

УДК 629.76

Н. В. ХОРЯК, А. Д. НИКОЛАЕВ, С. И. ДОЛГОПОЛОВ

*Институт технической механики Национальной академии наук Украины
и Государственного космического агентства Украины, Украина***ВЛИЯНИЕ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В БАКАХ
НА АМПЛИТУДЫ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ**

Предложен подход к численному исследованию влияния демпфирования колебаний жидкого топлива в баках на продольную устойчивость и амплитуды продольных колебаний жидкостной ракеты-носителя (РН). Исследование выполняется на основе нелинейной и усовершенствованной линейной математической модели низкочастотной динамики системы “жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус РН”, в которой продольные колебания корпуса РН описываются как колебания многосвязной диссипативной системы. На основе линейной модели определяются параметры собственных колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” при разном по величине демпфировании динамических звеньев корпуса, выявляются звенья, оказывающие существенное влияние на продольную устойчивость РН, а также определяются доминирующие тона и параметры собственных продольных колебаний корпуса РН для нелинейной модели. Амплитуды продольных колебаний РН вычисляются на основе нелинейной модели. Изложены результаты исследования, выполненного для трехступенчатой жидкостной РН. Показано, что увеличение демпфирования продольных колебаний топлива в баке окислителя первой ступени в два раза привело к существенному уменьшению амплитуд колебаний продольных перегрузок и областей неустойчивости системы “ЖРДУ первой ступени – корпус РН”.

Ключевые слова: жидкостная ракета, продольная устойчивость, упругие продольные колебания, продольные перегрузки, демпфирование, динамическая система, параметры собственных колебаний

Введение

Анализ продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) выполняется на основе математической модели низкочастотной динамики замкнутой системы “жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус РН”, описывающей взаимодействие низкочастотных ($f_{\max} \leq 50$ Гц) динамических процессов в ЖРДУ с упругими продольными колебаниями корпуса РН [1–3]. Обычно в этой модели при описании продольных колебаний корпуса РН ограничиваются рассмотрением нескольких первых тонов его собственных колебаний. Как правило, их собственные частоты и формы определяются в результате математического моделирования свободных продольных колебаний корпуса РН без учета диссипации энергии, а декременты полагаются постоянными. Очевидно, что на основе подобных моделей невозможно исследовать влияние характеристик отдельных динамических звеньев корпуса РН (напр., элементов конструкции, топливных баков, космического аппарата) на устойчивость динамической системы “ЖРДУ – корпус РН”.

Такое исследование было бы полезным при анализе эффективности возможных средств снижения уровня амплитуд колебаний продольных перегрузок корпуса РН до приемлемой величины (т. н.

“смягчения” продольной неустойчивости РН [4]) в том случае, когда необходимые конструкторские решения проводятся за счет изменения динамических характеристик корпуса РН. К числу таких конструкторских решений относится установка в одном из баков РН устройства гашения продольных колебаний жидкости [5]. В этой связи разработка методического обеспечения для определения динамических звеньев корпуса РН, оказывающих наиболее существенное влияние на параметры собственных колебаний динамической системы “ЖРДУ – корпус РН”, и последующей корректировки характеристик этих звеньев с целью “смягчения” продольной неустойчивости РН, является актуальной задачей.

Эта задача может быть решена на основе математической модели продольных колебаний жидкостной РН, предложенной в статье [6]: корпус РН в замкнутой динамической системе “ЖРДУ – корпус РН” рассматривается как многосвязная диссипативная система “конструкция РН – топливо в баках” и схематизируется разветвленной цепочкой осцилляторов с вязким трением. Такая математическая модель является эффективным инструментом для исследования влияния не только упруго-массовых, но и диссипативных характеристик динамических звеньев корпуса на параметры продольных колебаний и продольную устойчивость жидкостных РН.

