

УДК 621.4, 629.7

## **Особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя**

И.В. Завалишин, А.Г.Финогеев

### **Аннотация:**

В статье рассмотрены особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя (ГТД). Отмечаются особенности конструкции турбины современного ГТД, определяющие техническое совершенство двигателя. Приводится описание современных технологий, применяемых на российских предприятиях газотурбостроения.

### **Ключевые слова:**

авиационный газотурбинный двигатель; технологическая подготовка производства; детали турбины.

Одной из наиболее важных проблем авиадвигателестроения является совершенствование газотурбинных двигателей путем повышения температуры газа перед турбиной. Для этого необходимо обеспечить работоспособность лопаток турбины при высоких температурах. Однако пределы классических металлов и сплавов практически исчерпаны, а новые функциональные возможности охлаждаемых лопаток заключены в новых конструкциях и технологиях изготовления.

Многие детали турбины современного газотурбинного двигателя имеют существенные функционально-конструктивные особенности, которые не позволяют выполнять техническую подготовку их производства традиционными методами последовательного формирования и оценки конструктивных и технологических решений с применением существующих систем автоматизированного проектирования технологических процессов и средств оснащения. Вместе с тем, именно эти детали в значительной степени

определяют техническое совершенство двигателя. К таким деталям, в первую очередь, относятся рабочие и сопловые лопатки турбин высокого и низкого давления газотурбинного двигателя (рис. 1) [1].

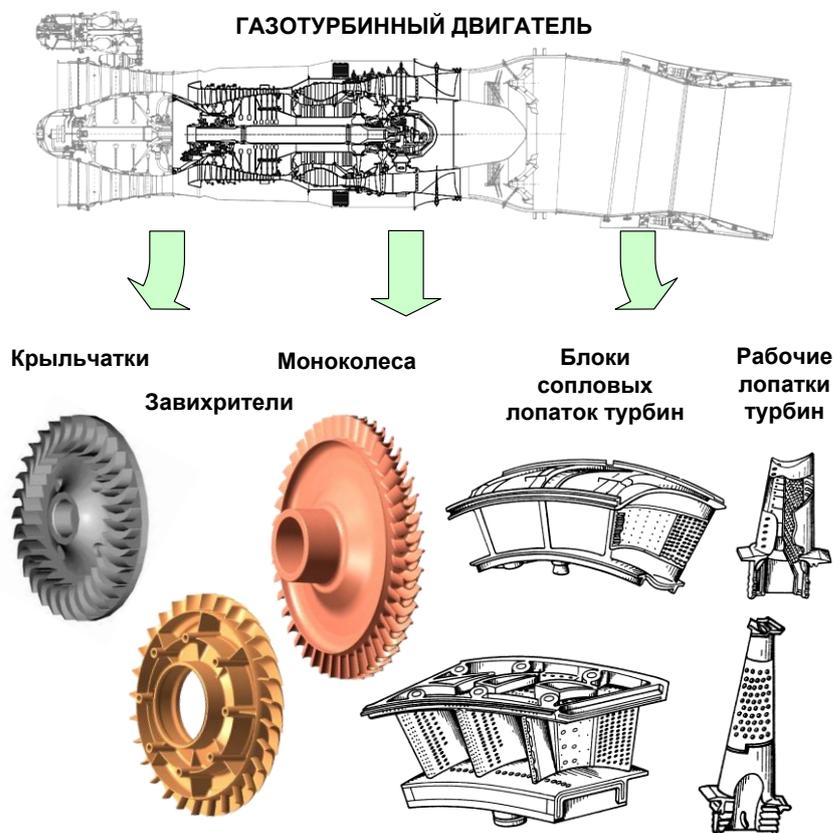


Рисунок 1- Детали газотурбинного двигателя

Для этих деталей условия работы и выполняемые функции обуславливают соответствующую конструкцию, которая, в свою очередь, определяет технологию ее изготовления. Необходимость обеспечения максимальной производительности и коэффициента полезного действия турбины определяет соответствующий газодинамический профиль, размеры и качество поверхности (до  $R_a=0,08$  мкм) пера лопатки.

