

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ ТРЕТЬЕЙ СТУПЕНИ И КОРПУСА РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ «ЦИКЛОН-4»

Изложены результаты математического моделирования свободных продольных колебаний корпуса трехступенчатой жидкостной ракеты, которые предполагается использовать при построении нелинейной математической модели замкнутой динамической системы «ЖРДУ первой ступени – корпус ракеты» и выполнении теоретического прогноза амплитуд продольных колебаний ракеты. Приведены расчетные зависимости параметров доминирующих тонов собственных продольных колебаний корпуса ракеты космического назначения “Циклон-4” от времени ее полета, вычисленные с учетом диссипации энергии при различных уровнях заполнения топливных баков ее первой ступени.

Викладено результати математичного моделювання вільних поздовжніх коливань корпусу триступеневої рідинної ракети, які будуть використовуватись при побудові нелінійної математичної моделі замкненої динамічної системи «РРДУ першого ступеня – корпус ракети» і виконанні теоретичного прогнозу амплітуд поздовжніх коливань ракети. Наведено розрахункові залежності параметрів домінуючих тонів власних поздовжніх коливань корпусу ракети космічного призначення “Циклон-4” від часу її польоту, які визначені з урахуванням дисипації енергії при різних рівнях заповнення паливних баків її першого ступеня.

Presented are the results of a mathematical simulation of free longitudinal oscillations of structure of a three-staged liquid rocket which will be used for construction of a nonlinear mathematical model of closed dynamic system of the liquid propulsion system and the rocket body and for a theoretical prediction of the amplitudes of rocket longitudinal oscillations. The calculation dependencies of parameters of prevailing tones of natural longitudinal oscillations of the Cyclone-4 space rocket body on its flight time, which were calculated considering the energy dissipation under various levels of tank fuelling its first stage, are examined.

Введение. Одной из наиболее важных задач в теоретическом решении проблемы обеспечения продольной устойчивости жидкостных ракет-носителей (РН) является разработка математической модели продольных колебаний корпуса РН [1, 2], на основе которой можно с достаточной для практики точностью определить параметры низших тонов его собственных продольных колебаний: собственные частоты, декременты и собственные формы.

Как показано в работе [3], диссипация энергии продольных колебаний корпуса РН, несмотря на свою малую величину, оказывает заметное влияние на коэффициенты собственных форм его продольных колебаний и, соответственно, на обобщенные массы, ограничивая их расчетные значения в областях резонансного возрастания. В то же время, влияние диссипации энергии на собственные частоты колебаний корпуса РН в силу ее малой величины пренебрежимо мало. В связи с этим учет диссипации энергии при математическом моделировании свободных продольных колебаний корпуса РН особенно актуален именно при решении нелинейной задачи теоретического определения амплитуд продольных колебаний жидкостной РН на активном участке траектории ее полета. Использование в нелинейной математической модели динамической системы “жидкостная ракетная двигательная установка (ЖРДУ) – корпус РН” значений параметров собственных продольных колебаний корпуса РН, которые определены с учетом диссипации энергии, повышает надежность и достоверность прогноза уровня амплитуд продольных колебаний жидкостной РН.

В работе [4] рассмотрена задача теоретического определения частот и амплитуд продольных колебаний жидкостных РН на основе нелинейной математической модели замкнутой динамической системы “ЖРДУ первой

ступени – корпус РН” и представлены результаты ее решения применительно к трехступенчатой жидкостной РН “Циклон-3”. Ракета космического назначения (РКН) “Циклон-4” разрабатывалась на основе РН “Циклон-3”. Ее геометрические, инерционно-массовые и жесткостные характеристики отличаются от соответствующих характеристик ракеты “Циклон-3”, поэтому значения параметров собственных продольных колебаний корпуса, которые относятся к числу основных факторов влияния на продольную устойчивость, у этих двух ракет будут различными.

Целью настоящей работы является математическое моделирование свободных продольных колебаний корпуса трехступенчатой РКН “Циклон-4”. Его результаты необходимы для выполнения теоретического прогноза амплитуд продольных колебаний РКН и космического аппарата (КА) на активном участке траектории полета.