В мировой практике анализ продольной устойчивости РН выполняется как анализ устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” по первому приближению Ляпунова [1–3] на основе ее линеаризованной математической модели с “замороженными” коэффициентами. Однако в ряде случаев требование устойчивости по Ляпунову заменяется менее жестким требованием “технической” устойчивости, которое сводится к регламентации допустимого уровня амплитуд колебаний продольной перегрузки РН. Теоретический прогноз уровня амплитуд колебаний выполняется на основе нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН” [1, 3, 7].

Цель статьи – разработать методическое обеспечение для численного исследования влияния демпфирования продольных колебаний жидкого топлива в баках РН на устойчивость и параметры колебаний нелинейной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН”.

Концепция исследования

Влияние демпфирования колебаний топлива в баках на продольную устойчивость жидкостной РН в период работы ЖРДУ ее первой ступени исследуется на основе нелинейной математической модели низкочастотной динамики нестационарной системы “ЖРДУ – корпус РН” и усовершенствованной линейной (линеаризованной) математической модели с “замороженными” коэффициентами [6]. Особенность этой линейной модели состоит в том, что продольные колебания корпуса описываются в ней как колебания многосвязной диссипативной системы “конструкция РН – топливо в баках” [8].

Анализ устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” на основе линейной модели выполняется в соответствии с теоремой Ляпунова об устойчивости по первому приближению. Параметры собственных колебаний и доминирующие собственные частоты колебаний корпуса РН и системы “ЖРДУ – корпус РН” определяются на основе решения проблемы собственных значений. При анализе рассматриваются только собственные значения (т. е. комплексные собственные частоты) $\lambda_i = -(\delta_i f_i) + j \cdot 2\pi f_i$ с ограниченной мнимой частью ($0 < f_i \leq f_{\max}$), лежащие вблизи мнимой оси или справа от нее. Отрицательное значение показателя затухания колебаний δ_i является признаком неустойчивости системы.

Определение динамических звеньев корпуса, демпфирование которых оказывает существенное влияние на устойчивость системы “ЖРДУ – корпус РН” (т. е. “ключевых” звеньев для доминирующих гармоник продольных колебаний корпуса РН), проводится на основе параметрического исследования линейных систем “конструкция РН – топливо в ба-

ках”, “ЖРДУ – корпус РН”. Множество варьируемых параметров составляют декременты колебаний элементов “конструкция РН – топливо в баках”, в частности, декременты низших тонов продольных колебаний топлива в баках первой и второй ступени.

Амплитуды продольных колебаний РН определяются на основе нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН”, коэффициенты которой зависят от времени полета РН.

Отдельным вопросом является определение декрементов колебаний жидкости в баках, которое представляет собой сложную самостоятельную задачу. Их достоверные значения, даже для баков простых форм, можно получить только экспериментально, при этом они существенно зависят от формы бака, уровня его заполнения, наличия ребер и различных внутрибаковых элементов и т. д., а погрешность их определения составляет не менее 15 – 20 % [9, 10]. Как показывают экспериментальные данные, значения декрементов δ продольных колебаний жидкости в цилиндрических баках без демпферов могут находиться в диапазоне от 0,005 до 0,05 – 0,1, а в баках с демпфером – от 0,1 до 0,3 [9–11]. Что касается конструкционного демпфирования, то, согласно данным [12], обобщающим результаты исследований источников и механизмов демпфирования космических кораблей, при упругих продольных колебаниях ракетных конструкций, значения коэффициента диссипативных потерь $\eta_s \approx \delta/\pi$ находятся в следующих интервалах: (0,001; 0,01) – для материального демпфирования в металле; (0,01; 0,5) – при соединении сваркой и клепкой; (0,02; 0,1) – при резьбовых и винтовых соединениях.

Ориентировочные значения декрементов колебаний динамических звеньев корпуса РН могут быть заданы без проведения эксперимента – на основе экспериментальных данных по аналогичным объектам, либо с использованием эмпирических формул (напр., [9, 11]), либо методами идентификации. При этом значения декрементов низших тонов колебаний системы “конструкция РН – топливо в баках” должны находиться в интервале (0,02; 0,3), в котором, согласно экспериментальным данным [10, 13], находятся декременты доминирующих гармоник продольных колебаний корпуса РН. С учетом приведенных данных, значения логарифмических декрементов колебаний δ динамических звеньев корпуса РН полагались равными 0,05.