Рабочая лопатка турбины высокого давления (ТВД) ГТД АЛ-31Ф – литая, полая, охлаждаемая. В ее внутренней полости для организации процесса охлаждения имеются продольный канал с отверстиями в перегородке и ребра. Хвостовик лопатки – «елочного типа». Лопатка ТВД работает при осевых и радиальных нагрузках от вращения турбины. Частота вращения ротора – 13 200 об/мин; рабочая температура лопатки – 1050-1060°C [2].

Максимальная толщина поперечных сечений лопаток турбины, как правило, больше,

чем у лопаток компрессора, что, в частности, связано с наличием в пере внутренних полостей для охлаждения лопаток. Углы поворота потока в межлопаточных каналах турбин также больше, что обуславливает более значительный, чем в лопатках компрессоров, прогиб профиля и как следствие большие момент инерции сечения и жесткость.

Точность изготовления пера лопаток турбин, как и лопаток компрессора, регламентируется отраслевым стандартом ОСТ 1.02571-86 "Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения формы и расположения пера" должна соответствовать данным, приведенным в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

**Предельные отклонения размеров и смещение профилей пера литых лопаток турбины**

Диапазон значений длины хорды профиля пера, мм	Высота пера, мм	Предельное отклонение размера, мм			хорды профиля $b$	Смещение профиля пера в корневом сечении рабочей лопатки от номинального положения в направлении оси $Y\delta_y$ , мм
		спинки и корыта профиля, радиуса входной кромки $R_1$				
		Класс точности				
		0	1	2		
До 25	До 100	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	-	-0,50	$\pm 0,10$
Свыше 25 до 60	Свыше 100 до 240	$\pm 0,15$	$\pm 0,20$	-	-0,50	$\pm 0,15$
Свыше 60 до 100	Свыше 240 до 360	-	$\pm 0,30$	$\pm 0,4$	-0,80	$\pm 0,20$
Свыше 100 до 160	До 400	-	$\pm 0,40$	$\pm 0,5$	-0,80	$\pm 0,20$

Таблица 2

**Предельные отклонения размеров и смещение профилей пера лопаток турбины, изготавливаемых из деформируемых материалов с использованием механической обработки или штамповки**

Диапазон значений длин хорды профиля пера, мм	Предельное отклонение размера, мм			хорды профиля пера $b$	Смещение профиля пера рабочей лопатки, мм	
	спинки и корыта профиля, радиуса входной кромки $R_1$				для выходной кромки профиля от теоретического положения в направлении оси $X\sigma_x$	в корневом сечении от номинального положения в направлении оси $Y\sigma_y$
	Класс точности					
	1	2	3			
До 20	-0,05	-0,15	-	$\pm 0,20$	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$
Свыше 20 до 30	-0,15	-0,20	-0,30	$\pm 0,20$	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$
Свыше 30 до 40	-0,20	-0,25	-0,30	$\pm 0,30$	$\pm 0,30$	$\pm 0,10$

Свыше 40	-0,20	-0,25	-0,30	±0,30	±0,30	±0,10
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Рабочая температура газов перед турбиной и необходимый ресурс работы требуют применения жаропрочных сплавов для изготовления деталей турбин, наличия эффективной системы внутреннего и наружного охлаждения, а также использования защитных покрытий (например, термобарьерных покрытий  $ZrO_2+Y_2O_3$  с подложкой NiCoCrAlY).

Большинство охлаждаемых деталей турбин имеет перфорационные отверстия. Для лопатки турбины высокого давления число таких отверстий диаметром 0,3 ... 0,6 мм достигает 100 и более штук.

Значительные центробежные силы, действующие на детали ротора турбины на рабочих оборотах (до 20 000 об/мин) влияют на выбор марки материала, его структуру, механические свойства, а также конструкцию и размеры присоединительных элементов детали. Материалы лопаток газовых турбин должны обладать высоким сопротивлением ползучести, усталости, высокотемпературной газовой коррозии, эрозионному разрушению, иметь высокую жаропрочность и пластичность и в тоже время удовлетворительные технологические свойства (обрабатываемость резанием, давлением, хорошие литейные свойства и др.). Сплав ЖС-6У, являющийся основным материалом лопаток турбины высокого давления ГТД АЛ-31Ф, относится к труднообрабатываемым. Коэффициент обрабатываемости  $k_{ЖС-6У} = 0,05$ , если принять  $k_{ст.45} = 1,0$ . Сплав имеет удовлетворительные литейные свойства. Механические свойства сплава ЖС-6У:  $\sigma_B^{900} = 880$  МПа;  $\sigma_{100}^{1000} = 220$  МПа;  $\sigma_{100}^{900} = 410$  МПа;  $\delta = 16\%$ . Температура плавления  $T_{плав.} = 1360^\circ\text{C}$ .

