

## **Собственные колебания жидкостных ракет-носителей пакетной компоновки**

**А. С. Конюхов<sup>а</sup>, В. С. Легеза<sup>а</sup>, А. С. Цыбенко<sup>б</sup>, Н. Г. Крищук<sup>б</sup>**

<sup>а</sup> Государственное конструкторское бюро “Южное”, Днепропетровск, Украина

<sup>б</sup> Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

*Разработана математическая модель для численных расчетов спектра собственных колебаний жидкостных ракет-носителей пакетной компоновки. Для описания динамической модели механико-гидравлической системы используются элементы с приведенными кусочно-однородными (балочного типа) распределенными и сосредоточенными параметрами жесткостных и инерционных характеристик, для колеблющихся масс жидкости – механические осцилляторы. Представлены результаты расчетов собственных частот и форм колебаний конструктивного варианта ракеты-носителя для начальной стадии полета. Изучено влияние учета инерции вращения и деформации сдвига элементов балочного типа на расчетные значения собственных частот колебаний. Исследована сходимость конечноэлементных решений.*

**Ключевые слова:** ракета-носитель, динамическая модель, механико-гидравлическая система, математический аппарат, собственные частоты и формы колебаний, конечноэлементные решения.

При проектировании ракет-носителей (РН) одна из главных проблем – определение собственных частот и форм упругих колебаний ракет на различных стадиях полета. Данные амплитудно-частотного анализа динамических моделей РН составляют основу для решения задачи эффективной стабилизации и управления полетом [1].

Построение рациональных динамических моделей РН содержит, как правило, элементы эвристики [2, 3] и достигается последовательным сравнением данных расчетов, полученных для различных степеней идеализации исходного объекта. В зависимости от выбора расчетной схемы вводятся те или иные упрощающие предположения, позволяющие перейти от реального объекта к адекватной расчетной модели динамической системы. Диапазон частот, в котором возможна такая замена, определяется требованиями к точности аппроксимации конструкции РН соответствующими динамическими моделями [3].

Традиционная концепция построения динамических моделей одноступенчатых и многоступенчатых жидкостных РН с продольным делением ступеней предполагает аппроксимацию конструкции ракеты стержневыми элементами с распределенно-сосредоточенными параметрами, соответствующими упругим и инерциальным свойствам корпуса, двигательных установок, жидких масс [2–4]. При этом динамические характеристики РН определяются для взаимно независимых форм продольных, крутильных и изгибных колебаний [3, 4].

Ракеты-носители пакетной компоновки по сравнению с РН с продольным делением ступеней имеют более сложное продольно-поперечное деление ступеней в виде пространственного пакета связанных упругодеформируемых тел – подкрепленных тонкостенных конструкций оболочек с общей продольной осью. Распределение масс и жесткостей в произвольном радиальном направлении для осесимметричных элементов РН одинаково. Межблочные связи (боковые, центральные), как правило, имеют кинематические степени свободы, обусловленные конструктивно-технологическими решениями. Принципиальными особенностями РН, характеризующими динамические свойства системы, являются:

наличие значительных масс жидкости со свободными поверхностями; упругость корпусов модулей (сложные пространственные тонкостенные конструкции) и межблочных связей (пространственные массивные тела);

симметрия объекта – массовая и геометрическая.

В отличие от РН с продольным делением ступеней для конструкций РН пакетной компоновки характерна связанность продольных, изгибных и крутильных колебаний. Это существенно усложняет динамический анализ РН и делает невозможным применение аналитических методов.

Цель данной работы заключалась в выборе адекватной математической модели РН пакетной компоновки, ее численной реализации с использованием современных вычислительных средств и исследовании на базе созданного математического аппарата динамических характеристик конкретной конструкции РН (рис. 1,а).

При создании динамической модели РН рассматривали основные элементы механико-гидравлической системы, определяющие процессы собственных колебаний конструкции. Каждый модуль РН представляли упругим стержнем с приведенными [2, 3] кусочно-постоянными по длине инерционными и жесткостными характеристиками. Межблочные связи РН аппроксимировали эквивалентным упругим массовым слоем. Корпус обтекателя, содержащего полезный груз РН, моделировали упруго закрепленной балкой постоянного поперечного сечения, полезный груз – распределенной массой.

