



ОНУФРИЕВ
Александр Валерьевич
аспирант
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ONUFRIEV
Alexander Valerievich
Post-Graduate
(MSTU named
after N.E. Bauman)



ДМИТРИЕВ
Сергей Николаевич
кандидат технических наук,
доцент
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

DMITRIEV
Sergey Nikolaevich
Candidate of Engineering
Sciences, Assoc. Prof.
(MSTU named
after N.E. Bauman)



ОНУФРИЕВ
Валерий Валентинович
доктор технических наук,
профессор
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ONUFRIEV
Valeriy Valentinovich
Dr. Sc. Techn., Professor
(MSTU named
after N.E. Bauman)

Исследование влияния теплового состояния на механические характеристики ампулы для космического захоронения радиоактивных отходов

А.В. Онуфриев, С.Н. Дмитриев, В.В. Онуфриев

Для транспортировки радиоактивных отходов (РАО) с помощью космического аппарата (КА) на орбиты захоронения необходим контейнер для хранения РАО на борту КА. Контейнер должен быть герметичен и иметь хорошие жесткостные характеристики во избежание его разрушения от различных силовых факторов, воздействующих на его корпус, в том числе на участке выведения и участке автономного полета при попадании метеоритных потоков. Однако прочностные характеристики материалов контейнера во многом зависят от температуры рабочего тела. В статье рассмотрена задача термомеханического нагружения ампулы, получено решение методом конечных элементов и аналитическим способом.

Ключевые слова: космический аппарат, ампула, конечно-элементная модель, прочность, напряжения, деформация, перемещения, сила, момент, модуль упругости, жесткость.

Investigation of thermal state effect on mechanical characteristics of a capsule for space disposal of radioactive wastes

A.V. Onufriev, S.N. Dmitriev, V.V. Onufriev

To transport radioactive wastes (RW) by a spacecraft (SC) to a disposal orbit, there is a need for a capsule to store the wastes on board. The capsule should be leak-tight and have good rigidity characteristics to prevent its destruction by various force factors affecting its casing both when put into orbit and during independent flight when being hit by meteorite. However, the strength properties of the capsule material will largely depend on the temperature of the working substance. The paper considers the problem of thermomechanical loading of the capsule, the solution has been obtained by finite element analysis and analytically.

Keywords: space ship, capsule, finite element model, strength, stress, deformation, displacement, force, moment, module of elasticity, rigidity.

Развитие атомной промышленности привело к накоплению большого количества радиоактивных отходов (РАО), в том числе особо опасных, которые необходимо утилизировать. Один из способов

утилизации РАО — доставка РАО в дальний космос на орбиты захоронения [1—3]. Для осуществления этого способа доставки важно создание проектного облика КА с энергодвигательной установкой для транспортировки РАО [4]. Для транспортировки РАО с помощью КА на орбиты захоронения необходим контейнер, состоящий из ампул, для хранения РАО на борту КА.

Цель работы — определение массогабаритных характеристик и получение конструктивно-силовой схемы ампулы с РАО. Одной из главных задач является определение и анализ прочностных и жесткостных характеристик ампулы с РАО и всего контейнера.

Рассмотрим ампулу с РАО, которая закрепляется в контейнере КА, например, как показано на рис. 1. Для упрощения расчетной модели и возможности сопоставления с аналитическим решением в целях верификации конечно-элементной модели ампулы с РАО представляется в виде цилиндрической оболочки постоянного сечения, изготовленной из изотропного материала.

Конечно-элементное моделирование механических характеристик ампулы с РАО. Для ампулы с РАО приняты следующие граничные условия: по левому краю промоделирована жесткая заделка (отсутствуют поступательные и вращательные степени свободы), по правому краю разрешено поступательное движение только вдоль оси X (отсутствуют поступательные, кроме координаты X , и вращательные степени свободы). Изнутри ампула с РАО полностью заполнена наполнителем (рабочим телом), состоящим из РАО.