Наличие отверстий и концентраторов напряжений в охлаждаемой лопатке повышает роль предела выносливости. Характеристики материала в интервале рабочих температур должны обеспечивать работоспособность материала в упругой области без накопления пластической деформации при действии соответствующих нагрузок.

Перечисленные конструктивные особенности обуславливают применение специальных технологических методов формообразования, таких как литье по выплавляемым моделям, многокоординатная и фасонная лезвийная, электрохимическая и электрофизическая обработка, использование для создания мастер-моделей метода быстрого прототипирования, литье выплавляемых моделей в силиконовые формы, применение контактных и оптических измерительных систем для контроля моделей, отливок и готовых деталей. Для реализации указанных методов требуется использование специального и экспериментального технологического и контрольно-измерительного оборудования и

оснастки.

Лопатки турбины изготавливают из литейных и реже деформируемых жаропрочных сплавов. Заготовки из литейных сплавов получают литьем по выплавляемым моделям (прецизионное литье в оболочковые формы), а из деформируемых сплавов - горячим объемным деформированием.

Производство лопаток турбин из литых заготовок является более экономичным и технологичным, чем из штампованных. При вакуумной плавке технологические отходы металла не окисляются. Их можно использовать повторно при плавке. Это относится и к забракованным отливкам и лопаткам.

В настоящее время литье по выплавляемым моделям (в оболочковые формы) является единственным методом, который позволяет в промышленном масштабе наиболее экономично получать заготовки рабочих и сопловых лопаток турбины, не нуждающихся в последующей обработке. Несмотря на значительный прогресс в технологии и средствах производства литых лопаток ГТД, брак в литейных цехах все еще значителен. При литье охлаждаемых рабочих лопаток турбины он достигает 50%. Брак проявляется по причине коробления стержня, смещения и полома в процессе прокаливании формы и заливки ее сплавом (таблица 3).

Таблица 3

#### Отклонение толщины стенки лопатки ТВД

Тип лопаток	Вид брака, %				
	Отклонение от геометрических размеров	Засор, шлак	Рыхлота	Плены	Трещины
Рабочая I ступени	24...50	20...30	2,5...8,0	1,5...8,5	2,0... 14,0
Сопловая I ступени	24...50	22...33	2,0...3,5	1,2...6,0	0,5...7,5

В технологическом процессе изготовления отливки охлаждаемой лопатки турбины можно выделить следующие основные этапы: изготовление керамического стержня; изготовление выплавляемой модели лопатки; сборка моделей лопаток в блоки (секции); приготовление огнеупорной суспензии, окраска и сушка секций лопаток; удаление модельной массы из оболочек; прокатка оболочек; плавка металла, заливка оболочек и кристаллизация отливок; разрезка секций; удаление керамических стержней; контроль отливок лопаток.

Для изготовления стержней охлаждаемых деталей турбин применяются керамические смеси на основе  $ZrO_2$ , которые обладают более высокой прочностью и термостойкостью, чем смеси на основе  $Al_2O_3$ . При создании стержневой керамики решена задача формирования композиции, разрушающейся в щелочах. Технологический процесс получения стержня

можно разделить на несколько основных этапов: подготовка исходных материалов (сушка, измельчение и т.д.); приготовление стержневой смеси; прессование стержней; рихтовка сырых стержней; укладка стержней в короба; обжиг стержней (твердофазное спекание); извлечение стержней из коробов и обдувка стержней; контроль и зачистка стержней; пропитка стержней в растворе лака (КО-815) с выдержкой до прекращения выделения пузырьков воздуха; сушка стержней при температурах 80-100°.

