

СПЛОШНОСТЬ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА ПРИ ПОЛЕТНЫХ ВИБРАЦИЯХ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

Предложен обобщенный методический подход к определению работоспособности внутрибаковых устройств обеспечения сплошности газонасыщенных компонентов топлива в жидкостных ракетных двигательных установках в условиях виброн нагружения топливных баков на различных этапах полета ракеты-носителя.

Запропоновано узагальнений методичний підхід до визначення працездатності пристроїв забезпечення суцільності газонасичених компонентів палива всередині баків в рідинних ракетних двигунних установках в умовах вібронавантаження паливних баків на різних етапах польоту ракети-носія.

The generalized method for computing the serviceability of intratank devices for continuity of gas-saturated propellant components in rocket propulsion systems under vibration loads on propellant tanks at the different stages of the flight is proposed.

Опыт проектирования и эксплуатации ракет-носителей на жидких компонентах топлива (КТ) показал [1, 2], что существенное влияние на гидродинамическую обстановку в топливных баках (ТБ) оказывают полетные вибрации, обусловленные работой маршевых двигателей (МД).

Вибронагружение конструкции РН на частотах 1 – 100 Гц инициирует возникновение и развитие разнообразных движений КТ (плесканий, вращений и т.п.), сопровождающихся формированием в них свободных газовых включений и их перемещениями, вплоть до проникания в топливные магистрали МД. Для предотвращения этого явления топливные баки РН оснащаются внутрибаковыми устройствами обеспечения сплошности (УОС), работа которых, как правило, основана на использовании капиллярного эффекта [1]. Капиллярные УОС позволяют обеспечить высокую полноту выработки КТ из баков различных конфигураций в широком диапазоне изменения полетных нагрузок. Однако, действие вибронгрузок на конструкцию РН может привести к снижению удерживающей способности УОС [2] до уровня, при котором становится возможным прорыв свободных газовых включений в топливные магистрали МД в количествах, способных привести к срыву его устойчивой работы [3] и, как следствие, невыполнению ракетой-носителем полетной задачи. Этим обуславливается актуальность проблемы определения работоспособности УОС в условиях полетных вибронгрузок и её значимость в общем перечне задач, решаемых в процессе проектирования и отработки РН и, особенно, их верхних ступеней.

К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных исследованию различных аспектов этой проблемы [4 – 8], включая разработку методических подходов к оценке работоспособности УОС на различных этапах полета РН [9, 10]. При этом, однако, не учитываются особенности формирования газонасыщенных сред, обусловленные разрушением свободной поверхности КТ и протекающими в них сорбционными процессами, без учета которых невозможно получать достоверные количественные оценки влияния вибронгрузок, действующих на ТБ, на работоспособность УОС и двигательной установкой РН в целом.

Целью настоящей статьи является развитие предложенного в [10, 11] методического подхода к определению работоспособности УОС при виброн-

© О.В. Пилипенко, А.Н. Заволока, А.Д. Николаев, Н.Ф. Свириденко,
А.Н. Машченко, В.Н. Бичай, 2009

агружении ТБ путем учета влияния основных механизмов формирования газожидкостных сред и параметров свободных газовых включений на гидродинамическую обстановку в газонасыщенных КТ, находящихся в ТБ, подвергаемых воздействию полетных вибронагрузок.

Поставленная задача является комплексной, предусматривающей необходимость рассмотрения различных аспектов проблемы обеспечения работоспособности УОС в реальных условиях эксплуатации РН, включающих:

- механизмы формирования газожидкостных сред в компонентах топлива при вибронагружении ТБ;
- особенности и параметры движения свободных газовых включений в столбе жидкости, подвергаемом воздействию вибраций;
- учет возможности оголения фазоразделяющих поверхностей УОС при колебании свободных поверхностей КТ в ТБ;
- определение динамической удерживающей способности УОС;
- формулирование критериев оценки работоспособности УОС.

Механизмы формирования газожидкостных сред в емкости с жидкостью, подвергаемой воздействию вибраций, и их характеристики. Основными механизмами формирования газожидкостных сред в компонентах топлива при воздействии на ТБ вибрационных нагрузок являются:

- разрушение поверхности жидкости, обусловленное развитием различных форм ее колебаний и их взаимодействием с конструктивными элементами бака (оболочки, ребра, диафрагмы, сетки и т.д.);
- возникновение и развитие процессов десорбции в газонасыщенных компонентах при отклонении системы «жидкость – растворенный газ» от равновесного состояния.

Разрушение свободной поверхности жидкости. Вибрационные нагрузки, воздействующие на ТБ с компонентами топлива во время работы маршевых двигателей РН, инициируют возникновение и развитие волновых движений и плесканий поверхности КТ, сопровождающихся разрушением их свободной поверхности и образованием барботажного слоя, состоящего из хаотично распределенных в жидкости газовых пузырей различных размеров [3, 4].

С увеличением частоты вибровозбуждения инициируется также сохраняющийся в достаточно широком диапазоне частот механизм разрушения поверхности КТ, обусловленный генерированием фонтанирующего потока капель и их последующим падением на поверхность жидкости [6, 11]. Из-за сильной неустойчивости поверхности падающие капли глубоко внедряются в жидкость, интенсивно привнося в ее приповерхностный слой газ из свободного газового объема ТБ.

