

ВЛИЯНИЕ ПОЛЕТНЫХ ВИБРАЦИЙ ВЕРХНИХ СТУПЕНЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОМ ГАЗОНАСЫЩЕННОМ ТОПЛИВЕ В БАКАХ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Изложены методические аспекты и предложен численно-аналитический подход к определению характеристик сорбционных процессов в топливных баках сложной конфигурации на основе моделирования вынужденных пространственных колебаний верхних ступеней жидкостных ракет-носителей с использованием метода конечных элементов. Показано, что полетные вибронагрузки на указанные ступени с частотами колебаний, близкими к собственным частотам пространственных колебаний системы «конструкция верхней ступени – жидкое топливо», могут существенно интенсифицировать процесс выделения растворенного газа в зонах с локальным понижением давления.

Викладено методичні аспекти і запропоновано чисельно-аналітичний підхід до визначення характеристик сорбційних процесів у паливних баках складної конфігурації на підставі математичного моделювання змусених просторових коливань верхніх ступенів рідинних ракет-носіїв з використанням методу скінченних елементів. Показано, що польотні вібронавантаження зазначених ступенів з частотами коливань, близькими до власних частот просторових коливань системи «конструкція верхнього ступеня – рідке паливо», можуть суттєво інтенсифікувати процес виділення розчиненого газу в зонах з локальним зниженням тиску.

Methodical aspects are presented and a numerical-analytical approach to define characteristics of sorption processes in fuel complex-configuration tanks, based on simulation of three-dimensional oscillations of the upper stages of liquid launch vehicles using the finite-element method, is proposed. It is shown that flight vibration loads on the stages under consideration with oscillation frequencies approximating proper frequencies of three-dimensional oscillations of the upper stage structure - liquid propellant system can essentially intensify the process of release of a dissolved gas in zones with a local pressure decrease.

Введение. Топливные отсеки современных верхних ступеней ракет-носителей (РН) представляют собой сопряженные тонкостенные конструкции сложной пространственной конфигурации с различного рода внутрибаковыми устройствами, частично заполненные жидкими компонентами топлива и находящиеся под давлением газа наддува [1, 2]. Характерные конструктивно-компоновочные схемы таких верхних ступеней РН приведены на рис. 1 – ступень А5ЕСА для РН «Ариан» [3]) и рис. 2 – концепция Центра им. М. В. Келдыша для РН «Союз» [4].

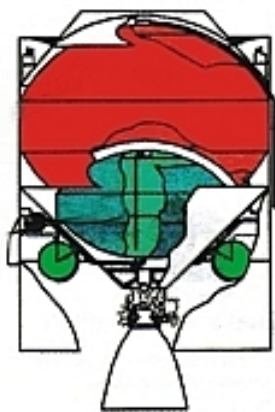


Рис.1

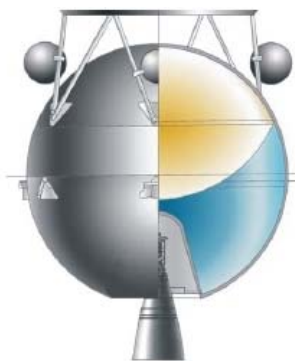


Рис.2

Специфические задачи полета РН, решаемые с помощью верхних ступеней, наряду с потенциальной возможностью динамической неустойчивости

© И.Д. Башлий, А.Д. Николаев, Н.Ф. Свириденко, 2011

верхних ступеней к поперечным колебаниям, наличием геометрической и массовой асимметрии верхних ступеней относительно продольной оси и значительной податливостью их конструкций обуславливают ряд особенностей их проектирования. Эти особенности проявляются, в частности, в развитии динамического взаимодействия масс жидких компонентов топлива, находящихся в сопряженных полостях топливных отсеков.

Полетные вибрации, обусловленные работой маршевых двигателей ступеней, оказывают существенное влияние на сорбционные процессы в их баках [3, 4, 6 – 8]. Заметим, что компоненты топлива (КТ) в баках верхних ступеней РН с целью удаления из них растворенных газов, негативно влияющих на эксплуатационные характеристики системы топливоподдачи, насыщены замещающим газом (как правило, гелием [5]). При колебаниях конструкции ступени с частотами от долей Гц и до 100 Гц инициируются разнообразные движения компонентов топлива (плескания, вращения и т.п.), сопровождающиеся возникновением в объеме топлива зон, где могут нарушаться условия динамического равновесия в системе “газ – жидкость” с образованием свободных газовых включений. Указанные процессы могут оказывать существенное влияние на функционирование систем топливоподдачи маршевого двигателя (МД) ступени, вплоть до срыва его устойчивой работы.

