

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 531.01:629.764

ПРОДОЛЬНЫЕ УПРУГИЕ КОЛЕБАНИЯ КОРПУСА МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ЖИДКОСТНОЙ РАКЕТЫ ПАКЕТНОЙ СХЕМЫ

М.И. Дьяченко, А.М. Павлов, А.Н. Темнов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: s_masyanya@mail.ru; pavlov_arseniy@mail.ru; antt45@mail.ru

В связи с появлением новых многоступенчатых жидкостных ракет-носителей пакетной компоновки (с использованием унифицированного ракетного блока) возникает необходимость в проведении дополнительных исследований динамических характеристик таких ракет. По сравнению с ракетами тандемной схемы, колебания ракет пакетной компоновки имеют особенности, усложняющие анализ их динамических характеристик. В первую очередь это обусловлено тем, что при колебаниях ракеты боковые и центральный блоки оказывают друг на друга взаимное влияние, что расширяет систему возможных движений блоков. Рассмотрена проблема упругих колебаний жидкостных ракет пакетной компоновки. Исследована задача о продольных собственных колебаниях ракеты пакетной схемы. Проведен приближенный расчет низших тонов, а также анализ соответствующих им форм продольных колебаний ракеты с использованием осцилляторной модели.

Ключевые слова: ракета-носитель, стержневая система, продольные колебания, спектр колебаний, эффект POGO.

LONGITUDINAL ELASTIC VIBRATIONS OF MULTISTAGE LIQUID-PROPELLANT LAUNCH VEHICLE BODY

M.I. Dyachenko, A.M. Pavlov, A.N. Temnov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: s_masyanya@mail.ru; pavlov_arseniy@mail.ru; antt45@mail.ru

Due to introduction of new multistage liquid-propellant launch vehicles with clusters of boosters (based on the unified booster structure), there is a need for additional analysis of their dynamic properties. In comparison with the tandem multistage rockets, vibrations of rockets with clusters of boosters have some peculiarities, which complicate the analysis of their dynamic characteristics. The main reason for this is the mutual influence of the central and lateral blocks during vibrations. It introduces additional allowable motions of the blocks. The article deals with the problem of elastic vibrations of lateral-staging liquid-propellant launch vehicles. The authors carry out the research into the problem of the rocket longitudinal natural vibrations. They also make approximate calculation of the lowest tones and respective modes of the rocket longitudinal vibrations with the help of the liquid sloshing oscillatory model.

Keywords: launch vehicle, rod system, longitudinal vibrations, vibration spectrum, POGO effect.

Исследование продольных колебаний мощных ракет-носителей (РН) является необходимой и важной задачей в связи с возможным возникновением эффекта POGO вследствие взаимодействия упругого корпуса с жидким топливом, топливной магистралью и жидкостным ракетным двигателем (ЖРД) [1, 2]. Систематическое изучение устойчивости продольных колебаний РН пакетной схемы было начато в работах [3, 4]. Актуальность рассматриваемой задачи подчеркивается также необходимостью улучшения энергетических характеристик современных РН тяжелого класса [5, 6]. С другой стороны, в настоящее время в различных ракетно-космических корпорациях все большее распространение получает разработка модельного ряда РН модульной схемы на основе унифицированного ракетного блока (модуля). В качестве примеров можно привести семейство ракет Delta американской фирмы Boeing, ракеты Ангара, разрабатываемые в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Falcon 9 и Falcon Heavy американской частной компании SpaceX. Такой подход позволяет создать серию РН, начиная с легкой (или средней) и заканчивая тяжелой и сверхтяжелой. Повышение грузоподъемности РН в данном случае обеспечивается объединением нескольких ракетных блоков, расположенных по окружности вокруг центрального.

Зачастую центральный блок имеет некоторые отличия от боковых (отсутствие обтекателя, дополнительные разъемы и усиления и т.д.), но отличия эти несут незначительные конструктивно-компоновочные изменения и его конструктивно-компоновочная схема остается идентичной остальным блокам.

