

УДК 629.76.015.017.21.001

**Н. В. ХОРЯК, А. Д. НИКОЛАЕВ, С. И. ДОЛГОПОЛОВ***Институт технической механики Национальной академии наук Украины  
и Государственного космического агентства Украины, Украина***ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ДИНАМИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ**

*Рассмотрена задача снижения уровня амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей (РН) путем установки в корпусе РН динамического гасителя колебаний (ДГК). Предложен подход к решению этой задачи на основе математического моделирования взаимодействия низкочастотных процессов в жидкостной ракетной двигательной установке (ЖРДУ) с упругими продольными колебаниями корпуса РН и анализа устойчивости динамической системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” в линейной и нелинейной постановке. Выбор параметров ДГК выполняется в результате численного исследования устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” по 1-му приближению Ляпунова с использованием ее расширенной математической модели, в которой упругие продольные колебания корпуса РН с ДГК описываются как колебания разветвленной цепочки дискретных масс. Эффективность ДГК определяется в результате определения амплитуд колебаний продольной перегрузки элементов конструкции жидкостной РН на основе нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, в которой учитывается несколько низших тонов продольных колебаний корпуса РН с ДГК. Изложены результаты решения этой задачи для случая, когда потеря продольной устойчивости жидкостной РН происходит на двух интервалах времени ее полета.*

**Ключевые слова:** жидкостная ракета, жидкостная ракетная двигательная установка, упругие продольные колебания, продольная устойчивость, динамический гаситель колебаний, динамическая система, математическое моделирование, параметры собственных колебаний, устойчивость по первому приближению Ляпунова.

**Введение**

Обеспечение продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) на активном участке их полета является важной научно-технической задачей. При продольной неустойчивости РН амплитуды упругих продольных колебаний ее корпуса могут превысить допустимый уровень и привести к сверхнормативным нагрузкам на элементы конструкции РН, что создает опасность различных аварийных ситуаций. Причиной самовозбуждающихся продольных колебаний жидкостных РН является неустойчивость автоколебательной системы “жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус РН”, обусловленная несовместимостью динамических характеристик ЖРДУ и корпуса РН на отдельных интервалах времени полета. Благоприятные условия для потери продольной устойчивости создаются при резонансном взаимодействии продольных колебаний корпуса РН и низкочастотных (с частотами до 50 Гц) динамических процессов в маршевой жидкостной ракетной двигательной установке (ЖРДУ), в частности, колебаний жидкого топлива в питающих магистралях [1 – 7]. Соответственно, меры по обеспечению продольной устойчи-

вости РН направлены на “разнесение” резонансных частот и уменьшение коэффициентов усиления ЖРДУ и корпуса РН в областях их резонансного возрастания. Наиболее распространенным способом обеспечения продольной устойчивости жидкостных РН является снижение низшей частоты колебаний жидкости в питающей магистрали посредством установки в ней газожидкостного аккумулятора [2, 4-7]. Следует отметить, что при этом возникает возможность потери продольной устойчивости РН из-за сближения собственной частоты колебаний ее корпуса со второй частотой колебаний жидкости в питающей магистрали.

Для подавления колебаний упругих конструкций используется динамический гаситель колебаний (ДГК) – элемент, обладающий фильтрующими свойствами, который настраивается в “антирезонанс” с опасной частотой и подавляет ее [8, 9]. К числу таких конструкций относится и корпус РН. ДГК не устраняет колебания полностью, а лишь снижает их амплитуды, однако он может быть установлен в уже изготовленную ракету, в то время как установить демпфер в жидкостной ракетный двигатель (ЖРД) или питающую магистраль готовой ракеты практически невозможно. Динамический гаси-

тель продольных колебаний общей массой около 200 кг, выполненный в виде 4 грузов на упругой подвеске, был установлен в хвостовом отсеке советской межконтинентальной баллистической ракеты УР-100Н УТТХ (по классификации НАТО — SS-19 mod.2 Stiletto) и обеспечил снижение амплитуд колебаний продольной перегрузки конструкции РН до допустимого уровня [4].

