

УДК 621.671:532.528:629.76.017.2

В.В. ПИЛИПЕНКО, С.И. ДОЛГОПОЛОВ, Н.В. ХОРЯК, А.Д. НИКОЛАЕВ*Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепрпетровск, Украина***МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ ПРИ ДВУХЧАСТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ
ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЖРДУ – КОРПУС РАКЕТЫ**

Проведено численное исследование продольных колебаний жидкостной ракеты для случая, когда замкнутая динамическая система ЖРДУ–корпус ракеты неустойчива одновременно на двух частотах, близких к собственным частотам колебаний корпуса ракеты. Показано, что при двухчастотной продольной неустойчивости жидкостной ракеты и кратности собственных частот продольных колебаний корпуса ракеты в системе реализуется колебательный режим со значительным (трехкратным) увеличением амплитуд осевой виброперегрузки ракеты по сравнению со случаем одночастотной неустойчивости системы.

жидкостная ракета, продольные колебания, кавитационные колебания, собственные частоты и декременты колебаний, амплитуды колебаний продольной перегрузки, двухчастотная неустойчивость системы

Введение

Продольные колебания жидкостных ракет-носителей (РН) возникают в результате динамического взаимодействия упругой конструкции корпуса РН с работающей жидкостной ракетной двигательной установкой (ЖРДУ). Они опасны тем, что способны нарушить нормальную работу системы управления, агрегатов ЖРДУ и привести к различным аварийным ситуациям (вплоть до разрушения элементов конструкции РН).

Система ЖРДУ–корпус ракеты является многоконтурной колебательной системой, в которую входит корпус РН, линии питания ЖРДУ с кавитирующими насосами и двигатель. В этой системе могут развиваться и взаимодействовать между собой колебания жидкости в сложных магистралях с разветвленной структурой, продольные и кавитационные колебания [1, 2]. При этом колебания могут как усиливаться в результате синхронизации, так и гасить друг друга в результате конкуренции. Динамическое поведение жидкостной РН при многочастотной неустойчивости ракеты на частотах, близких к собственным частотам продольных колебаний корпуса РН, в достаточной степени не исследовано.

Целью статьи является численный анализ характера продольных колебаний жидкостной РН при двухчастотной неустойчивости динамической системы ЖРДУ – корпус ракеты.

**1. Математическая модель системы
ЖРДУ – корпус ракеты**

Математическая модель динамической системы ЖРДУ–корпус РН, используемая при анализе продольной устойчивости жидкостных РН, включает три блока уравнений: уравнения низкочастотной динамики ЖРД, питающих магистралей и уравнения продольных колебаний корпуса РН. Взаимодействие корпуса РН и ЖРДУ учитывается, во-первых, в уравнениях динамики корпуса РН через действие внешних (по отношению к корпусу) сил, наибольшей из которых является сила тяги двигательной установки, и, во-вторых, в уравнениях динамики питающих магистралей через действие динамического ускорения корпуса РН на столбы жидкости в топливных баках и питающих магистралях.

Продольные колебания корпуса жидкостных РН могут быть описаны обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями в обобщенных

нормальных координатах, с переменными по времени коэффициентами, которые для i -го тона колебаний имеют вид [3]

$$\frac{d^2 z_i}{dt^2} + \frac{\omega_i \delta_i}{\pi} \cdot \frac{dz_i}{dt} + \omega_i^2 z_i = \frac{\beta_D \cdot \bar{R}_{sum} \cdot (p_k - \bar{p}_k)}{m_i \cdot \bar{p}_k},$$

где z_i – продольное перемещение; t – время; ω_i , δ_i – круговая собственная частота и декремент i -го тона колебаний корпуса; β_D – коэффициент формы колебаний корпуса в месте крепления двигательной установки; $\bar{R}_{sum}$ – суммарная тяга ЖРДУ первой ступени; m_i – приведенная масса; p_k , $\bar{p}_k$ – текущее и номинальное давления в камерах маршевого двигателя.

