

ВЛИЯНИЕ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В БАКАХ И КОНСТРУКЦИОННОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ НА ЕЕ ПРОДОЛЬНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Потеря продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) происходит при резонансном взаимодействии низкочастотных процессов в маршевой жидкостной ракетной двигательной установке (ЖРДУ) с упругими продольными колебаниями корпуса РН, которые, как известно, характеризуются слабым демпфированием. Для обеспечения продольной устойчивости обычно принимаются меры, направленные на устранение опасного сближения собственных частот колебаний корпуса РН и ЖРДУ. Цель настоящей статьи – используя методы математического моделирования, исследовать влияние демпфирования колебаний жидкого топлива в баках и упругих колебаний конструкции корпуса РН на ее продольную устойчивость и оценить возможность обеспечения продольной устойчивости РН путем увеличения демпфирования отдельных динамических звеньев ее корпуса. Эту задачу предложено решать на основе численного исследования математической модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ – корпус РН”, в которой корпус схематизирован разветвленной цепочкой осцилляторов с вязким трением. При исследовании используется концепция Ляпунова об устойчивости системы по первому приближению. Анализ устойчивости и определение параметров собственных колебаний динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” выполняется на основе решения проблемы собственных значений. Изложены результаты использования предложенного подхода применительно к трехступенчатой жидкостной РН. Определены доминирующие гармоники продольных колебаний РН и основные факторы, влияющие на их затухание. Показано, что при повышенном демпфировании колебаний жидкого топлива в баке окислителя и горючего первой ступени устраняется продольная неустойчивость рассматриваемой РН по отношению ко второму тону колебаний ее корпуса и «смягчается» неустойчивость по отношению к первому тону.

Втрата позовжньої стійкості рідинних ракет-носіїв (РН) відбувається при резонансній взаємодії низькочастотних процесів у маршовій рідинній ракетній двигунній установці (РРДУ) із пружними позовжніми коливаннями корпусу РН, які, як відомо, є слабо демпфованими. Для забезпечення позовжньої стійкості звичайно вживаються заходи, спрямовані на усунення небезпечного зближення власних частот коливань корпусу РН і РРДУ. Мета цієї статті – використовуючи методи математичного моделювання, дослідити вплив демпфування коливань рідкого палива в баках і пружних коливань конструкції корпусу РН на її позовжню стійкість та оцінити можливість забезпечення позовжньої стійкості РН шляхом збільшення демпфування окремих динамічних ланок її корпусу. Цю задачу запропоновано вирішувати на основі чисельного дослідження математичної моделі низькочастотної динаміки системи “РРДУ – корпус РН”, в якій корпус схематизовано розгалуженим ланцюжком осциляторів з в'язким тертям. При дослідженні використовується концепція Ляпунова про стійкість системи по першому наближенню. Аналіз стійкості та визначення параметрів власних коливань динамічної системи “РРДУ – корпус РН” виконується на основі вирішення проблеми власних значень. Викладено результати використання запропонованого підходу стосовно триступеневої рідинної РН. Визначено домінуючі гармоніки позовжніх коливань РН і основні фактори, які впливають на їх затухання. Показано, що при підвищеному демпфуванні коливань рідкого палива в баку окислювача та пального першого ступеня усувається позовжнє нестійкість розглянутої РН по відношенню до другого тону коливань її корпусу і «пом'якшується» нестійкість по відношенню до першого тону.

The longitudinal instability (POGO) of liquid launch vehicles (LV) occurs with a resonant interaction of low-frequency processes in liquid rocket cruise propulsion (LRCP) with longitudinal elastic vibrations of the LV body, which, as known, are characterized by weak damping. To ensure a longitudinal stability, precautions are usually taken to eliminate a dangerous convergence of natural frequencies of vibration of the LV body and the propulsion system. The paper goal is to investigate the effects of damping the oscillations of the liquid propellant into the tanks and damping elastic vibrations of the LV body on POGO and to estimate the possibility of providing the LV longitudinal stability by increasing individual damping the dynamic elements of its body, using the methods of a mathematical simulation. It is proposed to solve this problem by a numerical study of a mathematical model of the low-frequency dynamics of the LRCP – LV body system, in which the body is schematized by a branched chain of viscous friction oscillators. The Lyapunov concept for the system stability in a first approximation is used. Based on the solution of problems of eigenvalues, the stability analysis and the determination of the parameters of natural oscillations of a dynamical system of the LRCP and the LV body are performed. The results of the proposed approach are reported as applied to the three-stage liquid launch vehicle. The dominant harmonics of the LV longitudinal vibrations and the main factors for damping are found. It is shown that a longitudinal instability of the LV under consideration is eliminated with reference to the second mode of the LV body vibrations and is "softened" with reference to the first mode after increasing of damping oscillations of the liquid propellant into the oxidizer and fuel tanks of the first stage.