Следует отметить, что общие критерии выбора места установки, частоты колебаний и массы ДГК [8, 9] не всегда могут быть использованы для жидкостных РН по техническим причинам [10]. Кроме того, значение частоты продольных колебаний корпуса РН, на которую должен быть настроен ДГК, изменится при полете РН.

В настоящей статье рассмотрена задача выбора параметров ДГК для снижения уровня амплитуд продольных колебаний жидкостных РН и предложен подход к ее решению на основе математического моделирования динамического взаимодействия ЖРДУ с корпусом РН и анализа устойчивости динамической системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” в линейной и нелинейной постановке.

### Постановка задачи и концепция исследования

В мировой практике анализ продольной устойчивости РН выполняется как анализ устойчивости динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” по I-му приближению Ляпунова на основе ее линеаризованной математической модели с замороженными коэффициентами [1-7, 11, 13]. В этой модели обычно учитываются нескольких низших тонов собственных продольных колебаний корпуса РН, которые описываются уравнениями в обобщенных нормальных координатах. Такая модель не позволяет исследовать влияние характеристик ДГК и отдельных элементов корпуса РН на продольную устойчивость РН и выбрать значения параметров ДГК. Для решения этой задачи предложено использовать расширенную математическую модель динамического взаимодействия ЖРДУ и корпуса РН, в которой продольные колебания корпуса РН описываются как колебания многосвязной диссипативной системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках” [11].

Кроме того, поскольку ДГК не устраняет колебания полностью, его эффективность предлагается оценивать на основе результатов расчетов амплитуд продольных колебаний РН, выполненных с использованием нелинейной математической модели динамической системы “ЖРДУ – корпус РН” [12].

Предлагаемый подход к выбору параметров динамического гасителя продольных колебаний жидкостных РН требует решения таких задач:

– построение линейной математической модели системы “конструкция РН с ДГК – топливо в баках”, описывающей свободные продольные колебания корпуса РН с учетом диссипации энергии, и определение параметров его собственных колебаний [13];

– построение нелинейной и линейной (линеаризованной) математической модели системы “питающие магистрали – маршевые жидкостные ракетные двигатели (ЖРД)”, описывающей низкочастотные процессы в ЖРДУ с учетом кавитационных явлений в насосах [14];

– построение расширенной линейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, в которой продольные колебания корпуса РН описываются как механические колебания многосвязной диссипативной системы “конструкция РН с ДГК – топливо в баках” [11];

– выбор параметров ДГК в результате численного исследования устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” в линейной постановке (по I-му приближению Ляпунова) [10];

– построение нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, описывающей продольные колебания жидкостной РН с учетом нескольких низших тонов собственных продольных колебаний корпуса РН [12], и расчет амплитуд ее колебаний;

– оценка эффективности ДГК на основе анализа расчетных амплитуд продольных колебаний РН.

Предлагаемый подход изложен на примере выбора параметров ДГК для жидкостной РН, неустойчивой по отношению к продольным колебаниям на двух интервалах времени полета РН в период работы ЖРДУ первой ступени [12]. Стартовая масса этой РН составляет 200 тонн, маршевые двигатели имеют насосную систему подачи и выполнены по схеме без дожигания генераторного газа. В рассматриваемом случае выбор оптимального места установки ДГК и его массы не проводился. Предполагалось, что ДГК будет установлен в хвостовом отсеке, поскольку это место наиболее доступно для проведения технических работ в уже построенной ракете. Принимая во внимание, что допустимое значение массы ДГК строго ограничивается из соображений минимизации веса РН, а увеличение массы ДГК в допустимых пределах, как показано в статье [10], не оказывает существенного влияния на устойчивость линейной динамической системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, масса ДГК ( $m_{\text{ДГК}}$ ) полагалась равной 200 кг. Учет кавитационных явлений в насосах ЖРДУ при моделировании продольных колебаний жидкостной РН осуществлялся на основе разработанных в ИТМ НАНУ и ГКАУ математических моделей кавитационных колебаний [14].