Математическое моделирование динамики жидкости в питающей магистрали от дальнего бака ввиду протяженности этой магистрали проводится с учетом распределенности её параметров с использованием метода конечных элементов [4]. Особое место в моделировании динамики всего ЖРД занимает моделирование кавитационных явлений в шнеко-центробежных насосах (ШЦН) маршевых ЖРД. Учет кавитационных явлений в насосах двигателей производился в соответствии с гидродинамической моделью кавитирующих насосов [5]. Для определения коэффициентов уравнений динамики кавитирующих насосов использовались экспериментально-расчетные зависимости [6], полученные по результатам экспериментальных исследований 20 ШЦН различной размерности. Блок нелинейных уравнений низкочастотной динамики кавитирующих ШЦН включает:

– уравнение динамики кавитационных каверн V_k , выраженное относительно давления на входе в насос p_1 :

$$p_1 = p_{cp} + k^* (\tilde{V}_k, \varphi) \cdot \frac{\rho W_1^2}{2} + B_1 T_k \frac{dV_k}{dt},$$

– уравнение баланса расходов в проточной части насоса:

$$\gamma \frac{dV_k}{dt} = G_2 - G_1,$$

– уравнение, определяющее давление на выходе из насоса

$$p_2 = p_1 + p_H(n, G_2) \cdot f_H(\tilde{V}_k) - I_p \cdot \frac{dG_2}{dt} + D \frac{dG_2}{dt},$$

где p_{cp} – давление срыва; k^* , B_1 , T_k – число кавитации, упругость и постоянная времени кавитационных каверн; $\tilde{V}_k$ – относительный объем кавитационных каверн (отнесен к объему проточной части шнека, где располагаются каверны перед срывом); $\rho W_1^2 / 2$ – скоростной напор шнека; φ – коэффициент расхода, равный отношению параметра режима q_1 к параметру режима при возникновении обратных течений на входе в насос; q_1 – параметр режима, равный отношению входного расхода к расходу при нулевом угле атаки потока жидкости на лопатку шнека G_0 ; $p_H(n, G_2)$ – напорная характеристика насоса на бескавитационном режиме работы от числа оборотов n и расхода на выходе из насоса G_2 ; $f_H(\tilde{V}_k)$ – кавитационная функция насоса; I_p , D – инерционные коэффициенты.

Линейная модель продольных колебаний жидкостных ракет, используемая в данной работе, получена путем линеаризации нелинейной модели.

2. Результаты моделирования

Объектом исследований является космическая РН, у которой на активном участке траектории полета (при работе ЖРДУ первой ступени) возникают продольные колебания, обусловленные динамическим взаимодействием ЖРДУ и корпуса РН. На рис. 1 а, б показаны результаты расчета собственных частот f_i и показателей затухания δ_i колебаний системы ЖРДУ–корпус РН, полученные по линейной модели с “замороженными” коэффициентами. Показатели затухания δ_i по форме представления аналогичны декрементам колебаний одночастотных систем, и отрицательное значение хотя бы одного из них является признаком неустойчивости системы по Ляпунову.