Введение. Одной из важных задач, возникающих при создании многоступенчатых ракет-носителей (РН) с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД), является обеспечение их продольной устойчивости. Продольная неустойчивость РН классифицируется в теории автоматического регулирования ЖРД как неустойчивость автоколебательного контура “жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус РН”, в котором корпус РН является слабо демпфированной колебательной системой, а ЖРД – мощным источником энергии неколебательной природы [1 – 3]. Потеря продольной устойчивости происходит на участке активного полета РН из-за несовместимости характеристик упругих продольных колебаний корпуса РН и низкочастотных процессов в маршевой ЖРДУ. Наиболее благоприятные для нее условия создаются при резонансном взаимодействии ЖРДУ и корпуса РН. Поскольку диапазоны изменения низших собственных частот колебаний жидкости в питающих магистралях и упругих продольных колебаний корпуса многоступенчатых жидкостных РН пересекаются, эти ракеты предрасположены к потере продольной устойчивости [1 – 5].

В связи с этим для обеспечения продольной устойчивости РН обычно принимают меры, направленные на такое изменение динамических характеристик питающих магистралей или корпуса РН, которое позволяет устранить опасное сближение их собственных частот колебаний. К числу таких мер относится установка в питающих магистралях (или в самом ЖРД) газожидкостных аккумуляторов, снижающих низшую частоту колебаний жидкости в питающей магистрали; увеличение давления наддува баков, повышающее эту частоту; установка на ракете динамических гасителей колебаний (антивибраторов), которые настроены на опасную частоту колебаний корпуса и подавляют ее в спектре вибраций ракеты (напр., [1 – 7]).

С другой стороны, теоретически существует возможность обеспечения продольной устойчивости жидкостной РН за счет увеличения демпфирования доминирующих тонов продольных колебаний ее корпуса. Чтобы дать оценку этой возможности, необходимо исследовать влияние диссипации энергии в различных элементах корпуса РН на ее продольную устойчивость. Такое исследование не может быть выполнено на основе традиционной математической модели низкочастотной динамики системы “ЖРДУ – корпус РН” [1 – 5], поскольку в ней описание продольных колебаний корпуса РН сведено к описанию нескольких изолированных тонов этих колебаний, причем их параметры вычисляются без учета диссипации энергии, а значения декрементов колебаний полагаются постоянными. Предложенный в статье [8] подход к математическому моделированию продольных колебаний жидкостной РН позволяет построить математическую модель системы “ЖРДУ – корпус РН”, в которой динамическое взаимодействие ЖРДУ и корпуса РН описано на уровне взаимодействия их динамических звеньев. Такая модель является эффективным инструментом для исследования влияния упруго-массовых и диссипативных характеристик отдельных динамических звеньев корпуса РН на ее продольную устойчивость.

Целью этой статьи является теоретическое (численное) исследование влияния демпфирования колебаний жидкого топлива в баках и конструкционного демпфирования корпуса жидкостной РН на ее продольную устойчивость и оценка возможности обеспечения продольной устойчивости РН путем увеличения демпфирования колебаний отдельных элементов корпуса.

Постановка задачи и выбор метода. Сформулированная выше задача сведена к исследованию влияния диссипации энергии колебаний отдельных динамических звеньев корпуса жидкостной РН на параметры собственных колебаний многоконтурной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” и решается в следующей постановке.

1. Влияние диссипации энергии колебаний жидкого топлива в баках и конструкционного демпфирования жидкостной РН на ее продольную устойчивость исследуется на основе линеаризованной математической модели низкочастотной ($f_{\max} = 30 - 50$ Гц) динамики системы “ЖРДУ – корпус РН” с “замороженными” коэффициентами, описывающей динамическое взаимодействие ЖРДУ и корпуса РН в частотном диапазоне, характерном для продольных колебаний жидкостных РН.

2. Используемая при исследовании математическая модель динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” строится на основе подхода, предложенного в [8]. Особенность этой модели состоит в том, что упругие продольные колебания корпуса описываются в ней как колебания многосвязной неконсервативной системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” [9].

3. Анализ устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” выполняется в соответствии с концепцией Ляпунова об устойчивости по первому приближению и основывается на решении алгебраической проблемы собственных значений.

4. Параметры собственных колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” определяются на основе расчета спектра собственных значений $\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ матрицы ее коэффициентов. Для этого линеаризованная математическая модель исследуемой системы должна быть представлена в стандартной для линейных динамических систем форме записи – в форме Коши:

$$\dot{z}(t) = Az(t), \quad (1)$$

где $z = [\delta z_1, \dots, \delta z_n]$ – вектор отклонений $\delta z_j = z_j - \bar{z}_j$ переменных z_j от номинальных значений \bar{z}_j ; \dot{z}_j – производная z_j по времени; t – текущее время; n – порядок системы; A – матрица n -го порядка коэффициентов системы.

5. При анализе устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” по спектру матрицы рассматриваются только собственные значения (комплексные собственные частоты колебаний) $\lambda_j = -\alpha_j + j\omega_j$ с ограниченной по величине мнимой частью ($0 < \omega_j \leq 2\pi f_{\max}$), которые находятся вблизи мнимой оси или справа от нее. Область локализации таких собственных значений на комплексной плоскости задается следующим образом:

$$\Omega = \{\lambda_j = -\alpha_j + j\omega_j : 0 < \omega_j \leq \omega_{\max}; \alpha_j \leq \alpha_{\max}; \psi_l(\alpha_j, \omega_j) \leq 0, \quad l = 1, \dots, s\}, \quad (2)$$

где $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$; f_{\max} – верхняя граница частотного диапазона моделируемых процессов; $\alpha_{\max} \leq 1 \dots 1,5 f_{\max}$; $\psi_l(\alpha_j, \omega_j) \leq 0, \quad l = 1, \dots, s$ – возможные дополнительные ограничения.

