

Влияние выбора имитационной модели ракеты-носителя “Циклон-4” на расчетные значения динамических характеристик

А. С. Конюхов, А. С. Цыбенко, Н. Г. Кришук

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, Киев, Украина

Рассмотрена имеющая более высокую степень приближения к конструктивному аналогу динамическая модель ракеты-носителя “Циклон-4” пакетной компоновки в виде связанных подкрепленных тонкостенных упругих оболочечных отсеков, а также механических аналогов двигательных агрегатов, узлов крепления и жидких масс. Исследованы собственные формы и частоты колебаний имитационной модели для начальной стадии полета. Приведено сравнение экспериментальных данных с расчетными, полученными на основе аппроксимации ракеты-носителя в виде пространственного пакета стержневых элементов.

Ключевые слова: ракета-носитель, динамический анализ, собственные колебания, собственные частоты, формы колебаний, гладкооболочечная модель, метод конечных элементов.

Введение. Для расчетного определения динамических характеристик жидкостных ракет-носителей (РН) на этапе проектирования обычно используют приведение конструкции к эквивалентным упругим стержневым аналогам, содержащим сосредоточенные и колеблющиеся массы на упругих и жестких связях [1, 2]. Такой подход, очевидно, имеет свои преимущества (относительная простота модели и реализации) и недостатки (невысокая точность). Поэтому представляет интерес разработка новых имитационных моделей, позволяющих определять уточненные динамические характеристики жидкостных РН.

Цель работы заключается в оценке эффективности имитационной динамической модели РН “Циклон-4” пакетной компоновки при аппроксимации отсеков основного (центрального) и боковых модулей (блоков) в виде сопряженных подкрепленных тонкостенных оболочечных конструкций и сравнении экспериментальных данных с расчетными с использованием пакетно-стержневой модели [1].

Материалы и методы. В основу концепции построения трехмерной расчетной схемы для исследования динамических характеристик прототипа-аналога РН “Циклон-4” пакетной схемы (рис. 1) положено приведение моделей корпусов отсеков трех ступеней основного и шести боковых подвесных модулей к сочлененным пространственным тонкостенным оболочечным фрагментам постоянной толщины с усредненными эквивалентными жесткостными и инерционно-массовыми характеристиками. Оболочки отсеков РН вдоль продольной оси регулярно подкреплены шпангоутами фиксированной жесткости, а также стыковочными силовыми шпангоутами специального вида для крепления подвесных модулей. Силовые элементы подкрепляющего набора размещены на внутренней поверхности оболочек [3].

Геометрические характеристики профилей шпангоутов, используемых в модели поперечного подкрепляющего набора оболочек отсеков РН, соответствуют уголку Пр100-9 (линейные размеры $0,025 \times 0,025$ м, площадь сечения $0,964 \cdot 10^{-4}$ м², осевые моменты инерции $0,573 \cdot 10^{-8}$ м⁴). Для стыковочных силовых шпангоутов специального вида верхнего и нижнего поясов межблочных связей первой ступени основного и шести боковых подвесных модулей РН (рис. 1) параметры соответствуют удвоенному уголку Пр100-9 [3].

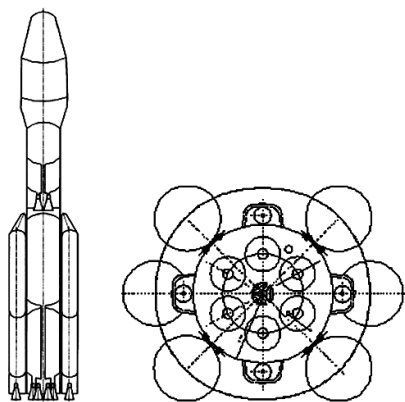


Рис. 1. Пакетная схема РН “Циклон-4”.

