УДК 658.5 : 621.77.04

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВИАКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2026 Д.В. Антипов[1], Р.С. Загидуллин[1], И.А. Наугольнова[2]

[1] Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия
[2] Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 08.10.2025

В работе представлена структурная модель взаимосвязи процессов (этапов) разработки авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях аддитивного производства. Авторами работы отмечено, что процесс формирования качества авиакосмической конструкции в условиях аддитивного производства зависит от количества и состава этапов, их качеством, их связями между собой. В соответствии со структурной моделью взаимосвязи этапов разработки на основе метода пространства состояний разработана математическая модель обеспечения качества авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях аддитивного производства. Разработанная математическая модель обеспечения качества включает пять последовательных этапов жизненного цикла авиакосмических конструкций в условиях аддитивного производства: проектирование, предпечатная подготовка и 3D-печать (изготовление), испытание (наземная экспериментальная отработка) и эксплуатация. Основным практическим результатом является алгоритмизация процесса принятия решений, направленная на минимизацию возмущающих воздействий и максимизацию интегрального показателя качества авиакосмических конструкций.

Ключевые слова: структурная модель, математическая модель, обеспечение качества, аддитивные технологии, авиакосмическая конструкция, полимерный материал, композиционный материал, метод пространства состояний.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-210-219
EDN: TLCWHZ

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря достижениям в области разработки и производства высокотемпературных полимерных и композиционных материалов существенно ускорился процесс внедрения аддитивных технологий, в частности, методом FDM (Fused Deposition Modeling, моделирование методом послойного наплавления) 3D-печати в производство деталей и узлов аэрокосмических конструкций [1].

Так, например, в работе [2] представлена составная часть конструкции космического аппарата, изготовленная методом FDM 3D-печати, представляющая собой решетчатую структуру для использования их в качестве поглотителя электромагнитных волн (рис. 1).

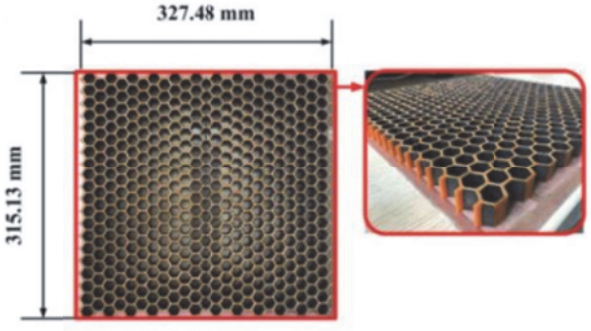

Рис. 1. Решетчатая структура космического аппарата, изготовленная методом FDM 3D-печати

Антипов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: antipov.dv@ssau.ru
Загидуллин Радмир Салимьянович, кандидат технических наук, докторант, старший преподаватель кафедры производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении. E-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru
Наугольнова Ирина Александровна, доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики, организации и стратегии развития предприятия. E-mail: naugolnovaia@mail.ru

В работе [3] представлен воздуховод ракеты-носителя Atlas V американской компании United Launch Alliance, изготовленный методом FDM 3D-печати из высокотемпературного полимерного материала Ultem 9085 (полиэфиримид) (рис. 2).

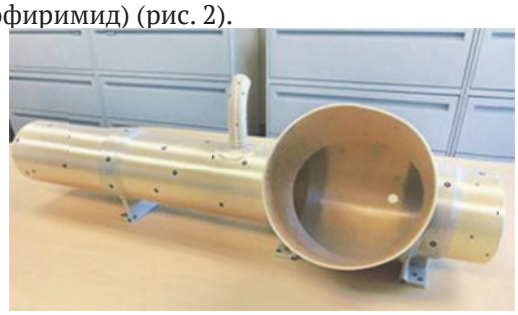

Рис. 2. Воздуховод системы кондиционирования конструкции ракеты-носителя Atlas V

На рисунке 3 представлены кронштейны, изготовленные методом FDM 3D-печати из высокотемпературного полимерного материала Ultem 9085. Кронштейны являются составными частями широкоугольного линзового телескопа, который установлен на борту Международной космической станции (кронштейны в составе телескопа выделены красным цветом) [4].

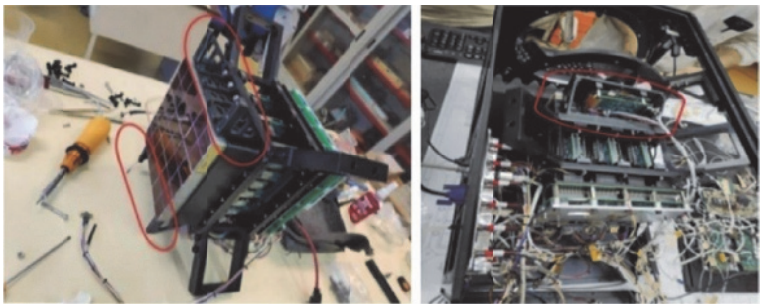

Рис. 3. Кронштейны, изготовленные методом FDM 3D-печати из высокотемпературного полимерного материала Ultem 9085

Авторы работы [5] произвели проектирование, изготовление методом FDM 3D-печати и испытания винтов беспилотного летательного аппарата (рис. 4).



Рис. 4. Винты беспилотного летательного аппарата, изготовленные методом FDM 3D-печати

Для штатной эксплуатации аэрокосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов, изготовленных методом FDM 3D-печати, в соответствии с требованиями тактико-технического задания необходимо обеспечить сквозное развертывание качества и требований на этапах проектирования, изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), испытания (наземной экспериментальной отработки, НЭО) и эксплуатации.

