

Клюев Н.И., Джавадов Р.О., Бурматнова Д.В.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТИ

В ТОПЛИВНОМ КАНАЛЕ РАКЕТЫ

Введение

Работоспособность и надежность топливной системы ракеты в значительной мере зависит от наличия или отсутствия вибраций конструкции. Колебания трубопроводов могут возникать, как от внешних факторов, так и от пульсаций давления в жидкости. Особенно опасны низкочастотные колебания, вызывающие резонанс конструкции. Прогнозирование резонансных явлений необходимо уже на стадии проектирования. Для математического моделирования процесса целесообразно использовать одномерные модели сжимаемой жидкости. Решение нестационарных уравнений движения для одномерной задачи было выполнено многими исследователями. Классическими можно назвать задачи, рассмотренные в [1,2]. В [3] рассматривается течение сжимаемой жидкости в топливном канале авиационного двигателя с учетом нестационарного коэффициента сопротивления.

Возмущение от дроссельной заслонки

Физическая постановка задачи. Рассмотрим задачу о течения жидкости в топливном канале ракеты. Траектория движения – вертикальный участок, соответствующий разгонной траектории первой ступени ракеты. При полете ракеты топливо из бака окислителя и бака горючего поступает в камеру сгорания ракетного двигателя. Расход топлива регулируется дроссельной заслонкой, установленной в конце трубопровода. Рассмотрим нестационарный процесс течения жидкости в вертикальном цилиндрическом канале при срабатывании дроссельной заслонки (ось x направлена вертикально вниз).

Математическая постановка задачи. Для расчета динамических характеристик жидкости в топливном канале используется модель сжимаемой жидкости. Для дозвуковых течений капельной жидкости можно пренебречь изменением давления, соответствующего изменению скоростного напора. Тогда задача описывается системой одномерных уравнений движения [1] с начальными и граничными условиями:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda u |u|}{2D} + g, \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$t = 0, p = p_0 + \rho g x, u = u_0; x = 0, p = p_0, x = L, u = u_1. \quad (3)$$

Здесь ρ – плотность, p – давление, p_0 – давление наддува, g – ускорение свободного падения, u – осредненная по поперечному сечению трубы продольная скорость течения жидкости, λ – коэффициент гидравлического сопротивления, D – диаметр трубопровода, L – длина трубопровода, t – время, x – координата, индекс «0» означает начальный момент времени, u_0 – начальная скорость течения, u_1 – средняя скорость жидкости в нижнем конце трубопровода.

Далее воспользуемся известной формулой $c^2 = \frac{dp}{d\rho}$ (где c – скорость звука),

откуда найдем $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$. Уравнение неразрывности (2) переписется в виде:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\rho \partial u}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Будем искать приближенное решение задачи, используя в (1) $u = u_0$. Получим линеаризованное уравнение движения

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\lambda u_0 u}{2D} + g. \quad (5)$$

Исключим давление из системы уравнений (4) – (5):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2a \frac{\partial u}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad a = \frac{\lambda u_0}{4D}. \quad (6)$$

Отметим, что уравнение (6) справедливо и для избыточной скорости течения. При этом условия для $t = 0$ становятся однородными и начальные и граничные условия задачи для (6) примут вид:

$$t = 0, u = 0, \frac{\partial u}{\partial t} = 0, x = 0, \frac{\partial u}{\partial x} = 0, x = L, u = A = const, \quad (7)$$

где $A = u_1 - u_0$.

Решение задачи и обсуждение результатов. Решение задачи вида (6), (7) выполнено Чарным [1]. Для коротких трубопроводов аналитическое решение задачи имеет вид:

$$u_A(x, t) = A - \frac{4A}{\pi} e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\cos\left(\frac{2n-1}{2} \frac{\pi c}{L} t\right) + \frac{a}{2n-1} \frac{\pi c}{L} \sin\left(\frac{2n-1}{2} \frac{\pi c}{L} t\right)}{2n-1} \sin\left(\frac{2n-1}{2} \frac{\pi(L-x)}{L}\right) \right), \quad (8)$$

где $u_A(x, t)$ – скачок скорости, вызванный возмущением в конце трубопровода (заслонка).