В этой связи достаточно отметить, что наличие в КТ свободных газовых включений в количестве ~ 1% приводит к снижению коэффициента быстроходности насосов МД на ~ 13% [9], а критическое содержание газа в КТ, приводящее к срыву их работы, составляет ~ 3 – 5% [10]. Указанное обстоятельство, наряду с требованием максимально возможной выработки бортового запаса компонентов топлива (97 % – 99 % [11]), обуславливает актуальность задачи определения влияния полетных вибраций на характер и интенсивность сорбционных процессов в газонасыщенных КТ на различных этапах полета верхних ступеней РН.

К настоящему времени опубликовано значительное количество работ, посвященных различным аспектам этой проблемы. В них предложены теоретические методы определения параметров собственных колебаний баков как оболочек вращения, частично заполненных жидкостью [12 – 13], разработаны методические подходы к оценке работоспособности внутрибаковых устройств обеспечения сплошности с учетом формирования газонасыщенных сред при продольных вибрациях РН [6 – 8].

Целью настоящей статьи является развитие предложенного в [6, 7] методического подхода к определению характеристик сорбционных процессов в баках топливных отсеков верхних ступеней РН с учетом особенностей их пространственной конфигурации и специфических условий виброн нагружения, связанных со значительным ростом влияния поперечных вибраций при маневрировании верхних ступеней с топливными баками. Установление на основе применения такого подхода закономерностей сорбционных процессов для указанных конструкций топливных отсеков позволит принять меры для обеспечения надежного функционирования систем питания МД верхних ступеней РН при решении различных полетных задач.

Характеристики сорбционных процессов в топливных баках верхних ступеней РН при полетных вибрациях верхних ступеней РН. Сорбционные процессы являются одним из видов массопередачи и оцениваются по таким характеристикам, как скорость протекания процесса массопередачи, параметры равновесия между газовой и жидкой фазами, которое устанавливает-

ся при весьма продолжительном их контакте в условиях, близких к квазистатическим, и др.

При снижении давления в газонасыщенных КТ до уровня давления насыщения P_H , создаются условия для десорбции (выделения) газа из раствора в свободное состояние. Центрами газовыделения являются находящиеся в компонентах топлива нерастворенные газовые пузырьки, механические примеси и т.п. [10]. Ввиду того, что уровень давления, при котором газ из раствора переходит в свободное состояние, как правило, значительно превышает давление насыщенных паров КТ верхних ступеней РН, допустимо рассматривать образующиеся пузырьки как чисто газовые включения. Под воздействием полетных вибраций в поле переменного давления КТ 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. «выпрямлению» знакопеременного диффузионного потока газа через изменяющуюся поверхность газового пузырька в условиях, весьма близких к равновесному состоянию с окружающей его жидкостью [6].

Амплитуда пульсаций давления A_P^{BD} , при превышении которой начинается рост пузырьков диаметром d_{II} , обусловленный процессом «выпрямленной газовой диффузии», определяется зависимостью [6]

$$A_P^{BD} = \sqrt{\frac{6 \cdot \sigma \cdot P_H}{d_{II}}}, \quad (1)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения.

С учетом того, что скорость сорбционных процессов при каждом отклонении от равновесного состояния пропорциональна степени пересыщенности раствора и текущему значению площади поверхности раздела фаз «газ – жидкость» (в конце такого отклонения система «газ – жидкость» приходит в равновесное состояние), в [6] получено соотношение для определения скорости «выпрямленной газовой диффузии» \dot{V} в объеме $\Delta V_{Ж}$, где амплитуда пульсаций давления с частотой f соответствует условию (1),

$$\dot{V} = fS \Delta V_{Ж} \left[\left(\frac{P_H + \bar{A}_P}{P_{CT}} - 1 \right) + \left(\frac{P_H - \bar{A}_P}{P_{CT}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{P_{CT} - \bar{A}_P}{P_{CT} + \bar{A}_P} \right)^{\frac{2}{3n}} \right] \left[1 - \exp \left(- \frac{0,346}{f \cdot T_{0,5}} \right) \right], \quad (2)$$