Как показал инженерно-практический опыт на производстве аэрокосмических конструкций в условиях аддитивного производства (АП), источником дефектов, может стать каждый из перечисленных этапов.

Теоретический анализ работ [6-20] показал, что исследования в области обеспечения качества деталей и узлов в условиях АП сфокусированы преимущественно отдельным этапам: проектированию, изготовлению (предпечатной подготовки и изготовлению) и испытанию.

Кроме того, важно отметить, что на качество деталей и узлов аэрокосмических конструкций в условиях АП существенно влияют физико-механические и эксплуатационные свойства филамента, используемых для FDM 3D-печати [1, 21-24].

Целью настоящей работы является разработка математической модели сквозного обеспечения качества аэрокосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях АП на основе метода пространства состояний.

1. СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ АВИАКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Качество авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях АП определяется количеством и составом процессов (этапов), их качеством, их связями между собой.

Иллюстрация указанного положения в виде структурной модели взаимосвязи процессов продемонстрирована на рис. 5.

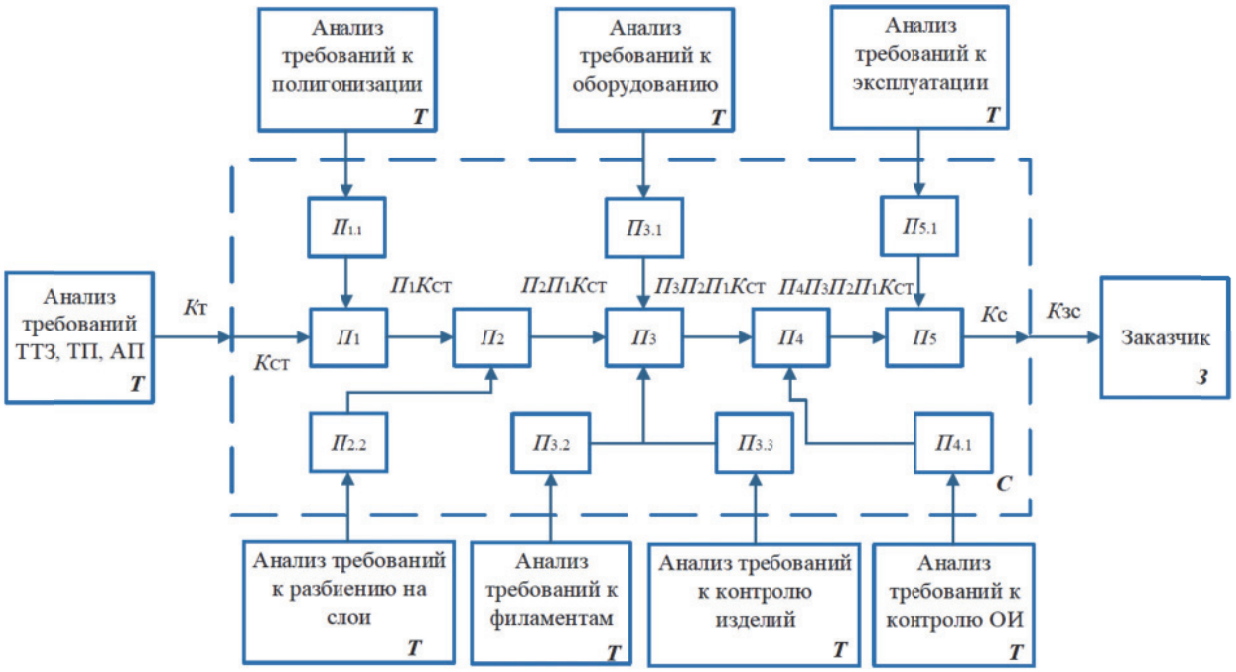

Рис. 5. Структурная модель взаимосвязи процессов разработки авиакосмической конструкции в условиях аддитивного производства

Система С согласно структурной модели взаимосвязи процессов разработки авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях *АП* включает следующие этапы: $П_1$ – проектирование изделия, $П_2$ – предпечатная подготовка, $П_3$ – 3D-печать, $П_4$ – испытания (наземная экспериментальная отработка), $П_5$ – эксплуатация изделия.

Структура системы *С* определяется:

на входе – качеством проведения множества требований K_T, изложенных в –тактико-техническом задании, техническом предложении (*ТП*) и требованиями *АП*, возможностью системы *С* воспринимать это множество. Есть вероятность, что система С воспринимает не все требования K_T, а только часть из них $K_{СТ}$;

на выходе – качеством K_C (множеством свойств) системы *С* и возможностью заказчика (потребителя) воспринять это множество. Есть вероятность, что заказчик *З* воспримет не свойства K_C, а только часть из них $K_{ЗС}$.

Внутренняя структура системы *С* определяется оператором системы $П = П_1 П_2 П_3 П_4 П_5$. Система *С* пять раз последовательно преобразует вход K_T. Тогда $K_C = П_5(П_1 П_2 П_3 П_4 K_{СТ})$.

На рисунке 5 в структурной модели взаимосвязи процессов важно отметить, что каждый основной процесс ($П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$, $П_5$) включает подпроцесс (подэтап). Так на этапе проектирования $П_1$ после разработки 3D-модели авиакосмической конструкции для перехода на следующий этап $П_2$ необходимо произвести подэтап $П_{1.1}$ – полигонизации / триангуляции 3D-модели для получения фасеточной модели [25].

