

РАБОТА КАПИЛЛЯРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ВНУТРИБАКОВОГО УСТРОЙСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СПЛОШНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ПОЛЕТНЫХ ВИБРАЦИЙ

Предложена модель движения жидкости в капиллярном накопителе внутрибакового устройства обеспечения сплошности компонентов топлива при воздействии низкочастотных вибраций; получены зависимости для определения высоты и скорости подъема жидкости от параметров вибрации.

Запропоновано модель руху рідини в капілярному накопичувачі внутрішньобакового пристрою забезпечення суцільності компонентів палива при дії низькочастотних вібрацій; одержані залежності для визначення висоти і швидкості підйому рідини від параметрів вібрації.

The model of liquid motion in the capillary storage device of intra-tank device for providing fuel components integrity at influence of low-frequency vibrations is proposed; functional dependencies for determination of heights and speeds of liquid climb on the vibration parameters are found.

Перспективы расширения диапазона полетных задач, решаемых современными ракетами-носителями (РН), в значительной степени обусловлены возможностью обеспечения гарантированной подачи на вход двигателя компонентов топлива (КТ) без газовых включений при осуществлении неоднократных запусков двигательной установки (ДУ) на различных этапах полета, в том числе в условиях невесомости или близких к ним. При этом зачастую ограничивается также время обеспечения готовности топливной системы к последующему, после останова двигателя, запуску [1].

Наиболее часто путем решения указанных задач является применение внутрибаковых устройств обеспечения сплошности КТ с капиллярными накопителями [2]. Это объясняется широким диапазоном возможных вариантов их конструктивного и технологического исполнения, что позволяет создавать устройства, обеспечивающие практически полную (до 98,5 % [3]) выработку топлива из баков в различных условиях полета.

Существенное влияние на процесс функционирования капиллярных устройств вообще и накопителей КТ в том числе оказывают полетные вибрации топливных баков (ТБ). Наиболее значительные вибрации действуют с частотой, не превышающей $f = 50$ Гц в моменты старта и останова двигателя. Кроме того, при маневрировании ступеней РН переменные по величине и направлению силы тяги обуславливают развитие вынужденных колебаний конструкции с частотами до $f = 10$ Гц [4].

В связи с этим необходимо отметить, что если работа капиллярных устройств в статических условиях и при воздействии колебаний килогерцевого диапазона исследована достаточно полно [5, 6], то адекватное описание закономерностей движения жидкостей в капиллярах при воздействии низкочастотных вибраций ($0 < f < 50$ Гц) отсутствует. Экспериментально установлено лишь интенсифицирующее влияние действующих вдоль оси капилляра низкочастотных вибраций на скорость движения и высоту подъема в нем смачивающих жидкостей, причем, как показывают эксперименты, скорость подъема жидкости экспоненциально зависит от частоты колебаний и возрастает с уменьшением краевого угла смачивания [7, 8].

Очевидно, что указанные эффекты необходимо принимать во внимание при решении задач, связанных с проектированием систем обеспечения многократных запусков ДУ космических ступеней РН.

© А.Н. Заволока, Н.Ф. Свириденко, Д.Э. Смоленский, 2011

Рассматривая влияние вибраций на капилляр с жидкостью, будем полагать, что:

- жидкость является идеальной и несжимаемой;
- система «капилляр-жидкость» находится в состоянии термодинамического равновесия;
- частота действующих вибраций существенно ниже собственной частоты капилляра;
- протяженность капилляра значительно больше его диаметра.

На движение жидкости в капилляре оказывают влияние различные факторы: поверхностное натяжение, гравитационные силы и, в том числе, как следует из приведенных выше данных, силы, зависящие от частоты и амплитуды вибраций, определяющие соответствующие значения частоты и амплитуды пульсаций давления в жидкости у основания капилляра.

Принимая во внимание, что наиболее широко используемые компоненты ракетных топлив являются хорошо смачивающими конструкционные материалы внутрибачковых устройств РН жидкостями, будем рассматривать в качестве оказывающих определяющее влияние на скорость и высоту подъема жидкости в вибронагруженном капилляре следующие силы:

- силу, обусловленную пульсациями давления у основания капилляра

$$F_p = \frac{\pi d_k^2}{4} A_p \sin \omega t, \quad (1)$$

где d_k – диаметр капилляра; A_p – амплитуда пульсаций давления; ω – круговая частота; t – время.