где $\bar{A}_P = 2A_P^{\max} / \pi$ – среднее значение амплитуды колебаний давления в газонасыщенной жидкости; A_P^{\max} – амплитуда гармонического колебания давления в жидкости относительно уровня статического давления P_{CT} в месте расположения объема $\Delta V_{Ж}$; S – постоянная растворимости газа, равная отношению объема, который он занял бы в нерастворенном состоянии при текущих значениях давления P_{CT} и температуры T , к объему жидкости, в которой он был растворен, определяемая по формуле [1]:

$$S = \chi(T) \cdot \frac{M_{Г}}{M_{Ж}} \cdot \frac{\rho_{Ж}}{\rho_{Г_0}} \cdot P_{CT} \cdot \frac{T}{273}, \quad (4)$$

где $\chi(T)$ – коэффициент Генри; $M_G, M_{Ж}$ – молекулярная масса газа и жидкости соответственно; $\rho_{G0}, \rho_{Ж}$ – плотности газа и жидкости при нормальных условиях ($P_0 = 10^5$ Па, $T_0 = 273^\circ\text{K}$); $T_{0,5}$ – период полувыведения, т.е. время выделения половины от общего количества растворенного в жидкости газа [6].

Образующееся в процессе десорбции включение свободного газа представляет собой “рой” газовых пузырьков, растущих вследствие “выпрямленной газовой диффузии” при пульсациях в поле переменного давления в жидкости. Изменение среднего диаметра отдельных пузырьков во времени, представляющее интерес для выбора рационального режима работы средств обеспечения запуска МД в невесомости [1], определяется соотношением [6]

$$d_{II}(\tau) = 0,046 \sqrt[3]{\frac{P_{CT}}{P_{CT} - \bar{A}_p} \left[\left(\frac{P_H + \bar{A}_p}{P_{CT} - \bar{A}_p} - 1 \right) + \left(\frac{P_H - \bar{A}_p}{P_{CT}} - 1 \right) \left(\frac{P_{CT} - \bar{A}_p}{P_{CT} + \bar{A}_p} \right)^{\frac{2}{3n}} \right]} f \tau \quad (4)$$

где τ – продолжительность колебательного процесса, с.

Как показали результаты экспериментов, проведенных на гидростенде станции “Мир”, после «отключения» возмущающего воздействия и наступления состояния невесомости происходит быстрое объединение отдельных пузырьков, находящихся в ограниченном объеме жидкости, в единое газовое включение (фрагмент).

Время его формирования определяется соотношением [15]

$$\tau_{\phi} = 1,15 \left(1 + 4,56 \eta^{\frac{1}{3}} \right) \left(\frac{\rho_{жс}}{\sigma} \right)^{0,5} d_{II}^{1,5}, \quad (5)$$

где η – безразмерное газосодержание среды.

Определение параметров колебаний компонентов жидкого топлива и характеристик сорбционных процессов в топливном отсеке сложной пространственной конфигурацией верхней ступени РН на основе численного моделирования динамической системы «конструкция верхней ступени – жидкое топливо». Для определения параметров пространственных движений жидкости в баках сложных конфигураций при различных граничных условиях и схемах нагружения признан наиболее эффективным и уже довольно широко используется метод конечных элементов. Геометрическую модель системы «конструкция верхней ступени – жидкость», отражающую в наиболее полной степени конструктивные особенности баков, целесообразно сформировать при помощи CAD (computer-aided design) средств автоматизированного проектирования [15]. Анализ рынка современных CAD систем показал, что по уровню функциональности, который определяется с учетом возможности поддержания ассоциативной связи с CAE системой (Computer Aided Engineering System) [15], лидируют так называемые «Hi-End» программные средства – Unigraphics, CATIA, Pro/E, Solid Works. Поэтому при разработке геометрической модели конструкции с жидким наполнением необходимо использовать один из этих программных продуктов.

