

На правах рукописи



ХАРИНОВА Юлия Юрьевна

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА
ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБОЛОЧЕК
МЕТОДОМ НАМОТКИ**

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ижевск, 2017

Работа выполнена в Воткинском филиале ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Воткинск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Уразбахтин Федор Асхатович,
Воткинский филиал ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова», заведующий кафедрой «Ракетостроение»

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
Куликов Геннадий Григорьевич, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления»;

Доктор технических наук, профессор,
Аношкин Александр Николаевич, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой механики композиционных материалов и конструкций;

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Научно-производственное объединение «Искра» (г.Пермь)

Защита состоится «25» января 2018 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М. Т. Калашникова по адресу: 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., доцент



В.Н. Сяктерев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

Стеклопластиковые оболочки широко применяются в изделиях промышленной техники, так как обладают высокой прочностью, надежностью и малым весом. В то же время, их производство требует больших затрат из-за высокой стоимости компонентов, повышенных требований к качеству изделий и большой длительности отработки технологии изготовления, связанной с возникновением многочисленных проблемных (критических) ситуаций. Такие ситуации приводят к образованию разнообразных дефектов, не допустимых для изделий ракетной тематики.

Решением этой проблемы является разработка методики прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек, использование которой на этапе проектирования изделий позволит сократить затраты на их отработку, производство и эксплуатацию.

Для построения методики, процесс изготовления стеклопластика необходимо представить в виде сложной технической системы, а ее исследование проводить с помощью методов системного анализа (экспертных оценок и дерева целей), позволяющих выявлять связи и закономерности функционирования и развития таких систем.

Степень разработанности темы исследования

В связи с интенсивным развитием композиционных материалов и технологий их изготовления, исследованию стеклопластиков посвящено значительное количество научных работ. Однако проблема прогнозирования качества изделий стала ставиться относительно недавно.

В конце прошлого столетия стали предприниматься попытки математического моделирования процессов изготовления стеклопластиков с целью прогнозирования свойств и оптимизации их производства.

Значительный вклад в этой области внесли такие выдающиеся ученые как Образцов И.Ф., Канович М.З., Трофимова Н.Н., Криканов А.А., Васильев В.В. Среди их последователей можно отметить В.А. Александрова, С.Н. Арсентьеву, Н.В. Голубеву, Л.И. Дворкина, В.В. Кузьмина, М.А. Кустова, А.В. Мендель, А.В. Речкалова и др.

Однако, в исследованиях этих авторов, как и во многих других, процесс изготовления стеклопластиков не рассматривается как техническая система, а модели строятся без учета возникновения проблемных ситуаций и в них используется ограниченное количество параметров.

Наличие современных научных трудов по теме исследования, позволяет сделать вывод о том, что на сегодняшний день проблема прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек, которую предполагается решить в данной работе, является актуальной.

Область исследования: Работа выполнена в соответствии со следующими пунктами паспорта специальности 05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике):

п.10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах;

п.11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем.

Объектом исследования является процесс изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки, **предметом исследования** - проблемные (критические) ситуации, возникающие при его реализации.

Цель работы:

Разработка методики прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки, позволяющей в практическом применении сократить затраты на отработку, производство и эксплуатацию продукции при сохранении необходимого уровня проявления свойств.

Для этого необходимо решить следующие **задачи:**

- исследование сложной технической системы и выявление взаимосвязей между ее элементами для разработки количественных оценок, определяющих состояние процесса изготовления стеклопластиковой оболочки, построение алгоритма прогнозирования качества намотки и соответствующей математической модели;
- выбор критериальных показателей и чувствительных параметров процесса изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки;
- разработка выражений частных критериальных показателей, построение функций обобщенных критериев;
- моделирование процесса изготовления стеклопластиковой оболочки с целью определения технологических параметров, обеспечивающих создание качественной оболочки с точки зрения следующих критериев оптимизации: максимальной прочности и экономичности, минимальной массы, а так же максимального обобщенного критерия.

Методы исследования: Для решения поставленных задач использованы аппараты: математического моделирования, теорий систем и системного анализа, оптимизации и математической статистики, а также прикладных методов восстановления зависимостей термодинамики, механики, материаловедения и проектирования летательных аппаратов.

Научная новизна результатов, полученных в диссертационной работе, состоит в следующем.