## Построение математических моделей

При построении расширенной математической модели динамической системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, описывающей продольные колебания жидкостной РН с ДГК, используется представление корпуса РН в виде упругого тонкостенного стержня переменного сечения, на продольной оси которого расположены осцилляторы с вязким трением. Стержень имитирует конструкцию РН, а осцилляторы – двигатели и жидкое топливо в баках [3, 15, 16]. Осциллятор, имитирующий установленный в хвостовом отсеке РН, присоединяется к стержню в сечении, соответствующем нижнему силовому шпангоуту корпуса РН [10]. В расчетной схеме продольных колебаний корпуса РН стержень заменяется цепочкой осцилляторов с вязким трением [11, 13]. Таким образом, продольные колебания корпуса РН моделируются как механические колебания многосвязной диссипативной системы “конструкция РН с ДГК – топливо в баках” и описываются матричным уравнением:

$$M_K \delta \ddot{X}(t) + B_K \delta \dot{X}(t) + C_K \delta X(t) = 0, \quad (1)$$

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

$M_K$ ,  $B_K$ ,  $C_K$  – матрицы масс, коэффициентов демпфирования и жесткости связей;

$t$  – время полета.

Линейная математическая модель низкочастотной динамики ЖРДУ в общем виде представляется матричным уравнением

$$B_D \delta \dot{Y}(t) + C_D \delta Y(t) = 0, \quad (2)$$

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

$B_D$ ,  $C_D$  – матрицы ее коэффициентов;

Соответственно, линейная математическая модель динамической системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, имеет следующий вид:

$$M_K \delta \ddot{X}(t) + B_K \delta \dot{X}(t) + C_K \delta X(t) = U_K \delta Y(t), \quad (3)$$

$$B_D \delta \dot{Y}(t) + C_D \delta Y(t) = U_D \delta \ddot{X}(t), \quad (4)$$

где  $U_K$ ,  $U_D$  – матрицы коэффициентов при возмущениях, действующих на корпус РН при работе ЖРДУ и, соответственно, на ЖРДУ со стороны корпуса РН при его продольных колебаниях.

Нелинейная математическая модель продольных колебаний жидкостной РН представляется уравнениями, соответствующими (3) – (4):

$$F_K(\ddot{X}, \dot{X}, X, t) = F_{EK}(Y, t), \quad (5)$$

$$F_D(\dot{Y}, Y, t) = F_{ED}(\ddot{X}, t), \quad (6)$$

где  $F_K$ ,  $F_{EK}$ ,  $F_D$ ,  $F_{ED}$  – нелинейные функции;

$X$  – вектор осевых (продольных) координат центров масс элементов системы “конструкция РН – жидкое топливо в баках”;

$Y$  – вектор параметров динамической системы “питающие магистрали – маршевые ЖРД”.

В нелинейной модели учитываются  $n_T$  тонов собственных продольных колебаний корпуса РН, поэтому уравнение (5) заменяется уравнениями

$$\ddot{q}_i + 2\delta_i f_i \dot{q}_i + (2\pi f_i)^2 q_i = (\beta_{di} / m_i) \sum_k \alpha_k u_k, \quad (7)$$

где  $q_i$  –  $i$ -я нормальная координата системы “конструкция РН – жидкое топливо в баке” ( $i = 1, \dots, n_T$ );

$\delta_i$ ,  $f_i$ ,  $m_i$ , – декремент, частота и обобщенная масса  $i$ -го тона собственных колебаний системы;

$\beta_{di}$  – коэффициент  $i$ -й формы ее собственных колебаний в месте крепления ЖРД к корпусу РН.

Значения параметров собственных продольных колебаний корпуса РН с ДГК, необходимые для построения уравнений (5), определяются в результате расчета корней характеристического уравнения системы (1).

## Выбор параметров ДГК

Выбор параметров ДГК проводится в результате численного исследования устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” в линейной постановке (по Ляпунову), которое выполняется с использованием ее расширенной линейной математической модели (3) – (4) с замороженными коэффициентами. Параметры колебаний исследуемой системы определяются на основе решения проблемы собственных значений [17]. При анализе устойчивости рассматриваются только собственные значения  $\lambda_i = -(\delta_i f_i) + j \cdot 2\pi f_i$ , лежащие в ограниченной области ( $0 < f_i \leq 50$  Гц) вблизи мнимой оси и справа от нее. Признаком неустойчивости системы является отрицательное значение хотя бы одного показателя затухания колебаний  $\delta_i$ . Здесь и далее областями неустойчивости системы будем называть интервалы времени полета РН, в которых  $\delta_i < 0$  хотя бы для одной собственной частоты  $f_i$  колебаний системы.