Для построения динамической модели колебаний жидких масс ввиду малости диссипативных сил продольные и поперечные (по отношению к оси РН) движения жидкой среды рассматривали как независимые, а крутильными – пренебрегали.

Каждый эквивалентный стержень РН, соответствующий баку с жидкостью, дополнили присоединенными к нему механическими осцилляторами, моделирующими колебания жидких объемов [3, 4].

Поперечные колебания жидкости, содержащейся в баках РН, описывали с использованием маятниковых моделей [4–6]. Приведенные характеристики эквивалентных маятников (длину, массу, точки подвеса на оси стержней) находили по данным исследования собственных колебаний жидкости в приповерхностных зонах недеформируемых полостей, отвечающих геометрии баков [5]. При достаточном заглублении жидкость считали “квазизатвердевшей”, ее погонную массу суммировали с погонной массой эквивалентных стержней динамической модели РН.

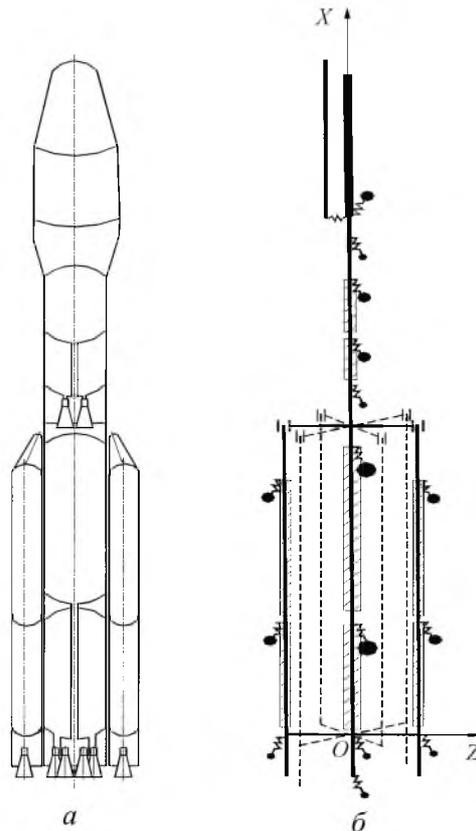


Рис. 1. Компонентная схема РН пакетного типа (а) и динамическая модель РН для начальной стадии полета (б).

Для учета продольных колебаний жидких объемов использовали пружинно-массовые модели эквивалентных механических осцилляторов с точкой привязки пружин в сечениях корпуса, соответствующих опорным шпангоутам днищ баков. Суммарную массу осцилляторов принимали равной массе жидкости в баках для текущего времени полета РН. Приведенные массы, а также жесткости эквивалентных пружин, характеризующие различные формы и частоты продольных колебаний жидкости, находили из условия динамического равновесия системы жидкость – деформируемые поверхности баков [4, 5].

Механические колебания двигательных установок учитывали по модели физического маятника с массой, равной массе двигателя и рамы. В этой схеме двигатель считали твердым телом, подвеску – невесомыми пружинами с координатами привязки, соответствующими точкам крепления двигателя на опорных шпангоутах.

Осуществив алгебраизацию системы уравнений собственных колебаний для сформулированной эквивалентной динамической модели РН на основе метода конечных элементов [7], получим дискретную форму уравнений вида

$$([M]^{-1}[K] - \omega^2[E])\{W\} = \{0\};$$

$$\{W\}_{S=S_1} = \{\tilde{W}\},$$

где  $[M]$  – матрица масс системы элементов;  $[K]$  – матрица жесткости системы элементов;  $[E]$  – единичная матрица;  $\omega$  – собственная частота;  $\{W\}$  – вектор узловых перемещений системы;  $\{\tilde{W}\}$  – кинематические ограничения на границе  $S_1$ . Собственные числа  $\lambda = \omega^2$  матрицы  $[M]^{-1}[K]$  системы уравнений (1) с наложенными ограничениями для вектора  $\{W\}$  в форме (2) характеризуют спектр собственных частот системы.