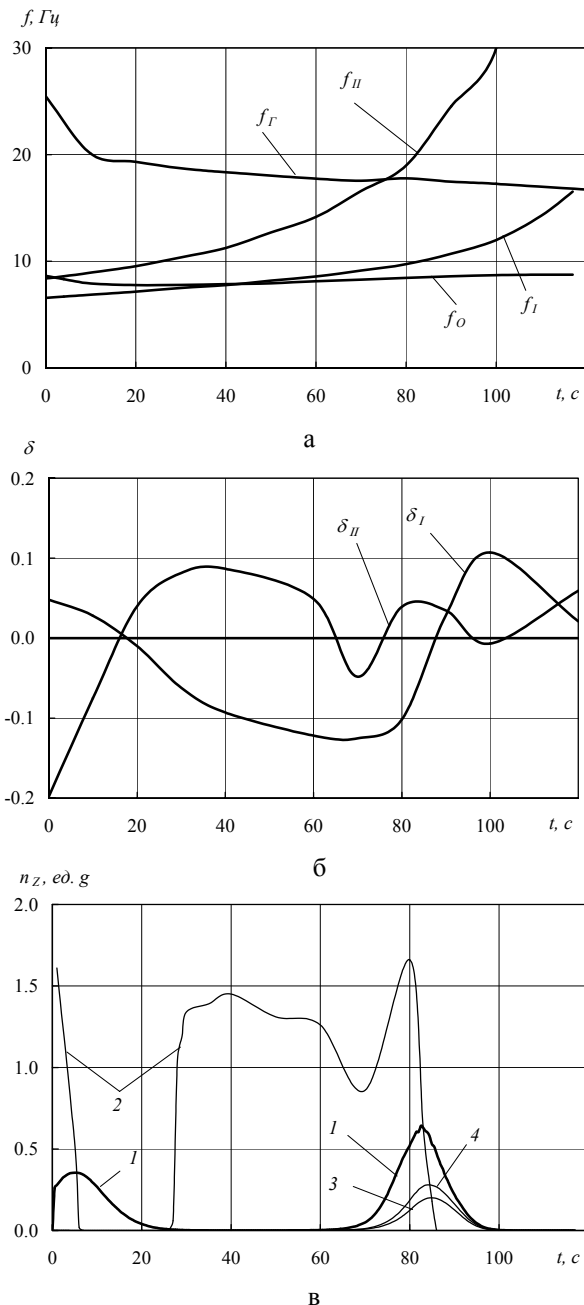


Рис. 1. Зависимости параметров продольных колебаний от времени полета РН (а – собственные частоты; б – показатели затухания; в – огибающие амплитуд продольной виброперегрузки): 1 – нелинейная нестационарная модель (I-й и II-й тон колебаний); 2 – нелинейная стационарная модель (I-й и II-й тон колебаний); 3 – нелинейная нестационарная модель (I-й тон колебаний); 4 – нелинейная нестационарная модель (I-й и II-й тон колебаний) с увеличенным демпфированием II-го тона колебаний.

Из рис. 1 а, б следует, что исследуемая система имеет несколько областей неустойчивости, обусловленной динамическим взаимодействием ЖРДУ и корпуса РН при близких значениях собственных

частот колебаний их подсистем (продольной неустойчивости). Колебания с собственной частотой f_{II} характеризуются отрицательным затуханием на интервалах времени полета РН (0; 27 с), (65 с; 75 с) и (96 с; 103 с). Неустойчивость системы на первом интервале возникает при близких значениях собственной частоты колебаний жидкости в линии питания окислителем f_o и частоты II-го тона колебаний корпуса РН. Потеря устойчивости на втором и третьем интервалах времени возникает в результате сближения собственной частоты II-го тона колебаний корпуса РН с собственной частотой колебаний жидкости в питающей магистрали горючего $f_2 \approx 18$ Гц, а затем со второй собственной частотой колебаний жидкости в питающей магистрали окислителя $f_{o2} \approx 32$ Гц. Колебания системы с собственной частотой f_I характеризуются отрицательным затуханием на интервале времени (19 с; 85 с), при этом неустойчивость системы объясняется близкими значениями собственной частоты колебаний жидкости в питающей магистрали окислителя f_o и частоты I-го тона колебаний корпуса. Таким образом, на интервале времени (65 с; 75 с) реализуется двухчастотная неустойчивость: колебания нарастают одновременно на частотах, близких к частоте I-го и II-го тона продольных колебаний корпуса РН.

На рис. 1, в представлены огибающие амплитуд продольной виброперегрузки исследуемой РН, полученные по нелинейным нестационарной (кривая 1) и стационарной (кривая 2) моделям системы ЖРДУ – корпус РН. Результаты расчета областей неустойчивости по линейной и нелинейной стационарной модели системы ЖРДУ – корпус РН согласуются между собой, однако значительно отличаются от областей неустойчивости, полученных по нелинейной нестационарной модели. Последний результат является следствием нестационарности системы ЖРДУ – корпус РН.