Для проведения конечно-элементной дискретизации системы «конструкция бака – жидкость» целесообразно использовать подход с разбиением имеющихся сложных объемов и областей геометрической модели системы на простые и дальнейшей конечно-элементной схематизации и «сшивкой» в

САЕ системе [15]. При разработке конечно-элементной модели динамической системы «конструкция верхней ступени – жидкое топливо» элементы конструкции ступени, ее агрегаты и узлы могут быть представлены конечными элементами типа «упругая оболочка» и «сосредоточенная масса», а жидкое топливо – с помощью конечных элементов «трехмерная жидкость». При моделировании динамики такой системы необходимо учитывать:

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

- граничные условия, определяющие особенности силовых связей топливного отсека с конструкцией РН;

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

Параметры вынужденных пространственных колебаний ступени как совокупности дискретных элементов определяются из решения системы дифференциальных уравнений:

$$M \frac{d^2}{dt^2} \delta + C \frac{d}{dt} \delta + K \delta = F, \quad (6)$$

где M – матрица масс порядка $n \times n$; K – матрица жесткости порядка $n \times n$; C – матрица демпфирования порядка $n \times n$; δ – вектор узловых перемещений; $F = F_{\max} e^{i\omega_s t}$ – вектор внешних сил; F_{\max} – вектор амплитуд колебаний внешних сил с угловой частотой ω_s ; t – текущее время.

При задании значений компонент вектора сил F , действующих на конструкцию ступени от ее двигательной установки в направлении продольной и поперечной оси ступени, можно использовать статистические данные по амплитудам A_s и частотам колебаний ω_s конструкции ступени. Типичные значения полетных вибронагрузок на конструкцию верхних ступеней в сечении их стыковки с космическим аппаратом для находящихся в эксплуатации РН приведены в соответствующих справочниках пользователя (смотри, например, в [16]). Эти вибронагрузки классифицированы по диапазонам частот, для которых колебательные процессы имеют общий характер динамического взаимодействия конструкции РН, жидкого топлива в баках и МД.

Используемый при моделировании пространственных колебаний КТ в полостях топливного отсека ступени конечный элемент «трехмерная жидкость» предназначен для имитации колебательных движений жидкости внутри емкостей при отсутствии в них течений [15]. С помощью этого же элемента может производиться вычисление гидростатических давлений в баках с учетом явлений, связанных с взаимодействием жидкости и конструкции баков.

Для вычисления давления P в элементе «трехмерная жидкость» [15] используются уравнения, описывающие связь «напряжение – деформация»:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{bulk} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ R_x \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/S & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/S & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/S & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/B \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

где ε_{bulk} – относительное объемное сжатие жидкости; K – модуль объёмной упругости; P – давление; γ – деформация сдвига; S – искусственно вводимый малый коэффициент для придания элементу некоторой прочности на сдвиг $S = K * 10^{-9}$; τ – касательное напряжение; R_j – смещение из-за вращения вокруг оси j ; B – искусственно вводимый малый коэффициент для придания элементу некоторого сопротивления к вращательному движению на сдвиг $B = K * 10^{-9}$; M_j – скручивающее усилие относительно оси j .

Для определения состояния газонасыщенных КТ по результатам численного моделирования пространственных движений жидкого топлива в упругой конструкции топливного отсека ступени необходимо выявить в объеме жидкости зоны потенциального газовыделения, в которых давление при колебаниях опускается ниже давления насыщения растворенного в КТ газа, т.е. $P_{CT} - \bar{A}_p \leq P_H$. Количественная оценка объема $\Delta V_{ж}$, в котором осуществляется процесс десорбции растворенного в КТ газа, рассчитывается суммированием соответствующих объемов конечных элементов «трехмерная жидкость». Данные амплитуд колебаний давления жидкого топлива в различных сечениях топливного отсека являются достаточными величинами для оценок характеристик (1) – (5) сорбционных процессов при различных условиях виброн нагружения ступени.

Скопления образовавшихся в жидком топливе газовых пузырьков, находящиеся в поле массовых сил, при определенных соотношениях между частотой собственных колебаний системы и частотой внешнего воздействия, могут всплывать к свободной поверхности, оставаться во взвешенном состоянии или мигрировать в направлении, противоположном действию массовых сил [6]. Причиной этого является наложение пульсаций объема включений на их движение в КТ. Это определяет мгновенную вертикальную составляющую скорости движения, которая рассчитывается при помощи полученных из решения задачи (6) параметров колебательного движения КТ.