1. Определены структурная и функциональная схемы технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки», выявлены связи между элементами и найден набор параметров, характеризующих их состояние. Построен алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек и соответствующая математическая модель.
2. Предложены критериальные показатели оптимизации параметров технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки». Найдены управляющие параметры, варьирование которыми позволяет эффективно изменять состояние системы.

3. Разработаны 73 частных критериальных показателя, представляющих собой специальные функции состояния (показатели критичности), которые в совокупности составляют два обобщенных минимаксных показателя (интегрированный и качественный). Их применение позволяет свести многокритериальную задачу прогнозирования качества процесса производства стеклопластиковых оболочек к однокритериальной и учесть более 150 различных по физической природе параметров.

4. Построены новые математические модели намотки, которые являются основой методики прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковых оболочек и средством интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений при производстве.

Достоверность результатов подтверждена данными, полученными путем экспериментальных исследований и сравнением с результатами испытаний в производственных условиях.

Разработанная методика и соответствующие математические модели апробированы и внедрены на ОА «Воткинский завод» (г. Воткинск), что документально подтверждается актом внедрения.

Практическое значение. Использование разработанной методики прогнозирования качества деталей из стеклопластика, изготавливаемых методом намотки, позволяет практически снизить количество брака при изготовлении на 20 %, более чем на 40% сократить длительность отработки новых композиционных изделий и осуществлять адаптацию процесса изготовления к изменяющимся условиям производства.

Полученные результаты исследования являются основой для интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в процессе создания качественных оболочек из стеклопластика, дополняя существующие эмпирические данные специальными количественными оценками.

Материалы исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т.

Калашникова» кафедры «Ракетостроение» при изучении студентами специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» курсов «Теплозащитные покрытия», «Материаловедение», «Изготовление деталей и узлов летательных аппаратов», «Производство летальных аппаратов», «Составление технологических процессов и подбор оборудования», «Теория поиска и принятия решений».

Предложенные математические модели могут быть представлены в виде программного комплекса с удобным интерфейсом, адаптированного под любую операционную систему, так как их реализация не требует применения вычислительных средств с особыми характеристиками.

На защиту выносятся:

1. Алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек, основанный на выявлении и количественной оценке критических ситуаций, а так же структура математической модели и принцип ранжирования критериальных показателей.
2. Критериальные показатели оптимизации параметров функционирования технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» и ее управляющие параметры.
3. Выражения 73 критериальных показателей (показателей критичности) и двух обобщенных минимаксных критериев, позволяющих оптимизировать технологические режимы для получения оболочки с удовлетворительным качеством одновременно по всем свойствам.
4. Результаты моделирования процесса изготовления стеклопластиковой оболочки и их использование в производстве.

Апробация работы: Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на научных семинарах кафедры «Ракетостроение» Воткинского филиала Ижевского государственного технического университета им. М.Т.Калашникова (2012-2017 г), г. Воткинск;

- на XXIX и XL Научно-технических конференциях на базе АО «Воткинский завод» (2013, 2014 г.) г. Воткинск;
- на конференции «Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке-2013» ФГБОУ ВПО ИжГТУ, 2013 г., г. Ижевск;
- на XXIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Электромеханические и внутрикамерные процессы в энергетических установках, струйная акустика и диагностика, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий». КВВКУ, 2011 г., г. Казань;
- на Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012», МАИ, 2012 г, г. Москва;
- на II Межрегиональной научно-практической конференции «Социально-экономическое развитие моногородов: традиции и инновации», 2016 г, г. Воткинск.

Публикации.

Результаты исследований отражены в девяти печатных работах [1-9], в том числе статьи [1,2,7,9] опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК, статьи [2,7,9] входят в базу данных SCOPUS .

Опубликованные работы полностью отражают основное содержание диссертационной работы. Все основные положения и результаты, выносимые на защиту, отражены в публикациях автора: по главе 1 – [1,2,3,5], по главе 2 – [4,6], по главе 3 – [8], по главе 4 – [7], по главе 5 – [9]. Работы написаны совместно с научным руководителем или другими членами научного коллектива.

Личный вклад соискателя.

Математические модели, методики, результаты численных и экспериментальных исследований, их анализ и интерпретация, представленные в диссертации, получены автором лично. Автором также

произведена адаптация алгоритма прогнозирования качества, основанного на теории критических состояний, применительно к изготовлению стеклопластиковых оболочек методом намотки: введение новых процедур, разработка и апробация функции эффективности с целью подтверждения достоверности.