Как следует из рис. 1 а и 1 в, нелинейная нестационарная система ЖРДУ–корпус РН имеет две области

неустойчивости по отношению к продольным колебаниям: от 0 до 27 с и от 64 с до 100 с полета РН. Неустойчивость системы в первой области объясняется близкими значениями собственной частоты колебаний жидкости в линии питания окислителем и частоты II-го тона колебаний корпуса. Возрастание амплитуд продольных колебаний во второй области имеет две причины: резонансное взаимодействие корпуса РН с линией питания ЖРД окислителем (на частоте I-го тона колебаний корпуса) и с линией питания ЖРД горючим (на частоте II-го тона). Этот вывод подтверждают расчетные зависимости некоторых параметров продольных колебаний от времени полета в двух областях неустойчивости, представленные на рис. 2. В первой области неустойчивости (рис. 2 а) колебания динамической перегрузки и давления на входе в насос окислителя и горючего происходят с частотой, близкой к частоте II-тона колебаний корпуса РН. Во второй области (рис. 2 б) колебания жидкости в линии питания окислителем и горючим происходят с разными частотами, а суммарная продольная перегрузка включает перегрузку по I-му и II-му тонам колебаний.

Факт взаимодействия двух подсистем нелинейной динамической системы ЖРДУ–корпус РН – контуров ЖРДУ–корпус РН (I тон) и ЖРДУ–корпус РН (II тон) – на частотах, близких к собственным частотам продольных колебаний корпуса РН (далее по тексту будет использоваться сокращенное выражение: взаимодействие продольных колебаний РН на частотах I-го и II-го тона продольных колебаний корпуса РН), подтверждается также результатами расчета амплитуд колебаний продольной перегрузки при раздельном и совместном учете продольных колебаний корпуса РН. Они показали, что максимальная амплитуда колебаний продольной перегрузки при учете одного I-го тона колебаний корпуса достигает 0,19 g (рис.1 в, кривая 3), а при учете одного II-го тона ее значения очень малы. Учет двух тонов колебаний корпуса РН привел к более чем 3-х кратному увеличению максимальной амплитуды продольных колебаний во второй области неустойчивости (с 0,19 g до 0,64 g).

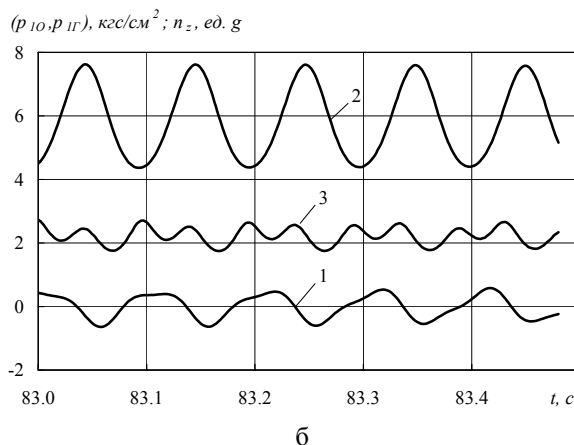
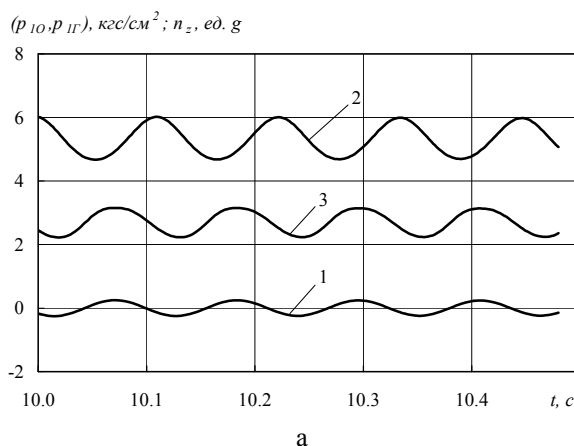


Рис. 2. Зависимости параметров продольных колебаний от времени полета (а – $t=10$ с; б – $t=83$ с):
1 – амплитуда колебаний продольной перегрузки;
2 – давление на входе в насос окислителя;
3 – давление на входе в насос горючего.

Анализируя расчетные значения параметров продольных колебаний исследуемой РН, необходимо также отметить, что в области двухчастотной неустойчивости системы ЖРДУ–корпус РН, при $t \approx 83$ с, собственные частоты I-го и II-го тона колебаний корпуса РН и соответствующие им собственные частоты колебаний замкнутой системы ЖРДУ–корпус РН имеют кратные значения (9,8 и 19,6 Гц).