Аналитические выражения, определяющие с приемлемой для практических расчетов точностью значения амплитуд виброперегрузки A_g^P , соответствующей началу разрушения поверхности, и толщину приповерхностного барботажного слоя $H_{ГЖС}$ в зависимости от параметров вибронагружения, полученные обработкой приведенных в [11] экспериментальных данных для диапазона частот $0 < f \leq 120$ Гц, имеют вид

$$A_g^P \cong 0,05 \cdot f, \text{ g}, \quad (1)$$

$$H_{\bar{A}E\bar{N}} \cong 12 \cdot \frac{A_g}{f^2}, \quad (2)$$

где f – частота вынужденных колебаний конструкции ТБ.

Максимальный диаметр газовых включений (пузырей), барботирующих в газожидкостном приповерхностном слое, составляет [12]

$$d_l^{\max} \cong \left(\frac{24}{\bar{N}_f} \right)^{1/3} \cdot \frac{\sigma}{U_{\Pi}^2 \cdot (\rho_{\bar{A}E}^2 \cdot n_z \cdot \rho_{\bar{A}})^{1/3}}, \quad (3)$$

где C_f – коэффициент сопротивления движению пузыря; σ – коэффициент поверхностного натяжения; U_{Π} – скорость всплытия пузыря; $\rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{г}}$ – плотности жидкости и газа в пузыре, соответственно; n_z – осевая перегрузка.

При этом распределение пузырей по размерам близко к нормальному закону, а их средний диаметр определяется соотношением [13]

$$\bar{d} = 1,45 \cdot \left(\frac{\sigma}{\rho_{\bar{A}E} \cdot n_z \cdot g} \right)^{0,35}, \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Параметром, оказывающим наибольшее влияние на структуру и характеристики барботажного слоя, является его газосодержание φ , определяемое как отношение суммарного объема газовых включений, одновременно находящихся в слое, к объему слоя.

Ввиду чрезвычайной сложности гидродинамических явлений, сопровождающих процесс разрушения поверхности колеблющейся жидкости, в настоящее время отсутствуют какие-либо рекомендации и зависимости для аналитического определения газосодержания формирующегося подобным образом барботажного слоя. Однако, принимая во внимание наличие определенной аналогии между процессами движения, коалесценции и дробления пузырей в барботажном слое, образующемся вследствие действия рассматриваемых механизмов разрушения поверхности, и в кипящем слое жидкости при развитом пузырьковом кипении [14], можно полагать, что приведенная скорость поступления газа в барботажный слой может быть принята равной объемной интенсивности генерации паровой фазы в кипящем слое, составляющей $\bar{W} = 0,1 \dots 0,15 \frac{\dot{v}^3/\bar{n}}{\dot{v}^2}$ [15].

В работе [13] на основании анализа и обработки многочисленных экспериментальных данных получена аналитическая зависимость газосодержания барботажного слоя от приведенной скорости газа \bar{W} , скорости всплытия пузыря в жидкости ($U_{\Pi} = 0,2 - 0,25 \text{ м/с}$ [16]) и толщины барботажного слоя $H_{\text{ГЖС}}$, которая с учетом реальных диаметров ТБ современных РН может быть преобразована к виду

$$\varphi \approx \text{th} \left[0,27 \cdot \left(\frac{f^2}{n_z \cdot A_g} \right)^{0,126} \right]. \quad (5)$$

В целом выражения (2) – (5) определяют параметры газожидкостной структуры барботажного слоя, которая формируется при разрушении поверхности жидкости в емкости, подвергающейся воздействию виброперегрузок с амплитудами, соответствующими соотношению (1).

Десорбция газонасыщенных компонентов топлива. Сорбционные процессы являются одним из видов массопередачи и характеризуются условиями равновесия между газовой и жидкой фазами, устанавливающимися при весьма продолжительном их контакте (статика), и скоростью протекания процесса массопередачи (кинетика).

При снижении давления в газонасыщенных КТ до уровня, соответствующего давлению насыщения, появляются условия, способствующие выделению газа из раствора в свободное состояние. Центрами газовыделения являются находящиеся в компонентах топлива нерастворенные газовые пузырьки, механические примеси и т.п.

Свободные газовые включения в виде зародышевых пузырьков образуются за промежуток времени, имеющий порядок 10^{-12} с [17]. Их минимальные размеры при определенных допущениях, вытекающих из условия начальной насыщенности раствора, могут быть определены из соотношения [16]

$$d_G = \frac{4 \cdot \sigma}{P_f - P_{ND}}, \quad (6)$$

где P_H – давление насыщения КТ; P_{CP} – давление в среде, окружающей пузырек.

При достаточно большом исходном пересыщении раствора образование свободных газовых включений (пузырьков) будет происходить практически непрерывно в течение всего времени «дресселирования». При этом увеличение исходного пересыщения $\frac{P_H}{P_{CP}}$ сопровождается увеличением медианного диаметра газовых пузырьков в соответствии с соотношением

$$d_j \cong 46 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{P_f}{P_{ND}} - 1 \right)^{0,37}, \quad (7)$$

полученным обработкой экспериментальных данных, приведенных в [17].

Возрастание исходного пересыщения раствора хотя и приводит к расширению спектра дисперсности пузырьков, как это следует из результатов измерения распределения пузырьков по размерам при дресселировании раствора с различным исходным пересыщением [17], однако для прогнозируемых в баках РН значений $\frac{P_H}{P_{CP}}$ это расширение незначительно и соответствует диапозону

$$d_G \leq d_j \leq d_M \pm 30 \text{ мкм}. \quad (8)$$

Воздействие вибраций, инициирующих периодические пульсации давления в газонасыщенных компонентах топлива, существенно облегчает условия

образования и роста зародышевых пузырьков при локальном понижении давления, соответствующем условию пересыщения раствора

$$P_{\dot{N}O} = P_{\dot{N}O} - A_p|_z = P_a + \rho \cdot g \cdot n_z \cdot z - A_p|_z < P_f, \quad (9)$$

где P_a – давление наддува в полости топливного отсека; $P_{\dot{N}O}$ – статическое давление; z – глубина; $A_p|_z$ – амплитуда пульсаций давления в КТ на глубине z .