При построении дискретной модели наиболее удобно использовать описываемые технической теорией бруса пространственные двухузловые конечные элементы (КЭ) постоянного сечения с шестью степенями свободы в каждом узле [6, 7]. Распределение параметров жесткости и инерционных характеристик в данном случае относится к элементам, а сосредоточенные массы и упругие связи задаются в узловых точках конечноэлементной модели РН. Упругие и инерционные характеристики КЭ произвольной пространственной ориентации при различных видах деформации (изгиб, растяжение–сжатие, кручение, сдвиг, а также при учете влияния инерции вращения) вычисляются по известным [6, 7] либо уточненным авторами методикам.

В разработанном алгоритме решения (1), (2) применяли эффективные методы определения собственных чисел QR-Хаусхолдера и обратных итераций со сдвигами [7]. Алгоритм реализовали с использованием современных вычислительных средств в виде проблемно ориентированного программного продукта, обладающего высоким уровнем автоматизации задания входной и обработки выходной информации.

В качестве иллюстрации приведем пример расчета конструктивного варианта РН пакетной компоновки (рис. 1) для начальной стадии полета (баки полностью заполнены жидкостью, ускорение равно нулю). На основе вышеизложенной методики динамическую модель РН (рис. 1,б) представим в виде пространственного пакета из семи связанных между собой изначально ненапряженных кусочно-неоднородных стержневых элементов с приведенными распределенными и сосредоточенными параметрами, эквивалентными жесткостным и инерционным свойствам типовых отсеков центрального и шести боковых блоков РН, а также полезного груза и обтекателя. Условия сопряжения блоков моделировались упругими связями с заданными кинематическими ограничениями в верхнем и нижнем силовых поясах (рис. 1,б). Конструкция верхнего пояса допускает перемещения вдоль продольной оси и накладывает ограничения на перемещения в поперечных направлениях. Для нижнего пояса имеют место ограничения на перемещения по трем взаимно перпендикулярным осям. Материал стержней – алюминиевый сплав типа Д16Т. Центральный блок РН аппроксимировали упругим кусочно-неоднородным стержнем, состоящим из 42 однородных элементов балочного типа, 10 элементов “упруго закрепленная масса” и одного элемента “упруго присоединенная балка постоянного поперечного сечения”. Каждый из четырех подвесных модулей задавали семью элемен-

тами балочного типа и тремя элементами “упруго закрепленная масса”. Два подвесных топливных бака представляли элементами “упруго присоединенная балка постоянного поперечного сечения”.

По разработанным численно-аналитическим методикам находили приведенные характеристики различного типа элементов, составляющих динамическую модель РН: сосредоточенные и погонные массы, моменты инерции сечений, погонные жесткости при растяжении–сжатии, изгибе, кручении и сдвиге в элементах балочного типа, упругие и инерционные величины для параметров осцилляторов.

При проведении расчетов собственных частот и форм колебаний РН исследовали влияние учета инерции вращения и деформации сдвига элементов балочного типа, а также сходимость конечноэлементных решений при увеличении степени дискретизации.

В таблице представлены результаты расчетов первых трех собственных частот колебаний для двух дискретных аналогов динамической модели РН: базового (387 КЭ) и уточненного (2310 КЭ), с учетом и без учета влияния деформации сдвига и инерции вращения.

Собственные частоты колебаний (Гц)

Форма колебаний	Базовая КЭ-модель			Уточненная КЭ-модель
	без учета сдвига и инерции вращения	с учетом сдвига	с учетом сдвига и инерции вращения	с учетом сдвига и инерции вращения
Первая	2,10193	2,02581	2,01057	2,00944
Вторая	3,90386	3,44291	3,42230	3,41332
Третья	8,48869	8,30047	8,19033	8,06341

По результатам вычислений на основе базового дискретного аналога обнаружено влияние учета деформации сдвига и инерции вращения стержневых элементах на собственные частоты и формы колебаний динамической модели РН. Так, например, учет деформации сдвига приводит к существенному уменьшению величин собственных частот колебаний. Наибольшее снижение частоты (13,5%) наблюдается для второй формы колебаний. Для первой и третьей форм колебаний это уменьшение составляет 3,9 и 2,1% соответственно.

Дополнительный учет инерции вращения в стержневых элементах приводит к снижению рассматриваемых частот колебаний еще на 0,4...1,3% (таблица).

В целом совместный учет указанных факторов обуславливает снижение собственной частоты колебаний по первой форме на 4,5%, второй и третьей – на 14,1 и 3,6% соответственно.