6. Определение динамических звеньев корпуса РН, демпфирование которых оказывает наибольшее влияние на продольную устойчивость РН (далее будем называть их “ключевыми” звеньями для доминирующих комплексных частот или доминирующих гармоник), проводится на основе результатов па-

раметрического исследования динамических систем “ЖРДУ – корпус РН”, “конструкция РН – жидкое топливо в баках”. При этом множество варьируемых параметров составляют коэффициенты демпфирования отдельных элементов системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках”, а исследование выполняется на основе расчета комплексных собственных частот колебаний указанных систем.

7. Возможность обеспечения устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” определяется в результате расчета ее комплексных собственных частот при увеличении коэффициентов демпфирования “ключевых” динамических звеньев корпуса РН, которое производится в пределах реального диапазона возможных значений этих коэффициентов.

Построение математической модели. В соответствии с [8], при моделировании динамического взаимодействия ЖРДУ и корпуса РН используется математическая модель упругих продольных колебаний корпуса РН, рассматриваемого как многосвязная диссипативная система “конструкция РН – жидкое топливо в баках”, и математическая модель динамической системы “питающие магистрали – маршевые ЖРД”, описывающая низкочастотные процессы в ЖРДУ.

Линеаризованная математическая модель низкочастотной динамики ЖРДУ в общем случае представляет собой систему дифференциально-алгебраических уравнений с запаздываниями, которая преобразуется к системе дифференциально-алгебраических уравнений [8, 12]:

$$B\dot{Y}(t) + CY(t) = 0, \quad (3)$$

где $Y = \{\delta y_1, \dots, \delta y_{n_d}\}$ – вектор-столбец вариаций $\delta y_i = y_i - \bar{y}_i$ параметров динамической системы “питающие магистрали – маршевые ЖРД”; B, C – действительные квадратные матрицы коэффициентов этой системы, причем матрица B в общем случае является вырожденной.

Линейная математическая модель свободных продольных колебаний упругого корпуса РН строится на основе его схематизации разветвленной цепочкой осцилляторов с демпфированием (вязким трением), которые могут совершать колебательные движения только в направлении продольной оси РН [10, 11]. В модели учитывается по 2–3 тона свободных продольных колебаний жидкого топлива в топливных баках и по одному тону механических колебаний маршевого ЖРД каждой ступени РН (точнее, системы “упругая рама – ЖРД”). При этом несущая конструкция корпуса РН схематизируется цепочкой из n_z “стержневых” элементов – дискретных масс, соединенных упруго-диссипативными связями. Продольные колебания ЖРД и жидкого топлива в баках моделируются одиночными осцилляторами с демпфированием. Пружины этих осцилляторов соединены с теми “стержневыми” элементами, которые включают в себя силовые шпангоуты двигателей и баков. Продольные колебания корпуса РН под действием возмущающих сил со стороны ЖРДУ описываются системой линейных дифференциальных уравнений в отклонениях [8]:

$$m_i \delta \ddot{x}_i + b_{i+1} (\delta \dot{x}_i - \delta \dot{x}_{i+1}) + c_{i+1} (\delta x_i - \delta x_{i+1}) + b_i (\delta \dot{x}_i - \delta \dot{x}_{i-1}) + c_i (\delta x_i - \delta x_{i-1}) + \sum_s m_{i,s} \delta \ddot{x}_{i,s} = \sum_k \delta Q_i^{(k)}, \quad (4)$$

$$m_{i,s} \delta \ddot{x}_{i,s} = c_{i,s} (\delta x_i - \delta x_{i,s}) + b_{i,s} (\delta \dot{x}_i - \delta \dot{x}_{i,s}) + \sum_l \delta Q_{i,s}^{(l)}, \quad i = 1, \dots, n_z, \quad (5)$$

где m_i – масса осциллятора, имитирующего колебания i -го “стержневого” элемента; $m_{i,s}$ – масса осциллятора, упруго присоединенного к осцилятору с массой m_i и имитирующего низшие тона продольных колебаний жидкого топлива в баках ($s=1, 2$) или маршевого ЖРД ($s=3$); c_i , $c_{i,s}$ и b_i , $b_{i,s}$ – жесткости и коэффициенты демпфирования i -й и i,s -й связи; δx_i , $\delta x_{i,s}$ – продольные перемещения масс m_i , $m_{i,s}$ относительно положения их статического равновесия; $Q_i^{(k)}$, $Q_{i,s}^{(l)}$ – возмущающие силы, приложенные к осциляторам массой m_i и $m_{i,s}$ соответственно.