Упругие колебания корпуса РН пакетной схемы. При исследовании устойчивости РН как динамической системы возникает необходимость в определении собственных частот и форм упругих колебаний корпуса. Один из существующих расчетных методов заключается в том, что ракета моделируется как стержень (или система стержней) с упругими и массовыми характеристиками, приближенно описывающими реальное изделие. Учет жидкости в баках осуществляется введением в стержневую систему осцилляторов, масса которых моделирует массу жидкости, а жесткость — параметры днища и стенок баков.

Упругие колебания корпуса ракеты тандемной схемы можно разделить на три типа: продольные, поперечные (изгибные) и крутильные колебания. Стоит отметить, что частоты собственных колебаний одного типа ракеты тандемной схемы достаточно разделены между собой, что позволяет при расчете учитывать небольшое число низших тонов колебаний.

В случае с ракетой пакетной схемы ситуация значительно усложняется. Модель такой ракеты представляет собой систему из стержней, соединенных упругими связями, моделирующими системы закрепления боковых блоков на центральном. В этом случае колебания одного

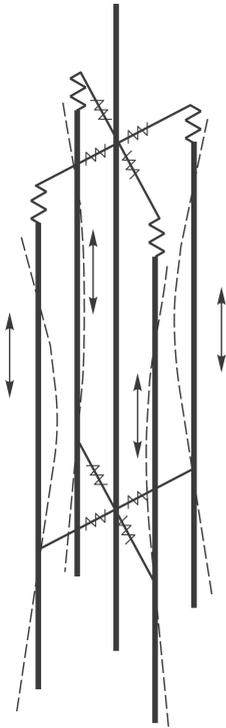


Рис. 1. Первый класс движений

типа начинают оказывать влияние на колебания другого. Например, продольные колебания боковых блоков могут возбудить поперечные колебания центрального блока или крутильные колебания центрального могут возбудить поперечные боковых блоков.

В работах [7, 8] предложена классификация движений, возникающих при собственных колебаниях ракеты пакетного типа. Рассмотрим ее на примере ракеты с четырьмя боковыми блоками.

1. Центральный блок совершает продольные колебания, боковые блоки совершают как продольные, так и поперечные колебания в радиальной плоскости (рис. 1). Механизм появления изгибных колебаний боковых блоков показан на рис. 2, *а*.

2. Центральный блок совершает изгибные колебания, боковые блоки совершают колебания трех типов: продольные, изгибные и крутильные. Возникновение продольных и изгибных колебаний боковых блоков показано на рис. 2, *б*, возникновение крутильных — на рис. 3, *а*.

При этом в первом случае изгибные колебания боковых блоков возникают из-за действия момента от сил реакций связей, приложенных внецентренно, во втором же случае эти колебания возбуждаются уже поперечной силой, возникающей из-за линейного перемещения в радиальном направлении узлов крепления боковых блоков. Этот случай колебаний можно условно разделить на два варианта: поперечные колебания центрального блока происходят в плоскости тангажа, либо

При этом в первом случае изгибные колебания боковых блоков возникают из-за действия момента от сил реакций связей, приложенных внецентренно, во втором же случае эти колебания возбуждаются уже поперечной силой, возникающей из-за линейного перемещения в радиальном направлении узлов крепления боковых блоков. Этот случай колебаний можно условно разделить на два варианта: поперечные колебания центрального блока происходят в плоскости тангажа, либо

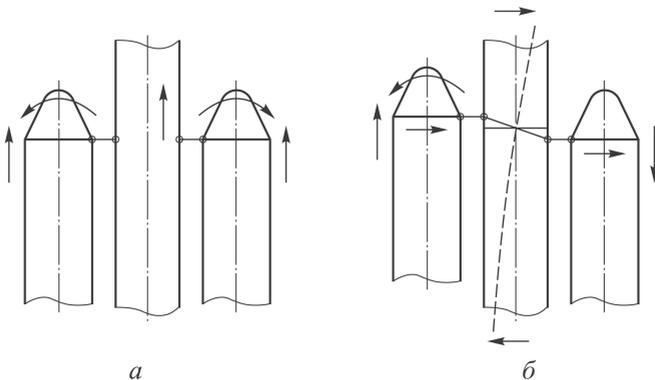


Рис. 2. Возбуждение изгибно-продольных колебаний боковых блоков в первом (а) и втором (б) классах движений

