

УДК 539.3

EDN AGUVVU (<https://elibrary.ru/aguvvu>)

ДЕЙСТВИЕ ЛОКАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ НА ОБОЛОЧКУ С КОМПОЗИЦИОННЫМ ТЕПЛОЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ*

Антуфьев Б.А., Орехов А.А., Рабинский Л.Н.

*ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)», г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Дано приближенное решение задачи о действии локального импульса давления на тонкую несущую оболочку с композиционным теплозащитным покрытием. Это покрытие рассматривается как инерционный слой, изменяющий в основном динамические характеристики конструкции. В случае его локального повреждения аэродинамическое давление передается на несущий слой, вызывая в нем местное возмущенное динамическое состояние. Таким образом, задача сводится к уравнениям изгиба оболочки под действием произвольной локальной динамической нагрузки. Эти дифференциальные уравнения в частных производных по методу Бубнова по пространственным координатам преобразуются в уравнения движения оболочки, но уже в обычных производных. Для них получено точное решение. Как побочный результат получена точная формула для собственных частот колебаний двухслойной композиционной оболочки. Рассмотрены примеры, в которых проанализировано влияние размеров площадки действия импульса на динамическое деформированное состояние конструкции. Отмечено, что нарушение сплошности теплозащитного покрытия или появление в нем эксплуатационных дефектов приводит к эволюции характеристик теплопроводности, теплоемкости, излучательной способности и каталитической активности в системе «несущий материал – покрытие». Это в значительной степени оказывает влияние на изменение теплового и напряженно-деформированного состояний конструкции.

Ключевые слова: тонкая оболочка; теплозащитное покрытие; инерционный слой; локальный импульс давления; собственные частоты колебаний; деформированное состояние оболочки

THE EFFECT OF A LOCAL PRESSURE PULSE ON A SHELL WITH A COMPOSITE THERMAL PROTECTION COATING

Antufyev B.A., Orekhov A.A., Rabinskiy L.N.

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

ABSTRACT

An approximate solution to the problem of the action of a local pressure pulse on a thin load-bearing shell with a composite heat-shielding coating is given. This coating is considered as an inertial layer, which changes mainly the dynamic characteristics of the structure. In the

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-19-00352,
<https://rscf.ru/project/22-19-00352/>

case of its local damage, the aerodynamic pressure is transferred to the load-bearing layer, causing a local perturbed dynamic state in it. Thus, the problem is reduced to the bending equations of the shell under the action of an arbitrary local dynamic load. These differential equations in partial derivatives by Bubnov's method on spatial coordinates are transformed into equations of motion of the shell, but already in usual derivatives. An exact solution was obtained for them. As an incidental result, an exact formula for the natural frequencies of oscillations of a two-layer composite shell is obtained. Examples are considered in which the effect of the size of the impulse action area on the dynamic deformed state of the structure is analyzed. It is noted that the violation of the thermal protection coating continuity or the appearance of operational defects in it leads to the evolution of thermal conductivity, heat capacity, emissivity and catalytic activity characteristics in the system "bearing material – coating". This greatly affects the change in the thermal and stress-strain states of the structure.

Keywords: thin shell; thermal shielding; inertial layer; local pressure pulse; natural frequencies of oscillations; deformed state of the shell