Выбор приоритетов, направлений, методов исследования, формирование структуры и содержания работы выполнены в ходе активного обсуждения с научным руководителем Уразбахтиным Ф.А.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы – 195 стр.

Содержание работы:

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель, поставлены задачи, определена научная новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе доказывается сложность и многофакторность объекта исследования, для чего выполнен обзор исследований по применению стеклопластиков и анализ существующих технологических методов их создания.

Установлено, что реализация существующих технологических методов производства стеклопластиковых деталей приводит к возникновению брака из-за появления проблемных (критических) ситуаций, возникающих при сбоях оборудования, применении не качественных компонентов стеклопластика и действии человеческого фактора.

Поскольку, наличие внутренних и поверхностных дефектов в стеклопластике считается недопустимым, то при создании оболочек необходимо отслеживать их качество при выполнении каждой технологической операции. Предлагается это проводить с помощью моделирования.

Обычно, в математических моделях изготовления стеклопластиковых оболочек используется ограниченное количество параметров и тогда получаемые оценки качества значительно отличаются от действительных. Кроме того, при рассмотрении качества изготовления используется обычно всего лишь один критерий (например, прочность или масса) без учета влияния других факторов и возникновения критичностей.

Вследствие этого, применение традиционных математических моделей не позволяет достаточно точно оценивать качество выполнения процесса изготовления оболочки.

Для повышения качества стеклопластиковых изделий необходимо учитывать множество параметров, отслеживать развитие возникающих критических ситуаций и прогнозировать изменение свойств оболочек. Это представляется возможным сделать только при использовании методов экспертных оценок и дерева целей системного анализа.

Во **второй главе** построены структурная и функциональная схемы сложной технической системы «Изготовление стеклопластиковой оболочки методом намотки» и выявлены связи между ее элементами.

Производство оболочки состоит из нескольких взаимосвязанных процессов, на развитие которых оказывают влияние параметры окружающей среды, возможности оборудования и производства, а также управляющие воздействия, которые совместно составляют сложную техническую систему. (Рис. 1).

Элементами этой системы являются подсистемы, связанные между собой функциональными зависимостями и связями (Рис.2).

Связи между элементами сложной технической системы «Процесс изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки» оцениваются набором общих параметров (например, одним из параметров связи между оборудованием и оболочкой является максимальный диаметр оболочки- D_{max}). Именно с нерасчетным изменением таких параметров и связано возникновение большинства предельных состояний.

