

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВЕРХНИХ СТУПЕНЕЙ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ ТОПЛИВНЫХ БАКОВ

Рассмотрены методические аспекты построения математической модели продольных колебаний современных верхних ступеней жидкостных ракет-носителей, имеющих топливные баки сложной конфигурации. Определены особенности колебательного движения жидкого топлива и ряда элементов конструкции верхних ступеней исследуемого типа, которые необходимо учитывать при моделировании замкнутой динамической системы “жидкостная ракетная двигательная установка – конструкция верхней ступени”. Выполнено математическое моделирование динамического взаимодействия жидкостной ракетной двигательной установки и конструкции верхней ступени, имеющей топливный отсек сфероконической конфигурации, при этом характеристики собственных колебаний конструкции ступени в продольном направлении определялись на основе моделирования свободных пространственных колебаний конструкции ступени с использованием метода конечных элементов и современных САД/САЕ средств компьютерного проектирования. Исследованы возможности потери устойчивости верхней ступени с КА по отношению к продольным колебаниям при работе ее маршевой ЖРДУ.

Розглянуто методичні аспекти побудови математичної моделі поздовжніх коливань сучасних верхніх ступенів рідинних ракет-носіїв, які мають паливні баки складної конфігурації. Визначено особливості коливального руху рідкого палива та ряду елементів конструкції верхніх ступенів досліджуваного типу, які необхідно враховувати при моделюванні замкнутої динамічної системи “рідинна ракетна двигунна установка – конструкція верхнього ступеня”. Виконано математичне моделювання динамічної взаємодії рідинної ракетної двигунної установки та конструкції верхнього ступеня, який має паливний відсік сфероконічної конфігурації, при цьому характеристики власних коливань конструкції ступеня в поздовжньому напрямку визначалися на основі моделювання вільних просторових коливань конструкції ступеня з використанням методу скінченних елементів і сучасних САД/САЕ засобів комп’ютерного проектування. Досліджено можливість втрати стійкості верхнього ступеня з КА стосовно поздовжніх коливань при роботі її маршевої РРДУ.

Methodic aspects of building a mathematical model of the POGO for the modern upper stages of liquid rockets with complicated-configuration propellant tanks are considered. The oscillation special features of liquid fuel and some structure elements of the upper stages under consideration are determined for modeling a closed dynamic system of the liquid propellant rocket engine and the upper stage structure. Mathematical modeling of the dynamic interaction of liquid-propellant rocket engine and the upper stage structure with the spheroconical fuel tanks having a complex spatial configuration is made. In so doing the stage structure natural oscillations characteristics in a longitudinal direction were computed by FEM and modern CAD/CAE systems on the basis of the mathematical model of the stage structure free spatial oscillations. Potential instability relative to the longitudinal oscillation of the rocket upper stage with spacecraft during the action of its main engine is studied.

Введение. Неустойчивость динамической системы “жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус ракеты-носителя (РН)”, проявляющаяся в росте амплитуд продольной перегрузки элементов конструкции корпуса РН, в классических работах по продольной устойчивости жидкостных ракет [1 – 3] (в американской научной литературе – устойчивости РН к POGO колебаниям) рассматривалась как явление, потенциально возможное в период работы двигателей низших ступеней РН. Исследования продольной устойчивости ряда отечественных РН, проводившиеся при их проектировании в последней трети XX века, выполнялись, как правило, на основании моделирования продольных колебаний РН в период работы маршевых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) первой и второй ступеней. Недостаточное внимание разработчиков РН к проблеме устойчивости верхних (космических) ступеней по отношению к колебаниям вдоль продольной оси РН можно объяснить относительно высокими (для задачи о POGO-неустойчивости) значениями собственных частот доминирующих тонов продольных колебаний конструкций верхних ступеней проектировавшихся РН и незначительными динамическим нагрузками, действующими на конструкции разработанных

© А.Д. Николаев, Н.В. Хоряк, И.Д. Башлий, С.И. Долгополов, 2009

РН на этих частотах.