В динамическом поведении такой газожидкостной системы скопление газовых пузырей выполняет роль упругого элемента, изменяющего характеристики системы в целом, которые могут быть учтены при задании параметров упругости K соответствующих элементов, имитирующих движение КТ в задаче (6). Можно выделить следующие режимы поведения рассматриваемой газожидкостной среды, подвергающейся вибрационным воздействиям:

– стационарный режим вибрационной устойчивости колебательной системы «жидкость – газовые включения» в области резонанса, когда в жидкости, содержащей газовые включения, происходит опускное движение и устойчивое удержание скопления включений на днищах баков. При этом собст-

венная частота новой колебательной системы определяется с учетом объема газа $\Delta V_{ж}$ в этом скоплении и продолжительности колебательного процесса;

– режим переходного процесса и расслоения в нелинейной колебательной системе «жидкость – газовые включения», когда после захвата и устойчивого удержания скопления включений (при продольных колебаниях ступени у основания жидкостного столба) происходит его рост за счет присоединения дополнительных газовых включений.

При этом колебания скопления все более отстают по фазе от колебаний ступени, а амплитуда колебаний давления \bar{A}_p увеличивается. По мере роста объема скоплений газовых включений происходит изменение собственной частоты колебательной системы, и при достижении определенного рассогласования частоты колебаний системы и частоты вибронагружения скопление пузырей отрывается от дна бака и всплывает в жидкости. Уровень, на котором скопление газовых включений перестает всплывать под действием архимедовой силы, определяется соотношением частоты вынужденных колебаний системы «конструкция верхней ступени – жидкость (с газовыми включениями)» и парциальной частоты этого скопления.

Из указанных режимов поведения газожидкостных сред в компонентах топлива, находящихся в подвергающемся воздействию полетных вибраций топливном отсеке верхней ступени РН, наиболее критичным, с точки зрения обеспечения устойчивости процесса подачи КТ в топливные магистрали двигателя, является режим, связанный с началом опускного движения газовых включений и их массовым поступлением к внутриваковым устройствам обеспечения сплошности. В случае последующего их проникания сквозь фазоразделители к заборным устройствам это может негативно отразиться на работоспособности двигателя ступени вплоть до срыва его рабочего процесса. Виброперегрузки и обусловленные ими колебания давления КТ, соответствующие началу опускного движения газовых включений на исследуемой глубине жидкого топлива, называются критическими (A_g^{kp} и A_p^{kp}) [7, 8]. Они определяются локальными значениями параметров поля давлений в “точке” местонахождения газового включения с продольной координатой z , т.е. амплитуды колебаний давления $A_p(z)$ и ее градиента $\frac{d A_p}{d z}$, оценку значений которых при заданных параметрах вибрации конструкции ступени можно получить из решения задачи (6).

В целом предложенный методический подход позволяет получать расчетные оценки характеристик состояния газонасыщенных КТ при воздействии на топливный отсек ступени полетных вибраций, включая скорость газовыделения, объем и местонахождение включений свободного газа в виде скопления (“роя”) пузырьков.

Применение разработанного методического подхода к определению параметров колебаний жидкого топлива и характеристик сорбционных процессов в топливном отсеке сложной пространственной конфигурации. В качестве примера применения разработанного методического подхода для анализа сорбционных процессов в баках проведено исследование колебаний верхней ступени РН со сложной пространственной конфигурацией топливного отсека, концептуально близкой к представленной на рис. 2 конструкции верхней ступени Исследовательского центра имени М. В. Келдыша [4].

Величины осевой перегрузки ступени, параметры виброперегрузок ступени при полетных вибрациях гармонического характера, обусловленных работой маршевого двигателя, типичны для ракеты легкого класса и соответствуют данным [16].