Математическая модель

Нелинейная математическая модель низкочастотной динамики системы “ЖРДУ – корпус РН” может быть представлена в общем виде двумя матричными уравнениями, одно из которых описывает

продольные колебания корпуса РН под действием возмущений со стороны ЖРДУ, а второе – низкочастотные процессы в ЖРДУ при действии возмущений со стороны корпуса РН:

$$\mathbf{F}_C(\ddot{\mathbf{X}}, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{X}, t) = \mathbf{F}_{EC}(\mathbf{Y}, t), \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_D(\dot{\mathbf{Y}}, \mathbf{Y}, t) = \mathbf{F}_{ED}(\ddot{\mathbf{X}}, t), \quad (2)$$

где $\mathbf{X}$ – вектор осевых (продольных) координат центров масс элементов динамической системы “конструкция РН – топливо в баках”;

$\mathbf{Y}$ – вектор параметров динамической системы “питающие магистрали – маршевые ЖРД”, описывающей низкочастотные процессы в ЖРДУ;

$\mathbf{F}_C, \mathbf{F}_D$ – матричные нелинейные функции;

$\mathbf{F}_{EC}, \mathbf{F}_{ED}$ – векторные функции, которые задают возмущения, действующие со стороны ЖРДУ на корпус РН и со стороны корпуса РН на ЖРДУ;

t – время полета.

В линейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН” низкочастотная динамика ЖРДУ описывалась линеаризованной системой дифференциально-алгебраических уравнений. Корпус РН схематизировался разветвленной цепочкой осцилляторов с вязким трением, которые совершают колебательные движения в направлении продольной оси РН. Несущая конструкция корпуса представлялась цепочкой из n_c “стержневых” осцилляторов. В модели учитывалось по 2–3 тона собственных продольных колебаний топлива в баках и по одному тону продольных колебаний маршевых ЖРД. Эти колебания моделировались n_z одиночными осцилляторами, пружины которых помещались на соответствующих “стержневых” элементах. Продольные колебания корпуса РН под действием возмущений со стороны ЖРДУ описывались системой линейных дифференциальных уравнений в отклонениях [5]:

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

$$i=1, \dots, n_c,$$

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

$$i=1, \dots, n_z,$$

где $m_i, m_{i,s}$ – масса i -го “стержневого” элемента и масса присоединенного к нему осциллятора, имитирующего 1-й тон колебаний маршевого ЖРД ($s=3$) или s -й тон колебаний топлива в баках ($s=1, 2$);

c_i, b_i и $c_{i,s}, b_{i,s}$ – жесткость и коэффициент демпфирования i -й и i,s -й связи;

$\delta x_{(\cdot)}$ – продольные перемещения массы $m_{(\cdot)}$ относительно положения статического равновесия;

$Q_{(\cdot)}^{(k)}$ – k -я сила, приложенная к массе $m_{(\cdot)}$.

Линейная математическая модель динамики системы “ЖРДУ – корпус РН” имела вид:

$$\mathbf{M}_C \delta \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}_C \delta \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}_C \delta \mathbf{X}(t) = \mathbf{F}_C \delta \mathbf{Y}(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{B} \delta \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C} \delta \mathbf{Y}(t) = \mathbf{F}_{DU} \ddot{\mathbf{X}}(t), \quad (4)$$

где $\delta \mathbf{X}$ – вектор продольных перемещений элементов системы “конструкция РН – топливо в баках” относительно положения статического равновесия;

$\mathbf{M}_C, \mathbf{B}_C, \mathbf{C}_C$ – матрицы масс, коэффициентов демпфирования и жесткости связей;

$\delta \mathbf{Y}$ – вектор отклонений параметров системы “питающие магистрали – маршевые ЖРД”;

$\mathbf{B}, \mathbf{C}$ – матрицы ее коэффициентов (в общем случае матрица $\mathbf{B}$ является вырожденной);

$\mathbf{F}_C, \mathbf{F}_{DU}$ – матрицы коэффициентов.

В нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН” учитывались только доминирующие тона собственных продольных колебаний корпуса, которые описывались уравнениями в нормальных обобщенных координатах. Соответственно, матричное уравнение (1) заменялось уравнениями нескольких осцилляторов с вязким трением:

$$\ddot{q}_i + 2\delta_i f_i \dot{q}_i + (2\pi f_i)^2 q_i = \frac{1}{m_i} \beta_{di} \sum_k \alpha_k y_k, \quad (5)$$

где q_i – i -я нормальная координата системы “конструкция РН – топливо в баке”;

m_i, f_i, δ_i – обобщенная масса, собственная частота и декремент i -го тона колебаний;

β_{di} – коэффициент собственной формы i -го тона колебаний системы “конструкция РН – топливо в баках” в месте крепления ЖРД к конструкции РН;

$\alpha_k y_k$ – k -я возмущающая сила, действующая на корпус со стороны ЖРДУ;

Параметры собственных продольных колебаний корпуса РН определялись на основе линейной математической модели свободных колебаний системы “конструкция РН – топливо в баках” [8]:

$$\mathbf{M}_C \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}_C \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C}_C \mathbf{X}(t) = 0. \quad (6)$$

Результаты моделирования

Анализ устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” проводился на основе расчета корней характеристического уравнения системы (3)–(4). В результате анализа установлено, что линейная система “ЖРДУ – корпус РН” с “замороженными” коэффициентами неустойчива на трех интервалах времени полета РН (рис. 1). Потеря устойчивости происходит при сближении собственных частот 1-го и 2-го тона продольных колебаний корпуса с собственными частотами колебаний жидкости в системе питания ЖРД (рис. 2), то есть 1-я и 2-я продольные моды корпуса РН являются доминирующими.

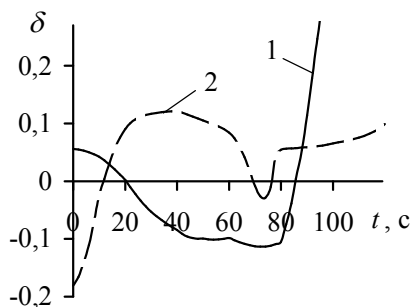


Рис. 1. Показатели затухания колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” на доминирующих собственных частотах:
1 – на частоте, соответствующей частоте 1-й продольной моды корпуса РН; 2 – 2-й моды

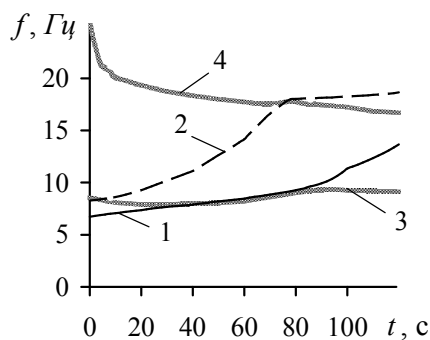


Рис. 2. Собственные частоты колебаний корпуса РН и жидкости в системе питания ЖРД:
1, 2 – частоты 1-го и 2-го тона продольных колебаний корпуса; 3, 4 – частоты колебаний жидкости в линии питания ЖРД окислителем и горючим

На основе результатов расчета параметров собственных колебаний систем (6), и (3)–(4) при различных значениях декрементов колебаний конструкции РН и жидкого топлива в ее топливных баках установлено, что в первой половине полета РН определяющее влияние на декременты 1-го и 2-го тона продольных колебаний корпуса РН оказывает демпфирование 1-го тона продольных колебаний

топлива в баке окислителя первой ступени. По мере выработки топлива это влияние уменьшается, и возрастает влияние демпфирования 1-го тона колебаний топлива в баке окислителя второй ступени (рис. 3). Полученный результат объясняется тем, что на соответствующих интервалах времени полета РН собственные частоты доминирующих продольных мод корпуса РН близки к собственным частотам 1-го тона продольных колебаний топлива в баке окислителя первой или второй ступени РН (рис. 4).