Это объясняется снижением в звуковой волне активационного барьера, препятствующего образованию зародышевых пузырьков, при этом механизм их образования не изменяется, а вероятность этого процесса возрастает, в связи с чем скорость выделения газа из пересыщенного раствора при наличии в нем периодически изменяющегося поля давлений многократно (в тысячи раз) возрастает по сравнению со статическими условиями [18].

В поле переменного давления происходит периодическое сжатие и расширение газового пузырька. Так как количество диффундирующего газа пропорционально его поверхности, то за каждый цикл пульсаций масса газа в пузырьке увеличивается. Это приводит в среднем к его росту во времени, т.е. происходит как бы «выпрямление» знакопеременного диффузионного потока газа через изменяющуюся поверхность пузырька в условиях, весьма близких к равновесному состоянию с окружающей жидкостью [19].

Формула для определения амплитуды пульсаций давления $A_D^{\hat{A}\hat{A}}$, при превышении которой начинается рост пузырьков, обусловленный процессом «выпрямленной газовой диффузии», имеет вид [19]

$$A_D^{\hat{A}\hat{A}} = \sqrt{\frac{6 \cdot \sigma \cdot P_f}{d_i}}. \quad (10)$$

При разработке математической модели кинетики десорбции газонасыщенной жидкости в периодически изменяющемся поле давлений будем исходить из следующих положений:

1. Колебания давления в газонасыщенной жидкости, происходящие относительно уровня статического давления $P_{\dot{N}O}$ на рассматриваемой глубине и являющиеся гармонической функцией времени, представляются в виде непрерывной последовательности знакопеременных прямоугольных импульсов с амплитудой $\bar{A}_p = \frac{2A_p^{\max}}{\pi}$, где A_p^{\max} – амплитуда гармонического колебания.

2. Скорость сорбционных процессов в каждом импульсе пропорциональна степени пересыщенности раствора и текущему значению площади поверхности раздела фаз «газ – жидкость».

3. В конце каждого импульса система «газ – жидкость» приходит в равновесное состояние.

Рассматривая, в соответствии с изложенным, полупериод изменения давления в жидкости $\Delta t_1 = \frac{T}{2}$, соответствующий условию пересыщения раствора $P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p < P_f$ из полученных в [16] уравнений, обобщающих результаты

экспериментального исследования процессов сорбции при виброн нагружении емкости с газонасыщенными жидкостями, следует соотношение, определяющее объем выделившегося за время Δt_1 газа

$$\Delta V_1 = \frac{S \cdot r}{S+r} \cdot \frac{P_f - (P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p)}{P_{\dot{N}O}} \cdot \Delta V_{\mathcal{E}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{0,693 \cdot \Delta t_1}{T_{0,5}}\right) \right], \quad (11)$$

где S – постоянная растворимости газа, равная «отношению объема, который бы занял газ в нерастворенном состоянии при текущих значениях давления $P_0 = P_{CT}$ и температуры T , к объему жидкости, в которой он был растворен», определяемая по формуле [3]

$$S = \chi(\dot{O}) \cdot \frac{M_{\dot{A}}}{M_{\mathcal{E}}} \cdot \frac{\rho_{\mathcal{E}}}{\rho_{\dot{A}_0}} \cdot P_{\dot{N}O} \cdot \frac{T}{273}, \quad (12)$$

где χ – коэффициент Генри; $M_{\Gamma}, M_{\mathcal{K}}$ – молекулярный вес газа и жидкости соответственно; $\rho_{\mathcal{E}}, \rho_{\dot{A}_0}$ – плотности газа и жидкости при нормальных условиях ($P_0 = 10^5$ Па, $T_0 = 273$ К); r – отношение объема, в котором распределяется выделившийся в результате десорбции газ, к объему жидкости, где давление соответствует условию пересыщения раствора; $\Delta V_{\mathcal{E}}$ – объем области жидкости, давление в котором соответствует условию пересыщенности раствора; $T_{0,5}$ – период полувыделения, т.е. время выделения половины от общего количества растворенного в жидкости газа [16].

Принимая во внимание, что возникшие и сформировавшиеся в процессе выпрямленной газовой диффузии в объеме $\Delta V_{\mathcal{E}}$ пузырьки всплывают и распределяются в дальнейшем во всем объеме жидкости, находящемся выше глубины h расположения объема $\Delta V_{\mathcal{E}}$, а также учитывая, что для реальных конструкций топливных баков РН $r \gg 1$, $\frac{S \cdot r}{S+r} \approx S$, можно преобразовать соотношение (11) к виду

$$\Delta V_1 = S \cdot \Delta V_{\mathcal{E}} \cdot \frac{P_f - (P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p)}{P_{\dot{N}O}} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{0,346}{f \cdot T_{0,5}}\right) \right], \quad (13)$$

где f – частота колебаний давления.