На этапе предпечатной подготовки $П_2$ после выбора технологических режимов 3D-печати необходимо произвести подэтап $П_{2.1}$ – разбиения объемной фасеточной модели на ряд последовательных слоев и запись информации о каждом слое [25].

На этапе $П_3$ перед 3D-печатью деталей или узлов авиакосмической конструкции необходимо произвести:

1) подэтап $П_{3.1}$ – подготовку FDM 3D-принтера к печати, которая включает в себя наладку оборудования, калибровку рабочего стола, калибровку подачи филамента и т.д. Общие требования к

аддитивному оборудованию устанавливает ГОСТ Р 57588–2021 [26].

2) подэтап $П_{3.2}$ – подготовку филамента (полимерного или композиционного материала), которая включает в себя замеры диаметра филамента, операцию сушки и т.д. Общие требования к филаментам для аддитивных технологий устанавливает ГОСТ Р 59100–2020 [27].

3) подэтап $П_{3.3}$ – контроль деталей и узлов авиакосмической конструкции после FDM 3D-печати [28].

Этап испытаний $П_4$ авиакосмической конструкции включает в себя подэтап $П_{4.1}$ – контроль объекта испытания (ОИ) во время и после проведения НЭО.

Этап эксплуатации $П_5$ авиакосмической конструкции включает в себя подэтап $П_{5.1}$, который включает в себя транспортировку, сборку, подготовку к полету.

Согласно структурной модели (рисунок 4) качество выполнения подэтапа влияет на качество этапа (в составе которого находится) и, соответственно, может повлиять на последовательное преобразование входа K_T.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА АВИАКОСМИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В соответствии со структурной моделью взаимосвязи процессов (рис. 5) разработана математическая модель обеспечения качества авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях АП, включающая этапы проектирования, изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), испытания и эксплуатации.

Пространство состояний – метод описания поведения динамической системы во временной области. Движение системы в пространстве состояний представляется кривой (траекторией движения системы) и отражает изменение положения вектора состояния в этом пространстве [29].

Обеспечение качества авиакосмических конструкций в условиях АП представляет собой динамическую систему взаимодействия процессов (проектирования, изготовления (предпечатной подготовки и 3D-печати), испытания и эксплуатации), обеспечивающих создание и эксплуатацию изделия в условиях имеющихся ограничений.

Жизненный цикл (ЖЦ) авиакосмических конструкций задается отрезком времени $\left[t_0, T\right]$, который включает N последовательных процессов (этапов):

$$\left[t_0, T\right] = \cup\left[t_{i-1}, t_i\right], i = 1,..., N \ . \quad (1)$$

Процесс формирования качества авиакосмической конструкции зависит от совокупности процессов S_P (Set of Processes): разработка, изготовление (предпечатная подготовка и 3D-печать), испытание и эксплуатация, определяющих заданные показатели качества конструкции в рассматриваемый период времени τ [30, 31].

Тогда в момент времени $\tau = t$ значение качества авиакосмической конструкции $\overline{Q(t)}$ определяют как функционал процессов $\overline{S_P(\tau)}$:

$$\overline{Q(t)} = \overline{F}\left[t; \overline{S_P(\tau)}, t_0 \le \tau \le t\right], \quad (2)$$

где $\overline{F}$ – некоторый заданный функционал качества, который зависит от исследуемого процесса.

В самом простом случае значение интегрального показателя качества в момент времени является аналитической функцией параметров процесса в указанный момент времени:

$$\overline{Q(t)} = \overline{f}\left(\overline{S_P(t)}\right). \quad (3)$$

Согласно структурной модели (рис. 5) ЖЦ авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях АП состоит из следующих основных последовательных процессов (этапов):

1) Проектирование конструкции, *D* (Design);
2) Предпечатная подготовка, P_P (Preprinting preparation);
3) 3D-печать (изготовление), *M* (Manufacture);
4) Испытание, *T* (Test);
5) Эксплуатация, *O* (Operation).

Следовательно, время ЖЦ авиакосмических конструкций в условиях АП разделено на 5 отрезков времени:

1) $\left[t_0, t_1\right]$ – проектирование авиакосмической конструкции;
2) $\left[t_1, t_2\right]$ – предпечатная подготовка 3D-модели конструкции;
3) $\left[t_2, t_3\right]$ – 3D-печать;

4) $[t_3, t_4]$ – испытание конструкции;

5) $[t_4, t_5]$ – эксплуатация авиакосмической конструкции.

Все параметры, отвечающие за показатели качества авиакосмических конструкций в условиях АП на каждом отдельном процессе, можно разделить на три множества:

1 множество параметров состояния $x(\cdot)$;

2 множество параметров управления $u(\cdot)$;

3 множество параметров возмущения $y(\cdot)$.

Параметры возмущения $y(\cdot)$ в любой момент времени влияют на параметры состояния $x(\cdot)$. В том случае, когда параметры возмущения $y(\cdot)$ являются несущественными, т.е. $|y(t)| \le \varepsilon, t \in [t_0, T]$, где ε – некоторый заданный коэффициент (малое положительное число), то в качестве $x(t)$ будем понимать само значение $x(t)$ или его усредненное значение по каждому процессу [29].

Важно отметить, что значения параметров возмущения $y(\cdot)$ необходимо минимизировать, чтобы получить стабильный управляемый процесс. Для получения стабильного управляемого процесса обеспечения качества необходимо разработать робастную конструкцию изделия и последующие робастные технологические процессы изготовления, испытания и эксплуатации конструкции [32].