Таким образом, математическая модель, описывающая взаимодействие упругих продольных колебаний корпуса РН и низкочастотных процессов в ЖРДУ, может быть представлена в матричном виде двумя уравнениями

$$M_C \ddot{X}(t) + B_C \dot{X}(t) + C_C X(t) = F_C Y(t), \quad (6)$$

$$B \dot{Y}(t) + C Y(t) = F_{DU} \ddot{X}(t), \quad (\det |B| = 0), \quad (7)$$

где $X = \{\delta x_1, \dots, \delta x_{n_c}\}$ – вектор-столбец продольных перемещений координат центров масс всех n_c элементов системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” относительно положения их статического равновесия; M_C , B_C , C_C – действительные квадратные матрицы, задающие массы элементов этой системы, коэффициенты демпфирования и, соответственно, жесткости связей между элементами; F_{DU} , F_C – квадратные матрицы коэффициентов при возмущениях переменных, которые действуют на ЖРДУ со стороны корпуса и, соответственно, на корпус со стороны ЖРДУ (произведение $F_C Y$ матрицы F_C на вектор Y задает действующие на элементы корпуса РН возмущения, вызванные колебаниями параметров ЖРДУ, а аналогичное произведение $F_{DU} \ddot{X}(t)$ – действующие на ЖРДУ возмущения, обусловленные упругими продольными колебаниями корпуса РН).

Методика исследования. Исследование влияния демпфирования колебаний жидкого топлива в баках и конструкционного демпфирования корпуса жидкостной РН на ее продольную устойчивость предполагает последовательное решение следующих задач.

Первая задача – определить параметры доминирующих собственных колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” и сделать заключение о продольной устойчивости жидкостной РН. Эта задача решается на основе расчета комплексных собственных частот колебаний (спектра матрицы) системы “ЖРДУ – корпус РН” [12]. Предварительно система дифференциально-алгебраических уравнений (6) – (7), описывающая продольные колебания жидкостной РН, преобразуется к виду (1). Полученная в результате матрица A коэффициентов системы представляет собой действительную квадратную

матрицу общего несимметричного вида. Для расчета спектра собственных значений $\{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$ этой матрицы применяется QR-алгоритм.

Параметры собственных колебаний системы (1) определяются собственными значениями $\lambda_j = -\alpha_j \pm j\omega_j$ матрицы A : $f_j = \omega_j / 2\pi$ – i -я собственная частота колебаний системы, $\alpha_j = -\text{Re } \lambda_j$ – коэффициент затухания (при $\alpha_j < 0$ – нарастания) ее колебаний с частотой f_j . В настоящей статье в качестве показателя затухания колебаний системы (1) рассматривался параметр $\delta_j = \alpha_j / f_j$, который по форме представления аналогичен логарифмическому декременту одночастотных колебаний.

Доминирующими являются 2–3 комплексные частоты $\lambda_j \in \Omega$ с наибольшей действительной частью (наименьшим показателем затухания колебаний). Отрицательное значение хотя бы одного показателя затухания указывает на неустойчивость системы. Признаком продольной неустойчивости являются отрицательные значения показателей затухания колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” для собственных частот, соответствующих собственным частотам упругих продольных колебаний корпуса РН.

Вторая задача – определить, какие динамические звенья системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” являются “ключевыми” для доминирующих собственных частот колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН”. Эту задачу предложено решать на основе численного исследования влияния демпфирования отдельных динамических звеньев системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” на ее комплексные частоты колебаний, соответствующие доминирующим гармоникам системы “ЖРДУ – корпус РН”. Отметим, что свободные продольные колебания системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” описываются уравнениями (4) – (5) или матричным уравнением (6), в которых правая часть, задающая возмущения, равна нулю. Расчет комплексных частот колебаний этой системы выполняется таким же методом, как и системы “ЖРДУ – корпус РН”. “Ключевые” звенья для доминирующих гармоник определяются в результате сравнительного анализа показателей затухания собственных колебаний системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках”, вычисленных без учета диссипации энергии и с учетом диссипации энергии лишь в одном динамическом звене этой системы.

Следует отметить, что корпус РН является слабо демпфированной системой. Декременты колебаний его звеньев малы (напр., [13 – 18]) и в силу этого практически не влияют на его собственные частоты. Таким образом, изменение демпфирования колебаний звеньев системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” не влияет на основную причину потери продольной устойчивости – сближение собственных частот корпуса и ЖРДУ.

Отметим также, что демпфирование считается “слабым”, если значения логарифмического декремента колебаний δ меньше, чем 0,2 [19]. Такие значения декремента колебаний жидкости в баках характерны для баков без демпфирующих устройств, а также для баков с демпфирующими устройствами при малых амплитудах колебаний [16]. При $\delta > 0,2$ демпфирование считается «повышенным».

Для увеличения демпфирования колебаний жидкого топлива в баке в полости бака устанавливаются различные демпфирующие элементы [15, 16, 20, 21]: диафрагма, жестко связанная с верхним днищем бака; наборы продоль-

ных перегородок или плоских кольцевых ребер, приваренных к стенкам баков; радиальные, кольцевые или крестообразные перегородки на днищах; вертикальные и горизонтальные демпфирующие перегородки с отверстиями, жестко соединенные с обечайкой, и др.

Величина демпфирования колебаний жидкости в баке определяется на основе результатов эксперимента либо на основе экспериментальных данных по аналогичным системам, либо с использованием эмпирических формул. Практические рекомендации по теоретическому определению величины демпфирования колебаний жидкого топлива в баках жидкостных РН для построения модели этих колебаний (в виде механического аналога – осциллятора) даны в работе [17]. В ней приведены данные из различных источников для оценки демпфирования колебаний жидкости в цилиндрических баках с плоским и сферическим днищем, в сферических и конических баках, а также помещены ссылки на источники, в которых имеются аналогичные данные для сфероидальных и тороидальных баков.