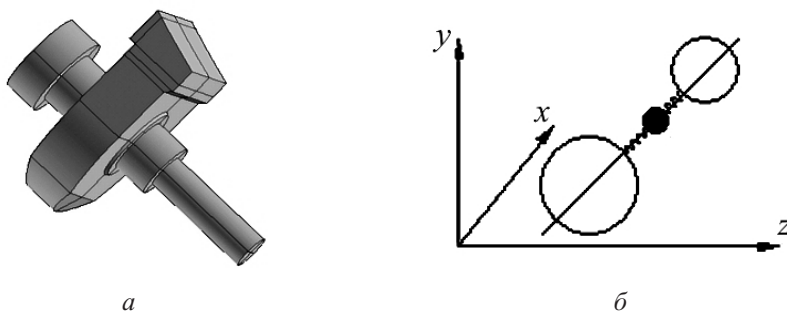


Рис. 2. Твердотельная модель связи нижнего пояса подвесного модуля РН (а) и расчетный аналог упруго-массовой связи силовых шпангоутов оболочек основного и боковых модулей (б).

Массивные узлы креплений, реализующих передачу усилий и моментов через верхний и нижний пояса силовых шпангоутов основного и боковых модулей РН (рис. 2,а), аппроксимировали массово-упругими связями (рис. 2,б). При этом полагали, что элемент связи может сопротивляться сложным видам упругих деформаций по шести обобщенным координатам [1].

Погонную массу подкрепленных оболочек основного и боковых модулей определяли по заданной плотности материалов соответствующих конструктивных элементов РН. Массу жидкости в емкостях модулей РН для стартового (начального) времени полета учитывали как добавку к плотности материала секций топливных баков. Двигатели и другие массивные элементы каждой из трех ступеней конструкции РН аппроксимировали сосредоточенными массами на шпангоутах в соответствии с их топологическим размещением в отсеках модулей. При построении расчетной схемы учитывали наличие геометрической и массовой симметрии конструкции РН.

Физико-механические свойства материала оболочек, шпангоутов и упругих элементов связей расчетной модели РН принимали соответствующими характеристикам алюминиевого сплава Д16Т: плотность – 2800 кг/м^3 , модуль Юнга – 71 ГПа , коэффициент Пуассона – $0,3$.

Осуществив алгебраизацию системы уравнений собственных колебаний для сформулированной эквивалентной расчетной схемы оболочечной модели РН (рис. 3) на основе метода конечных элементов (МКЭ) [4], получили дискретную форму уравнений вида

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

$$\{W\}_{S=S_1} = \{\tilde{W}\}, \quad (2)$$

где $[M]$ – матрица масс системы элементов; $[K]$ – матрица жесткости системы элементов; $[E]$ – единичная матрица; ω – 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 виде (2) характеризуют спектр собственных частот исследуемой модели.

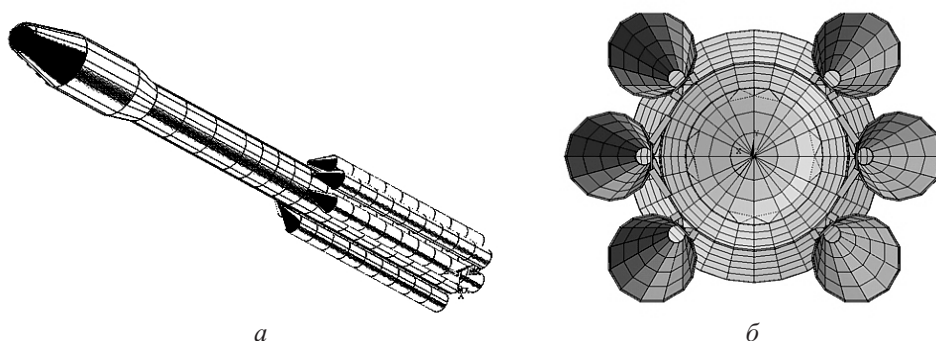


Рис. 3. Оболочечная модель РН “Циклон-4”: а – вид сбоку, б – вид сверху.

При построении дискретного аналога имитационной модели в системе инженерного анализа ANSYS 12,1 (лицензия ГКБ “Южное”) [5] учитывали, что материал тонких подкрепленных оболочек отсеков (основной и подвесные) модулей РН работает в основном на растяжение–сжатие и сдвиг, слабо сопротивляясь изгибу. Предположение о том, что распределение напряжений по толщине сглаженных обшивок модулей является равномерным, позволило воспользоваться для дискретизации оболочек четырехузловыми (SHELL41) мембранными конечными элементами (КЭ) с шестью степенями свободы в узлах (безмоментная теория оболочек). Пространственные двухузловые (BEAM188) КЭ постоянного сечения с шестью степенями свободы в узлах, описываемые технической теорией бруса, применяли для дискретизации конструкций шпангоутов.

