

УДК 621.455:534.12

**И.Д. БЛОХА, А.Д. НИКОЛАЕВ, Н.В. ХОРЯК, А.С. БЕЛЕЦКИЙ**

*Институт технической механики НАНУ и НКАУ, Украина*

## **ПРОДОЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВЕРХНЕЙ СТУПЕНИ И ПРОБЛЕМА ПРОДОЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ**

С целью анализа влияния динамических характеристик верхней (третьей) ступени жидкостной ракеты-носителя (РН) на параметры продольных колебаний полезного груза, выводимого на рабочую орбиту, проведено математическое моделирование динамики линейной системы «ЖРДУ первой ступени – корпус трехступенчатой РН». Показано, что сближение частоты собственных колебаний верхней ступени РН с доминирующими частотами колебаний конструкции РН приводит к существенному повышению коэффициентов форм колебаний конструкции РН в месте установки космического аппарата и незначительному изменению запасов продольной устойчивости РН.

**ЖРДУ, продольная устойчивость, ракета-носитель, верхняя ступень, параметры собственных колебаний корпуса ракеты, моделирование**

### **Введение**

Продольная неустойчивость жидкостных ракет-носителей (РН) обусловлена динамическим взаимодействием их конструкции с системой питания ЖРД в период работы двигателей первой или второй ступени [1, 2].

Продольные виброперегрузки конструкции РН на частотах колебаний до 50-100 Гц существенно снижают коммерческие возможности ракеты-носителя по выведению космических аппаратов (КА) на рабочие орбиты из-за возможности сбоев в работе их приборов и аппаратуры и опасны для организма человека [2, 3].

Влияние динамики верхних ступеней ракеты-носителя на параметры продольных колебаний РН ранее не анализировалось из-за сложности такого анализа. Созданные в ИТМ НАНУ и НКАУ математические модели продольных колебаний ракеты-носителя космического назначения [4] позволяют провести расчеты динамических характеристик этих РН с учетом особенностей конструкций их верхних (космических) ступеней, а также оценить возможности оптимизации конструкций этих ступеней, направленной на снижение динамических нагрузок на выводимый на орбиту полезный груз.

**Постановка задачи.** Оценку влияния динамики верхних ступеней РН на устойчивость (по Ляпунову) и параметры продольных колебаний РН проведем посредством численного моделирования динамических процессов в линейной системе «корпус трехступенчатой РН – ЖРДУ первой ступени». Исследуемая ракета по значениям параметров близка к трехступенчатой РН «Циклон».

Корпус РН схематизируем стержнем с упруго подвешенными массами, имитирующими продольные колебания низших тонов колебаний жидкости в баках и ЖРДУ [6]. Используя конечно-элементное представление стержня, продольные колебания корпуса РН опишем системой обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) высокого порядка:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{v}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{K}$  – матрицы масс, коэффициентов демпфирования и коэффициентов жесткости элементов конструкции РН размера  $n \times n$ ;

$\mathbf{u}$  – вектор-столбец перемещений размера  $n$ ;

$\mathbf{v}$  – вектор-столбец размера  $n$ , задающий колебательные составляющие сил, прикладываемых к элементам конструкции корпуса РН.

Низкочастотную динамику ЖРДУ опишем системой ОДУ, включающей уравнения нестационар-

ного движения жидкого топлива в магистралях, уравнения динамики газовых трактов (камеры сгорания и газогенератора) и ТНА, уравнения динамики кавитационных каверн в шнекоцентробежных насосах двигателя [4–6].

## 2. Результаты численного моделирования свободных продольных колебаний жидкостной ракеты-носителя

РН класса “Циклон” на отдельных интервалах времени полета РН (в период работы ЖРДУ первой ступени) неустойчивы на частотах, близких к частотам I-го и II-го тонов собственных продольных колебаний корпуса РН [4]. В настоящей работе анализируется влияние динамических характеристик третьей ступени РН на параметры I-го тона собственных колебаний трехступенчатой РН. На рис. 1, 2 представлены модули расчетных форм I-го тона собственных продольных колебаний корпуса РН при заполнении топливных баков ее первой ступени, соответствующем начальному участку интервала времени полета РН. Расчеты выполнялись при нескольких различных значениях обобщенных масс  $m_1^{(3CT)} = 8; 6; 3; 0,5$  т и собственных частот  $f_1^{(3CT)}$  (10, 15, 20, 40 Гц) I-го тона колебаний третьей ступени РН. Нормировка коэффициентов форм колебаний корпуса РН  $\beta_{1,1}, \beta_{1,2}, \dots, \beta_{1,N}$  проведена по значению формы колебаний в месте установки ЖРД первой ступени ( $x=0$ ), место установки КА соответствует осевой координате РН  $x=39$  м.

В рассматриваемом случае (на начальном участке интервала времени) коэффициенты форм I-го тона собственных продольных колебаний корпуса РН возрастают по мере увеличения осевой координаты РН; максимальным является коэффициент формы колебаний корпуса РН в сечении места установки КА  $\beta_{1,KA}$  (см. рис. 1, 2). Влияние динамических характеристик третьей ступени РН на форму I-го тона собственных продольных колебаний кор-

пуса РН (при выбранном условии их нормировки) также возрастает по мере увеличения осевой координаты РН. При  $m_1^{(3CT)} = 8$  т параметр  $\text{mod} \beta_{1,KA}$  имеет наибольшее значение для варианта (рис. 1, кривая 1)  $f_1^{(3CT)} = 15$  Гц. Далее – в порядке уменьшения значений параметра  $\text{mod} \beta_{1,KA}$  – следуют варианты (кривые 2, 3 и 4 соответственно)  $f_1^{(3CT)} = 10; 20; 40$  Гц.