При анализе баки горючего и окислителя, рама маршевого двигателя, маршевый двигатель моделировались конечными элементами «упругая оболочка»; жидкое топливо в баках ступени представлялось с помощью конечных элементов «трехмерная жидкость»; баллоны системы наддува, системы запуска, трубопроводы системы питания маршевого ЖРД и другие вспомогательные системы моделировались с помощью элементов «сосредоточенная масса». В результате «разбиения» конструкции ступени с жидким наполнением топливных баков на конечные элементы с использованием средств систем компьютерного моделирования [15] получено от 7000 до 10909 узлов расчетной сетки (в зависимости от уровня жидкого топлива). При этом для конечных элементов, имитирующих колебательное движение конструкции ступени, относительный коэффициент демпфирования колебаний полагался равным 2 %, для конечных элементов «трехмерная жидкость» – 0,5% от его критического значения. В виду чрезвычайной сложности моделирования колебательного движения внутрибаковых элементов конструкции, их влияние на характер динамического поведения жидкости учтено в расчетной схеме посредством введения сил сопротивления в соответствующих элементах жидкости, при которых относительные коэффициенты демпфирования элементов при описании колебательного движения элементов «трехмерная жидкость» увеличивались до 5 - 10 % от критического значения. При выборе вышеуказанных значений коэффициентов демпфирования элементов верхней ступени были использованы данные экспериментальных исследований, обобщенные в работах [12, 13].

С использованием разработанной конечно-элементной модели верхней ступени с топливным отсеком, частично заполненным КТ, рассчитаны:

– собственные частоты колебаний ступени в продольном направлении – 0,655 Гц; 14,3 Гц и 27,9 Гц;

– собственные частоты колебаний ступени в поперечном направлении – 0,57 Гц; 17,7 Гц, и 26,3 Гц;

– амплитуды пространственных колебаний конструкции ступени и амплитуды колебаний давления компонентов топлива при гармонических продольно-поперечных колебаниях силового шпангоута полости горючего с частотой ω_s .

На основании анализа результатов моделирования пространственных колебаний исследуемой верхней ступени РН установлено, что параметры вынужденных колебаний жидкости (формы, частоты, амплитуды) зависят от упругих и массовых характеристик топливного бака, т.к. в исследуемом диапазоне частот от 5 Гц и до 100 Гц при опорожнении бака изменяются собственные частоты колебаний динамической системы «конструкция бака – жидкое топливо».

Результаты численного моделирования пространственных колебаний исследуемой ступени РН с характерной для современных верхних ступеней пространственной конфигурацией топливного отсека показали, что последняя является определяющим фактором влияния полетных вибраций на характер и интенсивность сорбционных процессов в газонасыщенных компонентах топлива. Эта особенность современных конструкций верхних ступеней наиболее

существенно проявляется на частотах, близких к частотам доминирующих тонов гидроупругого взаимодействия конструкции топливного отсека и находящихся в нем жидких компонентов топлива.

На рис. 3 представлено распределение расчетных амплитуд колебаний давления КТ (в 10^5 Па) по продольному сечению жидкого топлива в полостях окислителя (на рисунке – верхняя) и горючего топливного отсека исследуемой ступени РН при продольно-поперечных гармонических колебаниях ее конструкции с частотой 27,8 Гц, близкой к собственной частоте 27,9 Гц продольных колебаний ступени и к частоте 26,3 Гц ее поперечных колебаний. Некоторые элементы жидкости, колебательные движения которых происходили «в противофазе», обозначены с отрицательными значениями амплитуд.

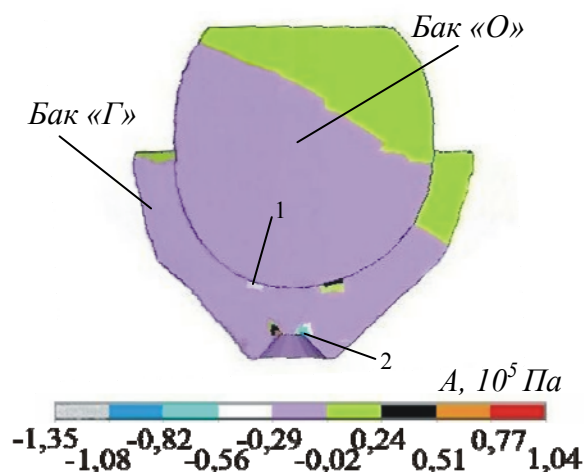


Рис. 3

Как следует из результатов расчета, при вынужденных продольно-поперечных колебаниях конструкции ступени с указанной частотой реализуется режим, при котором происходят значительные поперечные перемещения жидкого горючего и конструкции бака окислителя, погруженного в полость горючего. Это приводит к формированию зон с локальным понижением давления горючего в «подбрюшье» бака окислителя (на рис.3 обозначено цифрой 1) и в местах над устройствами обеспечения

сплошности (отмечено цифрой 2 на рисунке), установленными вблизи от заборных устройств бака горючего. В данном расчетном случае суммарный объем зон потенциального газовыделения $\Delta V_{\text{ж}}$ составил приблизительно 0,4% от объема горючего в баке. Таким образом, с учетом особенностей конфигурации исследуемого топливного отсека определены координаты зон десорбции растворенного газа при полетных вибрациях его конструкции.