Что касается конструкционного демпфирования, то при упругих продольных колебаниях корпуса РН значения коэффициента диссипативных потерь η_s ($\eta_s \approx \delta/\pi$) находятся в таких диапазонах [13]: (0,001; 0,01) – для материального демпфирования в металле; (0,01; 0,05) – при соединении сваркой и клепкой; (0,02; 0,1) – при резьбовых и винтовых соединениях. С другой стороны, значения логарифмических декрементов доминирующих гармоник упругих продольных колебаний ракетных конструкций в целом должны находиться в диапазоне от 0,015 до 0,35 (напр., [4, 22]).

Третья задача – определить комплексные собственные частоты колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” при увеличенном демпфировании “ключевых” звеньев корпуса РН и сделать заключение об устойчивости этой системы.

Результаты исследования. Исследование влияния демпфирования колебаний жидкого топлива в баках и конструкции корпуса РН на продольную устойчивость проводилось применительно к трехступенчатой жидкостной РН, маршевые двигатели которой имеют насосную систему подачи топлива и выполнены по схеме без дожигания генераторного газа. При исследовании рассматривался участок активного полета РН в период работы маршевой ЖРДУ ее первой ступени.

Выбор значений декрементов колебаний динамических звеньев системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” проводился с учетом имеющихся в литературе сведений о диссипативных потерях при колебаниях жидкого топлива в баках, при упругих продольных колебаниях в образцах материала, а также данных о декрементах доминирующих гармоник упругих продольных колебаний ракетных конструкций, полученных при натурных испытаниях. При этом для большей наглядности результатов моделирования значения логарифмических декрементов колебаний всех звеньев системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” полагались одинаковыми и равными 0,07, что соответствует приблизительно 1,1% от критического значения коэффициента демпфирования.

Результаты анализа устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН”. Согласно результатам расчета, в частотном диапазоне до 30 Гц находятся 7 собственных частот системы “ЖРДУ – корпус РН”. Их зависимости от времени полета РН показаны на рис. 1 Кривыми 1 – 5 изображены частоты, со-

ответствующие частотам I–V-го тона упругих продольных колебаний корпуса РН, а кривыми 6 и 7 – собственным частотам колебаний жидкости в линии питания ЖРД окислителем (6) и горючим (7). Наименьшими показателями затухания δ характеризуются колебания с частотами 1, 2 и 4. Зависимости $\delta(t)$ для частот 1, 2 и 4 изображены на рис. 2 кривыми 1, 2 и 3.

Из этих рисунков следует, что система неустойчива. В ней имеют место нарастающие колебания: при $0 \leq t < 17$ с

(область 1) и $65 \text{ с} < t < 79$ с (область 2) – с частотой, близкой к частоте II-го тона продольных колебаний корпуса, а при $22 \text{ с} < t < 86$ с (область 3) – с частотой,

близкой к частоте I-го тона. Неустойчивость системы в областях 1 и 2 обусловлена сближением собственной частоты II-го тона колебаний корпуса РН (рис. 1, кривая 2) с собственной частотой колебаний жидкости в системе питания ЖРД окислителем (кривая 6) и, соответственно, горючим (кривая 7). Неустойчивость в области 3 объясняется близкими значениями собственной частоты I-го тона продольных колебаний корпуса и собственной частоты колебаний жидкости в системе питания ЖРД окислителем (рис. 1, кривые 1 и 6).

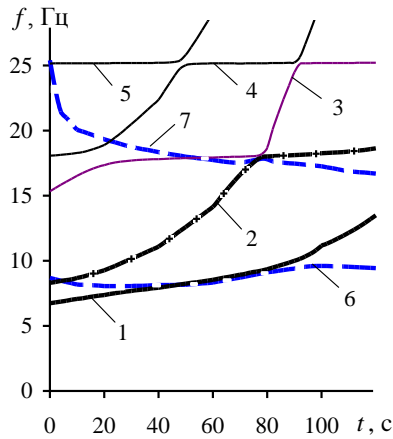


Рис. 1

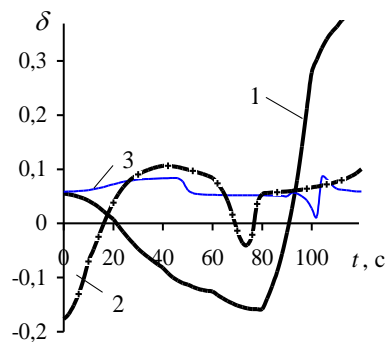


Рис. 2

Определение “ключевых” для доминирующих гармоник продольных колебаний РН динамических звеньев корпуса.