Переходя к определению объема газа, абсорбирующегося из пузырей в течение полупериода колебаний давления, когда $P_{\dot{N}O} + \bar{A}_p > P_f$, отметим, что в соответствии со сложившимися представлениями [16 – 20], механизмы и движущие силы процессов десорбции и абсорбции идентичны [12 – 16], а скорость массообмена в системе «жидкость – газовые пузырьки» при одинаковой степени пересыщения (недосыщения) определяется преимущественно развитостью межфазной поверхности.

Соотношение площадей межфазной поверхности, разделяющей газ, находящийся в пузырьках, и жидкость, в полупериодах десорбции (Δt_1) и абсорбции (Δt_2) определяется выражением [16]

$$\frac{F_{\Sigma}^{\Delta t_2}}{F_{\Sigma}^{\Delta t_1}} = \left(\frac{P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O} + \bar{A}_p} \right)^{\frac{2}{3n}}, \quad (14)$$

где n – показатель политропы газа насыщения.

Объем газа, выделившегося из газонасыщенной жидкости, находящейся в вибронагруженном баке, за один период колебаний T давления равен $\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_1 - \Delta V_2$. При этом газовыделение за промежуток времени τ , состоящий из n периодов колебаний, где $n = \tau \cdot f$, составит

$$\Delta V_{\Sigma}^{\tau} = \Delta V_{\Sigma} \cdot f \cdot \tau, \quad (15)$$

а скорость «выпрямленной газовой диффузии» будет равна

$$\begin{aligned} \dot{V} = S \cdot \Delta V_{\mathcal{E}} \cdot \left[\left(\frac{P_j + \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O}} - 1 \right) + \left(\frac{P_j - \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O} + \bar{A}_p} \right)^{\frac{2}{3n}} \right] \times \\ \times \left[1 - \exp \left(- \frac{0,346}{f \cdot T_{0,5}} \right) \right] \cdot f. \end{aligned} \quad (16)$$

Количество свободных газовых включений (пузырей), образующихся в объеме $V_{ж}$ за счет десорбции растворенного газа в течение полупериода времени Δt_1 , когда раствор пересыщен, может быть определено по выражению

$$n_V = \frac{6 \cdot \Delta V_1}{\pi \cdot d_M^3}. \quad (17)$$

Изменение среднего диаметра пузырей, обусловленное «выпрямленной газовой диффузией» при пульсациях пузырей в поле переменного давления в жидкости, определяется соотношением

$$d_j(\tau_{\theta}) \approx 3 \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \cdot \frac{\dot{V} \cdot \tau}{n_V}}, \quad (18)$$

где τ_{κ} – время действия колебательного процесса, которое после подстановки (7), (13), (16) и (17) может быть преобразовано к виду

$$d_j(\tau_{\theta}) = 0,0463 \sqrt[3]{\frac{P_{\dot{N}O}}{P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p} \left[\left(\frac{P_j + \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p} - 1 \right) + \left(\frac{P_j - \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O}} - 1 \right) \left(\frac{P_{\dot{N}O} - \bar{A}_p}{P_{\dot{N}O} + \bar{A}_p} \right)^{\frac{2}{3n}} \right] f \tau}, \quad (19)$$

где P_{CT} – статическое давление в жидкости на глубине, соответствующей месту расположения области $\Delta V_{\mathcal{E}}$ в топливном баке.

Принимая во внимание, что форма этих пузырей ($0,04 \text{ мм} \leq d_j \leq 0,4 \text{ мм}$), обусловленная преимущественным действием сил поверхностного натяжения, близка к сферичной, а влияние колебаний давления в жидкости на ско-

рость их всплытия несущественно [13], последняя может быть определена по формуле Стокса [19]

$$U_j = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_j^2 \cdot n_z \cdot g \cdot (\rho_{\mathcal{A}} - \rho_{\bar{\mathcal{A}}})}{\mu_{\mathcal{A}}}, \quad (20)$$

где $\mu_{\mathcal{A}}$ – динамическая вязкость жидкости.

Необходимо иметь в виду, что в процессе всплытия пузырей после выхода из области жидкости $\Delta V_{\mathcal{A}}$, где происходит процесс «выпрямленной газовой диффузии», их диаметр будет уменьшаться вследствие абсорбции находящегося в них газа. Для оценки диаметра пузырей в процессе всплытия может быть использовано выражение [19]

$$d_j(\tau) = d_{j_0}(\tau_{\hat{e}}) \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\chi \cdot R_{\bar{\mathcal{A}}} \cdot T_{\bar{\mathcal{A}}} \cdot \beta}{M_{\bar{\mathcal{A}}} \cdot d_{j_0}} \cdot \tau \right), \quad (21)$$

где χ – коэффициент растворимости газа в КТ; $R_{\mathcal{A}}$ – газовая постоянная растворенного газа; β – коэффициент массообмена; $M_{\mathcal{A}}$ – молекулярная масса газа; τ – время всплытия.

В целом соотношения (2) – (5), (7), (8), (19) – (21) позволяют определить основные параметры и характеристики газожидкостных структур, которые формируются в компонентах топлива, находящихся в вибронгруженных топливных баках РН, знание которых необходимо для последующего анализа влияния полетных вибраций на работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности.

Движения газовых пузырей в столбе жидкости, подвергаемом воздействию вибраций. Пузыри газа, находящиеся в поле массовых сил в жидкостном столбе при его вибронгружении и определенных соотношениях между характерными параметрами вибраций, не всплывают к свободной поверхности, а остаются во взвешенном состоянии или даже мигрируют в направлении, противоположном действию массовых (архимедовых) сил [4, 11].