На стадии разработки конструкции ампулы в системе автоматизированного проектирования AutoCad была создана модель ампулы с РАО. Затем в системе автоматизированного проектирования SolidWorks получена электронная твердотельная модель, которая

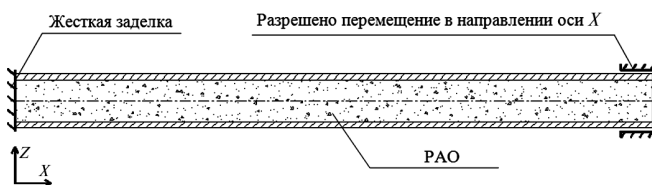


Рис. 1. Ампула с РАО

позволила определить массогабаритные характеристики ампулы с РАО [5].

Для определения жесткостных характеристик ампулы с РАО необходимо решить связанную задачу, первая часть которой состоит в получении поля температур от тепловыделения рабочего тела (РАО), а вторая часть — в получении поля перемещений и напряжений от воздействия поля температур.

В качестве модели воздействия принята эквивалентная схема нагружения для ампулы с РАО, представленная на рис. 2.

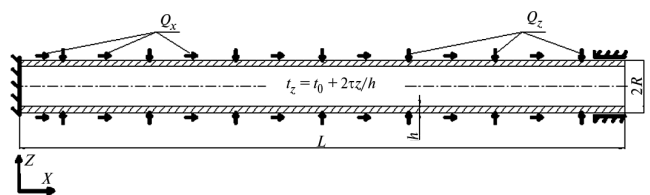


Рис. 2. Эквивалентная схема нагружения ампулы с РАО

Оболочка длиной $L = 0,7$ м, с радиусом срединной поверхности $R = 0,025$ м и толщиной $h = 0,001...0,005$ м нагружена силами, эквивалентными внешнему воздействию на поверхность, которые приложены в узловых точках конечно-элементной модели: продольной $Q_x(x) = 130$ Н, $Q_z(x) = 80$ Н и нагрета по закону

$$t(z) = t_0 + 2\tau z/h, \quad (1)$$

где h — толщина стенки ампулы с РАО. Значения t_0 и τ задавались изначально ($t_0 = 600$ К, $\tau = 5$), z — текущая координата по толщине стенки, измерялась от срединной поверхности оболочки ампулы.

В качестве материала стенки ампулы с РАО использовалась радиационно-стойкая, жаропрочная, коррозионно-стойкая сталь. Механические характеристики этих сталей близки к характеристикам сплавов 08—12X18H10T. Рабочая температура таких сплавов лежит в диапазоне до 600 К (принята в качестве расчетной), $\sigma_{вр} \approx 500$ МПа, $\sigma_T \approx 200$ МПа. В процессе радиационного упрочнения σ_T существенно повышается.

Для определения конструктивно-силовой схемы и анализа оценки поля температур перемещений и напряжений ампулы контейнера

с РАО в пакете MSC.Nastran/Patran [6] была создана конечно-элементная модель, представленная на рис. 3.

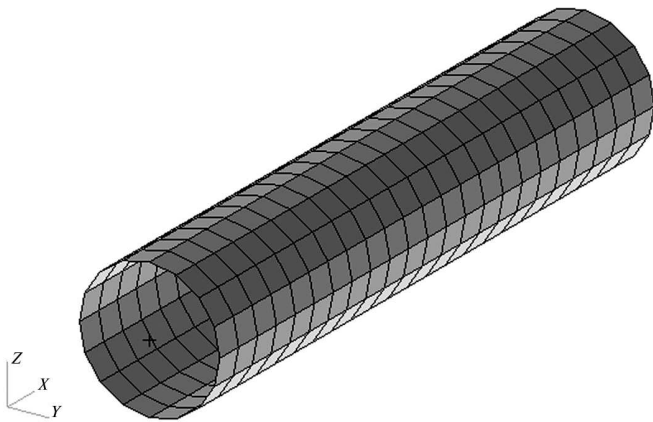


Рис. 3. Конечно-элементная модель ампулы контейнера с РАО в пакете MSC.Nastran/Patran

При создании конечно-элементной модели ампулы с РАО, изображенной на рис. 3, принята следующая аппроксимация:

- цилиндрический контур промоделирован из $2d$ элементов;
- условия температурного нагружения промоделированы с помощью теплового потока, приложенного к внутренней части цилиндрической оболочки ампулы с РАО;
- граничные условия наложены на узловые точки по левому и правому краю цилиндрической оболочки ампулы с РАО.