ВВЕДЕНИЕ

Обшивка летательных аппаратов (ЛА) для предотвращения его аэродинамического нагрева покрывается теплозащитным покрытием. Даже при его частичном разрушении происходит изменение динамических характеристик и локальный нагрев несущей оболочки. Кроме того, в момент его разрушения аэродинамическое внешнее давление, которое раньше частично демпфировалось теплозащитой, в виде импульса давления уже непосредственно действует на поверхность несущей оболочки. Все это вместе взятое усложняет и усиливает ее местное возмущенное состояние в зоне разрушения защитного слоя. Таким образом, даже небольшое разрушение теплозащитного покрытия вызывает к жизни целый ряд неблагоприятных проблем, каждая из которых в отдельности способна привести к гибели всего ЛА. Из вышеназванных трех задач первые две были рассмотрены в монографиях [1,2]. В предлагаемой работе исследуется последняя третья часть этой «триады» – действие локального импульса давления на тонкую оболочку. Так как жесткостные свойства теплозащиты значительно меньше, чем у несущей оболочки, то считаем, что всю нагрузку воспринимает только оболочка, а покрытие в этом процессе не участвует. Задачи подобного рода рассматривались в работах [3-10]. Импульс давления может быть произвольным образом распределен как по поверхности оболочки, так и во времени. Вследствие этого задача сводится к системе дифференциальных уравнений в частных производных. Локальные нагрузки на оболочку задаются с помощью обобщенных функций. Поэтому точное решение этих уравнений получить нельзя. Для их решения применяется метод Бубнова по пространственным координатам, сводящий задачу к исследованию движения оболочки только во времени. Изучению влияния различных видов радиальных импульсов давления на динамическое поведение двухслойной оболочечной конструкции и посвящена эта статья.

1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В двухслойной композиционной обшивке летательного аппарата внешний слой обеспечивает теплозащиту конструкции, а внутренний (несущий) – ее прочность. Основная идея работы основана на трактовке теплозащитного покрытия как инерционного слоя, изменяющего динамические характеристики

двухслойной оболочки. Однако при частичном разрушении защитного покрытия импульс аэродинамического давления целиком передается на несущую оболочку, вызывая в ней дополнительное локальное напряженно-деформированное состояние. Для его определения используется классическая теория оболочек при учете дополнительных инерционных нагрузок, связанных с наличием защитного покрытия. При этом внешняя локальная нагрузка на несущую оболочку изменяется как по пространственным координатам, так и по времени. Проблема сводится к решению системы двух дифференциальных уравнений оболочки в смешанной форме в частных производных. Для этого используется метод Бубнова по пространственным координатам, и задача сводится уже также к дифференциальным уравнениям ее движения во времени, но уже в обычных производных. Для них получено точное решение в замкнутой форме. Как побочный результат также в замкнутой форме получена формула для собственных частот колебаний двухслойной оболочки. Полученное решение позволяет анализировать влияние характера и формы импульса на локальный изгиб оболочки в зоне разрушения теплозащитного покрытия.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим тонкую упругую двухслойную оболочку неотрицательной гауссовой кривизны, внутренний слой которой изготовлен из металла и является несущим. Внешний слой представляет из себя композиционное теплозащитное покрытие, равномерно нанесенное на поверхность несущей оболочки. Панель отнесена к криволинейной ортогональной системе координат $Oxyz$ с началом в ее центре (рис.1). Защитный слой обладает погонной массой, соизмеримой с погонной массой несущей оболочки, но с малыми по сравнению с ней жесткостными характеристиками. Поэтому теплозащитное покрытие можно трактовать как инерционный слой, изменяющий только динамические характеристики конструкции. На оболочку действует нормальная к ее поверхности локальная динамическая нагрузка $p(x, y, t)$, распределенная по площадке F (рис.1).

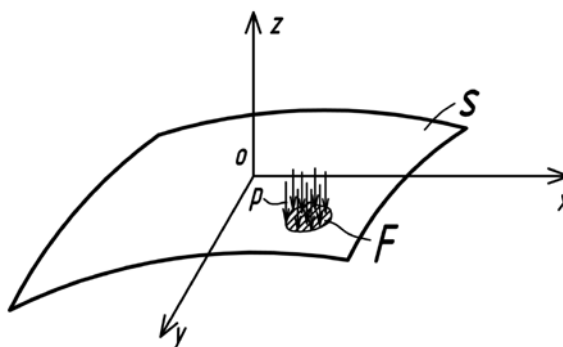


Рис.1. Распределение динамической нагрузки по площадке F .