- силу поверхностного натяжения

$$F_\sigma = \pi d_k \sigma, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

- гравитационную силу

$$F_g = \frac{\pi d_k^2}{4} \rho_{жс} g n_h h, \quad (3)$$

где $\rho_{жс}$ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; h – высота столба жидкости в капилляре; n_h – коэффициент продольной перегрузки (вдоль оси капилляра);

– диссипативную силу, ответственную за интенсивное рассеяние энергии колебаний в зоне мениска, которая обусловлена его деформацией при встрече поднимающейся жидкости с линией контакта и затратами энергии на ее продвижение вверх по сухой стенке капилляра [9].

Как показано в [9], при малых амплитудах колебаний жидкости в капилляре и $\theta \leq 40^\circ$ в общем случае нелинейная диссипативная сила вырождается в линейную, пропорциональную скорости движения жидкости в капилляре, которая определяется выражением

$$F_q = 0,182 \cdot 4 \sqrt{\frac{\rho \sigma^3}{n_h}} \frac{dh}{dt}, \quad (4)$$

где F_q – диссипативная сила на единицу длины линии контакта мениска со стенкой капилляра.

Из рассмотрения исключена сила, обусловленная вязким трением жидкости о стенки капилляра, что объясняется относительно низкими значениями скорости движения жидкости в капилляре, даже при вибрационном воздействии.

Рассматривая баланс работ по перемещению жидкости в капилляре за один период колебаний T , будем полагать, что в первом полупериоде сила F_p , совпадая по направлению с силой поверхностного натяжения, способствует подъему жидкости в капилляре на высоту Δh_B , а во втором, будучи противоположно направленной, инициирует опускание жидкости на Δh_H . При этом в обоих случаях будем рассматривать среднюю за полупериод силу

$$\overline{F_p} = \frac{A_p \cdot d_k^2}{2}. \quad (5)$$

Соответствующие уравнения балансов работ будут иметь, с учетом (1) – (5), следующий вид:

– для первого полупериода, когда жидкость в капилляре движется вверх

$$\frac{A_p d_k^2}{2} \Delta h_B + \pi d_k \sigma \Delta h_B - \frac{\pi d_k^2}{8} \rho_{жс} g n_h (\Delta h_B^2 + 2h \Delta h_B) - \frac{d_k}{T} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho \sigma^3}{100 n_h}} \Delta h_B^2 = 0; \quad (6)$$

– для второго полупериода, когда жидкость в капилляре опускается

$$\frac{A_p d_k^2}{2} \Delta h_H + \pi d_k \sigma \Delta h_H - \frac{\pi d_k^2}{8} \rho_{жс} g n_h (\Delta h_H^2 + 2h \Delta h_H) - \frac{d_k}{T} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho \sigma^3}{100 n_h}} \Delta h_H^2 = 0. \quad (7)$$

Подъем жидкости в капилляре за время, равное одному периоду колебаний T , составит

$$\Delta h_T = \Delta h_B - \Delta h_H, \quad (8)$$

а за время Δt

$$\Delta h_\Sigma = (\Delta h_B - \Delta h_H) \cdot \frac{\Delta t}{T} \quad (9)$$

или, после подстановки в (9), полученных из (6), (7) выражений, определяющих Δh_B и Δh_H ,

$$\Delta h_\Sigma = \frac{\sqrt[4]{\frac{45 \rho \sigma^3}{n_h}} (16 \pi \sigma + 4 \pi d_k \rho_{жс} g n_h h) - 8 \pi \rho_{жс} g n_h T A_p d_k}{\sqrt{\frac{45 \rho \sigma^3}{n_h} - (\pi \rho_{жс} g n_h T d_k)^2}} \cdot \Delta t. \quad (10)$$

Переходя в (10) к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка с постоянными (при заданных параметрах вибраций) коэффициентами

$$\frac{dh}{dt} = \frac{4\pi\rho_{жс}gn_h d_k f^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho\sigma^3}{n_h}}}{f^2 \sqrt{\frac{45\rho\sigma^3}{n_h} - (\pi\rho_{жс}gn_h d_k)^2}} \cdot h + \frac{16\pi\sigma f^2 \sqrt[4]{\frac{45\rho\sigma^3}{n_h}} - 8\pi\rho_{жс}gn_h f A_p d_k^2}{f^2 \sqrt{\frac{45\rho\sigma^3}{n_h} - (\pi\rho_{жс}gn_h d_k)^2}}, \quad (11)$$

где $f = \frac{1}{T}$ – частота вибраций.