Для выявления динамических звеньев корпуса РН, оказывающих определяющее влияние на демпфирование I-го и II-го тона его упругих продольных колебаний, были выполнены расчеты спектра матрицы системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” при разных значениях декрементов колебаний ее элементов. Наиболее интересные результаты представлены на рис. 3 в виде зависимостей $\delta_1(t)$ и $\delta_2(t)$ декрементов I-го и II-го тона продольных колебаний корпуса РН от времени полета. Приведенные на этих рисунках кривые 1 – 6 построены по результатам следующих вариантов расчета:

1 – расчет с учетом диссипации энергии колебаний всех звеньев системы (при этом декременты колебаний всех ее звеньев равны 0,07);

2 – расчет с учетом демпфирования только I-го тона колебаний жидкого топлива в баке окислителя первой ступени (при этом у осциллятора с демпфированием, имитирующего эти колебания, декремент колебаний равен 0,07, а декременты колебаний остальных звеньев системы – нулю);

3 – расчет с учетом демпфирования только I-го тона колебаний жидкого топлива в баке горючего первой ступени;

4 – расчет с учетом демпфирования только I-го тона колебаний жидкого топлива в баке окислителя второй ступени;

5 – расчет с учетом демпфирования только I-го тона колебаний жидкого топлива в баке горючего второй ступени;

6 – расчет с учетом демпфирования колебаний только “стержневых” элементов разветвленной цепочки, которыми моделируется упругая несущая конструкция корпуса РН (при этом декременты колебаний “стержневых” элементов равны 0,07, а декременты колебаний осцилляторов, имитирующих колебания жидкости в баках РН и механические колебаний ЖРД – нулю).

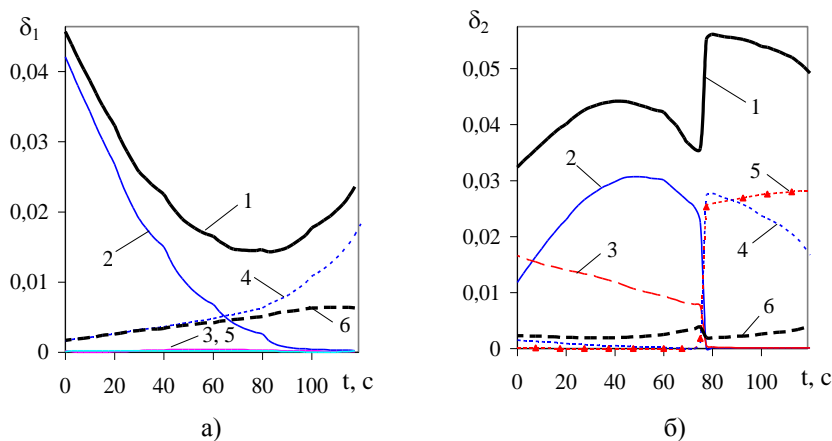


Рис. 3

Как видно из рис. 3, на разных интервалах времени полета РН “ключевыми” для декрементов доминирующих тонов продольных колебаний корпуса РН являются разные динамические звенья системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках”. Расположение кривых 2, 4 и 6 относительно кривой 1 (рис. 3, а) и характер их изменения позволяет сделать вывод, что при $0 \leq t \leq 60$ с декремент I-го тона колебаний корпуса РН определяется, главным образом, демпфированием колебаний жидкого топлива в баке окислителя первой ступени, а при $t > 60$ с – в баке окислителя второй ступени и также (в значительно меньшей степени) – демпфированием несущей конструкции корпуса РН. Что касается декремента II-го тона колебаний корпуса (рис. 3, б), то при $t < 77$ с определяющими факторами для него являются значения декрементов колебаний топлива в баке окислителя и баке горючего первой ступени, а при $t > 79$ с – в баках второй ступени.

Сделанный вывод согласуется с результатами сравнительного анализа расчетных зависимостей собственных частот первых пяти тонов колебаний системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” от времени полета (рис. 4, кривые 1 – 5) и аналогичных зависимостей собственных частот продольных колебаний жидкого топлива в баках РН: частот I-го тона колебаний топлива в баках окислителя и горючего первой ступени РН (кривые 6, 7); II-го тона колебаний топлива в баке окислителя первой ступени (кривая 8); I-го тона колебаний топлива в баках окислителя и горючего второй ступени РН (кривые 9, 10). Как видно из рис. 4, на соответствующих интервалах времени полета РН собственные частоты I-го и II-го тона упругих продольных колебаний ее корпуса (кривые 1, 2) близки к собственным частотам I-го тона продольных колебаний жидкого топлива в баках окислителя и горючего первой и второй ступеней РН.

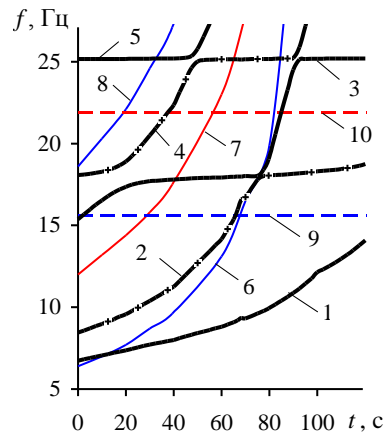


Рис. 4

Таким образом, в результате численного исследования системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” определены факторы влияния (“рычаги воздействия”) на показатели затухания доминирующих тонов продольных колебаний корпуса рассматриваемой РН. В частности, для I-го тона продольных колебаний корпуса такими факторами является демпфирование колебаний жидкого топлива в баке окислителя первой ступени РН при $0 \leq t \leq 60$ с и в баке окислителя второй ступени при $t > 60$ с, а для II-го тона – в баках первой ступени при $t < 77$ с и в баках второй ступени при $t > 79$ с.