Параметры ДГК выбираются на основе оценки его эффективности. Для оценки эффективности ДГК в линейной постановке предложено использовать два критерия: способность ДГК сократить области неустойчивости системы и уменьшить по модулю отрицательные значения показателей затухания ее колебаний. Окончательная оценка эффективности ДГК дается в результате расчета амплитуд колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК”, который выполняется на основе ее нелинейной математиче-

ской модели с переменными коэффициентами для выбранных значений параметров ДГК.

### Результаты исследования

Исследуемая система “ЖРДУ – корпус РН” неустойчива на двух интервалах времени полета. Неустойчивость в начале полета возникает при близких значениях частоты колебаний жидкости в питающей магистрали окислителя  $f_{O1}$  и частоты II-го тона продольных колебаний корпуса РН  $f_{K2}$ , при этом  $8 \text{ Гц} < f_{K2} < 9 \text{ Гц}$ . Неустойчивость во второй области ( $22 \text{ с} < t < 85 \text{ с}$ ) обусловлена сближением частоты I-го тона колебаний корпуса  $f_{K1}$  ( $7,3 \text{ Гц} < f_{K1} < 9,5 \text{ Гц}$ ) с частотой  $f_{O1}$  (рис. 1, 2).

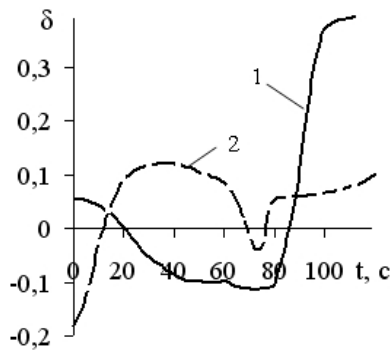


Рис. 1. Показатели затухания колебаний системы “ЖРДУ – корпус РН”:  
1 – на частоте  $f_1 \approx f_{K1}$ ; на частоте  $f_2 \approx f_{K2}$

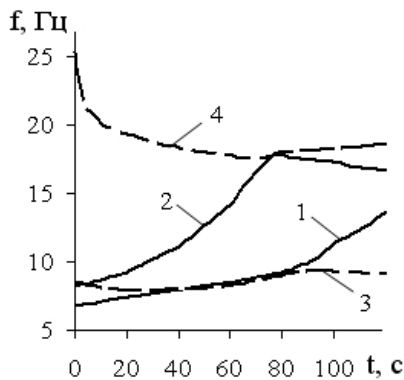


Рис. 2. Частоты I-го и II-го тона собственных продольных колебаний корпуса РН и жидкости в линиях питания ЖРД окислителем и горючим:  
1, 2 – корпуса РН; 3, 4 – жидкости в питающей магистрали окислителя и горючего

Значения частот  $f_1 \approx f_{K1}$  и  $f_2 \approx f_{K2}$  лежат в небольшом интервале ( $7,3 \text{ Гц}; 9,5 \text{ Гц}$ ), поэтому можно попытаться выбрать такое значение  $f_{ДГК}$ ,

чтобы ДГК, настроенный на постоянную частоту, подавлял колебания в обеих областях неустойчивости.

При исследовании устойчивости линейной системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” значение  $f_{ДГК}$  изменялось от  $7,3 \text{ Гц}$  до  $9,5 \text{ Гц}$ . Результаты исследования показали, что при  $f_{ДГК} \geq 9 \text{ Гц}$  ДГК малоэффективен в первой области неустойчивости, а при  $f_{ДГК} \leq 7,5 \text{ Гц}$  – во второй. Наиболее эффективен ДГК с частотой настройки  $8,2 \text{ Гц} \dots 8,5 \text{ Гц}$ .

На рис. 3 приведены собственные частоты низших тонов колебаний корпуса РН с ДГК при  $f_{ДГК} = 8,5 \text{ Гц}$  ( $f'_{K1}, f'_{K2}, f'_{K3}$ ) и без ДГК ( $f_{K1}, f_{K2}$ ).