Модернизация ракеты “Циклон-3” практически не затронула ее первую и вторую ступени. Третья ступень РКН “Циклон-4” представляет собой новую разработку. К особенностям конструкции третьей ступени в первую очередь относится нетрадиционное исполнение топливного отсека. Он представляет собой цельносварную герметичную ёмкость сфероконической формы с цилиндрической вставкой. Ёмкость состоит из полости окислителя, имеющей сферическую форму с цилиндрической вставкой, и полости горючего конической формы. Маршевый двигатель размещается симметрично относительно продольной оси ступени и крепится при помощи рамы к полости горючего топливного отсека. Таким образом, конструкция новой третьей ступени РКН “Циклон-4” имеет сложную пространственную конфигурацию сфероконического топливного отсека с нетрадиционным креплением к его нижнему шпангоуту маршевого ЖРД (рис. 1, а), при этом она существенно отличается от конструкции третьей ступени ракеты “Циклон-3” (рис. 1, б).

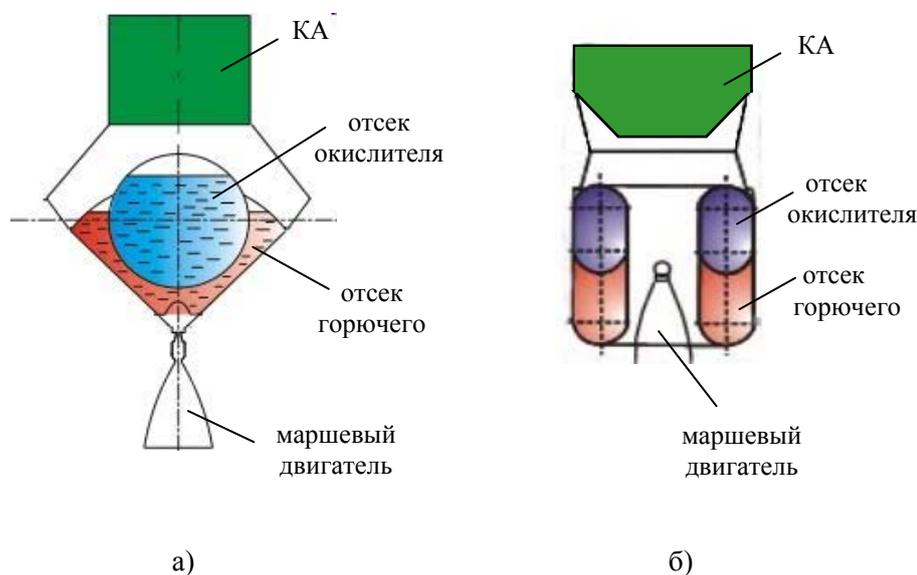


Рис. 1

Математическое моделирование свободных колебаний конструкции третьей ступени РКН “Циклон-4” в направлении ее продольной оси. Для определения параметров собственных продольных колебаний конструкции третьей ступени РКН с использованием универсальной программной САЕ-системы (Computer-Aided Engineering) [5] разработана конечно-элементная модель ступени. При моделировании предполагалось, что третья ступень РКН представляет собой конструкцию, состоящую из упругих оболочек, заполненных несжимаемой вязкой жидкостью с возможностью деформации свободной поверхности. Моделирование проведено для максимального заполнения конструкции полостей топливом, соответствующего времени работы двигателей первой ступени РКН “Циклон-4”.

Для построения конечно-элементной модели третьей ступени РКН “Циклон-4” как сложной пространственной гидромеханической системы были использованы конечные элементы трех типов. Полости горючего и окислителя, приборный отсек и рама маршевого двигателя моделировались

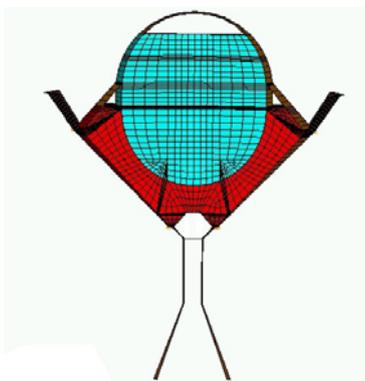


Рис. 2

конечными элементами “упругая оболочка” (3440 элементов); жидкое топливо в отсеках третьей ступени было представлено с помощью конечных элементов “трехмерная жидкость” (8320 элементов); баллоны системы наддува и системы запуска, баки окислителя и горючего жидкостной реактивной системы моделировались с помощью элементов “сосредоточенная масса” (8 элементов). На рис. 2 показано конечно-элементное представление третьей ступени РКН “Циклон-4”.

