

УДК 621.642.17

В.Л. ДЖЕППА, А.А. ДУБРОВИНСКИЙ, М.И. КОШКИН

Государственное конструкторское бюро "Южное", Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА НАДДУВА ТОПЛИВНЫХ БАКОВ ЖИДКОСТНОЙ РЕАКТИВНОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОЙ ТЯГИ

Разработана математическая модель процесса наддува топливных баков жидкостной реактивной двигательной установки малой тяги. Реальные свойства рабочего тела учитывались коэффициентом сжимаемости. Параметры системы наддува двигательной установки в произвольный момент времени определяются численным решением системы дифференциальных уравнений.

жидкостная реактивная установка, термодинамическое тело переменной массы, система наддува, коэффициент сжимаемости, теплообмен, топливные баки

В жидкостных установках малой тяги обычно применяется вытеснительный способ подачи топлива, а поскольку процесс протекает в условиях невискозности, топливо в баках отделяется от газа наддува гибкой мембраной. Постоянство давления в надмембранной полости обеспечивается при помощи газового редуктора. С физической точки зрения процесс наддува заключается в перетекании газа из одной емкости в другую с совершением работы изменения объема и наличием теплообмена термодинамического тела со стенками емкостей.

Методики расчета подобных процессов довольно подробно изложены в ряде публикаций. Основопологающей является работа М.А. Мамонтова [1], в которой представлено аналитическое выражение первого закона термодинамики для тела переменной массы. В работах [2 – 4] предложены методики расчета отдельных составляющих процесса наддува топливных баков ракет, причем рабочее тело при этом рассматривается как идеальный газ. Наиболее полно вопросы проектирования систем наддува рассмотрены в [5]. В работе [6] параметры газа при опорожнении емкости определяются с учетом его сжимаемости.

В настоящей работе представлена математическая модель процесса наддува топливных баков, позволяющая определить параметры системы в про-

извольный момент времени при реализации заданной циклограммы работы установки. Расчетная схема системы подачи представлена на рис. 1.

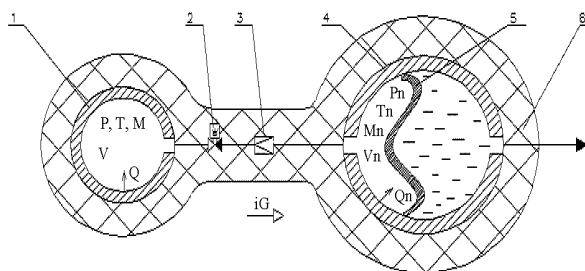


Рис. 1. Расчетная схема системы подачи топлива:

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1 – баллон; | 4 – оболочка бака; |
| 2 – пироклапан; | 5 – мембрана; |
| 3 – редуктор; | 6 – теплоизоляция |

Баки горючего и окислителя заменены емкостью, эквивалентной им по объему топлива, массе конструкции, поверхности теплообмена газа наддува с конструкцией баков и начальным объемом надмембранной полости. За исходное принимается изотермическое состояние системы, наступающее через некоторое время после открытия пироклапана.

Процесс наддува рассматривается при следующих допущениях:

- составляющие термодинамической системы (рабочее тело в баллоне, баллон, рабочее тело в баках, баки) однородны;
- система теплоизолирована от внешней среды;

– гидросопротивлением газовых магистралей пренебрегаем;

– газовая постоянная, удельная теплоемкость и показатель адиабаты рабочего тела – гелия – постоянны во всем рассматриваемом диапазоне температур и давлений;

– реальные свойства рабочего тела учитываются коэффициентом сжимаемости, зависящим от температуры и давления;

– динамическими процессами, происходящими в газовом редукторе, пренебрегаем;

– теплообмен между топливом и конструкцией баков отсутствует;

– срамливание газа через предохранительный клапан редуктора на температуру газа не влияет.

Теплофизические свойства гелия взяты из [7].