Представим ее в виде произведения двух функций (1), одна из которых $\phi(x, y)$ описывает закон ее распределения по пространственным координатам, а вторая $f(t)$ – по времени t .

$$p(x, y, t) = \phi(x, y) f(t). \quad (1)$$

Для изучения деформированного состояния оболочки используем уравнения классической теории оболочек в смешанной форме [3] относительно прогиба панели w и функции напряжений F , которые в рассматриваемой задаче принимают вид

$$\begin{aligned} \frac{D}{h} \nabla^4 w - \nabla_K^2 F &= \frac{\phi(x, y) f(t)}{h} - \rho \left(1 + \frac{\rho_1 \delta}{\rho h} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, \\ \frac{1}{E} \nabla^4 F + \nabla_K^2 w &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь обозначено: $D = Eh^3 / (1 - \mu^2)$ – цилиндрическая жесткость оболочки, E , μ и ρ – модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность материала ее несущего слоя соответственно, h – ее толщина, ρ_1 и δ – плотность и толщина защитного слоя, ∇^4 и ∇_K^2 – дифференциальные операторы, имеющие вид [3]

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}, \quad \nabla_K^2 = k_y \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_x \frac{\partial^2}{\partial y^2}.$$

Здесь k_y и k_x – кривизны оболочки в направлении координатных линий x и y соответственно. Неизвестные функции w и F раскладываем в двойные ряды по собственным формам колебаний оболочки $\varphi_{mn}(x, y)$, $\psi_{mn}(x, y)$ соответственно

$$w = \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L w_{mn}(t) \varphi_{mn}(x, y), \quad F = \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^L F_{mn}(t) \psi_{mn}(x, y), \quad (3)$$

где $w_{mn}(t)$ и $F_{mn}(t)$ – неизвестные функции времени (обобщенные координаты). Подставляя ряды (3) в систему уравнений (2) и применяя процедуру метода Бубнова по пространственным координатам, сводим задачу к системе $2 \times K \times L$ уравнений относительно неизвестных функций $w_{mn}(t)$ и $F_{mn}(t)$. Вследствие ортогональности собственных форм колебаний она распадается и для каждой пары значений m и n получим одно дифференциальное и одно алгебраическое уравнение относительно $w_{mn}(t)$ и $F_{mn}(t)$. Из алгебраического (второго) уравнения выражаем $F_{mn}(t)$ через $w_{mn}(t)$. После чего первое дифференциальное уравнение движения оболочки приобретает вид

$$\ddot{w}_{mn} + \omega_{mn}^2 w_{mn} = \frac{b_{mn} f(t)}{h a_{mn}}, \quad (4)$$

где h – толщина оболочки, ω_{mn}^2 – квадрат собственной частоты колебаний панели, соответствующий формам $\varphi_{mn}(x_1, x_2)$, $\psi_{mn}(x_1, x_2)$.

$$\begin{aligned} \omega_{mn}^2 &= \frac{1}{a_{mn}} \left[\frac{D}{h} \int_S \nabla^4 (\varphi_{mn}) \varphi_{mn} dS + \frac{E \int_S \nabla_K^2 (\psi_{mn}) \varphi_{mn} dS \cdot \int_S \nabla_K^2 (\varphi_{mn}) \psi_{mn} dS}{\int_S \nabla_K^4 (\psi_{mn}) \psi_{mn} dS} \right], \\ a_{mn} &= \rho \left(1 + \frac{\rho_1 \delta}{\rho h} \right) \int_S \varphi_{mn}^2 dS, \quad b_{mn} = \int_F \phi \varphi_{mn} dS. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь S и F – площадь поверхности панели оболочки и площадки действия нагрузки соответственно. Решение уравнения (4) методом вариации произвольной постоянной дает

$$w_{mn} = \frac{b_{mn}}{ha_{mn}\omega_{mn}} \int_0^t f(\tau) \sin \omega_{mn}(t-\tau) d\tau + C_{1mn} \sin \omega_{mn}t + C_{2mn} \cos \omega_{mn}t, \quad (6)$$

где τ – переменная интегрирования, а C_{1mn} , C_{2mn} – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий. Проинтегрировав решение (6) по времени при заданном законе изменения нагрузки $f(t)$ можно восстановить разложения (3) и далее по формулам теории пологих оболочек найти внутренние силовые факторы, а затем нормальные и касательные напряжения в несущей панели.