Общее решение уравнения (11) имеет вид

$$h = -\frac{16\pi\sigma f^2 \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}} - 8\pi\rho_{жс}gn_h f A_p d_k^2}{4\pi\rho_{жс}gn_h d_k f^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho\sigma^3}{n_h}}} + c \cdot \exp\left(\frac{4\pi\rho_{жс}gn_h d_k f^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}}}{f^2 \cdot \sqrt{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h} - (\pi\rho_{жс}gn_h d_k)^2}} \cdot t\right). \quad (12)$$

Определяя постоянную интегрирования c из условия $h=0$ при $t=0$ и подставляя ее значение в (12), после преобразований получим выражение для определения высоты подъема жидкости в капилляре при действии продольных вибраций

$$h = \frac{4\sigma f \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}} - 2\rho_{жс}gn_h A_p d_k^2}{\rho_{жс}gn_h d_k f \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho\sigma^3}{n_h}}} \times \left[\exp\left(\frac{4\pi\rho_{жс}gn_h d_k f^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}}}{f^2 \cdot \sqrt{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h} - (\pi\rho_{жс}gn_h d_k)^2}} \cdot t\right) - 1 \right]. \quad (13)$$

Время подъема жидкости на высоту h составляет

$$t = \frac{f^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}} - (\pi\rho_{жс}gn_h d_k)^2}{4\pi\rho_{жс}gn_h d_k f^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}}} \times \times \ln \left(1 + \frac{h\rho_{жс}gn_h d_k \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}} f}{4\sigma \cdot \sqrt[4]{\frac{45\rho_{жс}\sigma^3}{n_h}} f - 2\rho_{жс}gn_h A_p d_k^2} \right). \quad (14)$$

Выражения (13) и (14) позволяют осуществлять обоснованный выбор основных проектных параметров капиллярных накопителей внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива с учетом влияния на их работу полетных вибраций топливных баков РН и получать оценки минимальной продолжительности работы двигателя с точки зрения обеспечения условий для его гарантированного повторного запуска.

Необходимо отметить, что область применения выражений (13) и (14) определяется диапазоном изменения частоты вибраций

$$0 < f < 12d_k \sqrt[4]{\frac{\rho_{жс} n_h^5}{\sigma^3}}. \quad (15)$$

Для рассматриваемых условий эксплуатации РН, характерных геометрических характеристик капилляров накопителей и свойств компонентов топлива это соответствует значениям $0 < f \leq 120$ Гц.

Для более высоких частот колебаний механизмы, определяющие аномально высокие значения скорости и высоты подъема жидкостей в капиллярах, подлежат уточнению.

1. Шевченко Б. А. К вопросу о проектировании систем обеспечения запуска двигательной установки КЛА в условиях невесомости / Б. А. Шевченко // Математическое моделирование в инженерных расчетах сложных систем. – Днепропетровск: ДГУ, 1997. – С. 89 – 95.
2. Беляев Н. М. Системы надува топливных баков ракет / Н. М. Беляев. – М. : Машиностроение, 1976. – 336 с.
3. Anglim D. D. Low-G testing of the Space Shuttle OMS propellant tank / D. D. Anglim // AIAA Paper. – 1979. – № 1258. – P. 1 – 7.
4. Dynamic Environmental Criteria National Aeronautics and Space Administration NASA-HDBK-7005 MARCH 13, 2001 <http://standards.nasa.gov>.
5. Белов С. В. Пористые материалы в машиностроении / С. В. Белов. – М. : Машиностроение, 1976. – 184 с.
6. Прохоренко П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П. П. Прохоренко, Н. В. Дежкунов, Г. Е. Коновалов. – Минск : Наука и техника, 1981. – 135 с.
7. Кульгина Л. М. Низкочастотный капиллярный эффект / Л. М. Кульгина, А. А. Кульнин // Деп. в ВИНТИ, № 6493 –В85, 1985. – 6 с.
8. Кудрицкий Г. Р. Теплообмен при кипении в условиях определяющего влияния геометрических характеристик поверхности нагрева: автореф. дис. на соискание степени д-ра техн. наук / Г. Р. Кудрицкий. – Киев, 1995. – 40 с.
9. Микишев Г. Н. Влияние поверхностного натяжения и угла смачивания на колебания жидкости в сосудах / Г. Н. Микишев, Г. А. Чурилов // Динамика космических аппаратов и исследование космического пространства. – М. : Машиностроение, 1986. – С. 164 – 174.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
г. Днепропетровск
ГП «Конструкторское бюро «Южное»,
г. Днепропетровск

Получено 27.04.11,
в окончательном варианте 27.04.11