Полученные значения амплитуд колебаний давления КТ и их распределения для различных сечений топливного отсека ступени позволяют рассчитать основные характеристики (1) – (5) сорбционных процессов, а также градиенты давления для различных направлений и величины критических виброперегрузок (A_g^{kp} и A_p^{kp}), необходимые для оценки работоспособности внутрибаковых средств обеспечения сплошности КТ.

Выводы. Таким образом, на основании проведенного исследования:

- методический подход к определению характеристик сорбционных процессов в жидком топливе верхних ступеней РН развит для расчета влияния продольно-поперечных полетных вибраций баков сложной пространственной конфигурации;
- показано, что определяющим фактором влияния вибраций ступени на параметры газовых включений, объемы и зоны формирования свободных газовых включений в массе КТ и, следовательно, на работоспособность уст-

ройств обеспечения сплошности КТ в баках, является пространственная конфигурация конструкции топливных отсеков верхних ступеней РН;

• установлено, что наиболее существенными для процесса десорбции жидкого топлива являются полетные вибрации с частотами, близкими к частотам низших тонов динамической системы «конструкция ступени – жидкое топливо», т.е. к частотам колебаний свободной поверхности жидкости и к частотам гидроупругого взаимодействия конструкции и жидкого топлива.

1. Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / Под ред. В. Н. Челомея. – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с.
2. Полухин Д. А. Отработка пневмогидросистем двигательных установок ракет-носителей и космических аппаратов с ЖРД / Д. А. Полухин, В. М. Ореценко, В. А. Морозов. – М.: Машиностроение, 1987. – 247 с.
3. Louaas E. Dynamic and acoustic environments with Ariane 5 new version ASECA / E. Louaas, O. Ricouart, M. Bourgoin // Spacecraft and launch Vehicle Dynamic Environment Workshop. – El Segundo, 2005. – June 21 - 23, 2005, p. 205 - 211.
4. Официальный сайт Исследовательского центра имени М. В. Келдыша (г. Москва, Россия). <http://www.kerc.msk.ru/ipg/development/rb2.pdf>
5. Касаткин А. Г. Процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: Химия, 1973. – 478 с.
6. О. В. Пилипенко Сплошность газонасыщенных компонентов топлива при полетных вибрациях жидкостной ракеты-носителя / О. В. Пилипенко, А. Н. Заволока, А. Д. Николаев, Н. Ф. Свириденко, А. Н. Маценко, В. Н. Бичай // Техническая механика. – 2009. – № 4. – С. 3 – 16.
7. 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.
8. 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.
9. Чебаевский В. Ф. Кавитационные характеристики высокооборотных шнеко-центробежных насосов / В. Ф. Чебаевский, В. И. Петров – М.: Машиностроение, 1973. – 192 с.
10. Васильев Ю. Н. Устройства для дегазации жидкого топлива перед насосами ракетного двигателя / Ю. Н. Васильев, В. И. Тихомиров / Изв. РАН. Энергетика. – 2003. – № 4. – С. 51 – 57.
11. Anglim D. D. Low-G testing of the Space Shuttle OMS propellant tank / D. D. Anglim. – “AIAA Paper”. – 1979. – № 1258, – P. 1 – 7.
12. Микишев Г. Н. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1971. – 564.
13. SLOSH Suppression // NASA Space Vehicle Design Criteria (Structure). – National Aeronautic and Space Administration. – 1969, May. – NASA SP-8031. – 33 p.
14. Перфильев Л. А. Исследование вопросов гидромеханики в условиях невесомости на борту орбитальной станции «Мир» / Л. А. Перфильев, Г. Г. Подобедов, Б. А. Соколов // Изв. РАН. Энергетика. – 2003. – № 4. – С. 44 – 50.
15. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – Санкт-Петербург: Питер, 2004. – 560 с.
16. Soyuz User's Manual / Issue 3, Starsem, Revision 0. – April 2001. – 204 p.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 29.05.11,
в окончательном варианте 29.06.11