При превышении значения параметров возмущения $y(\cdot)$ заданное значение ε, то под параметром состояния $x(\cdot)$ понимают значение данного параметра $x(t)$ при фиксированном возмущении, в качестве которого обычно выбирают наиболее неблагоприятное значение с точки зрения выбранного критерия оптимального данного процесса.

Согласно структурной модели (рисунок 4) качество авиакосмической конструкции в некоторый момент времени t определяется качеством отдельного процесса, т.е. совокупностью значений параметров состояния и управления всех процессов за весь период времени $t_0 \le \tau \le t$.

Следовательно, можно представить функцию зависимости показателей качества авиакосмической конструкции от указанных параметров:

$$Q = F(t, x(\tau), u(\tau), y(\tau), \tau \in [t_0, t]), \tag{4}$$

С учетом перечисленных процессов ЖЦ значение интегрального показателя качества авиакосмической конструкции в условиях АП будет равен:

$$\overline{Q(t)} = \overline{F}\begin{pmatrix} \overline{D(t)}, t_0 \le t \le t_1 \\ \overline{P_P(t)}, t_1 \le t \le t_2 \\ \overline{M(t)}, t_2 \le t \le t_3 \\ \overline{T(t)}, t_3 \le t \le t_4 \\ \overline{O(t)}, t_4 \le t \le t_5 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

Для построения критерия оптимальности задачи обеспечения качества введен некоторый функционал $J_0 = (t_i, x(\cdot), u(\cdot))$, экстремум которого и будет определять оптимальное качество авиакосмической конструкции в условиях АП.

Для получения максимальных значений интегрального показателя качества в момент времени критерий оптимальности равен:

$$J_0 = (t_i, x(\cdot), u(\cdot)) = \overline{Q(t)} \Rightarrow \max, \tag{6}$$

В качестве ограничений выступают:

1) соотношения между показателями качества авиакосмической конструкции и параметрами отдельного процесса (4);

2)соотношения между параметрами состояния и параметрами управления процессами (дифференциальные связи):

$$\begin{aligned} \overline{D(t)} &= (t, x_1(t), \dot{x}_1(t), u_1(t)) = 0, t \in [t_0, t_1], \\ \overline{P_P(t)} &= (t, x_2(t), \dot{x}_2(t), u_2(t)) = 0, t \in [t_2, t_3], \\ \overline{M(t)} &= (t, x_3(t), \dot{x}_3(t), u_3(t)) = 0, t \in [t_2, t_3], \\ \overline{T(t)} &= (t, x_4(t), \dot{x}_4(t), u_4(t)) = 0, t \in [t_3, t_4], \\ \overline{O(t)} &= (t, x_5(t), \dot{x}_5(t), u_5(t)) = 0, t \in [t_4, t_5]. \end{aligned} \tag{7}$$

3) краевые условия:

$$x(t_1) = \overline{x_1},$$
$$x(t_2) = \overline{x_2},$$
$$x(t_3) = \overline{x_3},$$
$$x(t_4) = \overline{x_4},$$
$$x(t_5) = \overline{x_5}$$

или

$$x(t) = \begin{cases} x(t_1) = \overline{x_1} \\ x(t_2) = \overline{x_2} \\ x(t_3) = \overline{x_3} \\ x(t_4) = \overline{x_4} \\ x(t_5) = \overline{x_5} \end{cases}. \quad (8)$$

4) функциональные ограничения на ресурсы:

$$J_j = (t_i, x_i(\cdot), u_i(\cdot)) = a_j, i = 1,..., N, j = 1,..., m', \quad (9)$$

$$J_j = (t_i, x_i(\cdot), u_i(\cdot)) \le 0, i = 1,..., N, j = m'+1,..., m, \quad (10)$$

где m – общее количество различных функциональных ограничений в виде равенств и неравенств;

5) ограничения на параметры состояния и управления:

$$x_1(t) \in X_1(t), t \in [t_0, t_1],$$
$$x_2(t) \in X_2(t), t \in [t_1, t_2],$$
$$x_3(t) \in X_3(t), t \in [t_2, t_3],$$
$$x_4(t) \in X_4(t), t \in [t_3, t_4],$$
$$x_5(t) \in X_5(t), t \in [t_4, t_5],$$

или

$$x(t) = \begin{cases} x_1(t) \in X_1(t), t \in [t_0, t_1] \\ x_2(t) \in X_2(t), t \in [t_1, t_2] \\ x_3(t) \in X_3(t), t \in [t_2, t_3] \\ x_4(t) \in X_4(t), t \in [t_3, t_4] \\ x_5(t) \in X_5(t), t \in [t_4, t_5] \end{cases}, \quad (11)$$

$$u_1(t) \in U_1(t), t \in [t_0, t_1],$$
$$u_2(t) \in U_2(t), t \in [t_1, t_2],$$
$$u_3(t) \in U_3(t), t \in [t_2, t_3],$$
$$u_4(t) \in U_4(t), t \in [t_3, t_4],$$
$$u_5(t) \in U_5(t), t \in [t_4, t_5],$$

или

$$u(t) = \begin{cases} u_1(t) \in U_1(t), t \in [t_0, t_1] \\ u_2(t) \in U_2(t), t \in [t_1, t_2] \\ u_3(t) \in U_3(t), t \in [t_2, t_3] \\ u_4(t) \in U_4(t), t \in [t_3, t_4] \\ u_5(t) \in U_5(t), t \in [t_4, t_5] \end{cases}, \quad (12)$$

где $X_i(t)$ – заданное множество значений параметров состояния; $U_i(t)$ – заданное множество значений параметров управления.