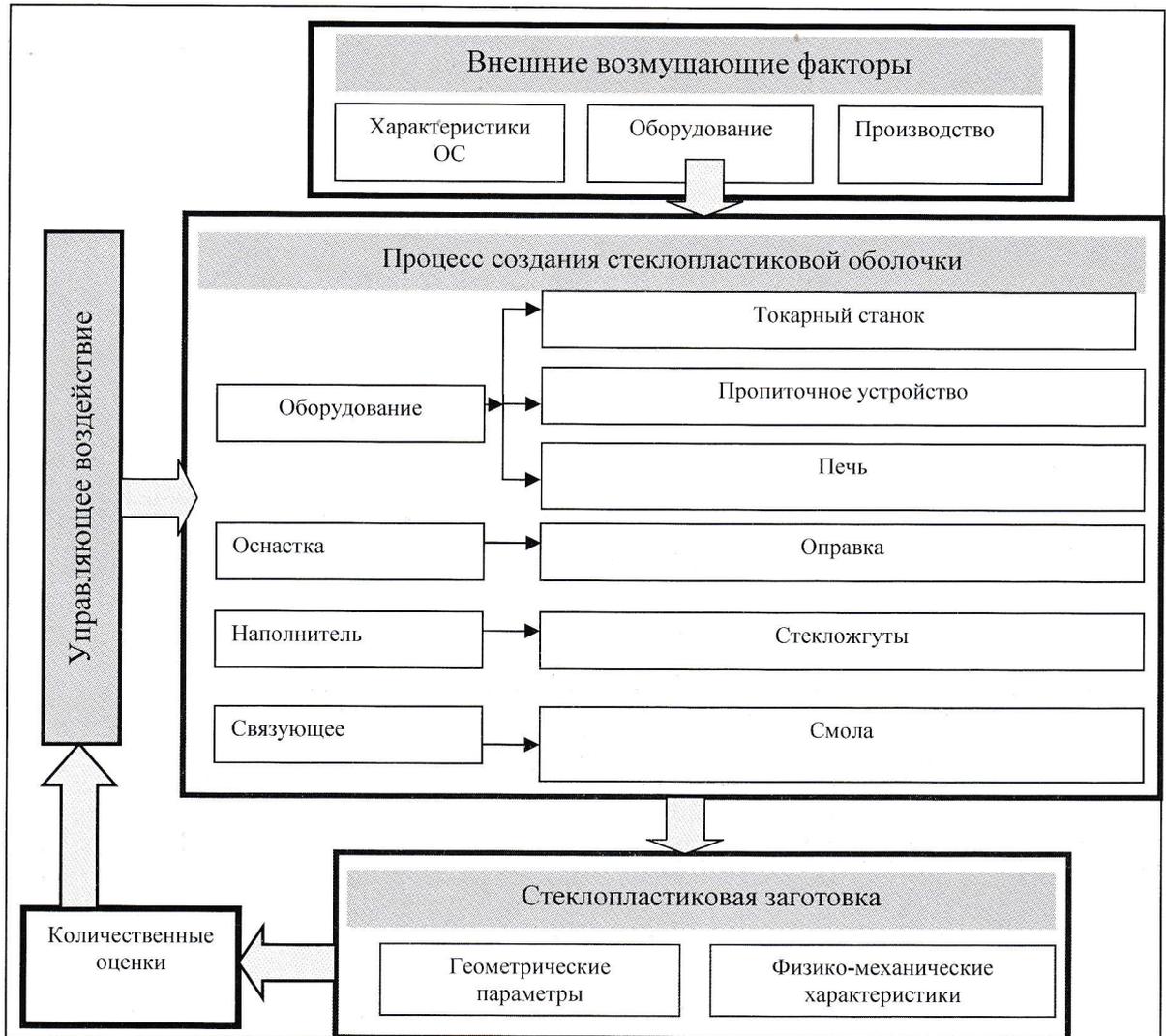


Рисунок 1 – Структурная схема сложной технической системы «Процесс изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки»

Каждый из элементов технической системы обладает собственными свойствами, которые оцениваются комплексом параметров.

Предполагается, что когда значения параметров не находятся в установленном интервале, имеет место проблемная (или в терминологии теории критичности - критическая) ситуация. Ее развитие приводит к предельному состоянию - моменту, когда изменения свойств стеклопластиковой оболочки становятся необратимыми, а сама система не может достичь цели функционирования.

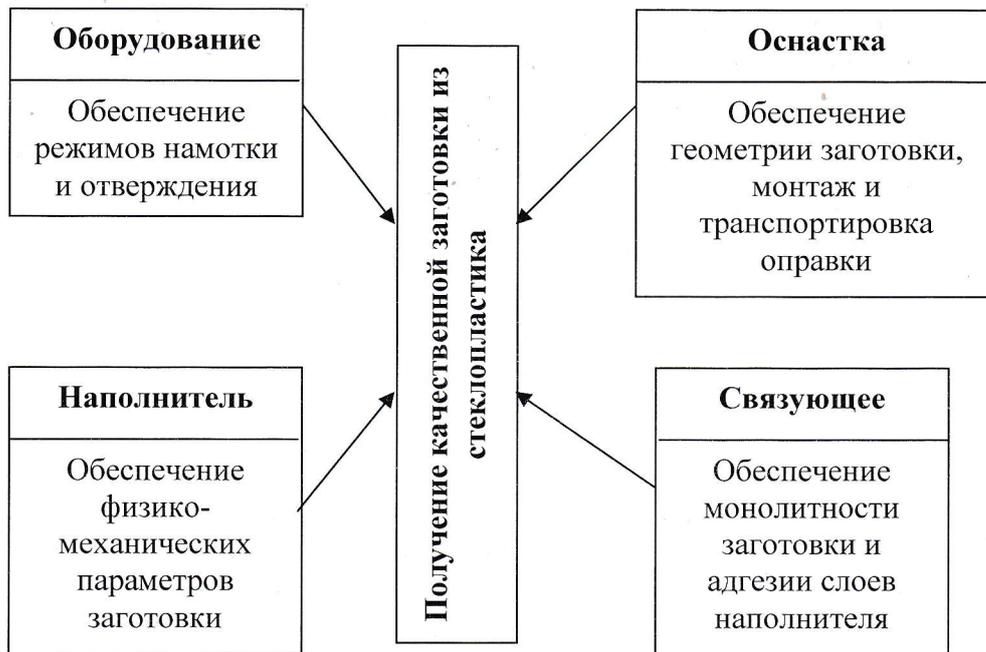


Рисунок 2 – Функциональная схема сложной технической системы «Процесс изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки»

Степень приближения значений параметров к критической ситуации оценивается специальными количественными оценками – критериальными показателями.