Одной из современных тенденций развития ракетно-космической техники является разработка новых сверхлегких конструкций верхних ступеней РН и использование более мощных новых (или модернизированных) маршевых ЖРД. Диапазоны изменения собственных частот колебаний конструкций и жидкости в системе питания ЖРДУ таких ступеней могут пересекаться, создавая благоприятные условия для эффективного динамического взаимодействия ЖРДУ и конструкции верхней ступени и развития POGO. Выполнение требований, предъявляемых разработчиками РН к динамической нагруженности ступеней и космических аппаратов (КА), делает актуальной проблему обеспечения устойчивости верхних ступеней РН по отношению к продольным колебаниям. Так, американская корпорация Aergospace Corporation, начиная с 1989 года, выполнила ряд исследований по анализу устойчивости верхних ступеней, устанавливаемых на жидкостных ракетах семейства Atlas и Titan [4].

В сентябре 2002 года при полете верхней ступени Centaur с работающим двигателем RL 10A-4-1A, выведенной РН Atlas, были зарегистрированы колебания ступени и космического аппарата (КА), характер которых свидетельствовал о явлении POGO [5]. Озабоченность менеджеров успехом последующей миссии Titan IVB/Centaur по выведению космического аппарата Milstar привела к необходимости выполнения научно-исследовательских работ по выявлению причин динамической неустойчивости верхней ступени Centaur и разработке мероприятий по обеспечению приемлемого уровня продольных колебаний ступени [5].

Для современных конструкций верхних ступеней РН характерна сложная пространственная конфигурация топливных баков верхних ступеней РН (напр., [6]). При анализе динамического взаимодействия ЖРДУ и конструкции верхней ступени, имеющей сложную конфигурацию топливных баков, построение математической модели продольных колебаний ступени РН должно проводиться с учетом конструктивного исполнения баков, которое в данном случае становится фактором, оказывающим определяющее влияние на собственные частоты и формы продольных колебаний конструкции ступени.

Целью настоящей статьи является анализ особенностей построения математической модели замкнутой динамической системы «ЖРДУ – конструкция верхней ступени с КА», описывающей продольные колебания современных верхних ступеней РН.

Для большей конкретности и практической значимости полученных теоретических оценок анализ проводился применительно к верхней ступени РН, в конструкции которой отражены некоторые современные тенденции проектирования космических ступеней РН, в частности компактность топливного отсека и возможность размещения в нем значительной массы топлива, достигаемые благодаря сложной пространственной конфигурации отсека. Следует также отметить, что по габаритным размерам конструкции верхних ступеней нередко соизмеримы с КА, а после выработки части топлива из топливных баков верхней ступени вес КА может превышать сухой вес конструкции ступени (для сравнения: вес КА обычно составляет 2 – 4 % от стартового веса многоступенчатой ракеты среднего класса). Топливный отсек исследуемой верхней ступени РН, содержащий жидкое топливо (окислитель и горючее),

имеет сфероконическую конфигурацию, аналогичную приведенной в [7].

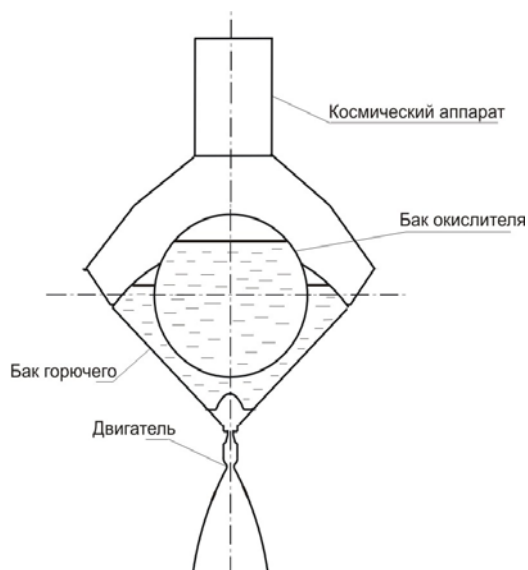


Рис. 1

Контур продольного разреза ступени и КА представлен на рис. 1.

При моделировании продольных колебаний многоступенчатых жидкостных РН несущая конструкция корпуса РН, состоящая из цилиндрических элементов оболочечного типа, обычно удовлетворительно схематизируется упругим тонкостенным стержнем. Схематизация конструкции РН упругим тонкостенным стержнем может оказаться довольно грубой при моделировании продольных колебаний конструкции верхней ступени РН с топливным отсеком

сфероконической конфигурации (рис. 1), поскольку габаритные размеры ступени в продольном и

поперечном направлениях соизмеримы. Это обстоятельство определяет основную особенность моделирования динамического взаимодействия ЖРДУ и конструкции верхних ступеней ракет-носителей с КА – необходимость учета пространственных движений конструкции ступени.

