

Р и с. 2. Переходный процесс давления  $p_1$  при скачкообразном возмущении объемного расхода  $q_1$  в гидравлической цепи

УДК 629.7.036

В.Е.Годлевский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РДМГ  
С УЧЕТОМ РЕАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

Приведена нестационарная одномерная модель камеры сгорания, учитывающая не только динамические свойства системы топливопитания, но и реальную скорость выгорания топлива. Модель реализована в программе *KAMERAL*, предназначенной для моделирования импульсных режимов работы РДМГ.

Библиографический список

1. Гроссшмидт Г.Т. Принципы построения математических моделей гидромеханических цепных систем //Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 632. С. 3-13.
2. Пахапилль Я.А., Гроссшмидт Г.Т. Пакет программ для моделирования гидромеханических систем //Тр. Таллинск. политехн. ин-та. 1987. № 632. С. 47-56.
3. *Großschmidt G., Wanaweski J., Pakapill J. Blockschemazusammensetzung der hydromechanischen Systeme aus Mehrpolmodellen der Funktionalelemente. 7. Fachtagung Hydraulik und Pneumatik. Vorträge - Teil 1, Teil 2, Dresden 1987. DDR, S. 138-146.*

Моделирование динамических характеристик ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) на химическом топливе является одной из важных задач, возникающих при проектировании таких систем. Это связано с тем, что РДМТ, как правило, работают в импульсном режиме и методы выбора их оптимальных параметров [1] должны учитывать реальную многорежимную циклограмму работы двигателей в составе энергетических установок.

В общем случае динамические характеристики РДМТ определяются динамическими свойствами не только системы подачи и дозирования топлива, но и собственно камеры сгорания.

Большинство известных моделей нестационарного режима работы камеры сгорания РДМТ [2, 3] используют ряд допущений при описании процесса преобразования топлива в продукты сгорания:

топливо преобразуется в продукты сгорания мгновенно по истечении времени пребывания  $\tau_{пр}$ , определяемого, как правило, по параметрам стационарного режима;

состав, температура и давление продуктов сгорания постоянны по объему камеры сгорания.

Эти допущения вносят существенные погрешности в моделирование нестационарных режимов работы РДМТ, поскольку в реальном случае процесс тепловыделения идет постепенно в течение всего времени пребывания порции топлива в камере сгорания. Кроме того, при существенном изменении во времени давления и температуры продуктов сгорания нельзя признать правомерным определение времени пребывания в квазистационарной постановке.

В связи с этим была сделана попытка разработать нестационарную математическую модель камеры сгорания РДМТ, учитывающую реальную скорость выгорания (преобразования) топлива. Переходный процесс в камере сгорания моделируется нестационарными реакторами идеального смешения, идея которых предложена в КИИ [4]. Течение высокотемпературного реагирующего рабочего тела в камере сгорания рассматривается как движение последовательно выталкивающихся и не смешивающихся друг с другом поперечных слоев газа. Полагая течение одномерным, выделенный тонкий слой газа, движущийся со скоростью  $W$ , можно интерпретировать как движущийся нестационарный реактор идеального смешения, в котором протекают физико-химические процессы теплообмена и горения топлива. Математическую модель нестационарного реактора идеального смешения можно построить при следующих общепринятых допущениях:

продукты сгорания являются смесью идеальных газов, к каждому из которых, как и к продуктам сгорания в целом, применимо уравнение состояния Клапейрона-Менделеева;

реакторы смешения не обмениваются друг с другом массой и энергией;

состав  $R$ , давление  $p_k$  и температура  $T$  постоянны по объему реактора смешения.

В такой постановке рассматривается нестационарная одномерная модель камеры сгорания без учета окружной и радиальной неравномерности состава продуктов сгорания.

Для  $j$ -го реактора смешения для момента времени  $\tau_i$  можно записать уравнение сохранения энергии в виде

$$M_{ji} \Delta U_{ji} = \Delta Q_{kji} + Q_{xji} - \Delta L_{cji}, \quad (1)$$

где  $M_{ji}$  - масса реактора смешения;  $\Delta U_{ji}$  - изменение внутренней энергии реактора смешения;  $\Delta Q_{kji}$  - контурно-контактная теплопередача реактора смешения;  $Q_{xji}$  - тепловыделение в реакторе смешения за счет протекания химических реакций;  $\Delta L_{cji}$  - работа сжатия реактора смешения.

