеры K_f . Постоянная времени камеры определяет длительность процесса перехода, в процессе работы ЭУ значение постоянной времени возрастает по мере увеличения свободного объема камеры из-за выгорания твердого топлива. Постоянная времени и коэффициент усиления зависят от барического показателя ν , увеличиваясь по мере его роста. Значение коэффициента усиления при переходе от топлив с $\nu = 0,9$ к $\nu = 0,6$ снижается примерно в два раза. Если ограничиваться установкой критических сечений, соответствующих необходимым уровням давления, то получаются неприемлемо большие времена переходов, что иллюстрируется графиком на рис. 4.

В соответствии с аппаратом теории управления в качестве закона стабилизации давления принят пропорционально-интегральный закон:

$$U = k_1 \delta p + k_2 \int_{t_{нач}}^{t_{тек}} \delta p dt, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент при пропорциональной части управляющего закона, k_2 – коэффициент при интегральной части управляющего закона, δp – текущее отклонение давления в камере от программного, U – сигнал на изменение площади критического сечения, $t_{нач}$ – момент начала работы СУ, $t_{тек}$ – текущий момент работы СУ [2].

Без введения закона управления время перехода с одного режима тяги на другой изменяется от 0,1...0,2 с в начале работы до нескольких секунд в конце. На графике рис. 5 видны также характерные забросы тяги, соответствующие моментам изменения площади критического сечения соплового блока.

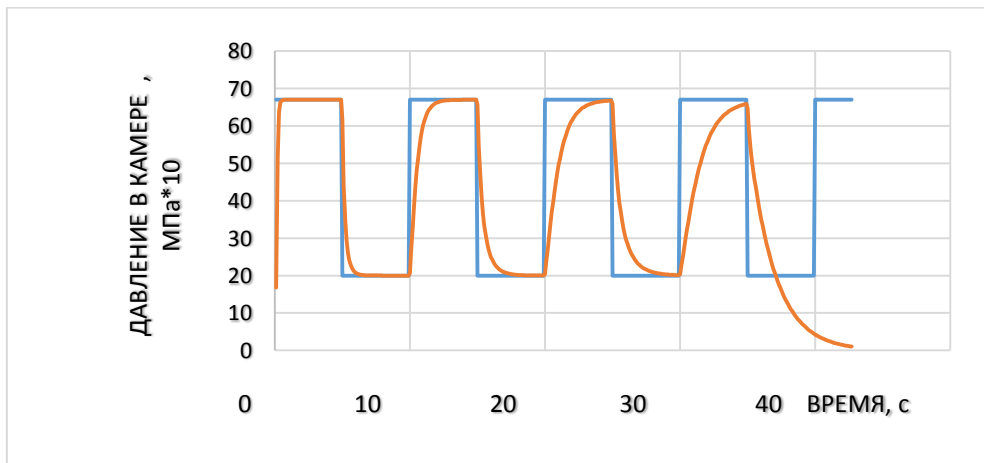


Рис. 4. Влияние изменения постоянной времени камеры на отличие давления от программного

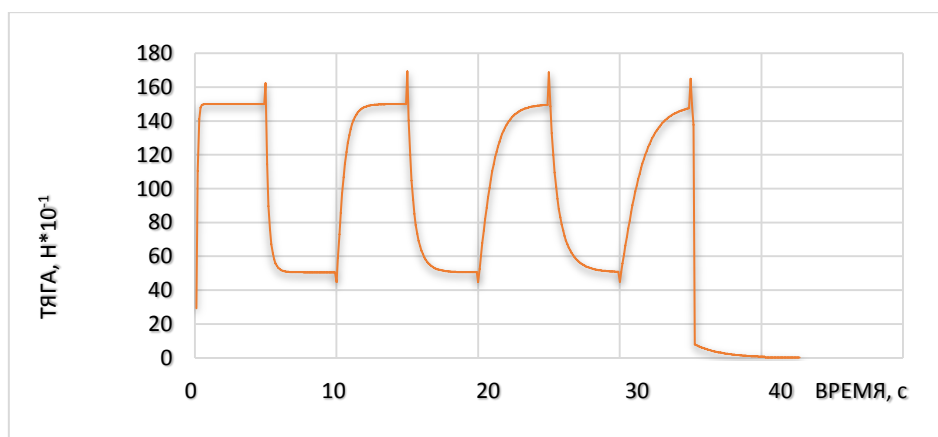


Рис. 5. Циклограмма тяги без контура регулирования давления

Применение системы стабилизации давления в контуре системы управления позволяет сократить время перехода в конце работы до 2 с (см. рис. 6). Характер изменения текущей площади критического сечения соплового блока по времени работы для заданного закона регулирования тяги представлен на рис. 7.