Моделирование продольных колебаний верхней ступени РН с КА осуществлялось в рамках традиционного подхода, построенного на раздельном определении динамических характеристик конструкции ракеты и ЖРДУ [1, 2].

Как следует из теории автоматического регулирования ЖРД [8], неустойчивость двигателя, которая может сопровождаться вибрациями конструкции верхней ступени РН, может быть обусловлена кавитационными колебаниями в насосной системе ЖРДУ, регуляторными колебаниями ЖРД, динамическим взаимодействием ЖРДУ и конструкции ступени. Таким образом, при выборе метода решения задачи определения устойчивости динамической системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» должны быть учтены не только его работоспособность, быстродействие и точность счета, но и его эффективность при численном анализе устойчивости системы по отношению к указанным выше видам колебаний. В этой связи методика исследования устойчивости РН как сложных многоконтурных систем [9], основанная на решении проблемы собственных значений, является достаточно эффективной для численного определения устойчивости линейной динамической системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» и отвечает требованиям к качеству проводимых вычислений. Устойчивость линейной динамической системы n -го порядка определялась расположением ее собственных значений λ_i ($i=1, \dots, n$) относительно мнимой оси, а ее собственные частоты колебаний f_i – мнимыми частями комплексных собственных значений: $f_i = |\text{Im} \lambda_i| / 2\pi$. Для оценки затухания колебаний системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» на собственной частоте f_i использовался параметр δ_i , аналогичный по форме

представления логарифмическому декременту колебаний одночастотной системы: $\delta_i = -2\pi \cdot \operatorname{Re} \lambda_i / |\operatorname{Im} \lambda_i|$. Нулевое значение параметра δ_i соответствует колебательной границе устойчивости системы, а отрицательное является признаком ее неустойчивости (нарастающих колебаний на собственной частоте f_i).

Линейная математическая модель собственных продольных колебаний конструкции космической ступени РН с КА. Определение параметров собственных колебаний исследуемой верхней ступени РН осложняется необходимостью учета ряда ее конструктивных особенностей:

- топливный отсек ступени имеет сложную пространственную конфигурацию;
- полость окислителя погружена в полость горючего, что благоприятствует динамическому взаимодействию этих полостей при колебаниях ступени;
- крепежный шпангоут сферической полости окислителя смещен по вертикали относительно центра симметрии полости;
- стенки баков топливного отсека имеют переменную толщину;
- силовые шпангоуты топливных отсеков ступени установлены в «неконцевых» сечениях конструкции.

Указанные особенности исключают возможность использования апробированных методик определения динамических характеристик верхней ступени с жидконаполненным топливным отсеком, разработанных для оболочек цилиндрической формы с плоским дном [10]. Поэтому расчеты динамических характеристик конструкции верхней ступени РН проводились с использованием метода конечных элементов [11] и современных САД/САЕ средств компьютерного проектирования, которые позволяют учесть указанные выше особенности конструкции исследуемой верхней ступени РН.

При моделировании свободных продольных колебаний верхней ступени последняя моделировалась как конструкция, состоящая из упругих оболочек, заполненных несжимаемой вязкой жидкостью. Учитывалась возможность деформации свободной поверхности жидкого топлива в полостях бака окислителя и бака горючего. Граничные условия, определяющие перемещение свободной поверхности жидкости, и условия, определяющие характер взаимодействия жидких и упругих сред на сопряженных поверхностях топливного отсека, задавались в соответствии с методикой [10].

Параметры собственных продольных колебаний верхней ступени РН, соответствующие различным расчетным уровням заполнения баков, определялись без учета диссипации энергии на основании решения линейной системы n_K обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, описывающей свободные колебания ступени РН:

$$M \frac{d^2 \bar{x}(t)}{dt^2} + K \bar{x}(t) = 0, \quad (1)$$

где K , M – матрица жесткости и матрица масс размера $n_K \times n_K$; $\bar{x}(t)$ – вектор перемещений длины n_K .