Результаты анализа устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” при повышенном демпфировании колебаний жидкого топлива в баках РН. Чтобы оценить возможность использования выявленных “рычагов воздействия” на декременты доминирующих тонов продольных колебаний корпуса РН для обеспечения продольной устойчивости РН, были выполнены расчеты спектра матрицы системы “ЖРДУ – корпус РН” при увеличенных значениях декрементов собственных колебаний топлива в баках. Значение декремента колебаний осцилляторов с повышенным демпфированием полагалось равным 0,5. Результаты расчетов представлены на рис. 5, а, б в виде зависимостей $\delta_1(t)$ и $\delta_2(t)$ показателей затухания доминирующих комплексных частот колебаний системы от времени полета.

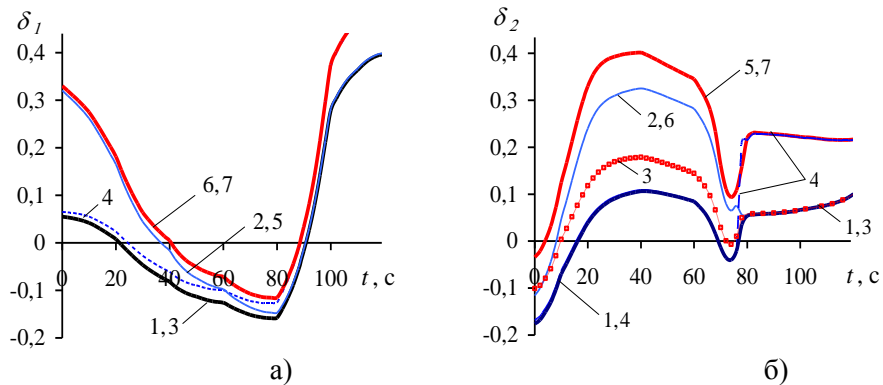


Рис. 5

Кривыми 1 изображены зависимости $\delta_1(t)$ и $\delta_2(t)$ при значениях декрементов колебаний звеньев системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках РН”, равных 0,07, а кривыми 2 – 6 – при повышенном демпфировании I-го тона колебаний жидкого топлива в одном или нескольких баках РН:

- 2 – в баке окислителя первой ступени РН;
- 3 – в баке горючего первой ступени;
- 4 – в баке окислителя второй ступени РН;
- 5 – в баке окислителя и баке горючего первой ступени РН;
- 6 – в баке окислителя первой и второй ступени РН;

7 – в баке окислителя и баке горючего первой ступени, а также в баке окислителя второй ступени.

Согласно результатам расчетов, для устранения неустойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” в области 2, которая является самой маленькой ($65\text{ с} < t < 79\text{ с}$), достаточно увеличить демпфирование колебаний жидкого топлива только в одном из топливных баков первой или второй ступени РН.

Увеличение демпфирования колебаний в баке горючего первой ступени РН не только обеспечило устойчивость системы в области 2, но также привело к уменьшению первой области неустойчивости $0 \leq t < 17\text{ с}$ почти в 2 раза, однако самая большая область неустойчивости – область 3 ($22\text{ с} < t < 86\text{ с}$) – при этом почти не изменилась (рис. 5, кривые 1, 3).

Наиболее сильным “рычагом воздействия” оказалось демпфирование колебаний топлива в баке окислителя первой ступени РН. Его увеличение позволило устранить неустойчивость в области 2, уменьшить область 1 более чем в 2 раза, а область неустойчивости 3 – на 24 % (рис. 5, кривые 1, 2).

Наилучший результат получен при увеличении демпфирования колебаний жидкого топлива одновременно в трех баках – баке окислителя первой и второй ступени РН и баке горючего первой ступени (кривые 7). В этом случае область 1 уменьшилась до интервала $0 \leq t < 4\text{ с}$, а минимальное значение показателя затухания колебаний $\delta_2^{\min}(t)$ увеличилось с $-0,176$ до $-0,034$ (рис. 5, б, кривые 1, 7). При таких условиях амплитуды колебаний не могут возрасти до опасного уровня, то есть неустойчивость системы “ЖРДУ – корпус РН” по отношению ко II-му тону продольных колебаний корпуса РН практически полностью устраняется. Что касается области 3, то ее протяженность уменьшилась на 33 %, а значение $\delta_1^{\min}(t)$ увеличилось на 27% (рис. 5, а). Таким образом, неустойчивость системы “ЖРДУ – корпус РН” по отношению к I-му тону продольных колебаний корпуса не устранена, но несколько “смягчена” (в смысле прогнозируемого снижения уровня амплитуд продольных колебаний).

Увеличение декрементов колебаний топлива не в трех, а в двух баках – баке окислителя первой и второй ступени РН – приводит к такому же результату по области 3 (рис. 5, а, кривая 6). Однако область 1 при этом увеличивается до интервала $0 \leq t < 7\text{ с}$, а $\delta_2^{\min}(t) = -0,108$ (рис. 5, б).

Увеличение демпфирования колебаний топлива в другой паре топливных баков – баке окислителя и баке горючего первой ступени РН – позволяет получить по областям 1 и 2 такой же результат, как и при повышенном демпфировании в трех баках (кривые 5). Для области 3 он несколько хуже, чем в двух предыдущих случаях: область 3 уменьшилась лишь на 23 %, а значения $\delta_1^{\min}(t)$ увеличились только на 8 %. Однако такое ухудшение на фоне общей картины устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” по отношению к I-му тону продольных колебаний корпуса не является принципиальным.