Увеличение декремента 1-го тона продольных колебаний топлива в баке окислителя первой ступени РН в два раза привело к уменьшению первых двух интервалов неустойчивости линейной системы “ЖРДУ – корпус РН” и к устранению ее неустойчивости на третьей, наименьшем интервале (рис. 5).

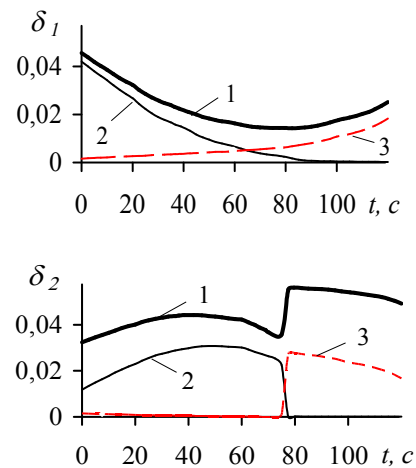


Рис. 3. Декременты 1-го и 2-го тона собственных продольных колебаний корпуса РН:
1 – с учетом демпфирования всех динамических звеньев корпуса РН; 2 – с учетом демпфирования колебаний топлива только в баке окислителя 1-й ступени; 3 – только в баке окислителя 2-й ступени

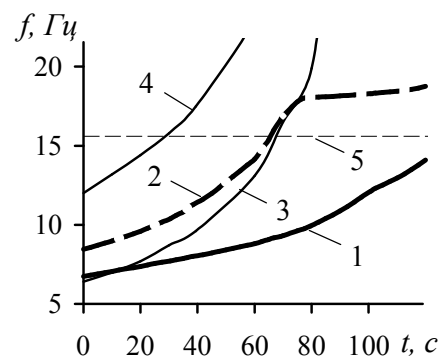


Рис. 4. Собственные частоты продольных колебаний корпуса РН и жидкого топлива в баках:
1, 2 – частоты 1-го и 2-го тона колебаний корпуса; 3, 4, 5 – частоты 1-го тона колебаний топлива в баке окислителя и горючего первой ступени, и в баке окислителя второй ступени

Амплитуды продольных колебаний РН вычислялись на основе нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН” с “замороженными” и переменными коэффициентами. Огибающие расчетных амплитуд колебаний продольных перегрузок корпуса РН в месте установки космического аппарата (КА) приведены на рис. 6, 7.

Как видно из рис. 5, 6, области неустойчивости линейной и нелинейной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” с “замороженными” коэффициентами согласуются между собой. Однако результаты определения устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” на основе ее нелинейной математической модели с “замороженными” и переменными коэффициентами заметно различаются (рис. 6, 7).

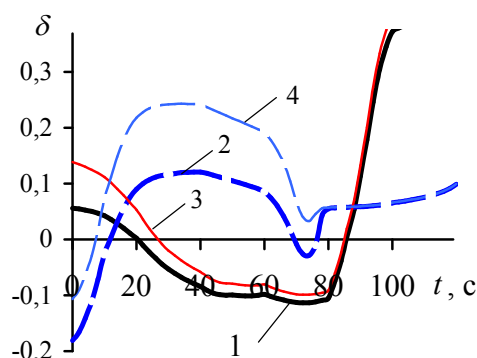


Рис. 5. Влияние демпфирования продольных колебаний топлива в баке окислителя первой ступени РН на устойчивость линейной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН”: 1, 2 – показатели затухания доминирующих комплексных частот колебаний системы при исходных значениях декрементов колебаний топлива в баках; 3, 4 – при увеличенном демпфировании колебаний топлива в баке окислителя первой ступени