При помощи САД системы для выбранных степеней заполнения (100%, 50% и 8%) топливного отсека ступени разрабатывались геометрические модели конструкции верхней ступени РН с объемами и поверхностями, удобными для последующего разбиения их на конечные элементы. После импор-

тирования полученных объемов и поверхностей в САЕ систему проводилась конечно-элементная дискретизация верхней ступени РН.

Для построения конечно-элементной модели верхней ступени РН как сложной пространственной гидромеханической системы были использованы конечные элементы 4-х типов: “упругая оболочка”; “жидкость 3D”; “сосредоточенная масса” и “твердое тело”. Баки горючего и окислителя, приборный отсек, рама маршевого двигателя и маршевый двигатель моделировались конечными элементами “упругая оболочка”; жидкое топливо в баках представлено с помощью конечных элементов “жидкость 3D”; другие подсистемы ступени (например, баллоны с газом для наддува топливного отсека и запуска ЖРД) моделировались с помощью элементов “сосредоточенная масса” и “твердое тело”. В частности, для варианта с максимальным заполнением топливных баков в результате «разбиения» системы на конечные элементы, проведенного по разработанной схеме дискретизации, получено 11338 узлов сетки (рис. 2).

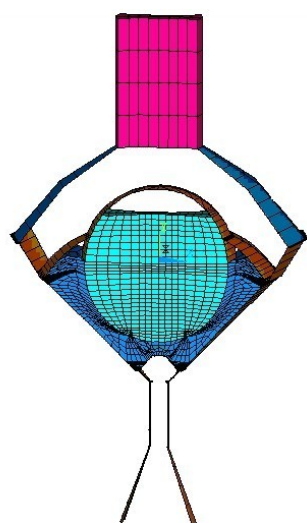


Рис. 2

В спектре расчетных частот пространственных колебаний конструкции верхней ступени РН количество частот соответствует количеству конечных элементов в используемой модели, а их значения находятся в диапазоне от долей герца до десятков тысяч герц. Поскольку собственные частоты колебаний динамической системы “питающие магистрали – ЖРД” рассматриваемой верхней ступени РН находятся в частотном диапазоне (0, 100 Гц), моделирование динамического взаимодействия конструкции РН и ее ЖРДУ проводилось в указанном частотном диапазоне. В математическую модель замкнутой динамической системы “ЖРДУ – конструкция верхней ступени РН” включались уравнения только доминирующих продольных мод конструкции РН. В качестве доминирующих продольных мод конструкции рассматриваемой ступени РН выбирались моды, частоты которых не

превышают верхней границы частотного диапазона модели $f_{\max} = 100$ Гц, а значения обобщенных масс в продольном направлении являются наибольшими. Из спектра собственных частот пространственных колебаний конструкции верхней ступени, рассчитанного при условии максимального заполнения топливных баков, были выбраны 3 моды собственных продольных колебаний конструкции ступени. Расчетные значения параметров выбранных продольных мод конструкции верхней ступени РН – собственных частот f_{ki} и коэффициентов форм колебаний конструкции двигателя β_{di} и космического аппарата β_{KAi} , соответствующие различной степени опорожнения θ топливных баков ступени ($\theta = 0\%$, 50% и 92%), приведены ниже в таблице.

Линейная математическая модель низкочастотной динамики ЖРДУ верхней ступени РН. Для определенности в качестве ЖРД исследуемой верхней ступени РН выбран ЖРД [13] отечественной разработки, выполнен-

ный по схеме без дожигания генераторного газа, с турбонасосной системой подачи и тягой около 8 тонн.

Разработанная линейная математическая модель динамики маршевого ЖРД в сосредоточенных параметрах, используемая далее при анализе устойчивости системы “ЖРДУ – конструкция верхней ступени РН”, включала уравнения динамики турбонасосного агрегата, записанные с учетом кавитационных явлений в насосах линий окислителя и горючего, уравнения динамики газовых объемов (камеры сгорания, газогенератора и проточной части турбины) и уравнения динамики питающих и напорных трубопроводов окислителя и горючего [8, 14]. Учет кавитационных явлений в насосах проводился на основе гидродинамической модели динамики кавитирующих шнекоцентробежных насосов ЖРД [14].