Для гелия в баллоне уравнение первого закона термодинамики имеет вид [1]:

$$Q = \frac{dU}{d\tau} + iG, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток от конструкции баллона к газу;

U – внутренняя энергия газа в баллоне;

τ – время;

i – энтальпия газа в баллоне;

G – массовый расход газа из баллона в надмембранные полости баков.

Подставляя в уравнение (1) выражение для внутренней энергии в виде [6]:

$$U = \frac{PV}{z(k-1)},$$

где P – давление газа в баллоне;

V – объем баллона;

z – коэффициент сжимаемости;

k – показатель адиабаты;

с учетом зависимости

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{\partial z}{\partial P} \frac{dP}{d\tau} + \frac{\partial z}{\partial T} \frac{dT}{d\tau},$$

где T – температура газа в баллоне, получим выражение для производной от давления по времени

$$\frac{dP}{d\tau} = \left[Q + \frac{PV}{z^2(k-1)} \frac{\partial z}{\partial T} \frac{dT}{d\tau} - iG \right] \frac{z(k-1)}{V \left(1 - \frac{P}{z} \frac{\partial z}{\partial P} \right)}. \quad (2)$$

Продифференцировав выражение для внутренней энергии в виде

$$U = C_v T M,$$

и принимая во внимание $dM/d\tau = -G$, $I = C_p T$, получим

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{1}{C_v M} \left[Q - iG \frac{(k-1)}{k} \right], \quad (3)$$

где C_v , C_p – удельная теплоемкость гелия при постоянном объеме и давлении соответственно;

M – масса газа в баллоне.

Для вычисления частных производных $\partial z/\partial P$ и $\partial z/\partial T$ воспользуемся аналитическим выражением для z из [6]:

$$z = \left(\frac{0,1373 \cdot 10^{-5}}{T} + 4,9035 \cdot 10^{-10} \right) P + 0,97. \quad (4)$$

Продифференцировав выражение (4), получим:

$$\frac{\partial z}{\partial P} = \frac{0,1373 \cdot 10^{-5}}{T} + 4,9035 \cdot 10^{-10}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial T} = - \frac{0,1373 \cdot 10^{-5} \cdot P}{T^2}. \quad (6)$$

Уравнения (3) – (6) после подстановки в (2) и при известном расходе энергии iG позволяют вычислить производную от давления гелия в баллоне по времени.

Для газа в надмембранной полости баков уравнение первого закона термодинамики выражается зависимостью [1]:

$$Q_n = \frac{dU_n}{d\tau} - iG + P_n \frac{dV_n}{d\tau}, \quad (7)$$

где Q_n – тепловой поток от конструкции бака к газу в надмембранной полости;

U_n – внутренняя энергия газа в надмембранной полости;

P_n – давление газа в надмембранной полости;

V_n – объем надмембранной полости.

Подставив в (7) выражение для внутренней энергии сначала в виде

$$U_n = \frac{P_n V_n}{z_n (k-1)},$$

затем в виде

$$U_n = C_v T_n M_n,$$

после простых, но громоздких преобразований с учетом $dM_n/d\tau = G$, получим выражения для производных от давления и температуры по времени для газа в надмембранной полости:

$$\frac{dP_n}{d\tau} = \frac{Q_n - P_n \left[\frac{z_n (k-1) + 1}{z_n (k-1)} \right] \frac{dV_n}{d\tau}}{\frac{V_n}{z_n (k-1)} \left[1 - \frac{P_n}{z_n} \frac{\partial z_n}{\partial P_n} \right]} + \frac{\frac{P_n V_n}{z_n^2 (k-1)} \frac{\partial z_n}{\partial T_n} \frac{dT_n}{d\tau} + iG}{\frac{V_n}{z_n (k-1)} \left[1 - \frac{P_n}{z_n} \frac{\partial z_n}{\partial P_n} \right]}; \quad (8)$$

$$\frac{dT_n}{d\tau} = \frac{1}{C_v M_n} \left(Q_n - P_n \frac{dV_n}{d\tau} \right) - iG \frac{(T_n - kT)}{kT C_v M_n}. \quad (9)$$

Уравнение (8) совместно с (9) и зависимостями, аналогичными (4 – 6), позволяют вычислить расход энергии iG для подстановки его в уравнение (2), если редуктор работает в заданном режиме, т.е. давление газа в надмембранной полости равно давлению настройки редуктора $P_n = P_{n0}$, $dP/d\tau = 0$ и $0 < iG < (iG)_{\max}$.