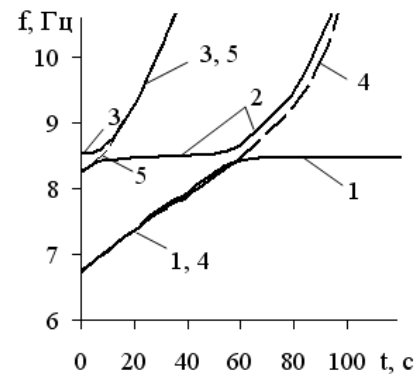


Рис. 3. Частоты низших тонов собственных продольных колебаний корпуса РН с ДГК (1, 2, 3) при  $f_{ДГК} = 8,5 \text{ Гц}$  и без ДГК (4, 5):  
1 –  $f'_{K1}$ ; 2 –  $f'_{K2}$ ; 3 –  $f'_{K3}$ ; 4 –  $f_{K1}$ ; 5 –  $f_{K2}$ .

Как видно из рис. 3,

$$f'_{K1}(t) \approx \begin{cases} f_{K1}(t), & f_{K1}(t) < f_{ДГК}(t); \\ f_{ДГК}(t), & f_{K1}(t) > f_{ДГК}(t); \end{cases}$$

$$f'_{K2}(t) \approx \begin{cases} f_{K2}(t), & f_{K2}(t) < f_{ДГК}(t); \\ f_{ДГК}(t), & f_{K2}(t) > f_{ДГК}(t); \\ f_{K1}(t), & f_{ДГК}(t) < f_{K1}(t); \end{cases}$$

$$f'_{K3}(t) \approx \begin{cases} f_{K2}(t), & f_{K2}(t) > f_{ДГК}(t); \\ f_{ДГК}(t), & f_{K2}(t) < f_{ДГК}(t). \end{cases}$$

При  $f_{ДГК} = 8,5 \text{ Гц}$  линейная система “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” имеет три области неустойчивости – А, В и С, которые по величине меньше областей неустойчивости I, II системы без ДГК (рис. 4). Область С меньше области I на 33 %, области А и В меньше области II на 60 % и 65 % соответственно. Кроме того, отрицательные значения показателей затухания колебаний у системы с ДГК значительно меньше по модулю, чем у системы без ДГК.

Таким образом, при установке ДГК колебания в системе нарастают медленнее (особенно в областях А и В) и имеют меньшую продолжительность, поэтому и их амплитуды должны быть меньше.

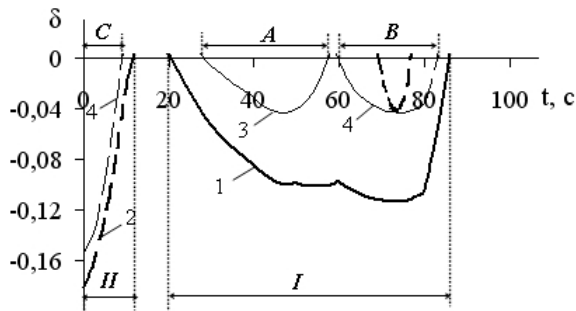


Рис. 4. Области неустойчивости линейной системы “ЖРДУ – корпус РН” с ДГК и без ДГК:  
 I, II – области устойчивости системы без ДГК;  
 А, В, С – с ДГК при  $f_{\text{ДГК}} = 8,5 \text{ Гц}$  ;  
 1, 2 – показатели затухания колебаний системы без ДГК с собственными частотами  $f_1 \approx f_{K1}$  и  $f_2 \approx f_{K2}$  ;  
 3, 4 – показатели затухания колебаний системы с ДГК с собственными частотами  $f'_1 = f'_{K1}$ ,  $f'_2 = f'_{K2}$

Амплитуды колебаний продольных перегрузок корпуса РН в месте установки космического аппарата (КА) определялись на основе нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” с переменными коэффициентами. Результаты показали, что наибольшее снижение уровня амплитуд продольных колебаний РН обеспечивает ДГК с частотой настройки  $f_{\text{ДГК}} = 8,0 \text{ Гц} \dots 8,5 \text{ Гц}$  (рис. 5).