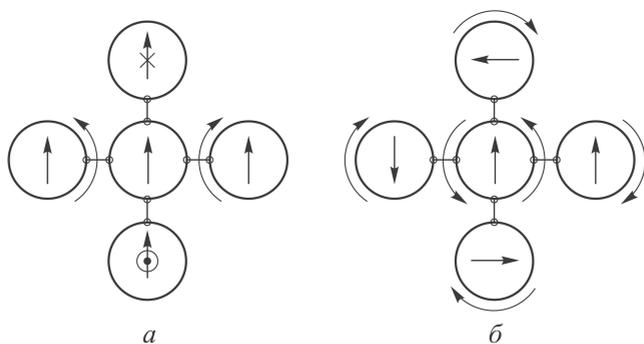


Рис. 3. Возбуждение изгибно-крутильных колебаний боковых блоков во втором (а) и третьем (б) классах движений

в плоскости рысканья (либо в двух других перпендикулярных плоскостях в зависимости от связанной системы координат ракеты).

3. Центральный блок совершает крутильные колебания, боковые блоки — изгибно-крутильные колебания в тангенциальных плоскостях (рис. 3, б).

Продольные упругие колебания ракеты пакетной схемы. При исследовании устойчивости продольных автоколебаний ракеты, возникающих в полете, одной из важных составляющих анализа является определение собственных частот и форм продольных колебаний корпуса ракеты.

В работе [8] указано, что анализ подсистемы, связанной с продольными колебаниями, следует проводить отдельно от подсистем, связанных с каналами управления (по тангажу, рысканию и крену), так как основное влияние продольные колебания оказывают на динамику взаимодействия гидроупругой системы: корпус–жидкое топливо–расходная магистраль–двигатель. Поэтому для выявления общего характера продольных колебаний ракеты пакетной схемы можно обосновано принять допущение, что при продольных колебаниях никакие другие колебания не возбуждаются. В работе [9] приведено исследование продольных колебаний корпуса жидкостной ракеты пакетной схемы, в котором движения жидкости не учитывались, а масса жидкости равномерно распределялась по стержням, составляющим расчетную модель. Математическая модель продольных колебаний подобной конструкции в виде пакета тонкостенных стержней подробно рассмотрена в диссертационной работе А.А. Пожалостина [10].

В настоящей статье приведены теоретические и вычислительные результаты продольных колебаний пакета стержней, дополняющие исследования [9, 10].

В качестве упрощенной математической модели примем систему, состоящую из стержней, соединенных между собой упругими связями, воспринимающими продольные перемещения боковых блоков относительно центрального. Обычно фиксация по продольному направлению

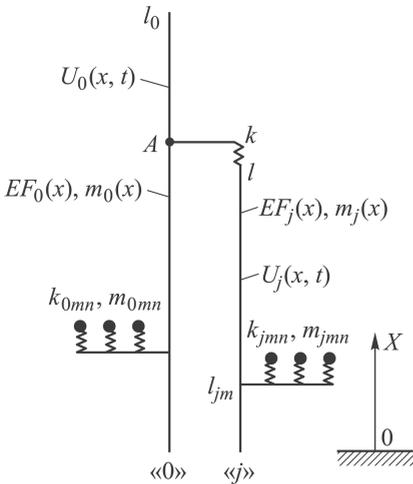


Рис. 4. Расчетная модель продольных колебаний ракеты пакетной схемы с произвольным числом блоков

упругим элементом жесткости k . В точках с координатой l_{jm} прикрепляется необходимое для конкретного расчетного случая число осцилляторов, моделирующих колебания жидкости. Индексы в параметрах жесткости k_{jmn} и массы m_{jmn} имеют следующий смысл: индекс j обозначает принадлежность к j -му стержню, m — точку крепления осциллятора, n — номер осциллятора в данной точке крепления.