Конечно-элементная сетка (создана из Quad элементов, Triа элементы отсутствуют) равномерно распределена по всей длине ампулы с РАО и сшита узел в узел.

Для расчета методом конечного элемента каждый элемент модели может быть представлен в виде матрицы жесткости элемента [7], которая зависит от типа элемента и от его характеристик. Матрицы жесткости отдельных элементов объединяются в глобальную матрицу жесткости. Температурное поле учитывается через начальные деформации.

Для конечно-элементной модели (см. рис. 3) было определено поле температур ампулы с РАО при заданной ее загрузке и удельном тепловыделении отходов. На основе полученного распределения температуры в стенке ампулы с РАО и действующих на нее в продольном

и поперечном направлениях нагрузок в пакете MSC.Nastran/Patran рассчитаны механические характеристики (рис. 4, 5), определены перемещения в материале ампулы с РАО в условиях теплового и механического нагружения в зависимости от толщины стенки, а также механические напряжения, возникающие в материале ампулы.

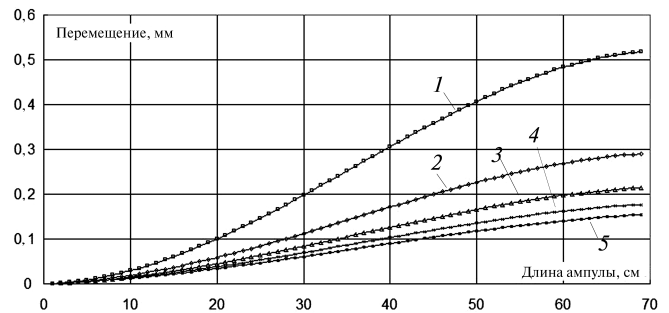


Рис. 4. Зависимость перемещений в материале ампулы от толщины стенок:

1 — 1 мм; 2 — 2 мм; 3 — 3 мм; 4 — 4 мм; 5 — 5 мм

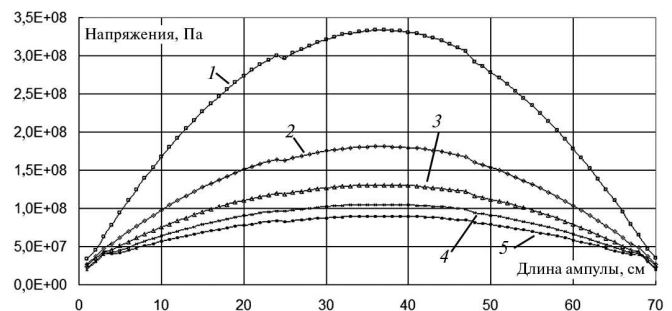


Рис. 5. Зависимость напряжений в материале ампулы от толщины стенок:

1 — 1 мм; 2 — 2 мм; 3 — 3 мм; 4 — 4 мм; 5 — 5 мм

Кроме того найдено аналитическое решение задачи, которое позволяет проверить результаты, полученные с помощью конечно-элементного моделирования.

Аналитическое решение задачи. Расчетная схема ампулы с РАО для аналитического решения представлена на рис. 6. Температура стенки по толщине изменяется по закону (1).

В основу модели нагруженного состояния оболочки ампулы положены уравнения деформаций с учетом нагрева. Введена новая система координат, представленная на рис. 6, в которой координата X совпадает с координатой S , по-

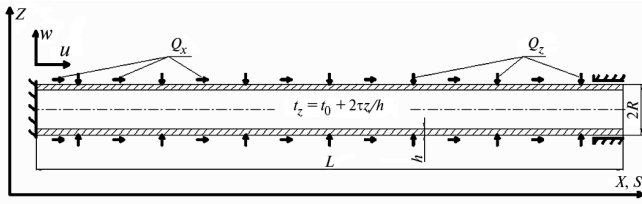


Рис. 6. Расчетная схема ампулы с РАО для аналитической модели

этому в модели используется независимая переменная S .