Другое условие эффективного (сильного) взаимодействия продольных колебаний жидкостной РН при двухчастотной продольной неустойчивости было получено в результате анализа амплитуд колебаний продольной перегрузки РН при изменении демпфирования II-го тона колебаний корпуса РН.

Увеличение декремента II-го тона колебаний корпуса РН на 40% привело к уменьшению амплитуд колебаний системы ЖРДУ–корпус РН (II-й тон)

на частоте f_{II} до 0,0001g, при этом амплитуды колебаний системы ЖРДУ–корпус РН значительно уменьшились (кривые 1, 4 на рис. 1 в) – почти до уровня амплитуд колебаний системы ЖРДУ–корпус РН (I-й тон) (кривая 3 на рис. 1 в). Напротив, при уменьшении декремента II-го тона колебаний корпуса РН (и, соответственно, увеличении амплитуд продольной перегрузки системы ЖРДУ–корпус РН (II тон)) отмечено заметное увеличение амплитуд колебаний системы ЖРДУ–корпус РН (более чем в 1,5 раза). Таким образом, для взаимодействия продольных колебаний системы ЖРДУ–корпус РН необходимо, чтобы амплитуды продольных колебаний подсистем ЖРДУ–корпус РН (II тон) и ЖРДУ–корпус РН (II тон) достигали достаточного уровня. Результаты численного эксперимента показали, что при устранении резонансного взаимодействия корпуса РН и линии питания ЖРД горючим нарастание колебаний в системе ЖРДУ–корпус РН на интервале (65 с; 75 с) происходит только на частоте f_I , а влияние контура ЖРДУ–корпус РН (II тон) на суммарную продольную перегрузку колебаний в системе ЖРДУ–корпус РН практически отсутствует.

Заключение

Показано, что в нелинейной динамической системе ЖРДУ–корпус РН взаимодействие ее подсистем – контуров ЖРДУ–корпус РН (I тон) и ЖРДУ–корпус РН (II тон) – на частотах, близких к собственным частотам I-го и II-го тона продольных колебаний корпуса, может приводить к существенному (более чем в 3 раза) увеличению максимальных амплитуд колебаний продольной перегрузки. Определены условия, при которых возможно эффективное (сильное) взаимодействие продольных колебаний жидкостной РН. Это двухчастотная (в общем случае – многочастотная) неустойчивость РН по отношению к продольным колебаниям, которая обусловлена резонансным взаимодействием корпуса РН и линий питания ЖРД окислителем и горючим на частотах двух тонов колебаний корпуса РН одно-

временно, достаточно большой уровень амплитуд продольных колебаний РН по каждому из этих тонов и кратность собственных частот колебаний корпуса РН.

Полученные результаты могут быть полезны при анализе продольной устойчивости и теоретическом определении амплитуд продольных колебаний модернизируемых жидкостных РН.

Литература

1. Динамика жидкостных ракетных двигательных установок и продольная устойчивость жидкостных ракет-носителей / В.В. Пилипенко, В.А. Задонцев, Н.И. Довготько и др. // Техническая механика. – 2001. – № 2. – С.11-37.
2. Анализ взаимодействия продольных и кавитационных колебаний в нелинейной динамической системе ЖРДУ – корпус ракеты / В.В. Пилипенко, А.С. Белецкий, А.Д. Николаев и др. // Международ. конф. «Научно-технические проблемы космонавтики и ракетостроения». – Калининград, Моск. обл.: ЦНИИМаш, 1996. – С. 254-255.
3. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
4. Теория автоматического управления ракетными двигателями / А.А. Шевяков, В.М. Калнин, М.В. Науменкова, В.Г. Дятлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 288 с.
5. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания. – К.: Наук. думка, 1989. – 316 с.
6. Пилипенко В.В., Долгополов С.И. Экспериментально-расчетное определение коэффициентов уравнения динамики кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах различных типоразмеров // Техническая механика. – 1998. – Вып. 8. – С. 50-56.

Поступила в редакцию 30.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.А. Задонцев. Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Днепропетровск.