Причиной этого является наложение пульсаций объема пузырей на их движение в жидкости. Изменение размеров пузыря определяется изменением давления в окружающей среде, что, в конечном итоге, определяет мгновенную вертикальную составляющую скорости его движения.

Из всех режимов поведения газожидкостных сред в компонентах топлива, находящихся в подвергающихся воздействию вибронгрузок топливных баках, наиболее критичным, с точки зрения обеспечения устойчивости процесса подачи КТ в питающие магистрали двигателя, является режим, связанный с опускным движением свободных газовых включений. Это объясняется тем, что массовое поступление пузырей к УОС, в случае последующего их проникания сквозь фазоразделители к заборным устройствам, может негативно отразиться на работе МД вплоть до срыва его рабочего процесса [3].

Пульсации давления в КТ, соответствующие началу опускного движения пузырей, определяются условиями равновесия последних на заданной глубине. Эти значения называются критическими ($A_p^{\hat{e}\hat{d}}$) и определяются ампли-

тудой пульсаций $A_p(z)$ и ее градиентом $\frac{dA_p}{dz}$ в «точке», занимаемой пузырь-
рем.

Аналитические выражения для расчета $A_p^{\dot{\epsilon}\delta}$, инвариантные относительно
распределения давления в жидкости $P(z, t)$ в точке, занимаемой пузырем
на глубине $z = h$ [21], имеют вид:

$$A_p^{\dot{\epsilon}\delta}|_{z=h} = \frac{2 \cdot n \cdot n_z \cdot \rho_{\mathcal{AE}} \cdot g \cdot (P_a + \rho_{\mathcal{AE}} \cdot g \cdot n_z \cdot h) \cdot \frac{dA_p}{dz}|_{z=h}}{(\rho_{\mathcal{AE}} \cdot g \cdot n_z)^2 + \left(\frac{dA_p}{dz}|_{z=h}\right)^2} \quad (22)$$

или для линейной формы колебаний

$$A_p^{kp}|_{z=h} = \sqrt{2 \cdot n \cdot n_z \cdot \rho_{\mathcal{JK}} \cdot g \cdot h \cdot (P_a + \rho_{\mathcal{JK}} \cdot g \cdot n_z \cdot h)}, \quad (23)$$

где P_a – давление наддува.

Условие начала опускного движения газовых включений имеет вид

$$A_p^{\ddot{a}}|_{z=h} > A_p^{\dot{\epsilon}\delta}|_{z=h}, \quad (24)$$

где $A_p^{\ddot{a}}|_{z=h}$ – амплитуда действующих на глубине $z = h$ пульсаций давления
в жидкости, обусловленных виброн нагружением топливного бака.

Скорость опускного движения пузыря U_T определяется решением урав-
нения его движения [11], из которого исключены члены, содержащие массу и
ускорение пузыря, существенно (\sim на пять порядков) меньшие статической
подъемной силы. В этом случае уравнение сохранения среднего по времени
количества движения пузыря за отрезок времени, равный периоду колебаний
давления в жидкости, будет иметь вид

$$-\frac{1}{T} \int_0^T V \frac{\partial P}{\partial z} dt - \frac{1}{T} \int_0^T C_d \cdot \frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \cdot \frac{\rho_{\mathcal{AE}} \cdot U_T^2}{2} dt = 0, \quad (25)$$

где $V = f(P)$ – объем пузыря; $P = P_a + \rho \cdot g \cdot n_z \cdot z + A_p \sin t$ – давление в
жидкости; $A_p = \rho_{\mathcal{AE}} \cdot g \cdot n_z \cdot z \cdot K_p \cdot A_g$ – динамическая составляющая давлени-
я; A_g – виброперегрузка; K_p – коэффициент формы колебаний; C_d – ко-
эффициент гидродинамического сопротивления движению пузыря в жидко-
сти.

Для характерных режимов движения пузырей $10 \leq Re \leq 80$ коэффициент
гидродинамического сопротивления определяется выражением [22]

$$C_d = \frac{12,5}{Re^{0,5}} = \frac{12,5}{\left(\frac{U_T \cdot d_j}{\rho_{\mathcal{AE}}}\right)^{0,5}}, \quad (26)$$

а связь между объемом пузыря и давлением в жидкости – уравнением состо-
яния [21].

Учитывая, что скорость опускного движения пузыря в течение рассматриваемого периода колебаний $T = \frac{1}{f}$ изменяется незначительно, и принимая во внимание слабую зависимость силы гидродинамического сопротивления от диаметра пузыря, можно также с приемлемой для практических оценок точностью полагать, что $U_T \approx \bar{U}_T \approx \text{const}$ и $d_{II} = d_{II_0}$.

В этом случае из (28) – (30) может быть получено выражение для приближенной оценки скорости опускного движения пузырей в столбе жидкости, подвергающемуся воздействию вибронагрузок с $A_g > A_g^{kp}$

$$\bar{U}_T \approx \frac{d_{I_0}}{\nu_{AE}^{1/3}} \cdot \left[\left(\frac{\rho_{AE} \cdot g \cdot A_g^2 \cdot K_p^2}{2n \cdot (P_a + \rho_{AE} \cdot g \cdot n_z \cdot z)} - 1 \right) \cdot n_z \right]^{2/3}. \quad (27)$$

Колебания свободной поверхности жидкости в топливных баках РН.

Прорыв газа в топливные магистрали МД может происходить также при оголении фазоразделителей внутрибаковых УОС компонентов топлива в процессе колебаний свободной поверхности жидкости при малых уровнях заполнения ТБ.