Параметры пространственных колебаний третьей ступени со сложной пространственной конфигурацией топливных баков определялись с использованием методики, изложенной в работе [6], на основании разработанной конечно-элементной модели путем решения линейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей свободные колебания ступени как консервативной системы:

$$M\ddot{X}(t) + K X(t) = 0, \quad (1)$$

где X – вектор перемещений; M , K – ленточные матрицы масс и жесткости порядка $n \times n$; t – текущее время.

В конечно-элементной модели ступени задавались условия совместности деформаций сопряженных поверхностей раздела жидкой и твердой сред с учетом скольжения жидкости относительно стенок баков ступени РКН, граничные условия, определяющие крепление верхней части конструкции, а также действие массовых сил и давления наддува на компоненты жидкого топлива в баках ступени [5, 6].

Для принятого разбиения системы на конечные элементы вычислялись параметры собственных пространственных колебаний третьей ступени РКН: собственные частоты и обобщенные массы. Выбор доминирующих продольных мод третьей ступени РКН, используемых в дальнейшем при построении математической модели свободных продольных колебаний

корпуса РКН “Циклон-4”, проводился на основе анализа собственных частот и обобщенных масс продольных составляющих пространственных колебаний третьей ступени РКН. Из анализа результатов следует, что значительными обобщенными массами (более 200 кг) характеризуются четыре продольные моды третьей ступени РКН “Циклон-4”, при этом только у двух из них собственные частоты (далее они обозначены f_{3ST1} и f_{3ST2}) находятся в частотном диапазоне потенциального проявления продольной неустойчивости РКН “Циклон-4” – интервале $(0, f_{max})$, где $f_{max} = 20 - 30$ Гц.

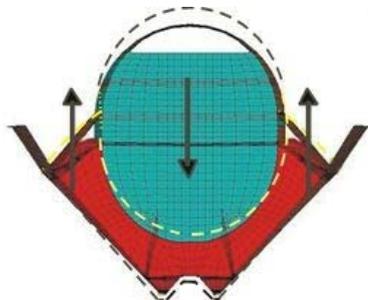


Рис. 3

Исследование характера колебаний системы на частоте $f_{3ST1} = 14,3$ Гц показало, что на этой частоте происходят существенные колебания (растяжения-сжатия) оболочки полости окислителя в направлении продольной оси ступени при относительно малых продольных перемещениях элементов конструкции полости горючего. Это следует из рис. 3, на котором представлен продольный «вырез» конечно-элементного представления ступени, иллюстрирующий форму пространственных колебаний третьей ступени на частоте $f_{3ST1} = 14,3$ Гц (для наглядности размеры деформаций здесь и далее на аналогичных рисунках увеличены).

На частоте $f_{3ST2} = 27,9$ Гц элементы конструкции, представляющие полости горючего и окислителя ступени, совершают колебательные движения вдоль продольной оси с одной фазой. Вследствие этого продольные колебания с частотой f_{3ST2}

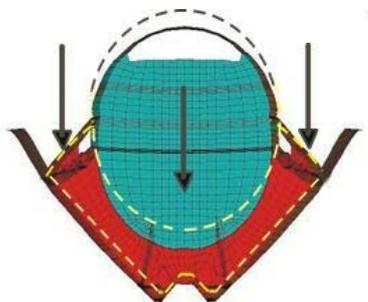


Рис. 4

характеризуются значительной обобщенной массой. На рис. 4 приведена форма пространственной деформации конструкции топливного отсека третьей ступени РКН “Циклон-4” на частоте колебаний $f_{3ST2} = 27,9$ Гц.

Из полученных результатов следует, что при моделировании свободных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4” достаточно ограничиться учетом колебательного движения третьей ступени в продольном направлении с двумя собственными частотами: $f_{3ST1} = 14,3$ Гц и $f_{3ST2} = 27,9$ Гц. Обобщенные массы осцилляторов, моделирующих колебания третьей ступени с указанными частотами, составляют $M_{3ST1} = 763$ кг и $M_{3ST2} = 8117$ кг соответственно. Суммарная расчетная масса остальных тонов собственных продольных колебаний третьей ступени учитывалась в модели свободных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4” в виде сосредоточенной массы M_{3ST3} , закрепленной в сечении верхнего шпангоута межступенного отсека.