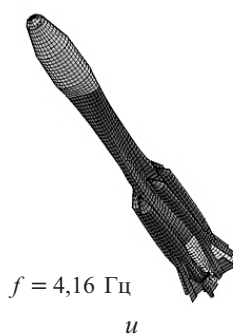
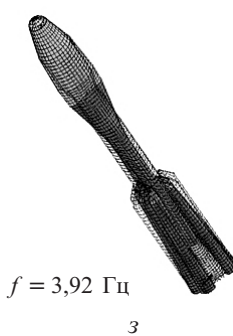
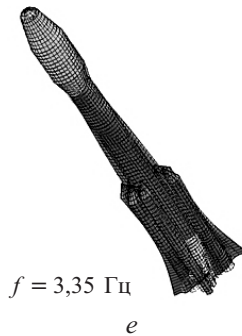
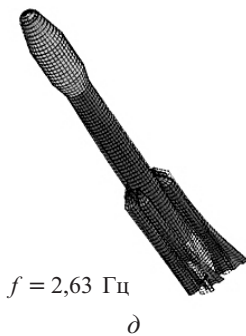
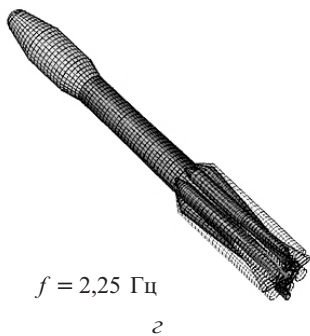
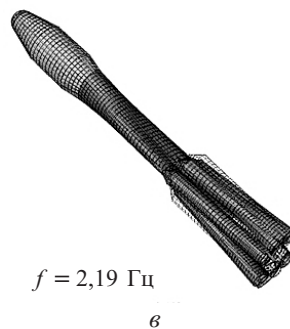
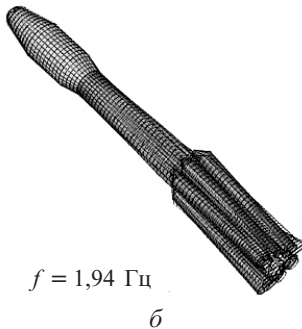
Сосредоточенные массы (MASS21) недеформируемых массивных тел, используемых при аппроксимации РН, размещали в соответствующих узловых точках КЭ модели. Упругие связи приводили к форме двухузловых суперэлементов – аналогов балочных КЭ с эквивалентными жесткостью и массой, отвечающими конструктивному исполнению верхнего и нижнего узлов креплений. Построенная трехмерная дискретная модель конструкции РН “Циклон-4” (рис. 3) состоит из 6134 КЭ (мембранные, балочные и двухузловые суперэлементы), объединенных в 5337 узлах с шестью степенями свободы. Общая масса КЭ модели РН без жидкости с распределенными параметрами и сосредоточенными массами составляет 6193 кг.

Результаты расчетов собственных частот для первых 39 форм колебаний оболочечной дискретной модели РН (рис. 3) приведены в табл. 1 и на рис. 4. Первой изгибной форме колебаний основного блока РН предшествуют формы поперечных колебаний элементов РН в диапазоне частот $f = 0,63...1,77$ Гц (рис. 4,а) и реализуется она на частоте 1,94 Гц (рис. 4,б). В интервале частот 2,19...5,39 Гц имеют

Т а б л и ц а 1

Спектр собственных частот трехмерной динамической модели РН “Циклон-4”

Формы колебаний	f , Гц	Формы колебаний	f , Гц	Формы колебаний	f , Гц	Формы колебаний	f , Гц
1	0,63	11	2,25	21	4,36	31	5,52
2	0,67	12	2,53	22	4,38	32	5,70
3	0,82	13	2,62	23	4,65	33	5,82
4	0,90	14	3,35	24	4,68	34	5,88
5	0,91	15	3,48	25	4,93	35	6,00
6	1,10	16	3,63	26	4,96	36	6,07
7	1,74	17	3,68	27	5,19	37	6,34
8	1,77	18	3,92	28	5,37	38	6,95
9	1,94	19	4,13	29	5,39	39	7,08
10	2,19	20	4,16	30	5,48		