Пример. Рассмотрим квадратную в плане панель сферической или цилиндрической оболочки со стороной $2a$, свободно опертую по всем краям. Нагрузка приложена в центре панели ($x = y = 0$) или в виде сосредоточенной радиальной силы P , или она равномерно распределена по малой квадратной площадке со стороной 2α . Функции $\phi(x, y)$ в представлении (1) имеют соответственно вид

$$\phi(x, y) = P\delta(x-0)\delta(y-0), \quad \phi(x, y) = \frac{P}{4\alpha^2} H(-\alpha, \alpha) H(-\alpha, \alpha). \quad (7)$$

Здесь $\delta(x-0)\delta(y-0)$ двумерная импульсная дельта-функция Дирака, заданная в начале координат; $H(-\alpha, \alpha)$ – разность функций Хевисайда, заданных в точках $x = y = \pm\alpha$. Нагрузка может быть или внезапно приложена в момент времени $t = 0$, или линейно зависит от времени. Тогда функции $f(t)$ в представлении (1) соответственно равны

$$f(t) = H(0), \quad f(t) = t, \quad (8)$$

где $H(0)$ – функция Хевисайда, заданная при $t = 0$. Таким образом, динамические нагрузки, действующие на оболочку, определяются вариантами попарных произведений функций (7) и (8). Начальные условия считаем нулевыми, тогда постоянные интегрирования C_{1mn} , C_{2mn} , входящие в решение (6) равны нулю, а окончательные выражения для w_{mn} после интегрирования (6) по времени при учете (8) для принятых вариантов задания $f(t)$ приобретают соответственно вид

$$w_{mn} = \frac{b_{mn}}{ha_{mn}\omega_{mn}^2} (1 - \cos \omega_{mn}t),$$

$$w_{mn} = \frac{b_{mn}}{ha_{mn}\omega_{mn}} \left(\frac{t}{\omega_{mn}} - \frac{\sin \omega_{mn}t}{\omega_{mn}^2} \right).$$

Таким образом, движение оболочки как бы «отслеживает» закон приложения сил с добавлением колебательных составляющих. В силу симметрии приложения нагрузки относительно координатных линий форма колебаний оболочки будет также симметрична

$$\varphi_{mn} = \psi_{mn} = \cos \frac{(m-0,5)\pi x}{a} \cos \frac{(n-0,5)\pi y}{a}.$$

При вычислениях в рядах (3) сохраняем 30×30 слагаемых, что обеспечивает, ранее достаточную точность вычислений [1,2]. Параметры, характеризующие оболочку: $R/h = 100$; $a/R = 0,26$; $\nu = 0,3$.

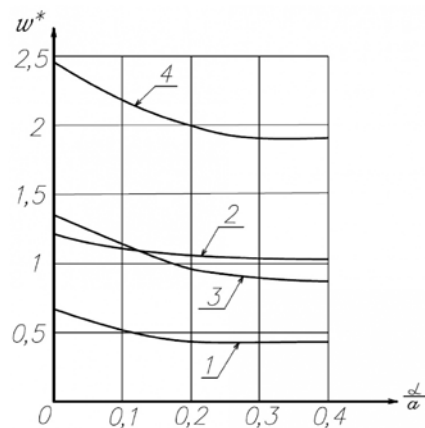


Рис.2. Зависимость безразмерных прогибов центров сферической и цилиндрической оболочек.