Математическое моделирование свободных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4”. Построение модели свободных продольных колебаний корпуса базировалось на ряде общих теоретических положений, используемых при математическом моделировании динамики жидкостных ракет-носителей [1 – 3, 7 – 10].

Моделирование свободных продольных колебаний конструкции корпуса РКН “Циклон-4” выполнялось на основе упруго-массовой схемы системы “конструкция РКН – жидкое топливо в баках” с учетом диссипации энергии (рис. 5). Конструкция РКН схематизировалась разветвленной цепочкой сосредоточенных масс, соединенных упругими и диссипативными связями. Переменными M , B , и C на схеме обозначены массы звеньев системы и, соответственно, коэффициенты демпфирования и жесткости связей. Учет

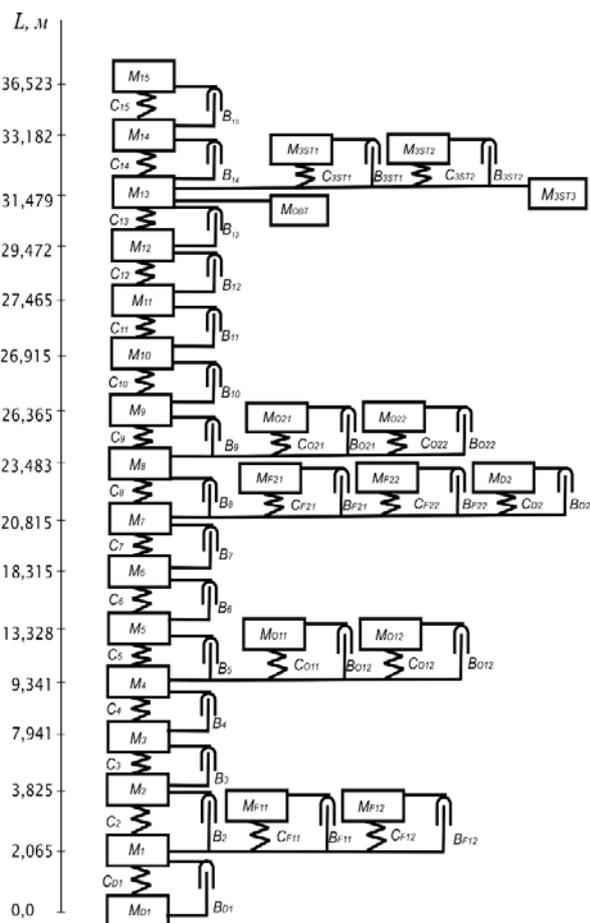


Рис. 5.

ступени РКН на частоте основного тона колебаний подсистемы “упругая рама – ЖРД”.

При схематизации колебательного движения третьей ступени РКН “Циклон-4” использовались приведенные выше результаты математического моделирования собственных продольных колебаний этой ступени.

Свободные продольные колебания корпуса РКН “Циклон-4” как диссипативной колебательной системы “конструкция РКН – жидкое топливо

диссипации энергии осуществлялся по модели вязкого трения.

При моделировании свободных продольных колебаний корпуса РКН учитывались по два низших тона собственных продольных колебаний жидкости в топливных баках первой и второй ступени РКН. В расчетной схеме они имитируются осцилляторами с массами M_{Oki} , M_{Fki} . Здесь переменными с индексами “ Oki ”, “ Fki ” ($k=1; 2$; $i=1; 2$) обозначены

параметры осцилляторов, имитирующих i -й тон собственных продольных колебаний жидкости в баке окислителя (“ O ”) и баке горючего (“ F ”) k -й ступени РКН; переменными с индексами “ Dk ” ($k=1; 2$) – параметры осцилляторов, имитирующих продольные колебания двигателя k -й

в баках” с конечным числом степеней свободы описывались системой обыкновенных дифференциальных уравнений [3, 7, 9]:

$$M\ddot{X}(t) + B\dot{X}(t) + CX(t) = 0, \quad (3)$$

где M , B , C – действительные квадратные матрицы масс, коэффициентов демпфирования и жесткости соответственно; X – вектор-столбец продольных перемещений координат центров масс всех элементов рассматриваемой системы “конструкция РКН – жидкое топливо в баках” относительно положения их статического равновесия.