Контурно-контактная теплопередача реактора смешения определяется конвективным и лучистым тепловыми потоками, величины которых для камеры сгорания РДМТ можно оценить по известным соотношениям. Для выполнения расчетов необходимы сведения о геометрии камеры сгорания, теплофизических свойствах ее материала, температуре и условиях внешнего теплообмена; о теплофизических свойствах продуктов сгорания в пограничном слое при некоторых характерных температурах; о параметрах потока на внешней границе пограничного слоя (давление, состав, температура и скорость движения).

Скорость движения  $j$ -го реактора смешения в момент времени  $\tau_i$  определяется выражением

$$W_{ji} = (x_{ji} - x_{ji-1}) / (\tau_i - \tau_{i-1}), \quad (2)$$

в котором осевая координата  $x_{ji}$  реактора смешения (рис. 1) находится из соотношений

$$x_{ji} = L_K - \sum_1^{j-1} \Delta x_{ji} - \Delta x_{ji} / 2, \quad (3)$$

$$x_{ji} = V_{ji} / (X \cdot D_K^2 / 4), \quad (4)$$

$$V_{ji} = M_j (RT)_{ji} / P_{ki}, \quad (5)$$

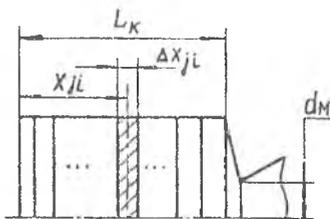
где  $L_K$  - длина камеры сгорания;  $\Delta x_{ji}$  - ширина реактора смешения;  $V_{ji}$  - объем реактора смешения.

Тепловыделение в  $j$ -м реакторе смешения за счет протекания химических реакций моделируется изменением комплекса  $(RT)_{ji}$ :

$$(RT)_{ji} = (RT)_t (\varphi_{\beta}^T)_{ji}^2, \quad (6)$$

$$\varphi_{\beta} = \varphi_{\beta}^H \varphi_{\beta}^T / \mu_c, \quad (7)$$

где  $(RT)_t$  - теоретическое значение комплекса, определяемое на основании термодинамических расчетов идеальной камеры для выбранных компонентов топлива в зависимости от соотношения компонентов топлива  $K_{mj}$  в реакторе смешения и давления  $P_{ki}$  в камере сгорания;  $\varphi_{\beta}$  и  $\varphi_{\beta}^T, \varphi_{\beta}^H$  - коэффициент потерь расходящего комплекса и его составляющие: потери за счет неполного тепловыделения в камере сгорания и из-за неоднородности состава продуктов сгорания;  $\mu_c$  - коэффициент расхода сопла.



Р и с. 1. Расчетная схема камеры сгорания

Коэффициенты  $\varphi_{\beta}^H$  и  $\mu_c$  слабо зависят от параметров элементов реакторов смешения, а для расчета коэффициента  $\varphi_{\beta}^T$  можно использовать квазистационарную полуэмпирическую модель тепловыделения в камере сгорания, в общем случае имеющую вид

$$\varphi_{\beta}^T = \varphi_{\beta}^T (P_{ki} \tau). \quad (8)$$

Используя известные соотношения, определяющие связь теплофизических параметров рабочего тела

$$U = C_V T; Q = M J; J = C_P T; \kappa = C_P / C_V; R = C_P - C_V, \quad (9)$$

тепловыделение в реакторе смешения за счет протекания химических реакций при взаимодействии компонентов топлива можно представить:

$$\Delta Q_{xji} = M_j (\varphi_B^H / \mu_c)^2 \Delta [\kappa / (\kappa - 1) R T]_t \varphi_B^{T^2} j_i. \quad (10)$$

Работа сжатия  $j$ -го реактора смешения в момент времени определяется следующим соотношением:

$$\Delta L_{ji} = P \kappa_i \Delta V_{ji}, \quad (11)$$

которое с учетом уравнения состояния и принятых допущений можно записать как

$$\Delta L_{ji} = M_j \Delta (RT) j_i. \quad (12)$$

Уравнение сохранения энергии реактора смешения с учетом полученных соотношений и допущения постоянства коэффициента изоэнтропы расширения ( $\kappa = const$ ) преобразуется к виду

$$\Delta (RT) j_i = - \Delta Q_{\kappa ji} / M_j + (\varphi_B^H / \mu_c)^2 \Delta [(RT)_t \varphi_B^{T^2}] j_i. \quad (13)$$