Исходные данные задачи для топливного канала ракеты: $L = 2,25 \text{ м}$; $D = 0,2 \text{ м}$; давление наддува $p_0 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$; топливо – керосин; $c = 1330 \text{ м/с}$, $\rho = 822 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 1,82 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; расход $G = 144,3 \text{ кг/с}$. Тогда начальная скорость течения $u_0 = 5,59 \text{ м/с}$ и число Рейнольдса $Re = \frac{u_0 D}{\nu} = 6,143 \cdot 10^5$. Поскольку течение турбулентное,

то $\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = 0,011$, $a = \frac{\lambda u_0}{4D} = 0,079$.

Рассмотрим случай, когда расход жидкости в результате срабатывания заслонки уменьшился на 10%. Избыточная скорость перед заслонкой равна $A = 0,9u_0 - u_0 = -0,1u_0$.

С использованием (8) проведены расчеты в пакете прикладных программ Mathcad. На рис. 1, 2 показаны графики избыточной скорости в топливном канале для разных интервалов времени. Здесь и далее графики представлены в размерном виде.

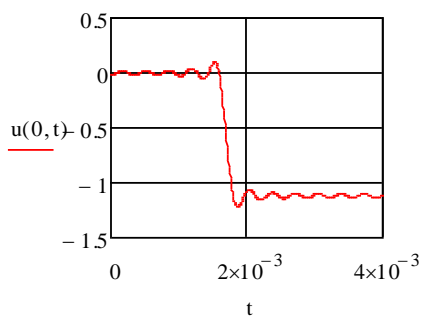


Рис. 1. Изменение средней скорости в начале процесса ($x = 0$)

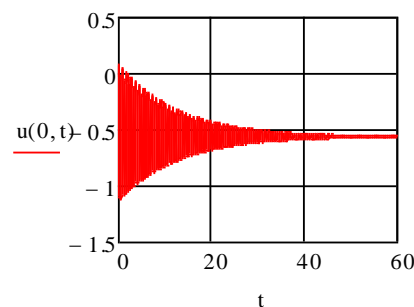


Рис. 2. Изменение средней скорости с течением времени ($x = 0$)

Численные результаты показывают, что в начальный момент времени (рис. 1) избыточная скорость скачкообразно уменьшается и приобретает колебательный характер. Возмущения от срабатывания заслонки характеризуются высокочастотными колебаниями скорости и затухают примерно через 45 с (рис. 2).

Для определения избыточного давления воспользуемся формулой:

$$\Delta P(x, t) = -\rho \int_0^x \left(\frac{\partial u_A(x, t)}{\partial t} + 2au_A(x, t) - g \right) dx. \quad (9)$$

На рис. 3, 4 представлено изменение перепада давления для различных интервалов времени на выходе из трубопровода (у заслонки).

В начальный момент времени перепад давления около заслонки возрастает примерно на семь атмосфер (рис. 3). С течением времени возникают высокочастотные колебания давления, которые затухают через 45 с (рис. 4). На рис. 5 показан график

перепада давления по длине канала. Видно, что скачок давления распространяется вверх по течению.

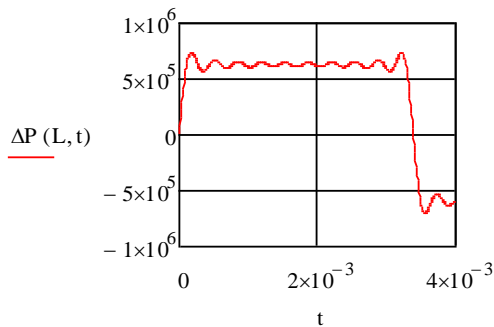


Рис. 3. Изменение давления у заслонки в начале процесса ($x = 0$)

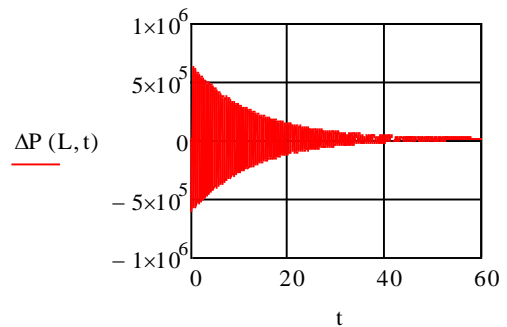


Рис. 4. Изменение давления у заслонки с течением времени ($x = L$)