Введем неподвижную систему отсчета OX и предположим, что жесткость стержней $EF_j(x)$, распределенная масса $m_j(x)$ и возмущение $q(x, t)$ являются ограниченными функциями координаты x :

$$\begin{aligned} 0 < r_j \leq EF_j(x) \leq R_j; \\ 0 < m_j \leq m_j(x) \leq M_j, \quad j = 0, 1, 2, \dots, N; \\ 0 < q_j \leq q_j(x, t) \leq Q_j. \end{aligned} \quad (1)$$

Пусть при продольных колебаниях в сечениях стержней с координатой x возникают смещения $u_j(x, t)$, определяемые уравнениями

$$m_j(x) \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left(EF_j(x) \frac{\partial u_j}{\partial x} \right) = q_j(x, t), \quad j = 0, 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Уравнение, описывающее смещение массы осциллятора $u_{jmn}^*(t)$, для данной системы запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{jmn} \frac{d^2 u_{jmn}^*}{dt^2} + k_{jmn} (u_{jmn}^* - u_j(l_{jm}, t)) = f_{jmn}(t); \\ j = 0, 1, 2, \dots, N, \quad m = 1, 2, \dots, N_j, \quad n = 1, 2, \dots, N_{jm}. \end{aligned} \quad (3)$$

в ракетах пакетной схемы осуществляется в верхнем силовом поясе. Учет колеблющейся массы жидкости в баках обеспечим введением осцилляторов, закрепленных на уровне силовых шпангоутов днищ соответствующих баков. Для каждого тона колебаний жидкости вводится один осциллятор.

Постановка задачи о продольных колебаниях. Рассмотрим продольные колебания стержневой системы, состоящей из центрального стержня длиной l_0 и N боковых стержней одинаковой длины $l_j = l$ ($l_0 > l, j = 1, 2, \dots, N$), скрепленных в т. A ($x_A = l$) (рис. 4) с центральным

Здесь $q_j(x, t)$ и $f_{jmn}(t)$ суть внешние силы, действующие на соответствующие стержни, либо осцилляторы. Дополним задачу следующими необходимыми граничными условиями:

- отсутствие нормальных сил на концах стержней —

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_j}{\partial x} &= 0, \quad x = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N; \\ \frac{\partial u_0}{\partial x} &= 0, \quad x = 0, \quad x = l_0; \end{aligned} \quad (4)$$

- равенство нормальных сил, возникающих в стержнях, силам упругости пружинных элементов крепления боковых блоков —

$$\begin{aligned} EF_j \frac{\partial u_j}{\partial x} &= F_{прj}, \quad x = l_j; \\ F_{прj} &= k(u_0(x_A) - u_j(l_j)); \\ EF_0 \frac{\partial u_0}{\partial x}(x_A - 0) - EF_0 \frac{\partial u_0}{\partial x}(x_A + 0) &= -NF_{прj}, \quad x = x_A l; \end{aligned} \quad (5)$$

- равенство перемещений в точке x_A центрального стержня —

$$u_0(x_{A-0}) = u_0(x_{A+0}); \quad (6)$$

- равенство нормальных сил, возникающих в стержнях, силам упругости пружинных элементов крепления осцилляторов —

$$\begin{aligned} EF_j \frac{\partial u_j}{\partial x} &= \sum_{n=1}^{N_{jmn}} F_{прjmn}, \quad x = l_{jm}; \\ F_{прjmn} &= k_{jmn}(u_{jmn}^* - u_j(l_{jm})); \end{aligned} \quad (7)$$

- равенство перемещений в точках l_{jm} крепления осцилляторов —

$$u_j(l_{jm-0}) = u_j(l_{jm+0}). \quad (8)$$

Численный пример решения задачи об упругих продольных колебаниях корпуса ракеты пакетной схемы. Положим в уравнении (2) возмущение $q(x, t) = 0$ и пусть все смещения $u_j(x, t)$ в исходной задаче (2)–(8) пропорциональны $\exp(i\omega t)$, где ω — собственная частота колебаний. Рассмотрим собственные колебания жидкостной ракеты тяжелого класса с четырьмя боковыми блоками.