Для всего объема камеры сгорания на основании уравнения состояния для момента времени  $\tau_i$  можно записать:

$$P \kappa_i = 1 / V_K \sum_1^{N_i} M_j (RT) j_i, \quad (14)$$

$$N_i = N_{i-1} + 1 - \kappa_i, \quad (15)$$

где  $V_K$  - объем камеры сгорания;  $N_i$  - число реакторов смешения, находящихся в камере к моменту времени  $\tau_i$ ;  $\kappa_i$  - число реакторов смешения, полностью покинувших камеру сгорания за время  $\Delta \tau = \tau_i - \tau_{i-1}$ . Величина  $\kappa_i$  рассчитывается на основании проверки условия

$$\Delta \tau \leq \sum_1^{\kappa_i} M_j / \dot{m} c j_i, \quad (16)$$

при

$$\dot{m}_{cji} = A_K P_{ki} F_M \sqrt{(RT)_{ji}}, \quad A_K = \sqrt{K(2/(K+1))^{K+1}} \quad (17)$$

$$F_M = \pi d_M^2 / 4, \quad (18)$$

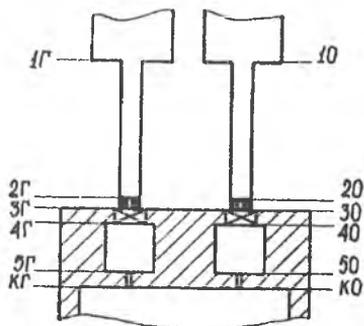
где  $\dot{m}_{cji}$  - расход продуктов сгорания через сопло;  $d_M$  - диаметр минимального сечения сопла.

Для описания динамических свойств системы подачи и дозирования топлива (рис. 2) использовался метод сосредоточенных параметров [5], на основании которого, пренебрегая для жиклеров, клапанов и форсунок емкостными свойствами ( $\dot{m}_{20,r} = \dot{m}_{30,r} = \dot{m}_{40,r}, \dot{m}_{50,r} = \dot{m}_{к0,r}$ ), а для распределительных коллекторов дозирующей системы -

инерционными свойствами ( $P_{40,r} = P_{30,r}$ ) - получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих

изменение расхода и давления в характерных сечениях (температура компонентов по длине тракта считается постоянной) в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{m}_{10,r}}{d\tau} &= \frac{1}{L_{тp,0,r}} (F_{10,r} - P_{20,r}) - \frac{R_{тp,0,r}}{L_{тp,0,r}} \dot{m}_{10,r}^2; \\ \frac{dP_{20,r}}{d\tau} &= \frac{1}{D_{тp,0,r}} (\dot{m}_{10,r} - \dot{m}_{20,r}); \\ \frac{d\dot{m}_{20,r}}{d\tau} &= \frac{1}{(L_{ж} + L_{кп})_{0,r}} (P_{20,r} - P_{40,r}) - \frac{(R_{ж} + R_{кп})_{0,r}}{(L_{ж} + L_{кп})_{0,r}} \dot{m}_{20,r}^2; \\ \frac{dP_{40,r}}{d\tau} &= \frac{1}{D_{кол,0,r}} (\dot{m}_{20,r} - \dot{m}_{к0,r}); \\ \frac{d\dot{m}_{к0,r}}{d\tau} &= \frac{1}{L_{ф,0,r}} (P_{40,r} - P_k), \end{aligned} \right\} (19)$$



Р и с. 2. Схема системы топливопитания

где  $L_{nm}$  - коэффициент, характеризующий инерционные свойства  $m$ -го компонента в  $n$ -м сечении;  $D_{nm}$  - коэффициент, характеризующий емкостные свойства  $m$ -го компонента в  $n$ -м сечении;  $R_{nm}$  - коэффициент, учитывающий потери на трение  $m$ -го компонента в  $n$ -м сечении.

Для расчета коэффициентов модели (19) используются следующие соотношения

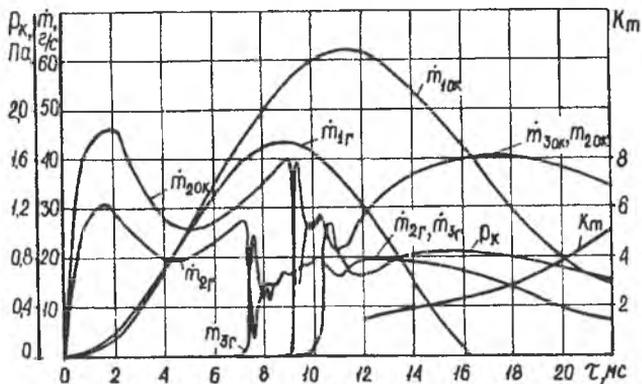
$$L_{nm} = \rho_{nm} / F_{nm}; D_{nm} = (\rho F)_{nm} / C_m^2; R_{nm} = (\Delta p / m^2)_{nm}, \quad (20)$$