Деформации срединной поверхности оболочки ампулы из теории напряженно-деформированного состояния [7] описываются геометрически нелинейными соотношениями:

$$\varepsilon_1 = \frac{du}{ds} + \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{ds} \right)^2; \quad \varepsilon_2 = \frac{w}{R}; \quad \kappa_1 = -\frac{d^2w}{ds^2}, \quad (2)$$

где u и w — перемещение в направлении осей X и Z , соответственно; R — радиус оболочки; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — деформации удлинения-сжатия срединной поверхности; κ_1 — изменение кривизны.

Деформации эквидистантного слоя оболочки можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_1 + z\kappa_1; \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_2. \quad (3)$$

Для связи напряжений и деформаций используем соотношение Дюамеля–Неймана [7]:

$$\sigma_{11} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{11} + \mu\varepsilon_{22} - (1-\mu)\alpha t); \quad (4)$$

$$\sigma_{22} = \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{22} + \mu\varepsilon_{11} - (1-\mu)\alpha t), \quad (5)$$

где α — коэффициент температурного расширения материала оболочки ампулы; μ — коэффициент Пуассона для материала; E — модуль упругости 1-го рода.

После подстановки деформаций ε_{11} и ε_{22} , выраженных через деформации срединной поверхности, получим:

$$\sigma_{11} = \frac{E}{1-\mu^2} \times \left(\varepsilon_1 + z\kappa_1 + \mu\varepsilon_2 - (1-\mu)\alpha t_0 + \frac{2(1-\mu)\alpha z\tau}{h} \right); \quad (6)$$

$$\sigma_{22} = \frac{E}{1-\mu^2} \times \left(\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1 + \mu z\kappa_1 - (1-\mu)\alpha t_0 + \frac{2(1-\mu)\alpha z\tau}{h} \right). \quad (7)$$

Воспользуемся соотношениями, связывающими внутренние силовые факторы — погонную силу T и момент M , возникающие в оболочке (6), с напряжениями:

$$T_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} dz; \quad T_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{22} dz; \\ M_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{11} z^2 dz; \quad M_2 = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{22} z^2 dz. \quad (8)$$

Используя соотношения (8) и выражения (6), (7) для напряжений, получим связь внутренних силовых факторов с деформацией срединной поверхности оболочки:

$$T_1 = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2 - (1-\mu)\alpha t_0); \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_2 + \mu\varepsilon_1 - (1-\mu)\alpha t_0); \quad (10)$$

$$M_1 = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left(\kappa_1 + \frac{2(1-\mu)\alpha\tau}{h} \right); \quad (11)$$

$$M_2 = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \left(\mu\kappa_1 + \frac{2(1-\mu)\alpha\tau}{h} \right). \quad (12)$$

Для оболочки ампулы можно составить уравнения равновесия с учетом нелинейных слагаемых:

$$\frac{dT_1}{ds} + Q_x = 0; \quad (13)$$

$$\frac{d^2M_1}{ds^2} + \frac{d}{ds} \left(T_1 \frac{dw}{ds} \right) - \frac{1}{R} T_2 + Q_z = 0, \quad (14)$$

или

$$\frac{d^2M_1}{ds^2} + \frac{dT_1}{ds} \frac{dw}{ds} + T_1 \frac{d^2w}{ds^2} - \frac{1}{R} T_2 + Q_z = 0. \quad (15)$$

Получим разрешающее уравнение для случая, когда продольная сила T_1 может быть определена путем интегрирования первого уравнения равновесия, что возможно при принятых условиях закрепления (13). Это позволяет линеаризовать систему уравнений. Нелинейные слагаемые входят в выражение для деформации ε_1 . Исключим ее, считая погонную силу T_1 известной:

$$\varepsilon_1 = \frac{1-\mu^2}{Eh} T_1 - \mu\varepsilon_2 + (1-\mu)\alpha t_0. \quad (16)$$