Выводы. Предложен подход к исследованию влияния диссипации энергии продольных колебаний отдельных звеньев корпуса жидкостной РН на ее продольную устойчивость, позволяющий выявить основные факторы этого влияния и оценить возможность их использования для обеспечения продольной устойчивости РН. Предложенный подход основан на математическом

моделировании взаимодействия низкочастотных процессов в маршевой ЖРДУ с упругими продольными колебаниями корпуса РН, рассматриваемого как многосвязная диссипативная система “конструкция РН – жидкое топливо в баках”. Анализ продольной устойчивости жидкостной РН выполняется на основе решения проблемы собственных значений и численного исследования многоконтурной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН”.

Предложенный подход использован применительно к трехступенчатой жидкостной РН. Определены основные факторы, влияющие на показатели затухания доминирующих тонов продольных колебаний корпуса рассматриваемой РН. Установлено, что для I-го тона его продольных колебаний такими факторами является демпфирование колебаний жидкого топлива в баке окислителя первой и второй ступени РН, а для II-го тона – в баке окислителя и горючего первой ступени. Показано, что повышенное демпфирование колебаний жидкого топлива в баке окислителя и горючего первой ступени РН (с увеличенным до 0,5 значением логарифмического декремента колебаний) позволяет “смягчить” продольную неустойчивость РН по отношению к I-му тону продольных колебаний ее корпуса (уменьшить протяженность области неустойчивости и показатели нарастания колебаний) и практически полностью устранить неустойчивость по отношению ко II-му тону.

1. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Oppenheim B. W. Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets / B. W. Oppenheim, S. Rubin // Journal of Spacecraft and Rockets. – 1993. – Vol. 30, No. 3. – P. 360 – 383.
3. Колесников К. С. Динамика ракет / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1980. – 376 с.
4. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов / Б. И. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1983. – 296 с.
5. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довгоцько, Ю. Е. Григорьев, И. К. Манько, О. В. Пилипенко // Техническая механика. – 2001. – Вып. 2. – С. 11 – 37.
6. Pilipenko V. V. Providing the LPRE-Rocket Structure Dynamic Compatibility / V. V. Pilipenko // AIAA / SAE / ASME / ASEE 29th Joint Propulsion Conference and Exhibit (June 28 – 30, 1993). – Monterey, CA. – 10 p.
7. Preventing POGO on Titan IVB. Crosslink // The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology. – Summer 2003. – P. 3.
8. Хоряк Н. В. Математическое моделирование взаимодействия продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты как многосвязной упруго-диссипативной системы и динамических процессов в двигательной установке / Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев // Техническая механика. – 2010. – № 3. – С. 27 – 37.
9. Николаев А. Д. Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии / А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – Вып. 4/12. – С. 62 – 73.
10. Гладкий В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарата / В. Ф. Гладкий. – М. : Наука, 1969. – 496 с.
11. Динамика старта жидкостных ракет-носителей космических аппаратов / Г. И. Богомаз, Н. Е. Науменко, М. Б. Соболевская, И. Ю. Хижа. – К. : Наукова думка, 2005. – 248 с.
12. Хоряк Н. В. Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД – корпус РН” по спектру матрицы: методические основы и приложение / Н. В. Хоряк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – С. 87 – 91.
13. Hilbrandt E. Damping representation related to Spacecraft Structural Design / E. Hilbrandt // Accuracy, Reliab. and Train. FEM Technol. Proc. 4th World Congress, Interlaken, 17–21 Sept., 1984. – P. 21 – 31.
14. Микишев Г. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г. Н. Микишев. – М. : Машиностроение, 1978. – 247 с.
15. Микишев Г. Н. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость / Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1971. – 564 с.
16. 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.
17. Slosh Suppression // NASA Space Vehicle Design Criteria (Structure). – National Aeronautic and Space Administration. – 1969, May. – NASA SP-8031. – 33 p.
18. Прочность материалов и конструкций / Отв. ред. В. Т. Ярошенко. – К. : Академперіодика, 2005. – 1088 с.

19. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко, Д. Х. Янг, У. Уивер. – М. : Мир, 1985. – 472 с.
20. Заявка 4921367/23 СССР МПК В64D 37/08. Гаситель колебаний в топливных баках жидкостных ракет / В. А. Серенко, А. В. Гавриш ; Заявитель ГП “КБ “Южное” им. М. К. Янгеля. – заявл. 23.03.1991; опубл. 07.06.1993, Бюл. № 21. – 3 с. : ил.
21. Грабин Б. В. Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов / Б. В. Грабин, О. В. Давыдов, В. И. Жихарев / Под ред. В. П. Мишина и В. К. Карраска. – М. : Машиностроение, 1991. – 416 с.
22. Vibration Testing of a 1/5 Scale Model of H-II Launch Vehicle / Minegishi M., Sano M., Komatsu K., Morita T., Morino Y., Tomioka K., Ujino I. // Report of National Aerospace Laboratory. – TR-1061. – 1990. – 154 p.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 03.07.13,
в окончательном варианте 03.09.13