Прочность на изгиб при длительном воздействии высоких температур является определяющим показателем качества стержней. Предельные значения прочности керамики при температурах 1300-1350°С составляют 8-11 МПа, что достаточно для сопротивления давлению жидкого металла.

В производстве отработаны две разновидности процесса изготовления модельной оснастки для литья охлаждаемых деталей турбины: фрезерованием на многокоординатных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и с применением технологий быстрого прототипирования. Модели лопаток формируются в разъемных стальных или металло-полимерных пресс-формах. Размеры рабочей зоны пресс-форм рассчитываются с учетом усадки модельного состава и металла отливки при охлаждении. Рабочие поверхности пресс-форм покрываются тонким слоем смазки (смесь 50%-го этилового спирта и 50%-го касторового масла). Стержень вкладывается в матрицу корыта пресс-формы. Собранный пресс-форма вакуумируется, заливается модельный состав, и производится прессование модели лопатки, затем зачистка облоя, заусенцев и контроль модели.

Сборка моделей лопаток в блоки (секции) производится в кондукторе, что обеспечивает высокую точность взаимного расположения моделей лопатки и литниковой системы.

Керамическая оболочка формируется из 7-12 последовательно наносимых слоев огнеупорной суспензии, получаемых керамической обмазкой и обсыпкой электрокорундом. Толщина каждого слоя составляет 1-1,5 мм. Закрепляющий слой наносят без обсыпки зернистым материалом. После нанесения каждого слоя производится сушка сначала на воздухе (в вытяжном шкафу) в течение 2 ч, а затем в аммиачно-газовой среде в течение 40-50 мин.

Модельные массы на основе мочевины и других водорастворимых связующих удаляются водой при температуре 25-35°С, подаваемой под давлением. Затем очищенная оболочка промывается в ванне с подкисленной водой. Вытопка модельной массы может выполняться в пароавтоклавах. Одним из наиболее современных образцов оборудования по удалению модельной массы из оболочек является бойлерклав фирмы "LBBC" (Англия).

Прокалка оболочек производится после удаления модельной массы и сушки. Оболочки помещают в камерную печь с температурой не выше 700°C, затем температура увеличивается до 1085±15°C, производится обжиг в течение 6-8 ч и последующее охлаждение печью до температуры 800°C.

Литьем получают заготовки с поликристаллической равноосной структурой, с направленной кристаллизацией и монокристаллические, имеющие столбчатую дендритную структуру. Высококачественные заготовки из жаропрочных сплавов можно получить, выплавляя их в вакуумных индукционных печах. После остывания металла в формах и разрезки секций проводится удаление керамических стержней.

Контроль полученных отливок подразумевает: выявление дефектов литья: пор, трещин; проверку целостности каналов охлаждения; наличие в полостях охлаждения фрагментов керамического стержня; оценку качества кристаллизации; контроль геометрических параметров отливки.

Среди методов изготовления пресс-форм на сегодняшний день выделяются автоматизированные методы, основанные на использовании единой математической модели детали и позволяющие перейти к выпуску изделий по новой технологии: без полного комплекта чертежей на пресс-формы и с включением электронной модели в качестве полноправного элемента в комплект выпускаемой документации.

В металлургическом производстве лопаток газовых турбин уже реализованы следующие технологии:

- компьютерное моделирование процесса заливки и кристаллизации отливки с использованием дифференциального термического анализа;
- изготовление восковых моделей на современных прессах;
- нанесение керамической оболочки на роботизированной линии;
- заливка лопаток на компьютеризированных установках;
- горячее изостатическое прессование лопаток с применением газостата;
- технология получения комбинированных конденсационно-диффузионных покрытий с использованием метода вакуумной плазменной технологии высоких энергий для нанесения подслоя, алитирования (хромалитирования), последующего горячего изостатического прессования и нанесения финишного слоя плазменным методом;
- бесконтактный контроль геометрии лопаток с использованием оптических систем;
- использование автоматизированных линий для контроля поверхностных металлургических дефектов и внутренних дефектов.