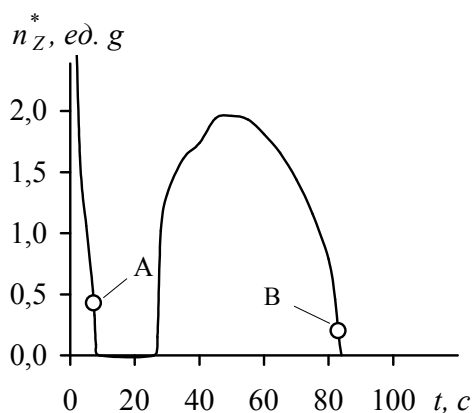


Рис. 6. Огибающая амплитуд колебаний продольной перегрузки КА в нелинейной системе “ЖРДУ – корпус РН” с “замороженными” коэффициентами

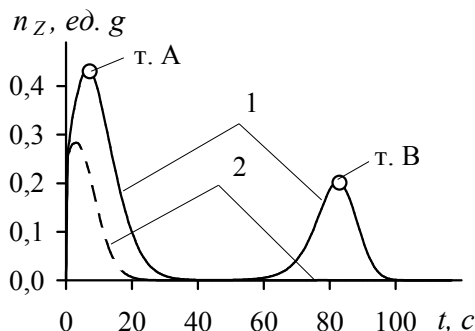


Рис. 7. Огибающие амплитуд колебаний продольной перегрузки КА в нелинейной системе “ЖРДУ – корпус РН” с переменными коэффициентами: 1 – при исходных значениях декрементов колебаний топлива в баках; 2 – при увеличенном значении декремента 1-го тона колебаний топлива в баке окислителя первой ступени

По сравнению с рис. 6, на рис. 7 интервалы неустойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН” смещены вправо и отличаются по протяженности, а уровень амплитуд колебаний существенно ниже (рис. 7, кривая 1). Значения амплитуд колебаний продольных перегрузок n_z^* , рассчитанные по нелинейной модели с “замороженными” коэффициентами, являются предельными для амплитуд колебаний n_z нестационарной системы. Это означает, что если в текущий момент времени $n_z^* > n_z$, то значения n_z будут возрастать, пока не станут равны n_z^* . Если же $n_z^* < n_z$, они будут убывать до совпадения с n_z^* . Точки, в которых $n_z^* = n_z$, на рис. 6, 7 обозначены буквами А и В.

Указанные отличия в результатах объясняются значительным влиянием начальных условий на параметры колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН” и необходимостью определенного периода времени для развития и затухания колебаний. Кроме того, значения предельных амплитуд существенно изменяются в течение полета, а время выхода нелинейной системы “ЖРДУ – корпус РН” на предельные амплитуды сравнимо со временем полета ступени.

При оценке влияния демпфирования колебаний топлива в баках на амплитуды колебаний продольных перегрузок РН использовалась нелинейная модель системы “ЖРДУ – корпус РН” с переменными коэффициентами. Результаты расчета показали, что, при двукратном увеличении декремента продольных колебаний топлива в баке окислителя первой ступени РН, уровень амплитуд колебаний продольных перегрузок РН на первом интервале неустойчивости

снизился с 0,43 до 0,28, а на втором – с 0,2 до 10^{-4} . Таким образом, увеличение демпфирования колебаний топлива в баке окислителя первой ступени РН позволило снизить уровень амплитуд колебаний продольной перегрузки РН более чем в 1,5 раза.