В данном примере ограничимся первым тоном осесимметричных колебаний жидкости. Расчет масс и жесткостей осцилляторов проводится по известным методикам, описанным в [11]. Колебания жидкости будем учитывать для ракетных блоков первой и второй ступеней. Для высших ступеней примем модель “замороженной” жидкости. Жесткость стержней примем как усредненную жесткость корпуса в продольном направлении. Итоговая расчетная модель изображена на рис. 5.

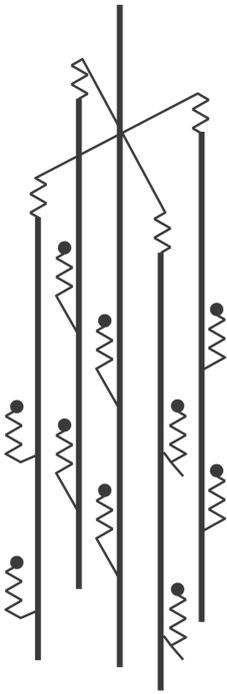


Рис. 5. Расчетная схема ракеты для анализа продольных колебаний

При расчете собственных частот использовались параметры, типичные для ракет тяжелого класса. В результате расчета были получены следующие парциальные частоты осцилляторов: для баков “Г” (нижние осцилляторы) $f = 9,64$ Гц, для баков “О” (верхние осцилляторы) $f = 5,36$ Гц.

Расчет проводился методом конечных элементов с помощью решателя NASTRAN. При решении использовались стержневые элементы типа CROD, осцилляторы моделировались элементами сосредоточенной массы CMASS и соединялись со стержнями упругими элементами CELAS. Боковые стержни соединялись с центральным также элементами CELAS. Расчет собственных значений частот проводился методом Ланцоша для свободного тела.

Далее приведены результаты расчета: значения первых шести собственных частот $f = \omega/2\pi$ (Гц) — 2,93; 3,80; 6,63; 6,80; 6,92; 10,59 и соответствующие им формы (рис. 6).

Отметим, что рассматриваемая система не закреплена, но имеется и “нулевой” корень задачи о собственных колебаниях, соответствующий движениям всего пакета при отсутствии упругих деформаций, т.е. $U = \text{const}$.

Как следует из полученных значений, низшие частоты колебаний весьма близки друг к другу. С последующим ростом частоты колебаний осцилляторы перестают в значительной мере влиять на колебания системы. Для исследования колебаний на более высоких частотах необходимо введение в систему осцилляторов, моделирующих высшие тона колебания жидкости в баках.

Из рис. 6, а следует, что при первой форме колебаний центральный блок полностью неподвижен, а колебания совершают боковые блоки, при этом их силовое воздействие на центральный равно нулю. Данная частота является кратной (здесь представлена форма, при которой блоки колеблются попарно в противофазе).

Из формы, изображенной на рис. 6, б, следует, что колебания совершают все блоки, при этом боковые блоки колеблются с одинаковой формой в фазе. Первая и вторая формы колебаний соответствуют формам, близким к тем, которые наблюдались, если бы блоки были неупругими (присутствует значительное перемещение центра масс каждого блока).