Возможно еще два режима работы редуктора:

– объемный расход топлива $dV_n/d\tau$ мал и за счет теплопритока от стенок баков P_n возрастает, клапан редуктора закрывается и $iG = 0$;

– объемный расход топлива настолько велик, что клапан редуктора полностью открывается, давление P_n понижается, а iG достигает максимального значения, которое определяется проходным сечением клапана и параметрами газа до и после редуктора.

В этих случаях уравнение (8) позволяет совместно с (9) вычислить $dP_n/d\tau$. Максимальный расход энергии определяется по формулам:

$$\text{если } \frac{P_n}{P} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{докритический режим})$$

$$(iG)_{\max} = C_p \mu f P \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)} \frac{T}{z} \left[\left(\frac{P_n}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_n}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}; \quad (10)$$

$$\text{если } \left(\frac{P_n}{P} \right) \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{сверхкритический режим})$$

$$(iG)_{\max} = C_p \mu f P \sqrt{\frac{kT}{Rz} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (11)$$

где μ – коэффициент расхода;

f – площадь проходного сечения клапана.

Для конструкции баллона и баков справедливы соотношения:

$$\begin{cases} \frac{dT_b}{d\tau} = -\frac{Q}{(MC)_b}; \\ \frac{dT_k}{d\tau} = -\frac{Q_n}{(MC)_k}; \\ Q = \alpha F (T_b - T); \\ Q = \alpha_n F_n (T_k - T), \end{cases} \quad (12)$$

где T_b , T_k – температура конструкции баллона и бака соответственно;

$(MC)_b$, $(MC)_k$ – теплоемкость конструкции баллона и бака соответственно.

Теплообмен между газом и стенками в баллоне и в баках определяется коэффициентом теплоотдачи, который в условиях невесомости с учетом критериальных зависимостей при стабилизированном температурном поле [8] можно записать соответственно:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{23\lambda}{d_b}; \\ \alpha_n = \frac{14\lambda}{d_k}, \end{cases} \quad (13)$$

где d_b , d_k – внутренний диаметр баллона и бака.

При наличии продольных перегрузок коэффициенты теплоотдачи определяются критериальным уравнением [6]:

$$Nu = 0,1 (Gr \cdot Pr)^{0,33}. \quad (14)$$

Уравнения (2), (3), (8), (9) совместно с зависимо-

стями (4 – 6), (10 – 14) и значением параметров в начальный момент времени представляют собой краевую задачу, численное решение которой определяет параметры системы наддува в произвольный момент времени. Расход топлива dV_n/dt определяется конкретной циклограммой работы двигательной установки и гидравлической характеристикой ее магистралей.

Температура гелия вычисляется при помощи уравнений (3) и (9), составленных на основании энергетического баланса. Однако эти температуры должны удовлетворять уравнению состояния для реального газа с учетом выражения для z (4). После преобразований получаем:

$$T = \frac{P(V - 2,852 \cdot 10^{-3} M)}{M(1,0186 \cdot 10^{-6} P + 2,01498 \cdot 10^3)}; \quad (15)$$

$$T_n = \frac{P(V_n - 2,852 \cdot 10^{-3} M_n)}{M_n(1,0186 \cdot 10^{-6} P_n + 2,01498 \cdot 10^3)}. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) можно использовать для контроля результатов расчета.