При традиционной технологии изготовления лопаток турбины подготовка

производства занимает 4-6 мес. Самой сложной проблемой является ручная окончательная обработка профиля рабочей части лопаток, которая выполняется на специальных шлифовальных станках абразивными кругами без охлаждения. На этой операции лопатки подвергаются периодически повторяющемуся местному нагреву и охлаждению, что приводит к неуправляемому процессу деформации. Контроль профиля осуществляется методом визуального сравнения с шаблонами, поэтому качество зависит от квалификации мастера.

В соответствии с современной технологией чертежи и модели изготавливаемых лопаток получают, используя систему UNIGRAPHICS, при этом выявляются все недостатки в чертежах. Проектирование модели отливки или штамповки проводят на основе модели детали в строгом соответствии с исходным чертежом и технологическими требованиями. Наличие электронной трехмерной модели отливки позволяет конструктору определить оптимальное направление разъема пресс-формы и сформировать поверхности разъема, а также установить возможность появления «затененных» зон в пресс-форме, чтобы помочь конструктору спроектировать ее без отрицательных углов по отношению к разъему. Создание электронной модели отливки занимает по трудоемкости в среднем 100 ч – для рабочих лопаток турбины, 250 ч – для наиболее сложных лопаток с вихревой матрицей в полости охлаждения. При получении электронной модели лопатки от разработчика трудоемкость самого моделирования сокращается в 4-5 раз.

На следующем этапе работ конструктор проектирует компоновочный чертеж, учитывая возможности станка для механической обработки поверхностей оснастки. Трудоемкость проектирования компоновочного чертежа составляет 20 ч в случае простого варианта (при разъеме пресс-формы в одной плоскости) и 40-50 ч при наличии затененных элементов, требующих оформления дополнительными вставками [3].

При наличии компоновочного чертежа пресс-формы и электронной модели отливки конструктор создает на компьютере математическую модель пресс-формы в течение двух дней, а затем передает эту информацию технологу-программисту, который на ее основе в течение двух дней разрабатывает задающие программы для станков с ЧПУ для обработки деталей пресс-форм или медных электродов для последующей обработки деталей пресс-формы на электроэрозионных станках. Детали с постоянным по одной из координат сечением обрабатываются на проволочных электроэрозионных станках. Одновременно конструктор передает инструментальщикам размеры заготовок. Заготовки в виде брусков, шлифованных по базовым поверхностям, поступают на участок станков с ЧПУ, где и подвергаются обработке по программам. В среднем пресс-форма для рабочей лопатки

турбины (все ее детали, участвующие в формообразовании восковой модели) изготавливается на станках с ЧПУ окончательно в течение 50-70 ч.

Параллельно по эскизам изготавливают сопутствующие элементы пресс-формы. После слесарной обработки проводят контроль геометрических параметров на контрольно-измерительной машине (КИМ) с программным управлением, точность измерения которой составляет 0,005-0,015 мм, что значительно превышает точность измерения шаблонами. Контрольно-измерительная машина использует при контроле данные электронной модели. Далее пресс-форма передается в литейный цех, который ее аттестует по результатам измерений параметров полученной отливки.

Такой способ изготовления пресс-форм с применением элементов автоматизации позволяет значительно ускорить подготовку производства и уменьшить затраты, повысить качество пресс-форм (профильная поверхность пресс-формы изготавливается с отклонением от электронной модели в пределах 0,05 мм). С момента согласования технических требований к отливке рабочей лопатки турбины до сдачи готовой пресс-формы в литейный цех затрачивается в среднем 2 мес.

Описанная технология позволяет: уменьшить количество специальной технологической оснастки благодаря применению унифицированных базовых поверхностей; обеспечить стабильное качество за счет использования современного обрабатывающего и контрольного оборудования; существенно сократить цикл изготовления одного комплекта лопаток (до 0,5-1,5 мес.); изготовить лопатку по образцу, без рабочих чертежей, за счет применения измерительной машины; снизить себестоимость благодаря использованию более дешевой заготовки; значительно сократить длительность подготовки производства; сократить численность рабочих.

Развитие вычислительной техники, способной оперировать трехмерными моделями в сочетании с концентрированными мощными точечными источниками энергии (в том числе и лазерными), позволило создать целое направление технологий быстрого прототипирования (Rapid Prototyping – RP).