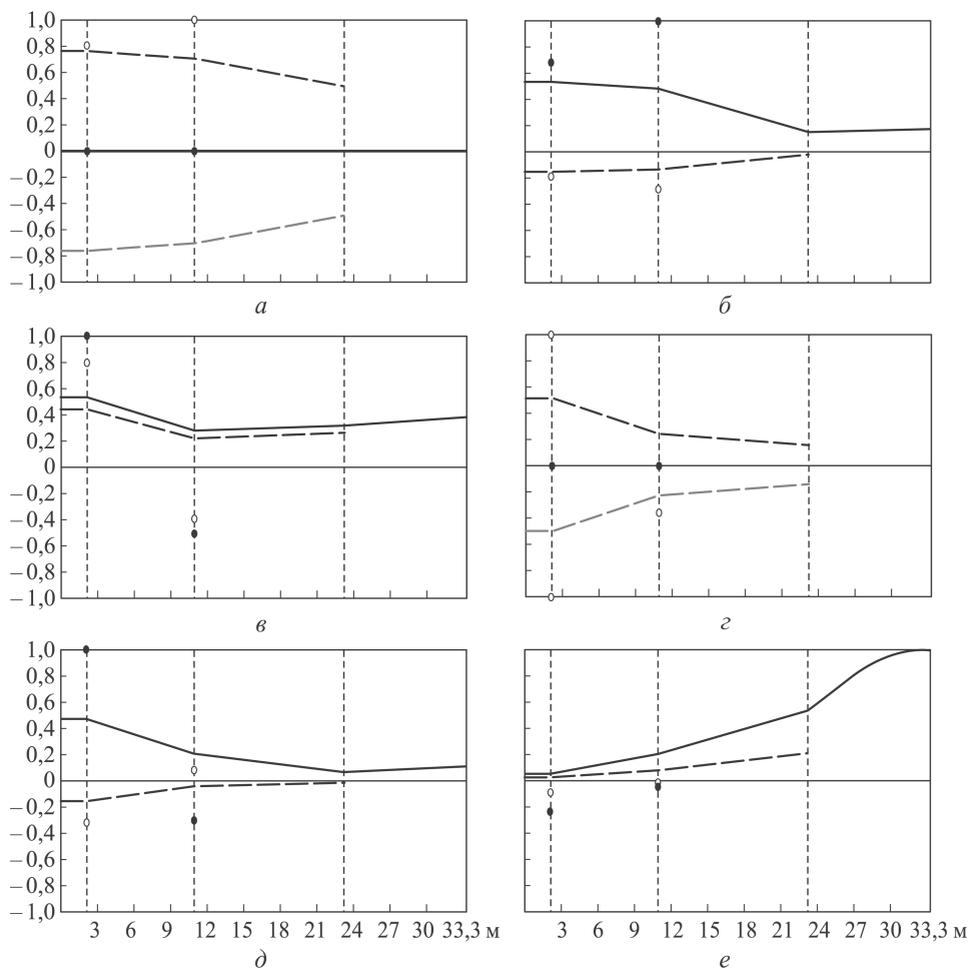


Рис. 6. Формы колебаний:

$f = 2,93$ Гц (*a*); $3,80$ Гц (*б*); $6,63$ Гц (*в*); $6,80$ Гц (*г*); $6,92$ Гц (*д*); $10,59$ Гц (*e*)

Третья форма колебаний (рис. 6, *в*) по своей конфигурации близка ко второй, но в данном случае все блоки колеблются в фазе между собой. В противофазе колеблются осцилляторы.

Четвертая форма колебаний (рис. 6, *г*) сходна с первой: центральный блок снова неподвижен, боковые колеблются попарно в противофазе, компенсируя силовое воздействие каждого на центральный. Сменилась лишь фаза осцилляторов.

При пятой форме колебаний (рис. 6, *д*), так же как и при второй и третьей, колеблются все блоки. Но этой форме соответствует иная комбинация фаз осцилляторов и боковых блоков по отношению к центральному.

Шестой форме колебаний (рис. 6, *e*) также соответствует движение всех блоков. Но в данном случае преобладают упругие колебания корпуса, а не осцилляторов. С ростом частоты наблюдается дальнейшее снижение амплитуды колебаний осцилляторов, отмеченное ранее.