На рис.2 показана зависимость безразмерных прогибов центров сферической и цилиндрической оболочек $w^* = w(Eh^2/PR)$ для произвольно выбранного безразмерного момента времени $t^* = t\omega_{11} = 3$ (ω_{11} – собственная частота колебаний оболочки соответствующая функциям φ_{11}, ψ_{11} в разложении (3)) в зависимости от величины безразмерной площадки приложения импульса α/a . Кривые 1 и 2 соответствуют действию внезапно приложенной силы, а кривые 3 и 4 – действию линейно возрастающей нагрузки. Значению $\alpha/a = 0$ отвечает случай действия сосредоточенной силы P . При всех остальных значениях α/a действует равномерно распределенная по площадке приложения импульса статически эквивалентная радиальная нагрузка интенсивности $P/4\alpha^2$. Причем кривые 1 и 3 соответствуют сферической оболочке, а кривые 2 и 4 – цилиндрической. Теплозащитный слой изменяет в основном динамические характеристики оболочки и влияет в рассматриваемой задаче только на собственные частоты ее колебаний. Однако, через решение (6) он влияет и на деформированное состояние панели, а через него и на напряжения. Кроме того, собственные частоты колебаний влияют и на выбор момента времени, для которого построены зависимости на рис.2.

ВЫВОДЫ

Даже частичное разрушение теплозащитного слоя вызывает для несущей оболочки целый ряд неблагоприятных факторов. Один из них – действие локального импульса давления и рассматривается в этой статье. Хотя появление в уравнениях движения оболочки дополнительных инерционных сил, связанных с теплозащитным покрытием, влияет на первый взгляд только на динамические характеристики конструкции, но через собственные частоты ее колебаний есть влияние и на динамическое деформированное состояние. Последнее напрямую связано с напряженным состоянием оболочки и, следовательно, с ее статической и динамической прочностью. Эта взаимосвязь в аналитической форме и выявлена в данной статье. Как следует из результатов работы, динамическое поведение двухслойной оболочки тесно связано с характером изменения импульса давления. Прогибы оболочки, а, следовательно, и напряжения как бы «отслеживают» закон

изменения импульса во времени, но с добавлением характерных колебательных составляющих. Однако, сравнивать значения прогибов оболочки при действии внезапно приложенной силы (функции Хевисайда) и линейно возрастающей нагрузки (соотношения (8)) нельзя, так как в последнем случае вычисления проводились для произвольно выбранного момента времени. Кроме того, на поведение оболочки влияет еще и размеры площадки приложения импульса силы. С ее увеличением прогибы и для сферической, и для цилиндрической оболочки уменьшаются независимо от изменения характера импульса во времени (рис.2). Проведенные расчеты показывают, что локальность приложения импульса давления напрямую влияет на изменение динамического напряженно-деформированного состояния оболочки как по ее площади, так и во времени. Нарушение сплошности теплозащитного покрытия или появление в нем эксплуатационных дефектов также оказывают существенное влияние на процессы теплопереноса из-за изменения характеристик теплопроводности, теплоемкости, излучательной способности и каталитичности в системе «несущий материал – покрытие». В результате возможно появление локальных участков с аномальным перегревом, что может привести к формированию градиентных тепловых полей и к значительному перераспределению напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антуфьев Б.А. *Колебания неоднородных тонкостенных конструкций*. – М.: Издательство МАИ, 2011. – 175 с.
2. Антуфьев Б.А. *Локальное деформирование дискретно подкрепленных оболочек*. – М.: Издательство МАИ, 2013. – 182 с.
3. Вольмир А.С. *Нелинейная динамика пластинок и оболочек*. – М.: Издательство Наука, 1972. – 432 с.
4. Orekhov A.A., Shemetova E.V., Min Y.N. *Fabrication and testing of rocket engine construction elements by additive production approach // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2021. – Vol.16. – Pp.120-126. DOI: 10.37394/232011.2021.16.12.
5. Starovoitov E.I., Leonenko D.V., Orekhov A.A. *Dynamic behavior of thin-walled elements of aircraft made of composite materials, excited by heat shock // Journal of Applied Engineering Science*. – 2020. – Vol.18. – Iss.4. – Pp.724-731. DOI: 10.5937/jaes0-28173.
6. Starovoitov E.I., Leonenko D.V., Orekhov A.A. *Bending of an elastoplastic circular sandwich plate on an elastic foundation in a temperature field // INCAS Bulletin*. – 2021. – Vol.13 (Special Issue). – Pp.233-244. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.21.
7. Kriven G.I., Sun Y. *Study of magnetite nanoparticles by the method of mössbauer spectroscopy // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2021. – Vol.16. – Pp.158-164. DOI: 10.37394/232011.2021.16.17.
8. Rodchenko V.V., Ko K.Y. *Investigation of adsorption capacity of magnetite nanoparticles // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2021. – Vol.16. – Pp.165-171. DOI: 10.37394/232011.2021.16.18.
9. Utkin Y.A., Sha M. *Study of electrokinetic properties of magnetite – silica core – shell nanoparticles // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. – 2021. – Vol.16. – Pp.172-178. DOI: 10.37394/232011.2021.16.19.