Параметры собственных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4” с составным макетом КА определялись на основе решения проблемы собственных значений [3]. Собственные значения неконсервативной системы (3) являются комплексно-сопряженными (иногда их называют комплексными собственными частотами): $\lambda_{i,i+1} = -\alpha_i \pm j\omega_i$. Каждая пара $\lambda_{i,i+1}$ определяет одну собственную частоту затухающих колебаний корпуса $f_i = \text{mod}(\text{Im}\lambda_{2i}/2\pi)$ и коэффициент затухания колебаний этой частоты $\alpha_i = -\text{Re}\lambda_i$. В качестве характеристики затухания колебаний системы “конструкция РКН – жидкое топливо в баках” рассматривался параметр $\delta_i = 2\pi\alpha_i / f_i$, который по форме представления аналогичен декременту одночастотных колебаний.

Расчет параметров свободных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4” проводился при различных уровнях заполнения топливных баков ее первой ступени, соответствующих времени работы двигательной установки этой ступени. В частотном диапазоне (0, 35 Гц) частично или полностью находятся зависимости 8-ми собственных частот колебаний системы от условного времени полета, которые показаны на рис. 6 кривыми 1 – 8.

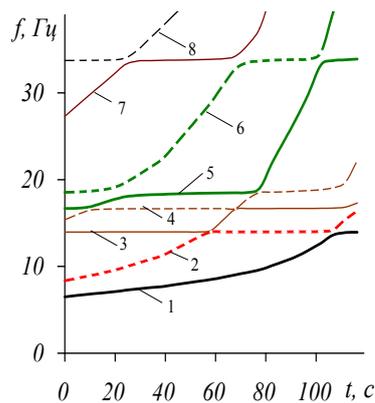


Рис. 6.

Зависимости декрементов 6-ти низших тонов собственных продольных колебаний корпуса РКН приведены на рис. 7 (нумерация кривых на рис. 7 соответствует нумерации кривых на рис. 6). Как видно из рис. 7, кривые этих зависимостей для всех тонов собственных продольных колебаний корпуса РКН имеют разный вид. Значения декрементов низших тонов собственных

продольных колебаний корпуса РКН изменяются в зависимости от степени динамического взаимодействия парциальных систем исследуемой системы “конструкция РКН – жидкое топливо в баках”, при этом на отдельных участках интервала времени полета РКН каждый из 6-ти тонов его колебаний может быть отнесен к числу доминирующих.

Для большей наглядности результатов математического моделирования свободных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4” и упрощения последующего анализа ее продольной устойчивости использовался подход к выбору доминирующих собственных частот колебаний корпуса жидкостной

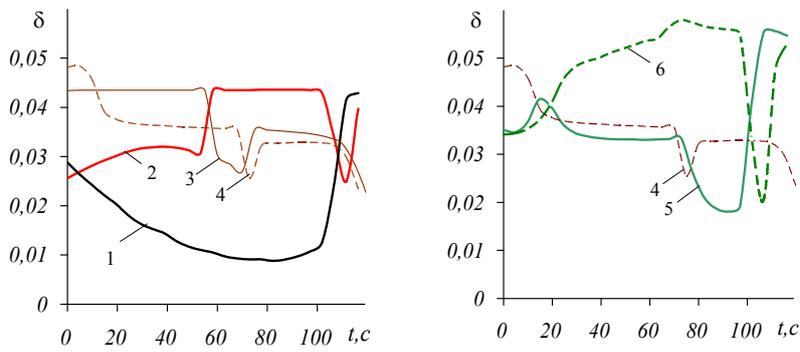


Рис. 7.

РКН, предложенный в работе [3]. В соответствии с этим подходом, выбор доминирующих собственных частот колебаний корпуса РКН “Циклон-4” производился с учетом значений декрементов и коэффициентов собственных форм колебаний. Это позволяет уменьшить количество доминирующих собственных частот колебаний корпуса РКН “Циклон-4” с шести до трех. Зависимости доминирующих собственных частот и соответствующих им декрементов колебаний корпуса РКН от времени полета показаны на рис. 8.

Как видно из рис. 6 и 8, а, первая доминирующая собственная частота колебаний корпуса РКН “Циклон-4” совпадает с собственной частотой I-го тона его продольных колебаний, а вторая, соответствующая собственной частоте I-го тона колебаний жидкости в баке окислителя первой ступени РН, “сшита” из собственных частот II-го – VI-го тона.