Сложная высокотехнологичная продукция требует проведения долгосрочных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР). Нужно решить не только конструкторские задачи, изготовить множество экспериментальных образцов моделей, но и провести весь комплекс экспериментально-исследовательских и научно-исследовательских работ, обеспечить технологическую подготовку производства. На этапе НИОКР RP-технология решает эти задачи в десятки раз быстрее, несмотря на большие затраты, связанные с приобретением специального оборудования, а подготовка производства с

помощью RP-технологий не только сокращается по срокам, но и обеспечивает получение готовой продукции высокого качества.

Одним из распространенных RP-методов является стереолитография (Stereolithography). Стереолитография – процесс получения прототипов деталей по данным трехмерного компьютерного проектирования. Принцип технологии заключается в послойной полимеризации (отверждении) плоских контуров (в плоскости XY) которые, накладываясь друг на друга, по оси Z формируют объемную модель из фотополимера. Стереолитография основана на процессе фотополимеризации, то есть превращения жидкости в твердое тело при воздействии света, для чего в современных установках стереолитографии применяют твердотельный лазер.

В технологический комплекс входит комплект оборудования, позволяющий пройти путь от трехмерной математической модели до получения детали или оснастки из материалов, предусмотренных конструкторской документацией.

Первым шагом в процессе подготовки данных для стереолитографии является передача поверхностных или объемных моделей в форматы, известные как файлы стереолитографии STL. Формат STL-файлов – это объемное изображение CAD-модели, все поверхности которой представлены в виде треугольников. Формат STL представляет координаты X, Y и Z вершин каждого треугольника и единичный вектор нормали для каждого треугольника, который используется для определения пространственной ориентации внутреннего и внешнего слоя. Анализ STL-файла заключается в проверке его на ошибки, к которым могут относиться: зазоры между треугольниками, наложение треугольников друг на друга, избыточные треугольники, неправильное направление нормали. Последними этапами подготовки являются расслоение модели на поперечные слои и передача данных на управляющий компьютер установки для стереолитографии. Окончательная обработка может включать шлифование песком, пескоструйную очистку, полирование, окрашивание или окраску.

Метод получения выжигаемых моделей на современных стереолитографических установках позволяет быстро (за 24 дня) получить высокоточные прочные модели, минуя дорогостоящие и трудоемкие операции по изготовлению металлической оснастки. В результате качественные отливки можно изготовить в течение 1-4 нед. (в зависимости от геометрии детали), по сравнению с 18-20 нед. традиционным способом [4].

Проработанная технологом математическая модель передается на участок прототипирования для создания выжигаемой стереолитографической модели. Изготовленная и обработанная выжигаемая модель проходит контроль на трехмерной оптической системе

для проверки размеров и геометрических параметров поверхностей. После получения результатов контроля выжигаемая модель передается на литейный участок, где происходит подготовка модели к выжиганию. Процесс подготовки заключается в добавлении литниковой системы, питателей и нанесении оболочки. Далее модель выжигается, и в оболочку заливается металл. В результате за короткий срок получается отливка детали, готовая для дальнейшей механической обработки.

### **Библиографический список**

1. Испытания, обеспечение надежности и ремонт авиационных двигателей и энергетических установок: Учеб. пособие / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, К.А. Малиновский, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – 540 с.: ил.

2. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство лопаток газотурбинных двигателей / Под ред. В.В. Крымова. М.: Машиностроение – Полет, 2002. 376 с., ил.

3. Технологичность конструкции изделия: Справочник / Ю.Д. Амиров, Т.К. Алферова, П.Н. Волков и др.; Под общ. ред. Ю.Д. Амирова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990. - 768 с.: ил.

4. Завалишин И.В., Потапов А.Ю., Силуянова М.В. Анализ конструктивно-технологических решений в процессе создания газотурбинных двигателей // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». - 2008. - №5. - С. 51-57.

### **Сведения об авторах**

Завалишин Игорь Владимирович, доцент Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, к.т.н., e-mail:info@itbu.ru

Финогеев Алексей Германович, профессор Российского государственного университета инновационных технологий и предпринимательства, д.т.н., e-mail:rassiec@mail.ru