Колебания свободной поверхности КТ при полете РН возникают в результате возбуждения динамической системы «жидкое топливо – упругая конструкция топливного бака РН» с частотами, близкими к частотам её собственных тонов 0,5 – 5 Гц, обусловленных, главным образом, упругими свойствами жидкости. При этом доминируют колебательные движения плоской поверхности на частоте основного тона, форма которых связана с ее отклонением от установившегося (в общем случае горизонтального) положения и характеризуется максимальным значением их амплитуды у стенки ТБ.

При вибронагрузении в диапазоне частот 5 – 100 Гц возбуждаются колебания компонентов топлива в ТБ на частотах, близких к собственным частотам колебаний системы «жидкое топливо – упругая конструкция топливного бака РН», в связи с чем параметры колебаний жидкости (формы, частоты, амплитуды) зависят от пространственной конфигурации топливного бака, его упругих и массовых характеристик. Как показано в [9], в этом диапазоне частот в баках, как правило, возникают колебательные движения жидкости с уровнем амплитуд, несущественным с точки зрения необходимости исследования возможности оголения фазоразделителей УОС.

В целом, проведенное выше рассмотрение основных процессов, создающих предпосылки для возможного прорыва свободных газовых включений в топливные магистрали МД, показывает, что их интенсивность и особенности протекания определяются параметрами пространственных колебательных движений КТ в подвергаемых воздействию полетных вибронагрузок ТБ РН.

Определение параметров пространственных колебательных движений КТ в топливных баках РН. Одним из наиболее эффективных методов определения параметров пространственных движений жидкости в баках сложных конфигураций при различных граничных условиях и схемах нагружения является метод конечных элементов [7, 23].

При разработке конечно-элементной модели колебательного движения топливного бака с КТ элементы его конструкции, агрегаты и узлы моделируются конечными элементами типа «упругая оболочка» и «сосредоточенная масса», а жидкое топливо – с помощью конечных элементов «трехмерная жидкость».

Собственные частоты ТБ, на которых при действии внешнего возбуждения следует ожидать проявления резонансных свойств, определяются на основании численного анализа параметров собственных колебаний моделируемой динамической системы «конструкция топливного бака – жидкое топливо». При этом динамическая система «конструкция ТБ – жидкое топливо» рассматривается как консервативная, то есть без учета диссипации энергии [9].

При моделировании динамики системы «конструкция ТБ – жидкое топливо» задаются:

– условия совместности деформаций сопряженных поверхностей раздела жидкой и твердой сред, учитывающие скольжение жидкости относительно стенок бака;

– граничные условия, определяющие особенности силовых связей ТБ с конструкцией РН;

– условия, характеризующие действие массовых сил и давления наддува ТБ на жидкие КТ в полете.

Параметры колебаний КТ при гармоническом возбуждении ТБ (в продольном и поперечном направлениях) с амплитудами, соответствующими условиям полета, определяются из решения системы дифференциальных уравнений, описывающей пространственные колебания системы с учетом диссипации энергии.

Амплитуды колебаний давления жидкого топлива в контрольных «точках» бака определяются по результатам численного моделирования как средняя величина давления в соответствующем конечном элементе «трехмерная жидкость». Объем области потенциального газовыделения $\Delta V_{\text{ж}}$ рассчитывается суммированием объемов конечных элементов «трехмерная жидкость», где давление при колебаниях опускается ниже давления насыщения растворенного в КТ газа.

Конечные элементы «трехмерная жидкость», предназначенные для моделирования колебательных движений жидкости при отсутствии в ней течений, могут быть использованы и для моделирования пространственных колебаний КТ в топливном баке РН с учетом взаимодействия жидкости с его стенками. При этом необходимо принимать во внимание влияние упругости K_S , обусловленной деформацией свободной поверхности жидкости, которая определяется соотношением [7]

$$K_S = \rho_{\text{ж}} \cdot A_e \cdot (g_x \cdot C_x + g_y \cdot C_y + g_z \cdot C_z), \quad (28)$$

где g_x, g_y, g_z – ускорения по направлениям X, Y, Z осей конечного элемента; C_x, C_y, C_z – компоненты нормали к поверхности конечного элемента, параллельные соответственно осям X, Y, Z конечного элемента; A_e – площадь поперечного сечения конечного элемента «трехмерная жидкость».

Удерживающая способность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности. Как уже отмечалось, в качестве устройств разделения фаз в

топливных баках РН наиболее широко используются капиллярные (сетчатые) фазоразделители (ФР), характеризующиеся универсальностью как с точки зрения компоновочных возможностей в баках различных геометрических форм, так и с позиции возможности работы с различными КТ в широком диапазоне перегрузок [1, 2].

Высота столба жидкости, при которой в статических условиях происходит потеря удерживающей способности фазоразделителя, сопровождающаяся прониканием газовых включений, определяется соотношением

$$H_{\bar{N}\bar{O}} \geq \frac{K_C \cdot \sigma}{\delta \cdot \rho_{\bar{E}} \cdot g \cdot n_z}, \quad (29)$$

где K_C – коэффициент, зависящий от геометрии ячейки сетки фазоразделителя и значения краевого угла; δ – номинальный размер ячейки сетки.

В динамических условиях удерживающая способность ФР зависит от скорости натекания на сетку находящихся в жидкости газовых включений.