Следует отметить, что для более глубокого решения задачи обеспечения качеством авиакосмической конструкции в условиях АП необходимо определить показатели качества, закладываемые на каждом отдельном процессе (*D, P_p, M, T* и *O*), описать «аналитической зависимостью» соответствующий процесс и определить функциональные ограничения на ресурсы.

В работе [30] приведена общая математическая модель управления качеством продукции на всем протяжении ее жизненного цикла.

В рамках общей модели [30] в настоящей работе разработана и уточнена математическая модель обеспечения качества авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях АП. Разработанная модель уточнена в части процессов разработки авиакосмических конструкций в условиях АП: проектирование, предпечатная подготовка, 3D-печать, испытание (наземная экспериментальная отработка) и эксплуатация (*D, P_p, M, T* и *O*).

Авторами работы [33] разработана математическая модель управления качеством продукции на основе модели Гудвина-Калецкого.

В работе [34] представлена математическая модель оперативного управления качеством производственного процесса на основе вероятностного подхода.

В работе [35] предложена математическая модель процесса управления качеством сборки агрегатов и систем ракетно-космической техники на основе теории оптимального управления

Принципиальное отличие предлагаемой в настоящей работе математической модели от работ [33–35] заключается в применении метода пространства состояний. Данный метод является адекватным для задач сквозного обеспечения качества изделий, так как позволяет формализовать жизненный цикл как единую динамическую систему. Это дает возможность находить не локально, а глобально оптимальные траектории управления качеством, минимизируя совокупное влияние возмущений на всех этапах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлена структурная модель, устанавливающая взаимосвязь пяти ключевых этапов жизненного цикла (проектирование, предпечатная подготовка, 3D-печать, испытания, эксплуатация) аэрокосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов.

В соответствии со структурной моделью на основе метода пространства состояний разработана математическая модель обеспечения качества авиакосмических конструкций из полимерных и композиционных материалов в условиях АП.

Разработанная математическая модель позволяет количественно оценивать совокупное влияние этапов проектирования, предпечатной подготовки, 3D-печати, испытаний и эксплуатации на показатели качества авиакосмических конструкций в условиях АП.

Для практической реализации разработанной математической модели требуются дальнейшие исследования по наполнению её конкретными параметрами и аналитическими зависимостями для каждого выделенного процесса, что и станет задачей следующих этапов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипов, Д.В.* Разработка классификации полимерных и композиционных материалов для изготовления авиакосмической техники в условиях аддитивного производства / Д.В. Антипов, Р.С. Загидуллин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27. № 1(123). – С. 12-23. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-12-23.
2. Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a threedimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb / J. Wei, Lю Yan, H. Ma, Y. Fan, J. Wang, Мю Feng, S. Qu // Scientific Reports. 2018. Vol. 8:4817. 7 p. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-23286-6.
3. *Кулик, В.И.* Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники. Учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2018. – 160 с.
4. 3D-Printed Satellite Brackets: Materials, Manufacturing and Applications / Samal SK, Vishwanatha HM, Saxena KK, Behera A, Nguyen TA, Behera A, Prakash C, Dixit S, Mohammed K.A. // Crystals. 2022. Vol. 12. № (8)1148. DOI: https://doi.org/10.3390/cryst12081148.
5. *Yeh, Y.-L.* The standard strength test of 3D printing materials and its application for UAV propellers // Modern Physics Letters B. 2020. Vol. 34. 5 p. DOI:10.1142/S0217984920400175.
6. *Попова, Д.Д.* Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД / Д.Д. Попова, Н.А. Самойленко, С.В. Семенов, А.А. Балакирев, А.Ю. Головкин // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2018. – № 55. – С. 42-51.
7. *Камардина, Н.В.* Топологическая оптимизация детали «Серьга» / Н.В. Камардина, Р.М. Гусейнов, И.К. Данилов, В.Н. Коноплёв, К.А. Иванов, А.С. Жарко, Г.М. Полищук // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2020. – № 21(1). – С. 20-26.