В результате погонная сила T_2 после исключения ε_1 может быть представлена в следующем виде:

$$T_2 = Eh\varepsilon_2 - Eh\alpha t_0 + \mu T_1. \quad (17)$$

Подставляя величину T_2 из (17) во второе уравнение равновесия (14), получим соотношение для перемещений оболочки через ее физические характеристики и величину $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ (цилиндрическая жесткость):

$$\begin{aligned} -D \frac{d^4 w}{ds^4} + D \frac{2(1-\mu)\alpha}{h} \frac{d^2 t}{ds^2} - Q_x \frac{dw}{ds} + \\ + \left(\frac{Eh}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2 - (1-\mu)\alpha t_0) \right) \frac{d^2 w}{ds^2} - \\ - \frac{1}{R} \left(Eh \frac{w}{R} - Eh + \alpha t_0 + Q_z \right) = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Проинтегрировав (18), найдем решение дифференциального уравнения относительно перемещения в виде

$$\begin{aligned} w(s) = e^{-ks} (C_1 \sin(ks) + C_2 \cos(ks)) + \\ + e^{ks} (C_3 \sin(ks) + C_4 \cos(ks)) + \\ + R(\alpha\theta - \frac{\mu}{1-\mu^2} (\varepsilon_1 + \mu\varepsilon_2 - (1-\mu)\alpha t_0)). \end{aligned} \quad (19)$$

Постоянные интегрирования $C_1 - C_4$ достаточно легко определяются из граничных условий ($s = 0, s = L$), $k^4 = \frac{1}{4} \frac{Eh}{DR^2}$.

Зная значения перемещений, полученные по формуле (19), несложно найти значения напряжений. Значения максимальных перемещений и напряжений для материала оболочки ампулы с РАО представлены ниже:

Толщина стенки, м	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
Перемещение, м	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Напряжение, Па	$3,3 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^8$	$1,1 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^7$

Выводы

1. Решена термоупругая задача для оболочки ампулы с РАО, находящейся под нагрузками и имеющей градиент температуры по толщине.

Получено аналитическое и численное решение задачи.

2. Анализ результатов расчетов перемещений и напряжений стенки ампулы для РАО при толщине 1...5 мм, представленных на рис. 4–5 и выше, позволяет осуществить выбор толщины стенки, обеспечивающей необходимый запас прочности и жесткости.

3. Показано хорошее совпадение результатов конечно-элементного моделирования и аналитического решения (погрешность составляет не более 2...7 %).

4. Проведена верификация принятой конечно-элементной модели, которую можно уточнять и развивать.

5. Аналитическое решение может быть использовано для предварительных оценок напряженно-деформированного состояния ампулы с РАО.

Литература

1. О преимуществах транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок / А.В. Онуфриев, С.Н. Дмитриев, И.Н. Алиев, В.В. Онуфриев // 21-я Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: Тезисы доклада. Казань 2009, 12–14 мая, издательство «Отечество», Ч. 2. С. 177–178.

2. Об особенностях транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок / А.В. Онуфриев, В.В. Онуфриев, С.Н. Дмитриев и др. // Актуальные проблемы Российской космонавтики: Тез. докл. XXXIV академические чтения по космонавтике. М., 2010. С. 100–101.

3. Онуфриев А.В., Дмитриев С.Н., Онуфриев В.В. Об особенностях транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 3. С. 129–138.

4. Онуфриев А.В., Онуфриев В.В., Ивашкин А.Б. Проектный облик космического аппарата с энергодвигательной установкой для транспортировки радиоактивных отходов в дальний космос // Вестник МГТУ им Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. Спец. вып. 2011. С. 64–69.

5. Массово-энергетическое моделирование КА для транспортировки радиоактивных отходов на орбиты захоронения с помощью электроракетных двигательных установок / И.Н. Алиев, С.Н. Дмитриев, А.В. Онуфриев и др. // Труды VI-й Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». М., 2011. С. 294–302.

6. Секулович М. Метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1993. 664 с.

7. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник. В 3 т. Под ред. И.А. Биргера и Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. Т. 1. 830 с.