Выводы. Рассмотрен характер упругих колебаний корпуса ракеты пакетной компоновки, выявляющий большую сложность и разнообразность движений по сравнению с тандемной ракетой. Проведен приближенный расчет собственных частот и форм низших тонов продольных колебаний с использованием осцилляторной модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алифанов О.М., Андреев А.Н. Баллистические ракеты-носители. М.: Дрофа, 2004. 512 с.
2. Натанзон М.С. Продольные автоколебания жидкостной ракеты. М.: Машиностроение, 1977. 205 с.
3. Балакирев Ю.Г. Методы анализа продольных колебаний ракет-носителей с жидкостными двигателями // Космонавтика и ракетостроение. 1995. № 5. С. 50–58.
4. Балакирев Ю.Г. Исследование устойчивости системы упругий корпус–топливные магистрали–двигатели для жидкостных ракет пакетной компоновки // Изв. РАН. МТТ. 1994. № 2. С. 129–137.
5. Бирюков Ю.В. <http://readings.gmik.ru/lecture/2006-K-E-SIOLKOVSKIY-I-PRINTSIP-STUPENCHATOSTI-OSUSCHESTVLENIYA-KOSMICHESKIH-POLETOV>. ГМИК им. К.Э. Циолковского. Секция “Исследование научного творчества К.Э. Циолковского”, 2006.
6. Дьяченко М.И., Темнов А.Н. Проблемы динамики перераспределения топлива в крупногабаритных ракетно-космических объектах // Инженерный журнал: наука и инновации. Спец. вып. “Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции и материалы для перспективных ракетно-космических систем”. 2012. № 8. С. 164–174.
7. Балакирев Ю.Г. Особенности математической модели жидкостной ракеты пакетной компоновки как объекта управления // Избранные проблемы прочности современного машиностроения. 2008. С. 43–55.
8. Докучаев Л.В., Соболев О.В. Совершенствование методов исследований динамики ракеты-носителя пакетной компоновки с учетом ее симметрии // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 2 (39). С. 112–121.
9. Павлов А.М., Темнов А.Н. Продольные колебания пакета стержней // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2014. № 6. С. 53–66.
10. Пожалостин А.А. Разработка приближенных аналитических методов расчета собственных и вынужденных колебаний упругих оболочек с жидкостью. Дисс. . . д-ра техн. наук. М., 2004. 220 с.
11. Колесников К.С. Динамика ракет. М.: Машиностроение, 2003. 520 с.

REFERENCES

- [1] Alifanov O.M., Andreev A.N. Ballisticheskie rakety-nositely [Ballistic launch vehicles]. Moscow, Drofa Publ., 2004. 512 p.
- [2] Natanzon M.S. Prodolnye avtokolebaniya zhidkostnoy rakety [Longitudinal autovibrations of the liquid propellant rocket]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 205 p.
- [3] Balakirev Y.G. Liquid propellant rocket engine space launch vehicle longitudinal vibrations analysis methods. *Kosmonavtika i raketrostroenie* [Cosmonaut and Rocket Engineering], 1994, no. 5, pp. 50–58 (in Russ.).