8. *Полякова, Д.А.* Анализ зарубежных и отечественных исследований проблемы адаптации 3d-моделей для 3d-печати / Д.А. Полякова, М.В. Тагильцев // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Т. 7. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – С. 249-252.
9. *Зубрилин, А.В.* Предпечатная подготовка 3d-моделей с использованием специализированного программного обеспечения / А.В. Зубрилин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – Вып. 9. – Ч. 1. – С. 88-96.
10. *Федулов, В.М.* Влияние технологических режимов при FDM-печати на качество поверхностей детали из ABS и PLA пластика / В.М. Федулов, , Ю.С. Федулова, Е.Е. Кулик // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 4(43). – С. 162-167.
11. *Мышечкин, А.А.* Исследование влияния режимов FDM-технологии на свойства изделий / А.А. Мышечкин, Е.А. Шумило // Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сборник докладов конференции. – М.: РТУ МИРЭА, 2019. – Т. 2. – С. 276-280.
12. Mechanical properties of samples of polyphenylene sulfone obtained by the 3D-printing method / A.L. Slonov, A.A. Khashirov, A.A. Zhansitov, I.V. Dolbin // Materials Science Forum. 2018. Vol. 935. PP. 21–26.
13. *Aliaksandr, Ammar S., Dzhendo D.* Influence of technological parameters of FDM-print on the strength characteristics of samples of polyamide // Machines. Technologies. Materials. 2020. Vol. 14. Issue 5. PP. 210- 212.
14. Relationship between FDM 3D printing parameters study: parameter optimization for lower defects / F. Patrich, L.C. Christian, M.S. Gian, S. Merve, C. Elisa, F. Leonardo, D. Giampiero, L. Alfredo // Polymers. 2021. Vol. 13. Issue 13. PP. 210-212. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13132190.
15. *Русских, И.В.* Апробация методики робастного проектирования параметров наладки на операции послойной укладки расплавленной полимерной нити / И.В. Русских, А.С. Русских, Д.В Ермилина. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – Вып. 6. – С. 230-231.
16. *Mohammed H., Sarkawt R., Yassin M.* Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 11 100264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264.
17. *Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M.* Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2022. Vol. 5(12). PP. 2435-2452. DOI:10.1177/0892705720964560.
18. *Efrain Rodriguez E., Alvares A., Jaimes C.* Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019. Vol. 233. Issue 7. PP. 443- 450. DOI:10.1177/0015732515680408.
19. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer / C.S. Zilda, S.F. Matheus, I.N. Paulo, S. Jorge // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 572. PP. 151-154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151
20. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer / S.P. Deshpande, S. Kulkarni, S. Shah, J. Irwin // International journal of engineering research and innovation. 2019. Vol. 11. № 1. С. 13-22.
21. *Криницын, М.Г.* Создание новых композиционных материалов на полимерной основе для применения в аддитивных технологиях / М.Г. Криницын, Р.О. Черепанов, В.А. Юркина // Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции, 24–26 мая 2018 г., Юрга. – Томск: Изд-во ТПУ, 2018. – С. 142-148.
22. *Кондрашов, С.В.* Функциональные материалы, полученные способом FDM-печати (обзор) / С.В. Кондрашов, А.А. Пыхтин, С.А. Ларионов // Труды ВИАМ. – 2021. – № 3(97). – С. 44-57.
23. *Lopatina Yu. A., Slavkina V.E.* Development of a High Strength Polymeric Composite Material Using 3D-Printing and Vacuum Impregnation Technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 934 012019. 6 p. DOI:10.1088/1757899X/934/1/012019.
24. *Судан, А.* О перспективах производства филаментов на базе полиамида 6 для FDM-печати / А. Судан, А.Н. Гайдук, А.А. Скаскевич // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2021. – Т. 11. – № 2. С. – 83-90.
25. ГОСТ Р ИСО/АСТМ 52950-2022 Аддитивные технологии. Представление и обработка данных технологического процесса. Общие положения. – М.: Российский институт стандартизации, 2020. – 16 с.
26. ГОСТ Р 57588–2021 Аддитивные технологии. Оборудование для аддитивных технологических процессов. Общие требовани52950-2022. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.
27. ГОСТ Р 59100–2020 Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.
28. ГОСТ Р 58597-2019 Аддитивные технологии. Меры неразрушающего контроля, изготовленные методами аддитивных технологий. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с
29. *Филиповский, В.М.* Системы управления в пространстве состояний: учебное пособие / В.М. Филиповский. – СПб., 2022. – 75 с.
30. *Гитман, М.Б.* Математическая модель управления качеством в продукции / М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов, С.А. Федосеев // Качество в обработке материалов. – 2014. – № 1. – С. 22-26.
31. *Столбов, В.Ю.* Управление процессом формирования качества продукции промышленного предприятия / В.Ю. Столбов, М.Б. Гитман, С.А. Федосеев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2016. – № 3. – С. 79-98.
32. *Дмитриев, А.Я.* Робастное проектирование и технологическая подготовка производства изделий авиационной техники: учеб. пособие / А.Я. Дмитриев, Ю.А. Вашуков, Т.А. Митрошкина. – Самара: Изд-во СГАУ, 2016. – 76 с.

33. *Завершинский, И.П.* Математическая модель управления качеством продукции / И.П. Завершинский, М.Э. Лисянский, В.В. Максимов, Ю.Л. Ратис // Естествознание. Экономика. Управление: межвуз. сб. науч. работ, посвящ. памяти А. И. Федосова. – Самара: [СГАУ], 2001. – Вып. 2. – С. 229-233.
34. *Сафонова, Ю.А.* Разработка математической модели оперативного управления качеством производственного процесса / Ю.А. Сафонова, С.Г. Мачтаков, Д.А. Скроготунов // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 5(20). – С. 28-34.
35. *Недайвода, А.К.* Система управления качеством изготовления агрегатов ракетно-космической техники / А.К. Недайвода, П.Г. Михайлов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – № 56. – URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=30149 (дата обращения 10.12.2025).

MATHEMATICAL MODEL OF QUALITY ASSURANCE OF AEROSPACE STRUCTURES FROM POLYMERIC AND COMPOSITE MATERIALS IN ADDITIVE MANUFACTURING CONDITIONS

© 2026 D.V. Antipov[1], R.S. Zagidullin[1], I.A. Nauglanova[2]

[1] Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov, Samara, Russia
[2] Samara State University of Economics, Samara, Russia

This paper presents a structural model of the interrelationships between processes (stages) in the development of aerospace structures made of polymer and composite materials using additive manufacturing. The authors note that the process of forming the quality of an aerospace structure using additive manufacturing depends on the number and composition of stages, their quality, and their interrelationships. In accordance with the structural model of the interrelationships between development stages, a mathematical model for ensuring the quality of aerospace structures made of polymer and composite materials using additive manufacturing has been developed based on the state-space method. The developed mathematical model for quality assurance includes five sequential stages of the aerospace structure life cycle using additive manufacturing: design, prepress and 3D printing (manufacturing), testing (ground experimental development), and operation. The main practical result is the algorithmization of the decision-making process aimed at minimizing disturbances and maximizing the integral quality indicator of aerospace structures.
Keywords: structural model, mathematical model, quality assurance, additive manufacturing, aerospace design, polymer material, composite material, state space method.