В работе [24] приведены обобщающие результаты экспериментальных исследований динамической удерживающей способности мелкоячеистых сеток с размером ячеек $\delta = 40$ и 80 мкм зависимость, позволяющая количественно оценивать влияние скорости натекания газовых включений на сетку, геометрических характеристик сетки и физических свойств жидкости на удерживающую способность ФР

$$H_{\bar{A}\bar{E}\bar{I}} \approx 0,143 \left(\frac{\sigma}{\rho_{\bar{E}} \cdot n_z} \right)^{0,56} \frac{e^{-\frac{0,005 \cdot S_{\bar{O}\bar{D}}^{0,5} \cdot \delta}{(\bar{U}_{\bar{O}} + U_{\bar{O}\bar{D}})^2 \cdot \Delta t^2}}}{S_{\bar{O}\bar{D}}^{0,56}} \left[\frac{\delta}{(\bar{U}_{\bar{O}} + U_{\bar{O}\bar{D}}) \Delta t} \right]^{0,0003 \mu_{\bar{E}}} K_{\bar{A}} H_{\bar{N}\bar{O}}, \quad (30)$$

где $S_{\bar{O}\bar{D}}$ – площадь сетки ФР; $\mu_{\bar{E}}$ – коэффициент динамической вязкости жидкости; $U_{\bar{O}\bar{D}}$ – скорость опускания уровня жидкости; Δt – продолжительность контакта поверхности раздела фаз (газожидкостной среды) с сеткой ФР; $K_{\bar{A}}$ – коэффициент, учитывающий влияние вибраций на удерживающую способность сетки [2].

Определение работоспособности внутрибаковых устройств обеспечения сплошности КТ в условиях полетных вибронрузок. Работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в условиях вибронрузки РН на различных этапах ее полета целесообразно определять в рамках методического подхода, ориентированного на выявление режимов эксплуатации, потенциально опасных с точки зрения возможности прорыва формирующихся в КТ свободных газовых включений через ФР, и получение количественных оценок их содержания на входе в двигатель.

Последовательность расчета указанных оценок состоит в следующем:

– по соотношениям (1), (2), (5) определяются условия разрушения поверхности КТ и параметры приповерхностного барботажного слоя $H_{ГЖС}$ и $\Phi_{ГЖС}$;

– по результатам численного моделирования вынужденных колебаний динамической системы «конструкция ТБ – жидкое топливо» определяются

амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) перемещений свободных поверхностей КТ и амплитуды пульсации давления в КТ;

– выявляются области десорбции $\Delta V_{Ж}$ и рассчитывается скорость газо-выделения в газонасыщенных КТ по соотношению (16);

– по соотношениям (22), (23) рассчитываются критические, с точки зрения начала опускного движения пузырей, амплитуды пульсации давления $A_p^{\hat{\delta}}$ на нижней границе слоя $H_{ГЖС}$ и на уровне областей $\Delta V_{\mathcal{E}}$, которые сравниваются с амплитудами $A_p^{\hat{a}}$ на этих уровнях;

– если $A_p^{\hat{a}} \geq A_p^{\hat{\delta}}$, то по соотношению (27) определяется скорость опускного движения свободных газовых включений \bar{U}_O и скорость их натекания на фазоразделитель УОС ($\bar{U}_O + U_{OБ}$);

– по соотношениям (29), (30) определяется удерживающая способность ФР $H_{Дин}$, которая сравнивается с максимальной высотой столба жидкости $H_{СТ}^{max}$ над ним. Условие прорыва газа имеет вид: $H_{НО}^{max} \geq H_{\hat{A}\hat{E}\hat{I}}$;

– газосодержание КТ за ФР после потери им удерживающей способности составляет $\phi_{ГЖС}$ в случае прорыва свободных газовых включений из предповерхностного барботажного слоя или $\dot{V}/\dot{Q}_{КТ}$, где $\dot{Q}_{КТ}$ – объемный расход КТ, при прорыве газовых включений из области десорбции $\Delta V_{\mathcal{E}}$.

Применительно к оценке прорыва газа, обусловленного частичным оголением ФР при низкочастотных колебаниях КТ, отметим, что в этом случае $H_{Дин}$ определяется для скорости натекания газа на ФР $\bar{U}_O = 4A \cdot f$, где A – амплитуда колебания поверхности КТ. При этом газосодержание КТ за ФР определяется по соотношению:

$$V = 0.35 R_{\hat{\delta}\hat{\delta}}^2 \Delta h \left[\arcsin \sqrt{\frac{\Delta h(2a - \Delta h)}{a^2}} - \left(1 - \frac{\Delta h}{a}\right) \cdot \sqrt{\frac{\Delta h(2a - \Delta h)}{a^2}} \right] \cdot f, \quad (31)$$

где $R_{\hat{\delta}\hat{\delta}}$ – радиус сетки ФР; $\Delta h = a - h_{\hat{\delta}\hat{\delta}}$; a – амплитуда колебаний поверхности КТ; $h_{\hat{\delta}\hat{\delta}}$ – высота уровня КТ над ФР.

В качестве критериев при количественных оценках запасов работоспособности внутрибаковых УОС на указанных потенциально опасных, с точки зрения обеспечения сплошности КТ в топливных магистралях МД, режимах эксплуатации РН целесообразно рассматривать отношения критических $\Pi_{КР}$ и действующих $\Pi_{Д}$ значений определяющих параметров, соответствующих данным режимам

$$\Lambda = \frac{\ddot{I}}{\dot{I}} \frac{\hat{E}\hat{D}}{\hat{A}}. \quad (32)$$

При этом для получения минимальных значений критерия оценки запасов работоспособности внутрибаковых УОС необходимо рассматривать ситуации, характеризующиеся минимальными значениями параметров, оказывающих стабилизирующее влияние на процессы формирования и поведения газожидкостных структур в компонентах топлива (наддув, осевая

перегрузка, и т.д.), и максимальными значениями дестабилизирующих факторов (совместное действие продольных и поперечных вибронагрузок, расход КТ из ТБ и т.п.).