10. Bugaev N.M., Kuznetsova E.L., Ko K.Y. *Thermophysical and magnetic properties of magnetite – polyethylene composite* // Intern. J. of Mechanics. – 2021. – Vol.15. – Pp.165-171.

REFERENCES

1. Antufyev B.A. *Kolebaniya neodnorodnykh tonkostennykh konstruksij [The oscillations of inhomogeneous thin-walled structures]*. Moskva, Izdatel'stvo MAI, 2011, 175 p.
2. Antufyev B.A. *Lokal'noe deformirovanie diskretno podkreplennykh obolochek [Local deformation of discretely reinforced shells]*. Moskva, Izdatel'stvo MAI, 2013, 182 p.
3. Volmir A.S. *Nelinejnaya dinamika plastinok i obolochek [Non-linear dynamics of plates and shells]*. Moskva, Izdatel'stvo Nauka, 1972, 432 p.
4. Orekhov A.A., Shemetova E.V., Min Y.N. *Fabrication and testing of rocket engine construction elements by additive production approach*. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2021, Vol.16, Pp.120-126. DOI: 10.37394/232011.2021.16.12.
5. Starovoitov E.I., Leonenko D.V., Orekhov A.A. *Dynamic behavior of thin-walled elements of aircraft made of composite materials, excited by heat shock*. Journal of Applied Engineering Science, 2020, Vol.18, Iss.4, Pp.724-731.
6. Starovoitov E.I., Leonenko D.V., Orekhov A.A. *Bending of an elastoplastic circular sandwich plate on an elastic foundation in a temperature field*. INCAS Bulletin, 2021, Vol.13 (Special Issue), Pp.233-244. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.21.
7. Kriven G.I., Sun Y. *Study of magnetite nanoparticles by the method of mössbauer spectroscopy*. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2021, Vol.16, Pp.158-164. DOI: 10.37394/232011.2021.16.17.
8. Rodchenko V.V., Ko K.Y. *Investigation of adsorption capacity of magnetite nanoparticles*. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2021, Vol.16, Pp.165-171. DOI: 10.37394/232011.2021.16.18.
9. Utkin Y.A., Sha M. *Study of electrokinetic properties of magnetite – silica core – shell nanoparticles*. WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2021, Vol.16, Pp.172-178. DOI: 10.37394/232011.2021.16.19.
10. Bugaev N.M., Kuznetsova E.L., Ko K.Y. *Thermophysical and magnetic properties of magnetite – polyethylene composite*. Intern. J. of Mechanics, 2021, Vol.15, Pp.165-171.

Поступила в редакцию 12 августа 2022 года.

Сведения об авторах:

Антуфьев Борис Андреевич – д.т.н., проф., Кафедра «Сопротивление материалов, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: antufjev.bor@yandex.ru

Рабинский Лев Наумович – д.ф.-м.н., проф., зам. дир., Дирекция Института общинженерной подготовки, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Орехов Александр Александрович – к.т.н., асс., Кафедра «Проектирование сложных технических систем», ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: a_orekhov@mai.ru