Таблица

Уровень опорожнения топливных баков $\theta, \%$	Параметры доминирующих продольных мод конструкции верхней ступени РН			
	Номер моды i	Собственная частота колебаний $f_{ki}, \text{ Гц}$	Коэффициенты собственной формы колебаний	
			$\beta_{\partial i}$	$\beta_{КА i}$
0%	1	14,63	0,00273	0,00234
	2	22,55	0,00521	-0,01107
	3	55,69	0,00809	0,00015
50%	1	30,64	0,00472	0,00247
	2	46,83	0,01328	-0,00907
	3	47,41	-0,00411	0,00190
92%	1	39,93	0,00692	-0,00349
	2	45,73	0,01118	-0,00374
	3	47,48	-0,00554	0,00098

Результаты расчета спектра матрицы линейной динамической системы “питающие магистрали – ЖРДУ” показали, что рассматриваемая система устойчива: все ее собственные значения располагаются на комплексной плоскости слева от мнимой оси. В частотном диапазоне (0, 100 Гц) находятся значения 3-х собственных частот колебаний системы: $f_{D1} = 35,89$ Гц; $f_{D2} = 36,2$ Гц; $f_{D3} = 52,8$ Гц, причем колебания на этих частотах характеризуются достаточно большим затуханием: $\delta_{D1} = 0,939$; $\delta_{D2} = 0,613$; $\delta_{D3} = 10,94$. В результате анализа параметрической чувствительности системы было установлено, что колебания системы на частотах f_{D1} и f_{D2} определяются колебаниями жидкости в питающей магистрали горючего и окислителя, следовательно, резонансное взаимодействие ЖРДУ и конструкции корпуса верхней ступени на этих частотах может привести к потере устойчивости системы “ЖРДУ – конструкция ступени с КА”.

Моделирование динамического взаимодействия ЖРДУ и конструкции верхней ступени с КА. Динамическое взаимодействие конструкции ступени и ЖРДУ описывалась линейной системой обыкновенных дифференциальных уравнений с “замороженными” коэффициентами:

$$A \frac{d^2 \bar{x}(t)}{dt^2} + B \frac{d\bar{x}(t)}{dt} + C \bar{x}(t) = 0, \quad (2)$$

где \bar{x} – вектор переменных системы, имеющий длину n ; t – текущее время работы маршевого ЖРД ступени; A , B , C – действительные матрицы размера $n \times n$ коэффициентов системы, зависящих от времени (то есть от уровня заполнения топливных баков) как от параметра.

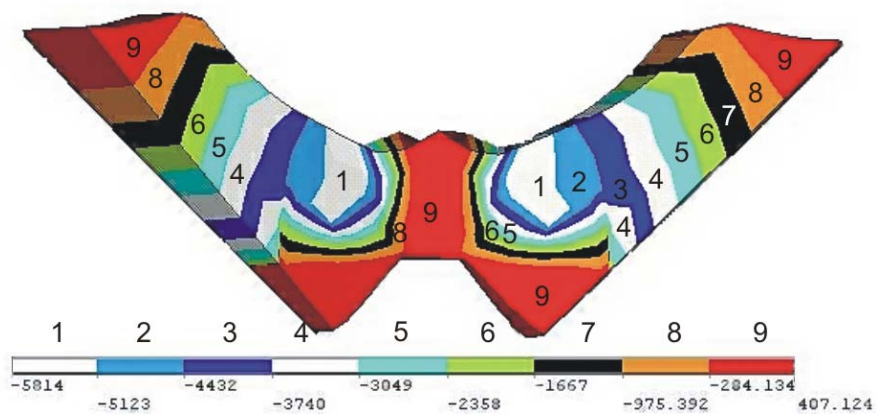
Воздействие на конструкцию ступени со стороны ЖРДУ в математической модели замкнутой динамической системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» задавалось в уравнениях собственных продольных колебаний конструкции ступени через внешнее (по отношению к корпусу РН) возмущение тяги ЖРД, а воздействие на ЖРДУ со стороны корпуса РН – в уравнениях движения жидкости по питающим магистралям через внешнее (по отношению к ЖРДУ) возмущение обобщенных координат конструкции ступени.