где  $\rho_{nm}, F_{nm}$  - длина и площадь проходного сечения магистрали  $m$ -го компонента в  $n$ -м сечении;  $C_m$  - скорость звука  $m$ -го компонента;  $(\Delta p, \dot{m})_{nm}$  - номинальные значения перепада давления и расхода  $m$ -го компонента в  $n$ -м сечении.

При моделировании режима запуска и останова РДМТ с учетом влияния динамики системы топливopодачи начальные условия для  $n$ -го сечения системы топливopодачи формулируются обычным образом, при этом граничные условия определяются постоянством давления на входе в систему топливopодачи во всем диапазоне интегрирования, а площади проходных сечений клапанов при открытии и закрытии описываются линейными функциями времени.

Таким образом, модель нестационарного режима работы РДМТ (1)-(20) представляет систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, учитывающими изменение площади проходных сечений клапанов при запуске и останове РДМТ и форсунок при регулировании расходов компонентов, в которой давление в камере сгорания в каждый момент времени рассчитывается на основании модели нестационарных реакторов смешения. На основании изложенной математической модели был разработан алгоритм и программа KAMERA1 моделирования нестационарного режима работы РДМТ с учетом влияния динамических характеристик системы топливopодачи. Все модули программы разработаны на алгоритмическом языке ФОРТРАН в среде MS-DOS ПЭВМ.

Апробация программы моделирования нестационарного режима работы проведена на примере изделия тягой  $P = 100$  Н при отсутствии теплообмена рабочего тела со стенками камеры сгорания ( $\Delta Q_T = 0$ ). Результаты моделирования переходных процессов при запуске приведены на рис.3



Р и с. 3. Результаты моделирования запуска РДМТ

в виде графических зависимостей изменения во времени давления и расхода компонентов топлива в характерных сечениях (см. рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает, что для РДМТ характерна существенная нестационарность процессов как в системе топливоподачи, так и в камере сгорания, причем низкочастотные колебания компонентов топлива, возникающие в трубопроводах системы топливоподачи ( $f_{TP} = 40 \dots 100$  Гц), и высокочастотные колебания давления в распределительных коллекторах форсуночной головки ( $f_{кол} = 2000 \dots 3000$  Гц) оказывают влияние на расход компонентов в камеру и давление в камере сгорания.

Разработанная программа *KAMERA1* позволяет не только моделировать изменение во времени параметров двигателя в характерных сечениях, но и обеспечивает расчет интегральных характеристик импульсных режимов работы двигателя. Необходимо отметить, что для адиабатной камеры сгорания (при отсутствии теплообмена со стенками камеры) программы обеспечивает определение предельно возможных характеристик работы РДМТ в импульсном режиме работы с учетом влияния системы топливоподачи.

## Библиографический список

Годлевский В.Е., Шумихина Л.Я. Оптимизация параметров малоразмерных газогенераторов с учетом динамических характеристик //Динамические процессы в силовых и энергетических установках летательных аппаратов: Межвуз. сб /Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1988. С.102-108.

2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей:Учебник /А.П.Васильев, В.М.Кудрявцев, В.М.Поляев и др.: Под ред. В.М. Кудрявцева. М.: Высшая школа, 1983. 703 с.

3. Петерсон Дж. Переходные процессы при запуске ракетных двигателей, работающих на самовоспламеняющемся двухкомпонентном топливе //Исследование ракетных двигателей на жидком топливе. М.: Мир, 1964. С. 427-439.

4. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергоустановках /А.Ф.Дрегалин, И.А.Зенуков, В.Г.Крюков, В.И.Наумов: Под ред. В.Е.Алемасова. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1985. 264 с.

5. Гликман Б.Ф. Нестационарные течения в пневмогидравлических цепях. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.

УДК 621.452:681.521.34

В.П.Шорин, А.Т.Гимадиев, А.Н.Крючков

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОССЕЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОАВТОМАТИКИ

Теоретически и экспериментально исследовано снижение среднего расхода жидкости через острокромочные дросселирующие элементы при наличии колебаний рабочей среды.

---

Динамические процессы в установках ЛА. Самара, 1994.

---