DOI: 10.37313/1990-5378-2026-28-5-210-219
EDN: TLCWHZ

REFERENCES

1. *Antipov, D.V.* Razrabotka klassifikacii polimernyh i kompozicionnyh materialov dlya izgotovleniya aviakosmicheskoj tekhniki v usloviyah additivnogo proizvodstva / D.V. Antipov, R.S. Zagidullin // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2025. – T. 27. № 1(123). – S. 12-23. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-1-12-23.
2. Electromagnetic wave absorption and compressive behavior of a threedimensional metamaterial absorber based on 3D printed honeycomb / J. Wei, Lyu Yan, H. Ma, Y. Fan, J. Wang, Myu Feng, S. Qu // Scientific Reports. 2018. Vol. 8:4817. 7 p. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-018-23286-6.
3. *Kulik, V.I.* Additivnye tekhnologii v proizvodstve izdelij aviacionnoj i raketno-kosmicheskoj tekhniki. Uchebnoe posobie / V.I. Kulik, A.S. Nilov. – SPb.: Balt. gos. tekhn. un-t, 2018. – 160 s.
4. 3D-Printed Satellite Brackets: Materials, Manufacturing and Applications / Samal SK, Vishwanatha HM, Saxena KK, Behera A, Nguyen TA, Behera A, Prakash C, Dixit S, Mohammed K.A. // Crystals. 2022. Vol. 12. № (8)1148. DOI: https://doi.org/10.3390/cryst12081148.
5. *Yeh, Y.-L.* The standard strength test of 3D printing materials and its application for UAV propellers // Modern Physics Letters B. 2020. Vol. 34. 5 p. DOI:10.1142/S0217984920400175.
6. *Popova, D.D.* Primenenie metoda topologicheskoj optimizacii dlya umen'sheniya massy konstruktivno podobnogo kronshtejna truboprovoda aviacionnogo GTD / D.D. Popova, N.A. Samojlenko, S.V. Semenov, A.A. Balakirev, A.Yu. Golovkin // Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. – 2018. – № 55. – S. 42-51.
7. *Kamardina, N.V.* Topologicheskaya optimizaciya detali «Ser'ga» / N.V. Kamardina, R.M. Gusejnov, I.K. Danilov, V.N. Konoplyov, K.A. Ivanov, A.S. Zharko, G.M. Polishchuk // Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya. – 2020. – № 21(1). – S. 20-26.
8. *Polyakova, D.A.* Analiz zarubezhnyh i otechestvennyh issledovanij problemy adaptacii 3d-modelej dlya 3d-pechati / D.A. Polyakova, M.V. Tagil›cev // Al›manah nauchnyh rabot molodyh uchenyh Universiteta ITMO. T. 7. – SPb.: Universitet ITMO, 2018. – S. 249-252.
9. *Zubrilin, A.V.* Predpechatnaya podgotovka 3d-modelej s ispol›zovaniem specializirovannogo programmnogo obespecheniya / A.V. Zubrilin // Izvestiya Tul›skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2017. – Vyp. 9. – Ch. 1. – S. 88-96.
10. *Fedulov, V.M.* Vliyanie tekhnologicheskih rezhimov pri FDM-pechati na kachestvo poverhnostej detali iz ABS i PLA plastika / V.M. Fedulov, , Yu.S. Fedulova, E.E. Kulik // Vestnik Rybinskoj gosudarstvennoj aviacionnoj tekhnologicheskoj akademii im. P.A. Solov›eva. – 2017. – № 4(43). – S. 162-167.
11. *Myshechkin, A.A.* Issledovanie vliyaniya rezhimov FDM-tekhnologii na svojstva izdelij / A.A. Myshechkin, E.A. Shumilo // Rossijskaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem. Informatika i