В традиционном анализе продольной устойчивости жидкостных РН с цилиндрическими топливными баками используется зависимость между давлением жидкости на днище бака P_b и ускорением обобщенной координаты Z , описывающей продольные колебания корпуса РН [1]:

$$P_b = \frac{\gamma}{g} H_b \beta_{db} \frac{d^2 Z}{dt^2}, \quad (3)$$

где γ – удельный вес топлива в баке; g – ускорение свободного падения; H_b – уровень жидкости в баке; β_{db} – коэффициент формы i -го тона собственных продольных колебаний корпуса РН.

В отличие от ступеней с цилиндрическими баками, для которых движения конструкции и жидкого топлива при осевом возмущении происходят преимущественно вдоль продольной оси, колебательные движения ряда элементов конструкции и жидкого топлива рассматриваемой верхней ступени имеют пространственный характер (с существенными поперечными составляющими перемещений). Амплитуды колебаний давления на днище топливных баков для исследуемой ступени не пропорциональны высоте столба жидкости (как в случае цилиндрических баков). Это видно из диаграммы (рис. 3), на которой в качестве иллюстрации представлено распределение расчетных амплитуд колебаний давления (в Па) для бака горючего исследуемой ступени (вариант 50%-го заполнения топливом) при продольном гармоническом возмущении конструкции двигателя δZ_{dv} на частоте 30,64 Гц с амплитудой 0,001 м. Знак при величине амплитуды колебаний давления дает представление о форме колебаний жидкого топлива на указанной частоте в расчетных областях бака горючего при движении в направлении продольной оси Z (знак «минус» соответствует растяжению, «плюс» – сжатию). Из рисунка следует, что продольные колебания конструкции ступени с топливными баками сфероконической конфигурации приводят к колебаниям давления жидкости (горючего) в месте расположения заборного устройства, которые не могут быть удовлетворительно описаны зависимостью (2). Поэтому для определения давления на входе в питающие магистрали окислителя P_{bo} и горючего P_{bg} использовались частотные характеристики, рассчитанные на основе разработанной модели системы «конструкция ступени с КА»:



$$\delta P_{bo} = A_{bo}(j\omega)\delta Z_{dv},$$

$$\delta P_{bg} = A_{bg}(j\omega)\delta Z_{dv},$$

где $A_{bo}(j\omega)$, $A_{bg}(j\omega)$ – отношения комплексной амплитуды колебаний давлений (соответственно в баках окислителя δP_{bo} и горючего δP_{bg}) на входе в заборное устройство к комплексной амплитуде колебаний продольного перемещения конструкции δZ_{dv} двигателя ступени; ω – угловая частота колебаний; j – мнимая единица.

Как показали результаты расчета спектра матрицы линейной динамической системы “ЖРДУ – конструкция ступени с КА” при различной степени опорожнения топливных баков, исследуемая система устойчива по Ляпунову

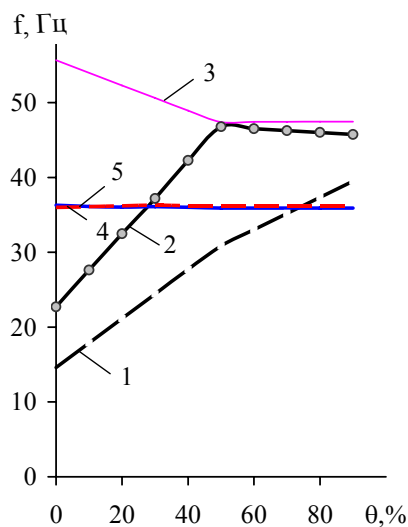


Рис. 4

на всем интервале времени работы маршевого двигателя ступени. Расчетные зависимости собственных частот колебаний замкнутой системы “ЖРДУ – конструкция ступени с КА” от степени θ опорожнения баков (в процентах от максимального объема), приведены на рис. 4 в виде кривых 1–5. Эти кривые можно рассматривать как зависимости собственных частот колебаний системы от времени работы маршевого двигателя ступени, так как степень опорожнения θ пропорциональна времени работы маршевого двигателя. Собственные частоты колебаний замкнутой системы f_1 , f_2 , f_3 , близкие по значениям к собственным частотам первых трех продольных мод конструкции верхней ступени РН с КА, изображены кривыми 1,

2, 3. Кривые 4 и 5 представляют зависимости от θ собственных частот колебаний системы f_4 и f_5 , близких по значениям к собственным частотам колебаний жидкости в топливных магистралях ЖРДУ f_{D1} и f_{D2} .