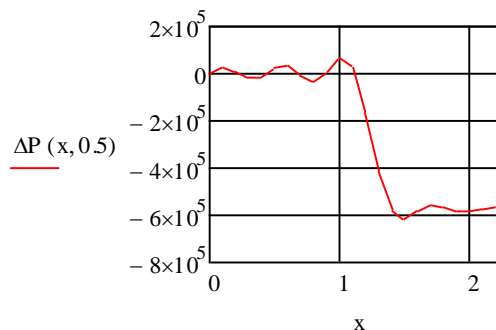


Рис. 5. Перепад давления по длине канала

Возмущения от топливного насоса на входе в трубопровод

Постановка задачи и аналитическое решение. Зададим возмущения от топливного насоса, установленного на входе в топливный канал, в виде гармонических колебаний давления с амплитудой $H = 10^4 \text{ Па}$ и частотой $\omega = 1250 \text{ рад/с}$. Следуя Чарному [1], решение для мгновенного единичного возмущения в начале трубопровода записываем как

$$u_2(x, t) = \frac{2}{\rho c} e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\left(1 - \frac{x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}(2n-1)\right)}{\frac{\pi}{2}(2n-1) \sin\left(\frac{\pi}{2}(2n-1)\right)} \sin\left(\frac{2n-1}{2} \frac{\pi c}{L} t\right) \right). \quad (10)$$

С помощью интеграла Дюамеля это решение переводится в решение с возмущением $H \sin(\omega\tau)$:

$$u_B(x, t) = \int_0^t \left(H \sin(\omega\tau) \frac{\partial}{\partial t} (u_2(x, t - \tau)) \right) d\tau. \quad (11)$$

Результаты решения задачи и обсуждение. По формуле (11) построены графики избыточной скорости в начале и конце трубопровода (рис.6, 7). Из рисунков следует, что амплитуда колебаний скорости по длине трубопровода уменьшается.

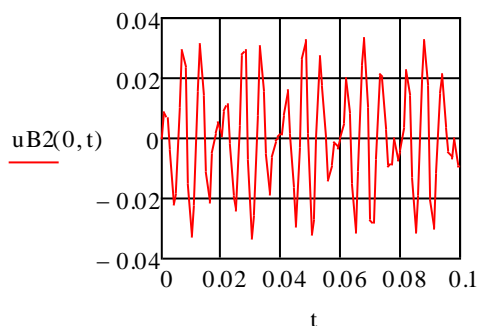


Рис. 6. Изменение скорости в начале трубопровода ($x = 0$)

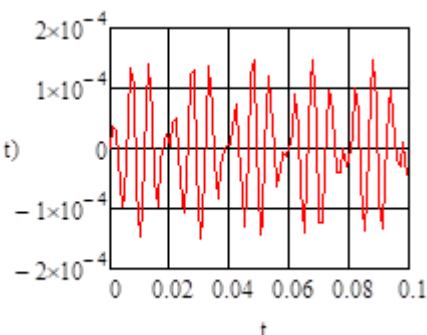


Рис. 7. Изменение скорости в конце трубопровода ($x = L$)

Для определения перепада давления используется формула (9). На рис. 8 представлены возрастающие в начальный момент времени колебания давления в конце трубопровода. Видно увеличение давления на заслонке на $\Delta P \approx 0,58 \text{ атм}$.

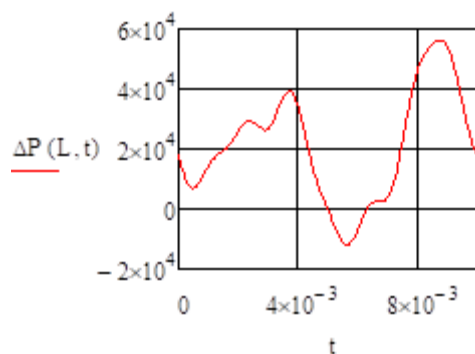


Рис. 8. Изменение давления при $x = L$

Заключение

Изменение расхода топлива на 10% приводят к возрастанию давления в конце канала на семь атмосфер. Возмущение от топливного насоса вызывают возрастающие колебания скорости и приводят к возрастанию давления в конце канала на 0,58 атм. Колебания являются высокочастотными. Предложенная в работе модель может быть использована

для исследования нестационарных сжимаемых течений жидкости в топливном канале ракеты.

Библиографический список

1. Бабе, Г.Д., Бондарев, Э.А., Воеводин, А.Ф., Каниболоцкий, М.А. Идентификация моделей гидравлики. – Новосибирск: Наука, 1980. – 160 с.
2. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.: «Недра». – 1975. – 296 с.

3. Загузов И.С., Федечев А.Ф., Поляков К.А. Математическая модель динамических процессов в проточных магистралях авиационных двигателей с теплопроводной стенкой. ИВУЗ Авиационная техника. 2000, №2, с.18-21.