Существует еще один способ контроля достоверности математической модели. Уравнение первого закона термодинамики в конечных величинах [1], записанное для газа в баллоне и в баках в произвольный момент времени τ , имеет вид соответственно:

$$\int_0^\tau Q d\tau = U_\tau - U_0 + \int_0^\tau (iG) d\tau; \quad (17)$$

$$\int_0^\tau Q_n d\tau = U_{n\tau} - U_{n0} + \int_0^\tau (iG) d\tau + \int_0^\tau \left(P_n \frac{dV_n}{d\tau} \right) d\tau. \quad (18)$$

Из уравнений (17) и (18) получается функция

$$\varphi = \frac{\int_0^\tau \left(P_n \frac{dV_n}{d\tau} \right) d\tau}{\int_0^\tau (Q + Q_n) d\tau - U_\tau + U_0 - U_{n\tau} + U_{n0}}, \quad (19)$$

которая в произвольный момент времени должна быть равна единице. Величина отклонения φ от единицы

характеризует точность расчета параметров процесса.

На основе предложенной математической модели составлена программа расчета процесса наддува топливных баков на ПЭВМ. На рис. 2 показаны результаты расчета параметров системы P_n , T_n и iG . На участке (0...50) с были включены двигатели малой тяги, система работала в заданном режиме при $P_n = 1,71675 \cdot 10^6$ Па. С 50 по 200 с в работе была пауза, клапан редуктора при этом закрылся ($iG = 0$), а за счет теплопритока от стенок баков температура T_n и давление P_n стали возрастать, и на 159,91 с P_n достигло значения $1,8 \cdot 10^6$ Па, на которое настроен предохранительный клапан редуктора. Последний открылся и до 200 с происходило стравливание газа из надмембранной полости баков. С 200 по 215,36 с в соответствии с заданной циклограммой произошел сброс остатков горючего, давление P_n и температура T_n вначале понизились, а потом за счет теплопритока стали повышаться. Пока P_n было меньше давления настройки редуктора $1,71675 \cdot 10^6$ Па, расход энергии iG достигал максимального значения (клапан редуктора был полностью открыт до 274,97 с). На 350 с начался сброс остатков окислителя, характер изменения параметров был аналогичен их поведению при сбросе горючего. Числовые значения температур газа в баллоне и в баках, вычисленные по формулам (3), (9) и (5), (16) отличались не более чем на 0,33 К, а функция φ отличалась от единицы не более чем на 0,5%.

Заключение

На основе дифференциальных уравнений первого закона термодинамики для тела переменной массы разработана математическая модель процесса наддува топливных баков жидкостной реактивной двигательной установки малой тяги, позволяющая определять параметры системы наддува двигательной установки в произвольный момент времени.