Значения собственных частот колебаний жидкости в топливных магистралях ЖРДУ и близкие к ним значения собственных частот колебаний замкнутой системы “ЖРДУ – конструкция ступени с КА” f_4 , f_5 остаются практически постоянными на всем интервале времени работы маршевого двигателя. Значения собственных частот первых двух тонов колебаний конструкции

верхней ступени и близкие к ним значения собственных частот колебаний замкнутой системы f_1, f_2 возрастают по мере опорожнения топливных баков, при этом кривые 1 и 2 пересекаются с кривыми 4 и 5 (рис. 4). В условиях резонансного взаимодействия подсистем «питающие магистрали – ЖРД» и «конструкция ступени – жидкое топливо» (при близких значениях их собственных частот колебаний) происходит эффективный обмен энергией между взаимодействующими подсистемами, который может привести к потере устойчивости замкнутой динамической системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА». Обмен энергией между взаимодействующими подсистемами линейной динамической системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» проявляется в более или менее существенном изменении значений показателей затухания ее колебаний (по сравнению с показателями затухания колебаний взаимодействующих подсистем) на собственных частотах, имеющих близкие значения.

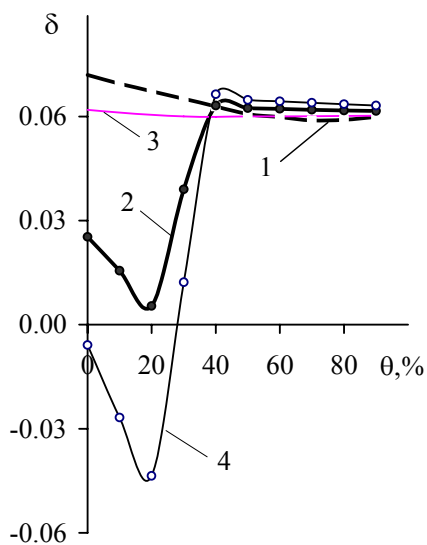


Рис.5

На рис. 5 показаны расчетные зависимости $\delta_i(\theta)$ показателей затухания колебаний системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» от степени опорожнения ее баков для собственных частот, близких по значениям к собственным частотам I-го, II-го и III-го тона продольных колебаний конструкции верхней ступени РН (кривые 1, 2 и 3 соответственно). При выполнении расчета логарифмические декременты этих тонов колебаний конструкции полагались равными 0,06. Из рис. 4 – 5 следует, что наиболее ярко динамическое взаимодействие ЖРДУ и конструкции ступени с КА проявилось при сближении значений собственной частоты II-го тона продольных колебаний конструкции ступени и собственных частот колебаний

жидкости в питающих магистралях ЖРДУ (главным образом, в питающей магистрали окислителя). При сближении значений собственных частот колебаний замкнутой динамической системы «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» f_2 и f_4, f_5 (как видно из рис. 4, они совпадают при $\theta \approx 25\%$), обусловленном сближением собственной частоты II-го тона колебаний конструкции с собственной частотой колебаний жидкости в питающей магистрали окислителя, значение показателя затухания колебаний замкнутой системы δ_2 заметно уменьшается (по сравнению с 0,06). Наименьшее значение $\delta_2 \approx 0,004$ достигается при $\theta \approx 20\%$ (рис. 5). Резонансное взаимодействие ЖРДУ и конструкции ступени на других собственных частотах колебаний системы весьма незначительно.

Следует отметить, что для ЖРД с дожиганием генераторного газа динамический коэффициент усиления ЖРД (по каналу давления) может быть в 2–3 раза больше, чем для ЖРД без дожигания генераторного газа. Таким образом, если в рассматриваемой верхней ступени РН в качестве маршевого двигателя использовать ЖРД с дожиганием генераторного газа, то исследуемая динамическая система «ЖРДУ – конструкция ступени с КА» на интервале

$0 \leq \theta < 30\%$ будет неустойчивой: колебания системы с собственной частотой f_2 , близкой к собственной частоте колебаний II-го тона конструкции ступени, на указанном интервале характеризуются отрицательным затуханием. Этот вариант расчета показан на рис. 5 кривой 4.