Заключение

Разработано методическое обеспечение для численного исследования влияния демпфирования колебаний жидкого топлива в баках на продольную устойчивость и амплитуды колебаний продольных перегрузок жидкостной РН. Его разработка позволила впервые выполнить такое исследование методами математического моделирования. Исследование проводится на основе нелинейной математической модели низкочастотной динамики замкнутой системы “ЖРДУ – корпус РН” с переменными коэффициентами и усовершенствованной линейной математической модели с “замороженными” коэффициентами, в которой продольные колебания корпуса РН описываются как колебания многосвязной диссипативной системы “конструкция РН – топливо в баках”. На основе разработанного методического обеспечения решаются следующие задачи: определяются “ключевые” динамические звенья корпуса РН, которые оказывают наиболее существенное влияние на устойчивость замкнутой динамической системы “ЖРДУ – корпус РН”, осуществляется корректировка характеристик этих звеньев с целью “смягчения” продольной неустойчивости РН и оценивается ее эффективность.

Работоспособность, предложенного методического обеспечения, продемонстрирована при исследовании влияния демпфирования колебаний топлива в баках на амплитуды колебаний продольной перегрузки трехступенчатой жидкостной РН на активном участке ее полета в период работы маршевой ЖРДУ первой ступени. Показано, что в рассматриваемом случае наиболее существенное влияние на декременты доминирующих тонов собственных продольных колебаний корпуса РН и устойчивость динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” оказывает демпфирование колебаний жидкого топлива в баке окислителя первой и второй ступени РН. Учет нестационарности нелинейной системы “ЖРДУ – корпус РН” при определении амплитуд продольных колебаний РН привел к изменению протяженности и смещению вправо расчетных интервалов неустойчивости системы. При увеличении демпфирования продольных колебаний топлива в баке окислителя первой ступени в два раза, уровень амплитуд колебаний продольных перегрузок системы “ЖРДУ – корпус РН” на частоте 2-го тона продольных коле-

баний корпуса снизился более чем в 1,5 раза, а на частоте 1-го тона – практически до нуля.

Литература

1. Натанзон, М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты [Текст] / М. С. Натанзон. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Oppenheim, B. W. Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets [Текст] / B. W. Oppenheim, S. Rubin // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 1993. – Vol. 30, № 3. – P. 360 – 383.
3. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей [Текст] / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довгоцько, Ю. Е. Григорьев, И. К. Манько, О. В. Пилипенко // *Техническая механика*. – 2001. – № 2. – С. 11–37.
4. Dotson, K. Mitigating Pogo on Liquid-Fuelled Rockets [Text] / K. Dotson // *Crosslink. Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology*. – 2003. – Winter. – P. 26 – 29.
5. А. с. 1819819 СССР, МКП В64D37/08. Гаситель колебаний в топливных баках жидкостных ракет [Текст] / В. А. Серенко, А. В. Гавриш (СССР). – № 4921367/23; заявл. 23.03.91; опубл. 07.06.93, Бюл. № 21. – 3 с.
6. Хоряк, Н. В. Математическое моделирование взаимодействия продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты как многосвязной упруго-диссипативной системы и динамических процессов в двигательной установке [Текст] / Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев // *Техническая механика*. – 2010. – № 3. – С. 27 – 37.
7. Теоретическое определение амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей [Текст] / В. В. Пилипенко, Н. И. Довгоцько, С. И. Долгополов, А. Д. Николаев, В. А. Серенко, Н. В. Хоряк // *Космічна наука і технологія*. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 90–96.
8. Николаев, А. Д. Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет-носителей с учетом диссипации энергии [Текст] / А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 4(12). – С. 62 – 73.
9. Богомаз, Г. И. Колебания жидкости в баках [Текст] / Г. И. Богомаз, С. А. Сирота. – Днепропетровск, 2002. – 306 с.
10. Микишев, Г. Н. Динамика тонкостенных конструкций, содержащих жидкость [Текст] / Г. Н. Микишев, Б. И. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1971. – 564 с.
11. Dodge, Fr. T. The new “Dynamic behavior of liquids in moving containers” [Text] / Fr. T. Dodge. – Southwest Research Institute. – 2000. – 196 p.
12. Hildbrandt, Eckh. Damping representation related to Spacecraft Structural Design [Text] / Eckh. Hilbrandt // *Accuracy, Reliab. and Train. FEM Technol. Proc. 4th World Congress, Interlaken*, 17–21

Sept., 1984. – P. 21–31.