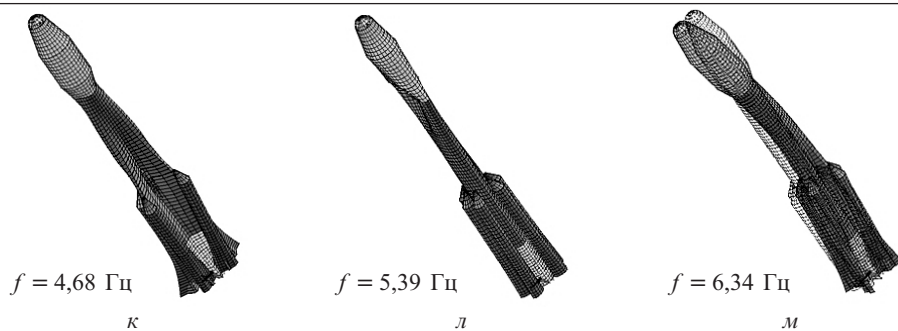


Рис. 4. Собственные формы колебаний динамической модели РН “Циклон-4” на основе аппроксимации отсеков подкрепленными оболочками.

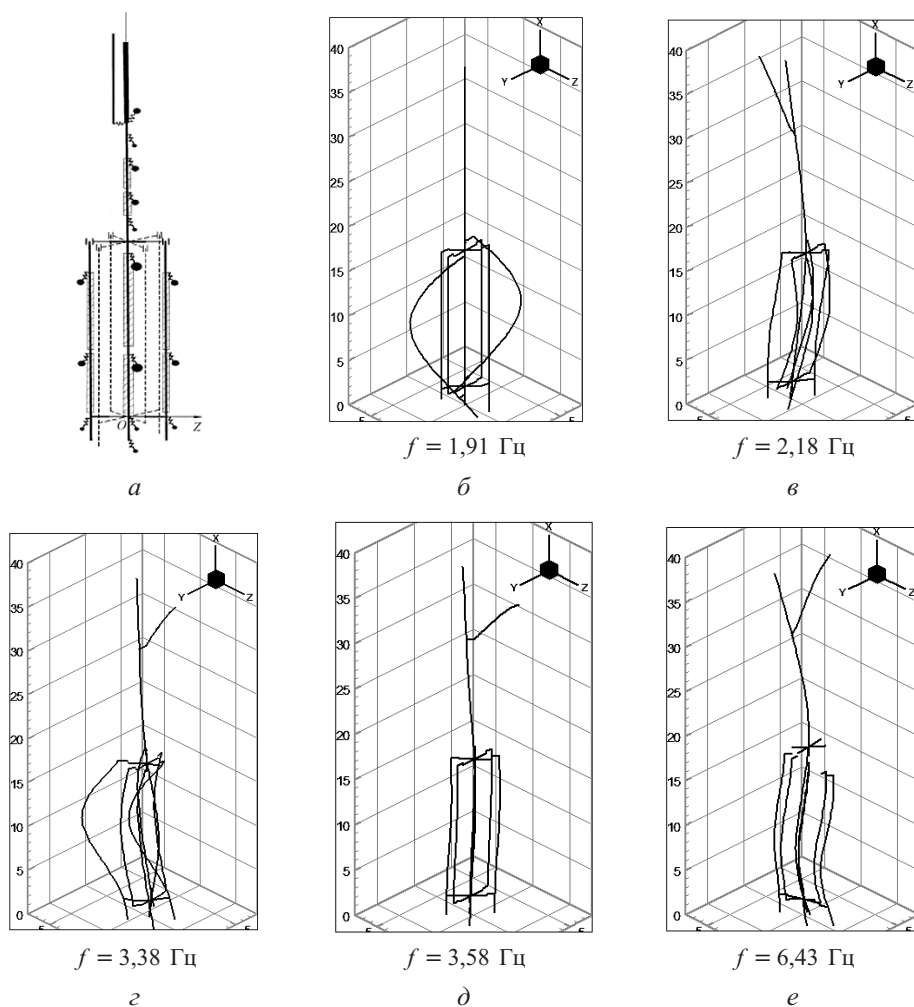


Рис. 5. Расчетная схема (а) и собственные формы колебаний динамической модели РН “Циклон-4” на основе пространственного пакета упругих элементов балочного типа (б–е).