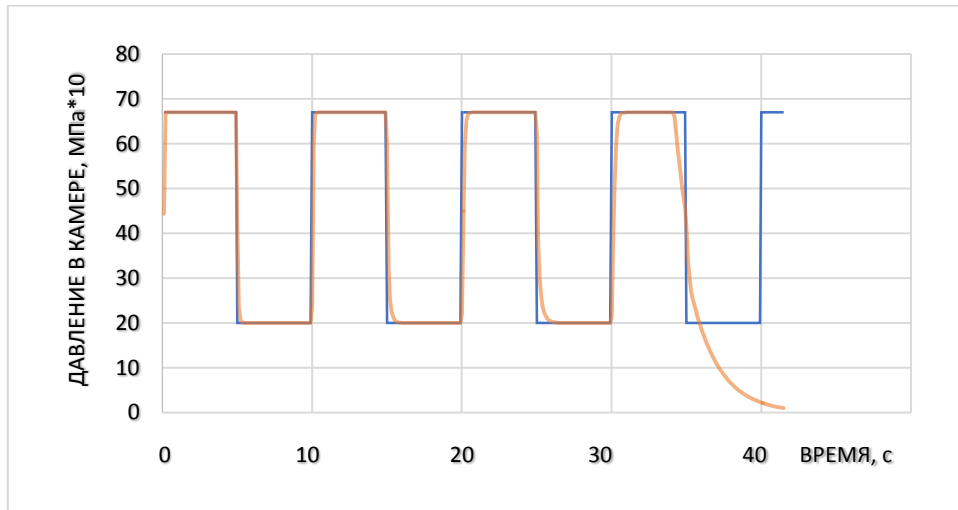


Рис. 6. Циклограмма давления с системой стабилизации

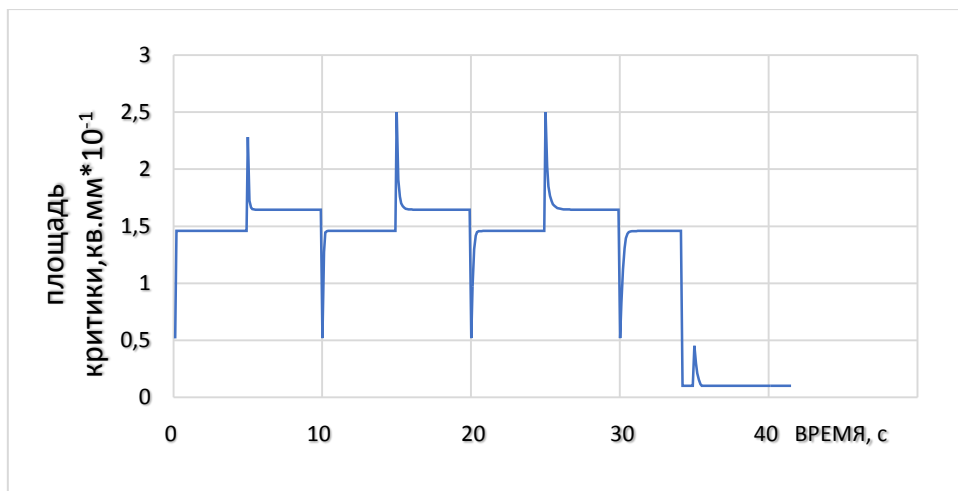


Рис. 7. Закон изменения критического сечения сопла

Таким образом, применение смесевых твердых топлив с высоким барическим показателем ν и введение в контур управления системы стабилизации давления в соответствии с пропорционально-интегральным законом (2) позволяет обеспечить требуемую циклограмму тяги как по глубине регулирования, так и по характеру переходных процессов.

Библиографический список

1. Твердотопливные регулируемые двигательные установки / РАРАН; Ю.С. Соломонов и др.; под ред. А.М. Липанова, Ю.С. Соломонова; редкол. серии В.В. Панов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 2011. – 416 с.: ил. (Справ. б-ка разработчика-исследователя).
2. Основы теории автоматического управления ракетными двигательными установками / А.И. Бабкин, С.И. Белов, Н.Б. Рутовский и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 456 с.
3. Биткин, С.А. Сопряженная задача математического моделирования внутрикамерных процессов регулируемого РДТТ и системы управления ЛА / С.А. Биткин, А.В. Бренкман // Механика и процессы управления. Труды XXXII Уральского семинара. – Екатеринбург, 2002. – С. 358–362.

[К содержанию](#)