Первые три формы собственных колебаний базовой модели РН в плоскости  $XOZ$  с учетом деформации сдвига и инерции вращения стержневых элементов показаны на рис. 2. Видно, что первая и вторая формы (рис. 2,а,б) сопровождаются синхронными изгибными колебаниями центрального и бо-

ковых блоков. Для третьей (рис. 2,в) имеет место рассогласование форм изгибных колебаний центрального блока и боковых модулей. Во всех случаях представляет интерес первая форма колебаний стержневого элемента, моделирующего обтекатель полезного груза.

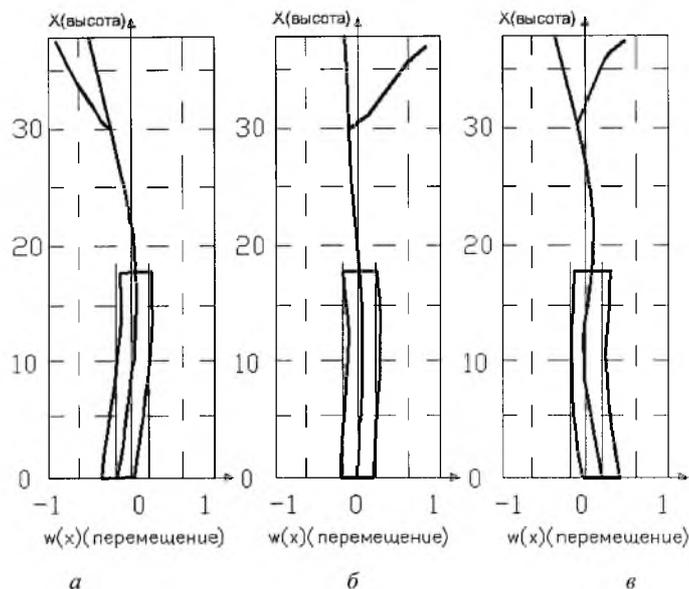


Рис. 2. Собственные колебания РН по первой (а), второй (б) и третьей (в) формам.

Анализ результатов расчета показывает, что отличие полученных значений собственных частот для уточненной динамической модели РН от таковых для базовой составляет 0,056% для первой основной частоты и соответственно 0,26 и 1,6% для второй и третьей. Увеличение степени дискретизации не оказывает существенного влияния на формы колебаний.

Таким образом, можно утверждать, что базовая степень дискретизации обеспечивает необходимую точность определения спектра собственных колебаний на основе принятой динамической модели РН.

## Резюме

Розроблено математичну модель для числових розрахунків спектру власних коливань рідинних ракет-носіїв пакетної компоновки. Для опису динамічної моделі механіко-гідролічної системи використано елементи зі зведеними кусково-однорідними (балкового типу) розподіленими й зосередженими параметрами жорсткості та інерційними характеристиками, для коливних мас рідини – механічні осцилятори. Приведено результати розрахунків власних частот і форм коливань конструктивного варіанту ракети-носія для початкової стадії польоту. Вивчено вплив інерції обертання і деформації зсуву елементів балкового типу на розрахункові величини власних частот коливань. Досліджено збіжність скінченноелементних розрахунків.

1. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с.
2. Микишев Г. Н., Рабинович Б. И. Динамика твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью / Под ред. А. Ю. Ишлинского. – М.: Машиностроение, 1971. – 532 с.
3. Колесников К. С. Динамика ракет. Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.
4. Рабинович Б. И. Об уравнениях возмущенного движения твердого тела с цилиндрической полостью, частично заполненной жидкостью // Прикл. математика и механика. – 1956. – 20, вып. 1. – С. 39 – 50.
5. Фещенко С. Ф., Луковский И. А., Рабинович Б. И., Докучаев Л. В. Методы расчета присоединенных масс жидкости в подвижных полостях. – Киев: Наук. думка, 1969. – 372 с.
6. Timoshenko S., Young D. H., and Weaver W., Jr. Vibration Problems in Engineering. – New York: John Wiley & Sons, 1955. – 472 p.
7. Bathe K. J. and Wilson E. L. Numerical Methods in Finite Element Analysis. – New York: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1976. – 447 p.

Поступила 27. 11. 2000