K. Komatsu, T. Morita, Y. Morino, K. Tomioka, I. Ujino

13. *Vibration Testing of a 1/5 Scale Model of H-II Launch Vehicle [Text]* / M. Minegishi, M. Sano, – TR-1061. – 1990. – 154 p.

Поступила в редакцию 2.06.2014, рассмотрена на редколлегии 12.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр. В. А. Задонцев, институт транспортных систем и технологий НАН Украины, Днепропетровск.

ВПЛИВ ДЕМПФУВАННЯ КОЛИВАНЬ РІДКОГО ПАЛИВА В БАКАХ НА АМПЛІТУДИ ПОЗДОВЖНИХ КОЛИВАНЬ РІДИННОЇ РАКЕТИ

Н. В. Хоряк, О. Д. Ніколаєв, С. І. Долгополов

Запропоновано підхід до чисельного дослідження впливу демпфування коливань рідкого палива в баках на позовжню стійкість і амплітуди позовжних коливань рідинної ракети-носія (РН). Дослідження виконується на основі нелінійної та удосконаленої лінійної математичної моделі низькочастотної динаміки замкнутої системи “рідинна ракетна двигунна установка (РРДУ) – корпус РН”, у якій позовжні коливання корпусу описуються як коливання багатозв’язкової дисипативної системи. На основі лінійної моделі визначаються параметри власних коливань системи “РРДУ – корпус РН” при різному за величиною демпфуванні динамічних ланок корпусу РН, виявляються його ланки, що мають суттєвий вплив на позовжню стійкість, а також визначаються домінуючі тони та параметри власних позовжних коливань корпусу РН для нелінійної моделі. Амплітуди позовжних коливань розраховуються на основі нелінійної моделі. Викладено результати дослідження, виконаного для триступеневої рідинної РН. Показано, що збільшення демпфування позовжних коливань палива в баку окислювача першого ступеня в два рази призвело до суттєвого зменшення амплітуд коливань позовжних перевантажень та областей нестійкості системи “РРДУ першого ступеня – корпус триступеневої РН”.

Ключові слова: рідинна ракета, позовжня стійкість, пружні позовжні коливання, позовжні перевантаження, демпфування, динамічна система, параметри власних коливань

INFLUENCE OF DAMPING FACTOR OF LIQUID PROPELLANT OSCILLATIONS IN TANKS ON LONGITUDINAL VIBRATION OF LAUNCH VEHICLE

N. V. Khorjak, A. D. Nykolayev, S. I. Dolgoplov

The approach to numerical research of influence of oscillation suppression of liquid propellant in tanks on longitudinal stability of the liquid launch vehicles (LV) and LV amplitudes longitudinal (POGO) accelerations is offered. Research is conducted on the basis of advanced linear and nonlinear mathematical models of low-frequency dynamics of the closed “propulsion – LV structure” system in which longitudinal vibrations of the LV structure are described as oscillation of multilinked dissipative system. Use of the linear model allows to determine parameters of natural oscillations of the system at various dissipative characteristics of the LV structure, to reveal the links, making essential impact on POGO stability, and also to execute computation of parameters of natural longitudinal oscillations of the LV structure for the nonlinear model. The amplitudes of POGO oscillations are evaluated by use the nonlinear model. The results of research of dynamics of three-stage launcher are given. It is shown that twice increase in damping factor of liquid propellant oscillation of the LV first stage oxidizer tank has led to essential decrease in level of amplitudes of LV POGO oscillation g-loads and instability domains of the closed “first stage propulsion – LV structure” system.

Key words: liquid launch vehicle, POGO stability, elastic longitudinal structural oscillations, POGO oscillation g-loads, damping factor, parameters of natural oscillations.

Хоряк Наталия Витальевна – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина, e-mail: khorjak@i.ua.

Николаев Алексей Дмитриевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина.

Долгополов Сергей Иванович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепропетровск, Украина.