References

1. Onufriev A.V., Dmitriev S.N., Aliev I.N., Onufriev V.V. O preimushchestvakh transportirovki radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia s pomoshch'iu elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok [On the advantages of the transport of radioactive waste disposal orbits with electrorocket propulsion]. *21-ia Vserossiiskaia mezhvuzovskaia nauchno-tekhnicheskaia konferentsiia «Elektromekhanicheskie i vnutrikamernye protsessy v energeticheskikh ustanovkakh, struinaia akustika i diagnostika, pribory i metody kontrolya prirodnoi sredy, veshchestv, materialov i izdelii»*. [21th National Interuniversity Scientific Conference «Electromechanical and intrachamber processes in power plants, jet acoustics and diagnostics, devices and methods of control of the environment, substances, materials and products»]. Kazan, 2009, «Homeland» Publ., part 2, pp. 177–178.
2. Onufriev A.V., Onufriev V.V., Dmitriev S.N. Ob osobennostiakh transportirovki radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia s pomoshch'iu elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok [About the features of the transport of radioactive waste disposal orbits with electrorocket propulsion]. *Aktual'nye problemy Rossiiskoi kosmonavtiki: Tez. dokl. XXXIV akademicheskikh chteniia po kosmonavtike*. [Actual problems of the Russian Space: Proc. Reports. XXXIV academic reading on space]. Moscow, 2010, pp. 100–101.
3. Onufriev A.V., Dmitriev S.N., Onufriev V.V. Ob osobennostiakh transportirovki radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia s

pomoshch'iu elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok [About the features of the transport of radioactive waste disposal orbits with electrorocket propulsion]. *Izvestiia RAN. Energetika*, 2011, no. 3, pp. 129–138.

4. Onufriev A.V., Onufriev V.V., Ivashkin A.B. Proektnyi oblik kosmicheskogo apparata s energodvigatel'noi ustanovkoi dlia transportirovki radioaktivnykh otkhodov v dal'nii kosmos [Design shape spacecraft power propulsion systems for the transport of radioactive waste in deep space]. *Vestnik MGTU im N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie. Spetsial'nyi vypusk*. 2011, pp. 64–69.

5. Aliev I.N., Dmitriev S.N., Onufriev A.V. Massovo-energeticheskoe modelirovanie KA dlia transportirovki radioaktivnykh otkhodov na orbity zakhoroneniia s pomoshch'iu elektroraketnykh dvigatel'nykh ustanovok [Mass-energy simulation of spacecraft to transport radioactive waste disposal orbits with electrorocket propulsion]. *Trudy VI-i Vserossiiskoi konferentsii «Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike»* [Proceedings of the VI-th All-Russian Conference «Irreversible processes in nature and technology»]. Moscow, 2011, pp. 294–302.

6. Sekulovich M. *Metod konechnykh elementov* [Finite element technique]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1993. 664 p.

7. *Prochnost', ustoiчивost', kolebaniia* [Strength, stability, vibration]. Spravochnik [Directory]. V 3 t. Pod red. I.A. Birgera, Ia.G. Panovko. Moscow, Machine building publ., 1968. Vol. 1. 830 p.

Статья поступила в редакцию 15.10.2012

Информация об авторах

ОНУФРИЕВ Александр Валерьевич (Москва) — аспирант кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexandr7@yandex.ru).

ДМИТРИЕВ Сергей Николаевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dmitrievsn@mail.ru).

ОНУФРИЕВ Валерий Валентинович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: onufryev@bmstu.ru).

Information about the authors

ONUFRIEV Alexander Valerievich (Moscow) — Post-Graduate of «Aerospace Systems» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia e-mail: alexandr7@yandex.ru).

DMITRIEV Sergey Nikolaevich (Moscow) — Candidate of Engineering Sciences, Assoc. Prof. of «Aerospace Systems» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia, e-mail: dmitrievsn@mail.ru).

ONUFRIEV Valeriy Valentinovich (Moscow) — Dr. Sc. Techn., Professor of «Plasma Power Plants» Department. MSTU named after N.E. Bauman (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya, 5, 105005, Moscow, Russia e-mail: onufryev@bmstu.ru).