tekhnologii. Innovacionnye tekhnologii v promyshlennosti i informatike: sbornik dokladov konferencii. – M.: RTU MIREA, 2019. – T. 2. – S. 276-280.
12. Mechanical properties of samples of polyphenylene sulfone obtained by the 3D-printing method / A.L. Slonov, A.A. Khashirov, A.A. Zhansitov, I.V. Dolbin // Materials Science Forum. 2018. Vol. 935. PP. 21–26.
13. *Aliaksandr, Ammar S., Dzhendo D.* Influence of technological parameters of FDM-print on the strength characteristics of samples of polyamide // Machines. Technologies. Materials. 2020. Vol. 14. Issue 5. PP. 210- 212.
14. Relationship between FDM 3D printing parameters study: parameter optimization for lower defects / F. Patrich, L.C. Christian, M.S. Gian, S. Merve, C. Elisa, F. Leonardo, D. Giampiero, L. Alfredo // Polymers. 2021. Vol. 13. Issue 13. PP. 210-212. DOI: https://doi.org/10.3390/polym13132190.
15. *Russkih, I.V.* Aprobaciya metodiki robastnogo proektirovaniya parametrov naladki na operacii poslojnoj ukladki rasplavlennoj polimernoj niti / I.V. Russkih, A.S. Russkih, D.V Ermilina. // Izvestiya Tul›skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2020. – Vyp. 6. – S. 230-231.
16. *Mohammed H., Sarkawt R., Yassin M.* Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology // Results in Engineering. – 2021. – Vol. 11 100264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264.
17. *Heidari-Rarani M., Ezati N., Sadeghi P., Badrossamay M.* Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2022. Vol. 5(12). PP. 2435-2452. DOI:10.1177/0892705720964560.
18. *Efrain Rodriguez E., Alvares A., Jaimes C.* Conceptual design and dimensional optimization of the linear delta robot with single legs for additive manufacturing // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2019. Vol. 233. Issue 7. PP. 443- 450. DOI:10.1177/0015732515680408.
19. Study of the Technical Feasibility and Design of a Mini Head Screw Extruder Applied to Filament Deposition in Desktop 3-D Printer / C.S. Zilda, S.F. Matheus, I.N. Paulo, S. Jorge // Key Engineering Materials. 2014. Vol. 572. PP. 151-154. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151
20. Developing an open source, inexpensive, large-scale polar configuration 3D printer / S.P. Deshpande, S. Kulkarni, S. Shah, J. Irwin // International journal of engineering research and innovation. 2019. Vol. 11. № 1. S. 13-22.
21. *Krinicyn, M.G.* Sozdanie novyh kompozicionnyh materialov na polimernoj osnove dlya primeneniya v additivnyh tekhnologiyah / M.G. Krinicyn, R.O. Cherepanov, V.A. Yurkina // Innovacionnye tekhnologii v mashinostroenii: sbornik trudov IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 24–26 maya 2018 g., Yurga. – Tomsk: Izd-vo TPU, 2018. – S. 142-148.
22. *Kondrashov, S.V.* Funkcional›nye materialy, poluchennye sposobom FDM-pechati (obzor) / S.V. Kondrashov, A.A. Pyhtin, S.A. Larionov // Trudy VIAM. – 2021. – № 3(97). – S. 44-57.
23. *Lopatina Yu. A., Slavkina V.E.* Development of a High Strength Polymeric Composite Material Using 3D-Printing and Vacuum Impregnation Technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 934 012019. 6 p. DOI:10.1088/1757899X/934/1/012019.
24. *Sudan, A.* O perspektivah proizvodstva filamentov na baze poliamida 6 dlya FDM-pechati / A. Sudan, A.N. Gajduk, A.A. Skaskevich // Vestnik Grodnenskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Yanki Kupaly. Seriya 6. Tekhnika. – 2021. – T. 11. – № 2. S. – 83-90.
25. GOST R ISO/ACTM 52950-2022 Additivnye tekhnologii. Predstavlenie i obrabotka dannyh tekhnologicheskogo processa. Obshchie polozheniya. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2020. – 16 s.
26. GOST R 57588–2021 Additivnye tekhnologii. Oborudovanie dlya additivnyh tekhnologicheskih processov. Obshchie trebovani52950-2022. – M.: Rossijskij institut standartizacii, 2021. – 12 s.
27. GOST R 59100–2020 Plastmassy. Filamenty dlya additivnyh tekhnologij. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. – M.: Standartinform, 2020. – 11 s.
28. GOST R 58597-2019 Additivnye tekhnologii. Mery nerazrushayushchego kontrolya, izgotovlennye metodami additivnyh tekhnologij. – M.: Standartinform, 2019. – 7 s
29. *Filipovskij, V.M.* Sistemy upravleniya v prostranstve sostoyanij: uchebnoe posobie / V.M. Filipovskij. – SPb., 2022. – 75 s.
30. *Gitman, M.B.* Matematicheskaya model› upravleniya kachestvom v produkcii / M.B. Gitman, V.Yu. Stolbov, S.A. Fedoseev // Kachestvo v obrabotke materialov. – 2014. – № 1. – S. 22-26.
31. *Stolbov, V.Yu.* Upravlenie processom formirovaniya kachestva produkcii promyshlennogo predpriyatiya / V.Yu. Stolbov, M.B. Gitman, S.A. Fedoseev // Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya. – 2016. – № 3. – S. 79-98.
32. *Dmitriev, A.Ya.* Robastnoe proektirovanie i tekhnologicheskaya podgotovka proizvodstva izdelij aviacionnoj tekhniki: ucheb. posobie / A.Ya. Dmitriev, Yu.A. Vashukov, T.A. Mitroshkina. – Samara: Izd-vo SGAU, 2016. – 76 s.
33. *Zavershinskij, I.P.* Matematicheskaya model› upravleniya kachestvom produkcii / I.P. Zavershinskij, M.E. Lisyanskij, V.V. Maksimov, Yu.L. Ratis // Estestvoznanie. Ekonomika. Upravlenie: mezhvuz. sb. nauch. rabot, posvyashch. pamyati A. I. Fedosova. – Samara: [SGAU], 2001. – Vyp. 2. – S. 229-233.
34. *Safonova, Yu.A.* Razrabotka matematicheskoj modeli operativnogo upravleniya kachestvom proizvodstvennogo processa / Yu.A. Safonova, S.G. Machtakov, D.A. Skrogotunov // Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii. – 2018. – № 5(20). – S. 28-34.
35. *Nedajvoda, A.K.* Sistema upravleniya kachestvom izgotovleniya agregatov raketno-kosmicheskoj tekhniki / A.K. Nedajvoda, P.G. Mihajlov // Elektronnyj zhurnal «Trudy MAI». – 2012. – № 56. – URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=30149 (data obrashcheniya 10.12.2025).

Dmitry Antipov, Doctor of Technics, Professor, Head of the Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering. E-mail: antipov.dv@ssau.ru
Radmir Zagidullin, Candidate of Technics, Senior Lecturer of Department of Production of Aircraft and Quality Management in Mechanical Engineering. E-mail: Zagidullin_Radmir@mail.ru
Irina Naugolnova, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Economics, Organization, and Strategy of Enterprise Development. E-mail: naugolnovaia@mail.ru