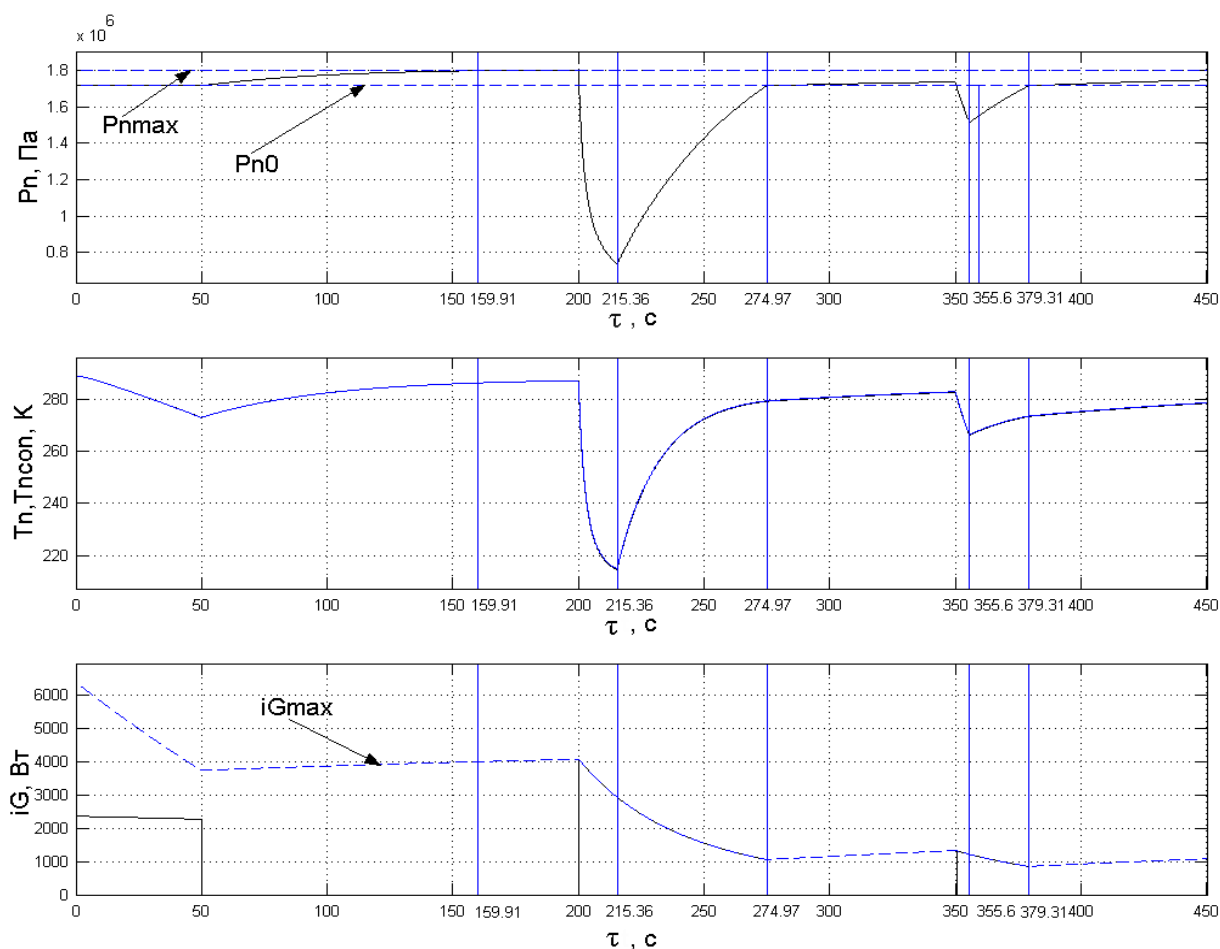


Рис. 2. Результаты расчета параметров системы

Литература

1. Мамонтов М.А. Вопросы термодинамики тела переменной массы. – М.: Оборонгиз, 1961. – 344 с.
2. Морозов И.И. Приближенный расчет процесса опорожнения газовой емкости // ИФЖ – 1959. – № 12. – С. 103 – 106.
3. Белик Н.П., Беляев Н.М., Шандоров Г.С. Расчет процесса опорожнения газовой емкости // ИФЖ – 1964. – № 9. – С. 18 – 22.
4. Беляев Н.М. Расчет параметров газа в емкости при опорожнении ее через газовый редуктор // Вопросы прочности, надежности и разрушения механических систем: Сб. ст. – Дн-ск: ДГУ. – 1969. – С. 34 – 37.
5. Беляев Н.М. Системы наддува топливных баков ракет. – М.: Машиностроение, 1976. – 180 с.
6. Присняков В.Ф., Галаев М.И., Логвинен-

ко А.И., Мосейко В.А. Определение параметров газа при опорожнении емкости с учетом сжимаемости и сопротивления магистрали // Проблемы высокотемпературной техники: Сб. научн. тр. – Дн-ск: ДГУ. – 1981. – С. 19 -25.

7. Цедерберг Н.В., Попова В.Н., Морозова Н.А. Термодинамические и теплофизические свойства гелия. – М.: Атомиздат, 1969. – 256 с.

8. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Н-ск: Наука, 1970. – 340с.

Поступила в редакцию 28.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф., Н.В. Белан, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.