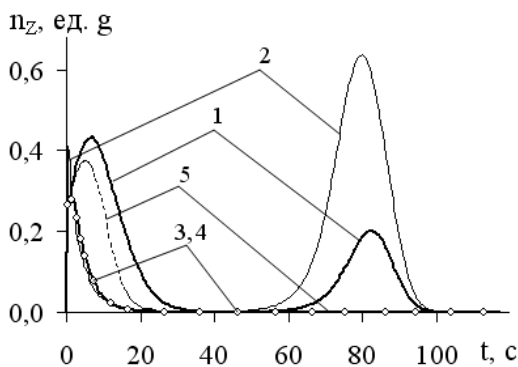


Рис. 5. Огибающие расчетных амплитуд колебаний продольной перегрузки КА:  
 1 – без ДГК; 2, 3, 4, 5 – с ДГК при  $f_{\text{ДГК}} = 7,5 \text{ Гц}$ ;  
 8,2 Гц; 8,5 Гц; 9 Гц соответственно

Таким образом, рекомендации по выбору параметров ДГК, разработанные в результате анализа устойчивости системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” в линейной и нелинейной постановке, совпадают.

Что касается областей неустойчивости, то в нелинейной системе “ЖРДУ – корпус РН” с переменными коэффициентами они меньше, чем в линейной и нелинейной системе с замороженными коэффициентами (рис. 4, 6). Кроме того, расчетные амплитуды колебаний в нестационарной системе (рис. 6 б) значительно меньше, чем в системе с замороженными коэффициентами (рис. 6 а). Значения амплитуд колебаний системы с замороженными коэффициентами являются предельными для амплитуд колебаний нестационарной системы [18], а в точках  $S_1, S_2, Q_1, Q_2$  их значения совпадают.

Таким образом, установка в хвостовом отсеке рассматриваемой РН динамического гасителя колебаний массой 200 кг, настроенного на постоянную частоту  $f_{\text{ДГК}} = 8,2 \dots 8,5 \text{ Гц}$ , позволила бы устранить продольные колебания РН во второй области неустойчивости и уменьшить их амплитуды в 1,5 раза – в первой. При этом ДГК с частотой настройки 8,2 Гц остается таким же эффективным при разбросе значений частот собственных продольных колебаний корпуса РН, не превышающем  $\pm 0,3 \dots 0,4 \text{ Гц}$ .

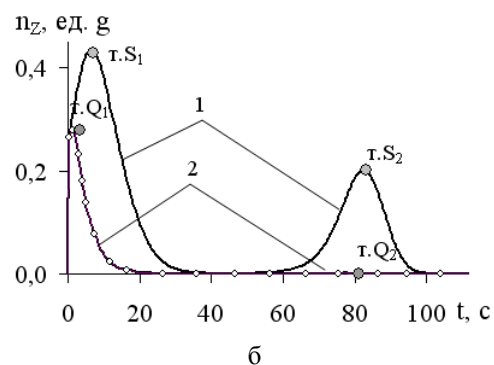
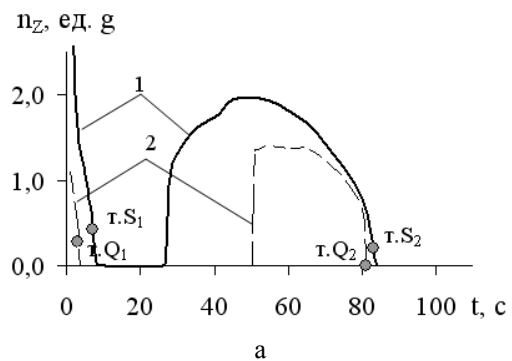


Рис. 6. Огибающие расчетных амплитуд колебаний продольной перегрузки КА:  
 а – расчет по нелинейной модели системы “ЖРДУ – корпус РН” с замороженными коэффициентами;  
 б – с переменными коэффициентами;  
 1 – система без ДГК; 2 – с ДГК при  $f_{\text{ДГК}} = 8,5 \text{ Гц}$

## Заключение

Разработан подход к выбору параметров и оценке эффективности динамического гасителя продольных колебаний жидкостных РН, основанный на численном исследовании устойчивости динамической системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” в линейной и нелинейной постановке. Использование при исследовании расширенной линейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” с замороженными коэффициентами позволяет оперативно решить задачу рационального выбора параметров ДГК. Правильность этого выбора подтверждена результатами расчета амплитуд колебаний продольной перегрузки КА на основе нелинейной математической модели системы “ЖРДУ – корпус РН с ДГК” с переменными коэффициентами.