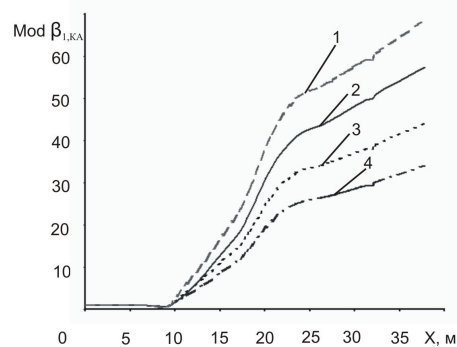


Рис. 1. Модуль расчетных форм I-го тона собственных продольных колебаний корпуса РН при различных значениях собственной частоты I-го тона колебаний ее третьей ступени

Полученный результат отражает разную степень динамического взаимодействия конструкции корпуса РН и ее верхней ступени на частотах, близких к диапазону изменения частот I-го тона колебаний корпуса исследуемой РН (6-12 Гц), и на более высоких частотах колебаний (15-40 Гц).

Анализ зависимостей, построенных для  $f_1^{(3CT)} = 20$  Гц при  $m_1^{(3CT)} = 8; 6; 3; 0,5$  т (рис. 2, кривые 1–4), позволил сделать вывод, что обобщенная масса I-го тона собственных продольных колебаний третьей ступени оказывает меньшее влияние на параметр  $\text{mod} \beta_{1,KA}$ , чем ее частота. Увеличение  $m_1^{(3CT)}$  с 0,5 до 8 т привело к повышению модуля коэффициента формы I-го тона собственных продольных колебаний корпуса ракеты-носителя в месте установки КА приблизительно в 1,5 раза.

Анализ устойчивости динамической системы «корпус РН – ЖРДУ первой ступени» показал, что

интервалы времени неустойчивости системы заметно зависят от параметров собственных колебаний верхней ступени РН, если частота собственных колебаний верхней ступени находится в диапазоне (или близка к нему) изменения частот низших тонов колебаний корпуса РН.

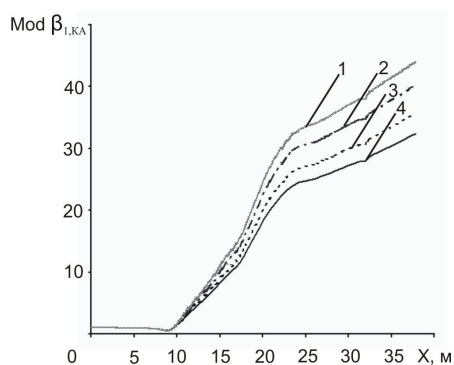


Рис. 2. Расчетные формы I-го тона собственных продольных колебаний корпуса РН при различных значениях обобщенной массы I-го тона колебаний ее третьей ступени

Это видно из рис. 3, на котором показаны декременты  $\delta_I$  колебаний системы на частоте I-го тона колебаний корпуса РН (кривые 1 – 4 соответствуют результатам расчетов при  $m_1^{(3CT)}=8$  т и  $f_1^{(3CT)}=40$  Гц, 20 Гц, 15 Гц и 10 Гц соответственно).

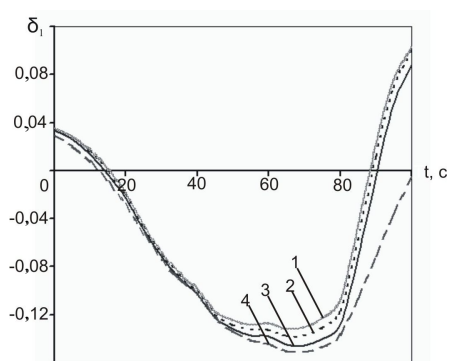


Рис. 3. Зависимость декремента колебаний замкнутой системы «корпус трехступенчатой РН – ЖРДУ первой ступени» на частоте колебаний, близкой к частоте первого тона продольных колебаний корпуса РН

### Заключение

На основании результатов математического моделирования линейной динамической системы

«корпус трехступенчатой РН – ЖРДУ первой ступени» показано, что динамические характеристики верхней ступени РН могут влиять на запасы продольной устойчивости РН и границы временных интервалов ее неустойчивости, если частота собственных колебаний ступени близка к частотам низших тонов собственных колебаний РН. С другой стороны, характеристики верхней ступени РН могут существенно повысить модуль коэффициента формы продольных колебаний конструкции РН в месте установки КА, а следовательно, и амплитуды его продольных виброперегрузок при продольных колебаниях РН.

### Литература

1. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. – М.: Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Rubin S. Longitudinal Instability of Liquid Rockets Due to Propulsion Feedback (POGO) // J. Spacecraft and Rockets. – 1966. – Vol. 3, No.8. – P. 1188-1195.
3. Fenwick Jim POGO // Threshold, Rocketdyne's engineering journal of power technology. – 1992, spring.
4. Теоретическое определение амплитуд продольных колебаний жидкостных ракет-носителей / 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.
5. Микишев Г. Н., Рабинович Б. И. Динамика тонкостенных конструкций с отсеками, содержащими жидкость. – М.: Машиностроение, 1971. – 564 с.
6. Пилипенко В.В, Задонцев В.А., Натанзон М.С. Кавитационные колебания и динамика гидросистем. – М.: Машиностроение, 1977. – 352 с.

Поступила в редакцию 1.06.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.А. Задонцев, Корпорация «ВЕСТА», Днепропетровск.