место различные изгибные формы колебаний основного блока, а также изгибные и продольные формы колебаний подвесных модулей (рис. 4,б–к). Вторая и третья основные частоты колебаний соответственно равны 3,92 (рис. 4,з) и 6,34 Гц (рис. 4,м).

На частотах выше 6,34 Гц доминируют комбинированные изгибные и продольные формы колебаний основного блока и аналогичные формы для подвесных модулей.

Верификацию полученных результатов осуществляли посредством сопоставления с данными имитационного моделирования на основе пространственного пакета из семи связанных упругих кусочно-неоднородных элементов балочного типа (рис. 4), отвечающих центральному и боковым блокам РН с учетом присоединенных масс (двигатель, аппарат стабилизации и т.п.), объемов жидких масс, условий сопряжения в межблочных связях для нижнего и верхнего силовых поясов подвесных модулей [1, 2].

Основные формы колебаний центрального и подвесных блоков стержневой модели РН приведены на рис. 5,б–е.

Т а б л и ц а 2

Собственные формы колебаний трехмерных динамических моделей РН

Форма колебаний центрального блока РН	Мембранная модель отсеков РН, Гц	Балочная модель отсеков РН, Гц	Относительная погрешность, %
Первая	1,94	2,18	12,4
Вторая	3,92	3,58	9,5
Третья	6,34	6,43	1,4

При сравнительном анализе данных расчетов для имитационных моделей РН с применением двух типов аппроксимаций модулей конструкции РН подкрепленными оболочками и балочными элементами можно отметить, что полученные значения частот основных изгибных форм колебаний корпуса РН (табл. 2) различаются не более чем на 12,5 % для первой собственной частоты колебаний центрального блока. Это значение уменьшается до 1,4% для третьей формы колебаний.

Выводы

1. По результатам исследований динамических характеристик РН “Циклон-4” на основе гладкооболочечных аппроксимаций обнаружен ряд форм поперечных колебаний основного и подвесных модулей с частотами ниже частоты, соответствующей первой изгибной форме колебаний центрального блока. В диапазоне частот 2...7 Гц для центрального блока и подвесных модулей имеют место комбинированные изгибно-поперечные формы колебаний.

2. Можно утверждать, что для рассматриваемой конструкции РН реализуются собственные оболочечные формы колебаний, обусловленные взаимодействием в системе оболочка–жидкость, которые являются доминирующими при низких частотах и не могут быть адекватно учтены на основе балочной схемы.

3. Для корректного анализа динамических характеристик РН “Циклон-4” пакетной компоновки необходимо в дополнение к конечноэлементным расчетам собственных частот и форм колебаний на основе балочных аппроксимаций применять уточняющие имитационные модели в виде подкрепленных гладкооболочечных аналогов.

Резюме

Розглянуто з більш високим ступенем наближення до конструктивного аналога динамічну модель ракети-носія “Циклон-4” пакетної компоновки у вигляді зв’язаних підкріплених тонкостінних пружних оболонкових відсіків, а також механічних ана-

логів двигунів, вузлів кріплення і рідинних мас. Досліджено власні форми і частоти коливань імітаційної моделі для початкової стадії польоту. Наведено порівняння експериментальних даних із розрахунковими, що отримані на основі апроксимації ракети-носія у вигляді просторового пакета стрижневих елементів.

1. *Цыбенко А. С., Конюхов А. С.* Имитационные динамические модели жидкостных РН. – Киев: Изд. НТУУ “КПИ”, 2008. – 230 с.
2. *Конюхов А. С., Легеза В. С., Цыбенко А. С., Крищук Н. Г.* Собственные колебания жидкостных ракет-носителей пакетной компоновки // Пробл. прочности. – 2001. – № 3. – С. 93–99.
3. *Блинов В. Н., Иванов Н. Н., Сеченов Ю. Н., Шалай В. В.* Ракеты-носители. Проекты и реальность. Справ. пособие. В 2 кн. / Кн. 1. Ракеты-носители России и Украины. – Омск: Изд-во ОГТУ, 2011. – 380 с.
4. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
5. *ANSYS Workbench User’s Guide, Release 12.1.*

Поступила 20. 10 2014