На основе разработанного подхода решена задача выбора параметров ДГК для подавления продольных колебаний жидкостной РН на двух интервалах времени ее полета. Показано, что размещение в хвостовом отсеке РН ДГК массой 200 кг, настроенного на постоянную частоту 8,2 Гц, обеспечивает устранение продольных колебаний РН на одном интервале времени полета и уменьшение их амплитуд в полтора раза – на другом.

## Литература

1. Oppenheim, B. W. *Advanced Pogo Stability Analysis for Liquid Rockets [Text]* / B. W. Oppenheim, S. Rubin // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 1993. – Vol. 30, No. 3. – P. 360 – 383.
2. Натанзон, М. С. *Продольные автоколебания жидкостной ракеты [Текст]* / М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
3. Колесников, К. С. *Динамика ракет [Текст]* / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1980. – 376 с.
4. Рабинович, Б. И. *Неустойчивость жидкостных ракет и космических аппаратов и некоторые фрагменты борьбы с ней [Текст]* / Б. И. Рабинович. – М. : ИКИ РАН, 2006. – 40 с. (Препринт / Российская академия наук ; Институт космических исследований ; Н/8977/Пр-2123).
5. *Динамика жидкостных ракетных двигателей установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей [Текст]* / В. В. Пилипенко, В. А. Задонцев, Н. И. Довготько [и др.] // *Техническая механика*. – 2001. – № 2. – С. 11 – 37.
6. *Preventing POGO on Titan IVB. Crosslink [Text]* // *The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology. Summer 2003*. – P. 3.
7. Pilipenko, V. V. *Providing the LPRE-Rocket Structure Dynamic Compatibility [Text]* / V. V. Pilipenko // *AIAA / SAE / ASME / ASEE 29th Propulsion Conference and Exhibit (June 28 – 30, 1993)*. – Monterey, CA. – 10 p.
8. Корнев, Б. Г. *Динамические гасители колебаний. Теория и технические приложения [Текст]* / Б. Г. Корнев, Л. М. Резников. – М. : Наука, 1988. – 306 с.
9. *Динамические гасители. Техническая информация и типы устройств [Электронный ресурс] // Системы защиты конструкций*. – Maurer Söhne GmbH & Co.KG, Мюнхен, Германия. – 20 с. – Режим доступа: [http://www.maurer-soehne.ru/files/bauwerkschutzsysteme/pdf/en/brochure/TMD\\_RU](http://www.maurer-soehne.ru/files/bauwerkschutzsysteme/pdf/en/brochure/TMD_RU). – 6.03.2015.
10. Хоряк, Н. В. *Рациональный выбор параметров динамического гасителя продольных колебаний жидкостной ракеты-носителя [Текст]* / Н. В. Хоряк // *Техническая механика*. – 2014. – № 3. – С. 58 – 70.
11. Хоряк, Н. В. *Математическое моделирование взаимодействия продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты как многосвязной упругодиссипативной системы и динамических процессов в двигательной установке [Текст]* / Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев // *Техническая механика*. – 2010. – № 3. – С. 27 – 37.
12. *Теоретическое определение амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей [Текст]* / В. В. Пилипенко, Н. И. Довготько, С. И. Долгополов [и др.] // *Космічна наука і технологія*. – 1999. – Т. 5, № 1. – С. 90 – 96.
13. 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.
14. Пилипенко, В. В. *Кавитационные автоколебания [Текст]* / В. В. Пилипенко. – К. : Наук. думка, 1987. – 316 с.
15. Гладкий, В. Ф. *Динамика конструкции летательного аппарата [Текст]* / В. Ф. Гладкий. – М. : Наука, 1969. – 496 с.
16. *Динамика старта жидкостных ракет-носителей космических аппаратов [Текст]* / Г. И. Богомаз, Н. Е. Науменко, М. Б. Соболевская [и др.]. – К. : Наук. думка, 2005. – 248 с.
17. Хоряк, Н. В. *Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД – корпус РН” по спектру матрицы: методические основы и приложение [Текст]* / Н. В. Хоряк // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 9(45). – С. 87 – 91.
18. Хоряк, Н. В. *Влияние демпфирования колебаний жидкого топлива в баках на амплитуды продольных колебаний жидкостной ракеты [Текст]* / Н. В. Хоряк, А. Д. Николаев, С. И. Долгополов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 7(114). – С. 34 – 40.