- [4] Balakirev Y.G. Issledovanie ustoichivosti sistemy uprugiy korpus — toplivnie magistraly — dvigateli dlya zidkostnyh raket paketnoy komponovki [Study of the flexible body — fuel pipelines — engines system sustainability for the liquid propellant clustered launch vehicle]. *Mech. Solids*, 1994, no. 2, pp. 129–137.
- [5] Biryukov Y.V. <http://readings.gmik.ru/lecture/2006-K-E-TSIOLKOVSKIY-I-PRINTSIP-STUPENCHATOSTI-OSUSCHESTVLENIYA-KOSMICHESKIH-POLETOV>, GMIK n.a.K.E. Tsiolkovskiy, Section “The Study of the Works of K.E. Tsiolkovsky”, 2006.
- [6] Dyachenko M.I. Temnov A.N. Propellant crossfeed dynamics problems of large space structures. *Jelekt. nauchno-tehn. Izd. “Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii”* [El. Sc.-Techn. Publ. “Eng. J.: Science and Innovation”], 2012, iss. 8, pp. 164–174.
- [7] Balakirev Y.G. Features of the mathematical model of the liquid propellant lateral-staging rocket as an object of guiding. *Izbrannye problemy prochnosti sovremennogo mashinostroeniya* [Selected Problems of Strength of Modern Engineering], Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, pp. 43–55 (in Russ.).
- [8] Dokuchaev L.V., Sobolev O.V. Improvements in methods of research in dynamics of a clustered launch vehicle considering its symmetry. *Kosmonavtika i raketostroenie*. [Cosmonautic and Rocket Engineering], 2005, no. 2, pp. 112–121 (in Russ.).
- [9] Pavlov A.M., Temnov A.N. System of Rods Longitudinal Vibrations. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2014, no. 6, pp. 53–66 (in Russ.).
- [10] Pozhalostin A.A. Razrabotka priblizhennykh analiticheskikh metodov rascheta sobstvennykh i vyzhdenykh kolebaniy uprugikh obolochek s zhidkost’yu. Diss. doct. tekhn. nauk [Development of approximate analytical computation methods for natural and forced vibrations of elastic shells with liquid. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2004. 220 p.
- [11] Kolesnikov K.S. Dinamika raket [Missiles dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 520 p.

Статья поступила в редакцию 16.02.2015

Дьяченко (Степанова) Мария Ильинична — ассистентка кафедры “Теоретическая механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Dyachenko (Stepanova) M.I. — Assistant Lecturer, Department of Theoretical Mechanics, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Павлов Арсений Михайлович — студент кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Pavlov A.M. — student, Department of Space Vehicles and Carrier Rockets, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Темнов Александр Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Temnov A.N. — Ph.D. (Phys.-Math), Associate Professor, Department of Space Vehicles and Carrier Rockets, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дьяченко М.И., Павлов А.М., Темнов А.Н. Продольные упругие колебания корпуса многоступенчатой жидкостной ракеты пакетной схемы // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 5. С. 14–24.

Please cite this article in English as:

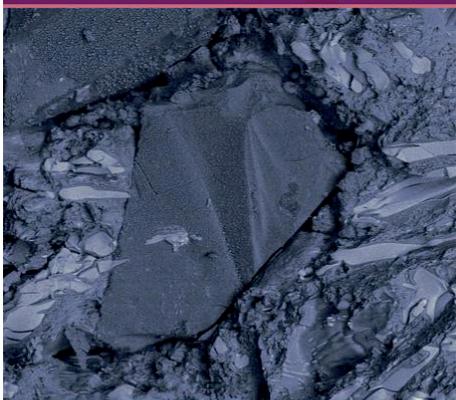
Dyachenko M.I., Pavlov A.M., Temnov A.N. Longitudinal elastic vibrations of multistage liquid-propellant launch vehicle body. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2015, no. 5, pp. 14–24.

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла в свет книга

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ю. А. Курганова, А. Г. Колмаков

**Конструкционные
металломатричные
композиционные
материалы**



 ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

Изложены основные понятия, относящиеся к науке о композиционных материалах. Рассмотрены классификация, основные способы получения, особенности соединения компонентов металломатричных композиционных материалов, методы исследования их структур, механические, технологические и эксплуатационные свойства. Теоретически и экспериментально обоснована целесообразность использования дисперсно-упрочненных и волокнистых композиционных материалов на основе металлических сплавов в области авиа-, ракето- и автомобилестроения.

Для студентов старших курсов технических вузов, обучающихся по направлению 150700 “Машиностроение”, магистров и аспирантов. Может быть полезно инженерно-техническим работникам промышленных и научно-исследовательских учреждений, а также всем, кто интересуется научно-инженерными и прикладными аспектами использования металломатричных композиционных материалов.