Выводы. При моделировании замкнутой динамической системы “ЖРДУ – конструкция ступени с КА” и теоретическом анализе устойчивости верхних ступеней ракет-носителей по отношению к продольным колебаниям необходимо учитывать особенности развития колебательных процессов в системе, обусловленные сложной пространственной конфигурацией топливных баков (отсеков) современных конструкций верхних ступеней РН. Показано, что при осевом возмущении конструкции верхней ступени РН, топливные баки которой имеют сложную пространственную конфигурацию, продольные и поперечные составляющие колебательного движения жидкого топлива и ряда элементов конструкции могут быть соизмеримыми по величине, а зависимости амплитуд колебаний давления на выходе из баков от амплитуды продольного перемещения конструкции ступени – непропорциональными высоте столба жидкости в баках.

С учетом указанных особенностей выполнено моделирование продольных колебаний верхней ступени РН с топливным отсеком сфероконической конфигурации и маршевым ЖРД без дожигания генераторного газа. Показано, что диапазоны изменения значений собственных частот продольных колебаний конструкции ступени и жидкости в системе питания ЖРД пересекаются и при близких значениях этих собственных частот исследуемая динамическая система “ЖРДУ – конструкция ступени с КА” вплотную приближается к колебательной границе устойчивости, а в случае увеличения вдвое коэффициента усиления ЖРД по каналу давления – теряет устойчивость по отношению к продольным колебаниям.

Таким образом, для современных верхних ступеней РН существует потенциальная опасность реализации в полете колебательных режимов, обусловленных динамическим взаимодействием ЖРДУ и конструкции верхней ступени со сложной пространственной конфигурацией топливных баков.

1. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Rubin S. Longitudinal Instability of Liquid Rockets Due to Propulsion Feedback (POGO) / S. Rubin // J. Spacecraft and Rockets. – 1966. – Vol. 3. – No. 8. – P. 1188 – 1195.
3. Пилипенко В.В. 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.
4. Dotson K. Mitigating Pogo on Liquid-Fueled Rockets. Crosslink / K. Dotson. // The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology. – Winter 2003. – P. 26 – 29.
5. Preventing POGO on Titan IVB. Crosslink. // The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology. – Summer 2003. – P. 3.
6. Ракета как объект управления / И. М. Игдалов, Л. Д. Кучма., Н. В. Поляков, Ю. Д. Шентун. – Днепропетровск : АРТ-Пресс, 2004. – 544 с.
7. Официальный сайт Исследовательского центра имени М.В. Келдыша. <http://www.kerc.msk.ru>
8. Гликман Б. Ф. Автоматическое регулирование жидкостных ракетных двигателей // Б. Ф. Гликман. – М. : Машиностроение, 1989. – 296 с.
9. Хоряк Н. В. Анализ устойчивости многоконтурной динамической системы “ЖРД – корпус РН” по спектру матрицы: методические основы и приложение / Н. В. Хоряк // Научно-технический журнал “Авиационно-космическая техника и технология”. – 2007. – № 9(45). – С. 87 – 91.
10. Микшиев Г. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г. Н. Микшиев. – М. : Машиностроение, 1978. – 248 с.
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

12. *Пилипенко В. В.* Численное моделирование свободных колебаний космических ступеней жидкостных РН со сложной пространственной конфигурацией топливных баков / *В. В. Пилипенко, О. В. Пилипенко, Г. И. Богомаз, А. Д. Николаев, И. Д. Блоха* // *Техническая механика*. – 2006. – № 2. – С. 69 – 81.
13. *Жидкостные ракетные двигатели. Описание и основные технические данные* / Под ред. *С. Н. Конюхова*. – Днепропетровск, ГКБ «Южное», 1996. – 84 с.
14. *Пилипенко В. В.* Кавитационные автоколебания / *В. В. Пилипенко*. – К. : Наук. думка, 1989. – 316 с.
15. *Tsujimoto Y.* Unified Treatment of Flow Instabilities of Turbomachinaries / *Y. Tsujimoto, K. Kamijo, C. Brenen* // *AIAA*. – 1999. – Paper 99-2678.

Институт технической механики,
НАН Украины и НКА Украины
Днепропетровск

Получено 29.05.09,
в окончательном варианте 05.06.09