В целом разработанная методика определения характеристик и параметров движения газовых включений при полетных вибрациях конструкции РН позволяет получать объективные количественные оценки запасов работоспособности внутрибаковых УОС, сокращать объемы и сроки их экспериментальной отработки.

1. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / Под ред. В. Н. Челомея. – М. : Машиностроение, 1978. – 238 с.
2. Козлов А. А. Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок / А. А. Козлов, В. Н. Новиков, Е. В. Соловьев. – М. : Машиностроение, 1988. – 352 с.
3. Чебаевский В. Ф. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов / В. Ф. Чебаевский, В. И. Петров. – М. : Машиностроение, 1973. – 192 с.
4. Кубенко В. Д. Динамика упругожидкостных систем при вибрационных воздействиях / В. Д. Кубенко, В. Д. Лакиза, В. С. Павловский, Н. А. Пельх. – К. : Наук. думка, 1988. – 256 с.
5. Богомаз Г. И. Колебания жидкости в баках (методы и результаты экспериментальных исследований) / Г. И. Богомаз, С. А. Сирота. – Днепропетровск : Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2002. – 306 с.
6. Венедиктов Б. Л. Самовозбуждение низкочастотных колебаний жидкости при высокочастотных колебаниях сосуда / Б. Л. Венедиктов, Р. А. Шибанов // Динамика КА и исследование космического пространства. – М. : Машиностроение, 1986. – С. 215 – 227.
7. Блоха И. Д. Численное моделирование свободных пространственных колебаний жидкости в емкостях сложной конфигурации / И. Д. Блоха, Г. И. Богомаз, А. Д. Николаев, С. А. Сирота // Науковий вісник НГУ. – 2006. – № 6. – С. 75 – 80.
8. Микишев Г. Н. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1971. – 564 с.
9. Блоха И. Д. Влияние продольных вибраций космической ступени ракеты-носителя на работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в системе питания маршевого двигателя / И. Д. Блоха, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко и др. // Техническая механика. – 2005. – №2. – С. 65 – 74.
10. Пилипенко О. В. Работоспособность внутрибаковых устройств обеспечения сплошности компонентов топлива в системе питания маршевой двигательной установки космических ступеней ракет-носителей / О. В. Пилипенко, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко и др. // Сб. науч. тр. «Аэрогазодинамика : проблемы и перспективы». – 2006. – Вып. 2. – С. 88 – 100.
11. Хасимото Х. Разрушение поверхности и образование пузырьков в столбе жидкости при вертикальных колебаниях / Х. Хасимото, С. Судо // Ракетная техника и космонавтика. – 1980. – Т. 18. – № 5. – С. 116 – 124.
12. Гройс Л. В. К вопросу о растворении газовых пузырьков в жидкости / Л. В. Гройс, Н. Е. Кванталиани // ИФЖ. – 1978. – Т. XXXIV, № 2. – С. 292 – 300.
13. Ефремов Г. И. Исследование гидродинамики барботажного слоя / Г. И. Ефремов, И. А. Вахрушев // Химия и технология топлив и масел. – 1969. – № 4. – С. 34 – 38.
14. Присняков В. Ф. Кипение / В. Ф. Присняков. – Киев : Наук. думка, 1988. – 240 с.
15. Кулинченко В. Р. Справочник по теплообменным расчетам / В. Р. Кулинченко. – Киев : Техніка, 1990. – 165 с.
16. Белов И. В. Исследование массообмена в системе газовых пузырей в жидкости / И. В. Белов, Е. В. Проколов // ПМТФ. – 1969. – № 1. – С. 116 – 121.
17. Покровский В. Н. Очистка сточных вод тепловых электростанций / В. Н. Покровский, Е. П. Аракчеев. – М. : Энергия, 1980. – 256 с.
18. Накоряков В. Е. Тепло- и массообмен в звуковом поле / В. Е. Накоряков, А. П. Бурдуков, А. И. Болдарев, П. Н. Терлеев. – Новосибирск : ИТФ СО АН СССР, 1970. – 253 с.
19. Ермашкевич В. Н. Гидро- и термодинамика насосных систем энергоустановок на четырехокиси азота / В. Н. Ермашкевич. – Минск : Наука и техника, 1987. – 287 с.
20. Швайцер Выделение газа в жидкостях и вопросы кавитации: Русский перевод / Швайцер, Цебекели // Journal of applied physics. – 1950. – V. 21, № 12. – P. 1218 – 1224.
21. Кузнецов В. И. Обобщенные условия равновесия газовых пузырей в жидкости / В. И. Кузнецов, Н. Ф. Свириденко. // Многофазные потоки в энергоустановках. – Харьков : ХАИ, 1988. – С. 10 – 16.
22. Дейч М. Е. Гидрогазодинамика / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. – М. : Энергоатом-издат, 1984. – 384 с.
23. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер, К. Ли. – М. : Мир, – 1991. – 504 с.
24. Давыдов С. А. Экспериментальные исследования процесса прорыва газовой фазы через тканую металлическую сетку / С. А. Давыдов // Техническая механика. – 2006. – № 2. – С. 120 – 126.

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

Получено 15.06.09,
в окончательном варианте 22.06.09