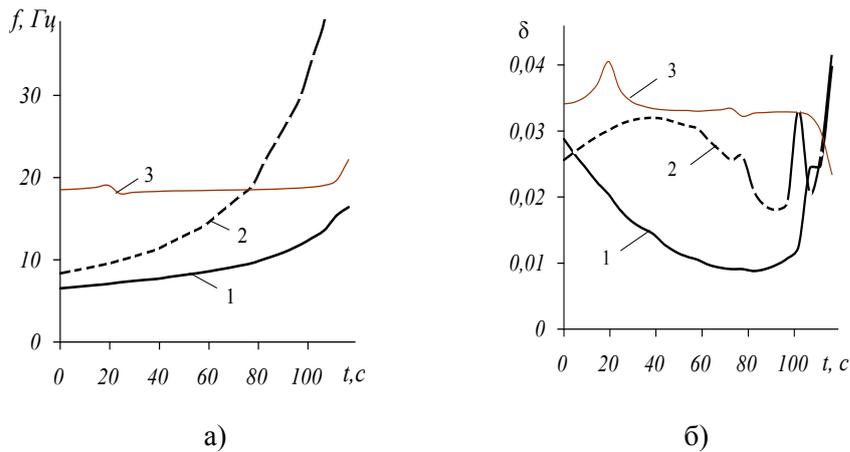


Рис. 8.

Расчетные значения обобщенных приведенных масс и модулей коэффициентов собственных форм низших тонов колебаний корпуса РКН также изменяются по мере уменьшения массы жидкого топлива в топливных баках первой ступени РКН. При этом на отдельных участках интервала времени полета РН происходит резонансное возрастание указанных параметров, которое обусловлено сближением собственных частот продольных колебаний конструкции РКН и жидкости в ее топливных баках. Расчетные значения этих параметров, вычисленные без учета диссипации,

неограниченно возрастают. Учет диссипации энергии при математическом моделировании свободных продольных колебаний корпуса РКН ограничивает резонансное возрастание значений указанных параметров. Для

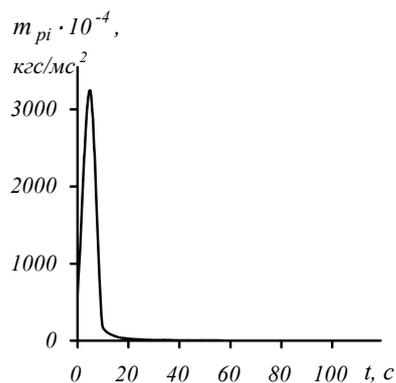


Рис. 9.

иллюстрации на рис. 9 показана зависимость обобщенной приведенной массы I-го тона собственных продольных колебаний корпуса РКН “Циклон-4”, рассчитанная с учетом диссипации энергии.

Таким образом, проведено математическое моделирование свободных продольных колебаний корпуса трехступенчатой жидкостной ракеты космического назначения “Циклон-4”. При этом учитывалось влияние диссипации энергии в элементах корпуса на параметры его собственных продольных колебаний и

особенности конструктивного исполнения третьей ступени РКН. Полученные результаты использовались при построении линейной и нелинейной математической модели замкнутой динамической системы «ЖРДУ первой ступени – корпус РКН “Циклон-4”», на основе которых выполнялся теоретический прогноз продольной устойчивости РКН “Циклон-4” и амплитуд ее продольных колебаний.

1. Натанзон М. С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М. С. Натанзон. – М. : Машиностроение, 1977. – 208 с.
2. Рабинович Б. И. Введение в динамику ракет–носителей космических аппаратов / Б. И. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1983. – 296 с.
3. Николаев А. Д. Определение параметров собственных продольных колебаний конструкции корпуса жидкостных ракет–носителей с учетом диссипации энергии / А. Д. Николаев, Н. В. Хоряк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4/12. – С. 62 – 73.
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. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – Санкт-Петербург : Питер, 2004. – 560 с.
6. 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.
7. Динамика старта жидкостных ракет-носителей космических аппаратов / Г. И. Богомаз, Н. Е. Науменко, М. Б. Соболевская, И. Ю. Хижа. – К. : Наукова думка, 2005. – 248 с.
8. Колесников К. С. Динамика ракет / К. С. Колесников. – М. : Машиностроение, 1980. – 376 с.
9. Гладкий В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарата / В. Ф. Гладкий. – М. : Наука, 1969. – 496 с.
10. Микишев Г. Н. Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г. Н. Микишев. – М. : Машиностроение, 1978. – 247 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 11.10.11,
в окончательном варианте 20.10.11