*Поступила в редакцию 8.06.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотр. Г. А. Стрельников, Институт технической механики НАН Украины и ГКА Украины, Днепрпетровск.

### ТЕОРЕТИЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДИНАМІЧНОГО ГАСИТЕЛЯ ПОЗДОВЖНІХ КОЛИВАНЬ РІДИННИХ РАКЕТ-НОСІЇВ

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

Розглянуто задачу зниження рівня амплітуд поздовжніх коливань рідинних ракет-носіїв (РН) шляхом установки в корпусі РН динамічного гасителя коливань (ДГК). Запропоновано підхід до вирішення цієї задачі на основі математичного моделювання взаємодії низькочастотних процесів у рідинній ракетній двигунній установці (РРДУ) із пружними поздовжніми коливаннями корпусу РН та аналізу стійкості динамічної системи “РРДУ – корпус РН з ДГК” в лінійній та нелінійній постановці. Вибір параметрів ДГК виконується в результаті чисельного дослідження стійкості системи “РРДУ – корпус РН з ДГК” по I-му наближенню Ляпунова із використанням її розширеної математичної моделі, в якій пружні поздовжні коливання корпусу РН з ДГК описуються як коливання розгалуженого ланцюжка дискретних мас. Ефективність ДГК визначається в результаті визначення амплітуд коливань поздовжнього перевантаження рідинної РН на основі нелінійної математичної моделі динамічної системи “РРДУ – корпус РН з ДГК”, в якій враховується декілька нижчих тонів поздовжніх коливань корпусу РН із ДГК. Викладено результати вирішення цієї задачі для випадку, коли втрата поздовжньої стійкості РН відбувається на двох інтервалах часу польоту.

**Ключові слова:** рідинна ракета, рідинна ракетна двигунна установка, пружні поздовжні коливання, поздовжня стійкість, динамічний гаситель коливань, динамічна система, математичне моделювання, параметри власних коливань, стійкість по першому наближенню Ляпунова.

### THEORETICAL EFFICIENCY ESTIMATION OF DYNAMIC DAMPER OF POGO VIBRATIONS OF LIQUID ROCKET LAUNCH VEHICLE

*N. V. Khoriak, A. D. Nykolayev, S. I. Dolgoplov*

The problem of reducing the amplitude of the POGO (longitudinal) vibrations of liquid launch vehicles (LV) by setting the in the LV structure of the dynamic vibration damper (DVD) is considered. An approach to solve this problem based on the mathematical modeling of dynamic interaction between propulsion system and LV structure, and on the stability analysis of dynamical systems “propulsion system – LV structure with DVD” in the linear and nonlinear formulation. Determination of DVD parameters is performed by numerical analysis of the system stability at Lyapunov first approximation using its advanced mathematical model, in which the LV elastic longitudinal structural vibrations are described as branched chains of discrete masses. Efficiency DVD is determined on the basis computed amplitudes of LV structure load factor using non-linear mathematical model of the systems “propulsion system – LV structure with DVD” with taking into account several of the lower modes of structure vibrations. The results of the solution of this problem are presented for the case, when the liquid LV was unstable in two flight time intervals.

**Keywords:** liquid launch vehicle, liquid rocket propulsion system, elastic longitudinal vibrations, longitudinal (POGO) stability, dynamic damper, dynamic system, mathematical modeling, eigenmodes, system stability at Lyapunov first approximation.

**Хоряк Наталя Витальевна** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. отдела динамики гидромеханических систем, Институт технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Днепрпетровск, Украина, e-mail: khoryak@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, Днепрпетровск, Украина, e-mail: odnikolayev@gmail.com.

**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, Днепрпетровск, Украина.