В общем случае, реализация математической модели сводится к определению значений двух обобщенных критериальных показателей:

$$M = \{Y_k\}; \{Y_a\} \quad (1)$$

Интегрированный обобщённый критерий $-Y_a$ представляет собой некоторое усредненное значение значений частных критериев, а качественный Y_k - учитывает относительный вклад каждого критерия с помощью коэффициентов, назначенных экспертным советом. При этом, (при отсутствии специальных требований) оптимальными считаются технологические режимы, соответствующие максимальным значениям минимаксных критериев.

$$Y_k = \sum_{i=1}^{m_i} Y_{ik} / m_i; Y_a = \sum_{i=1}^{m_i} Y_{ia} / m_i \quad (2)$$

$$Y_{ik} = \sum_{j=1}^{n_j} Y_{i,jk} / n_j, Y_{ia} = \sum_{j=1}^{n_j} Y_{i,ja} / n_j \quad (3)$$

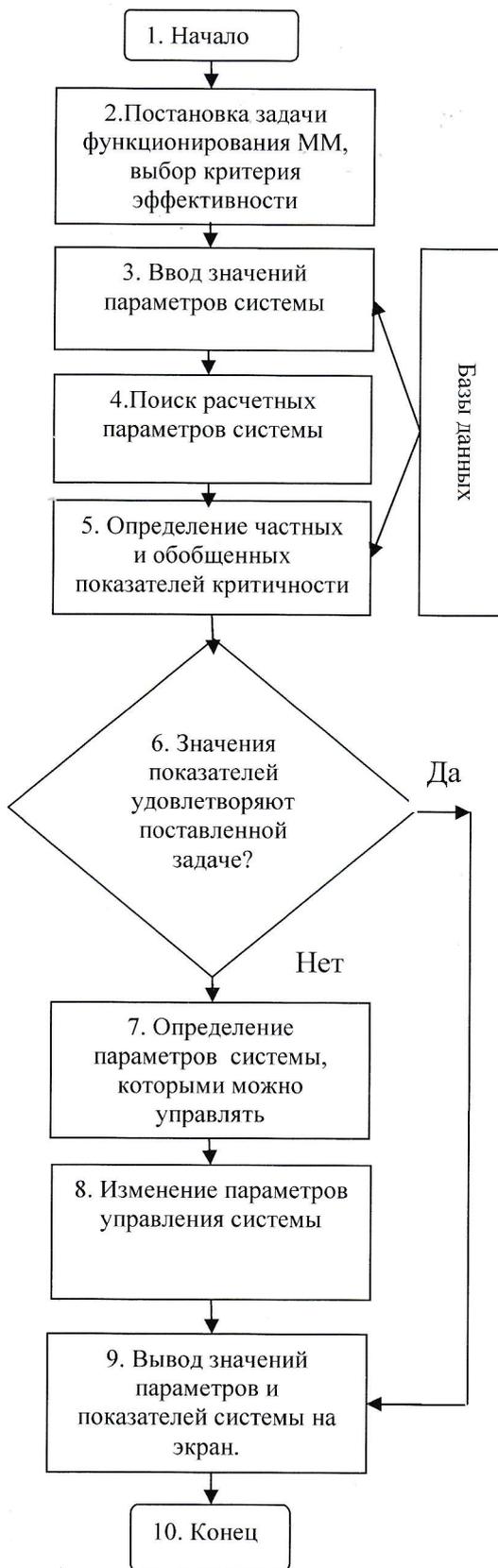
$$Y_{i,ja} = \{y_{i,j,l}, i=1..3, j=1, m_i, l=1, n_j\} \quad (4)$$

$$Y_{i,jk} = A \sum_{i=1, j=1}^{p_{i,j}} (y_{i,j,l})_{vp} / p_{i,j} + B \sum_{i=1, j=1}^{r_{i,j}} (y_{i,j,l})_p / r_{i,j} + C \sum_{i=1, j=1}^{s_{i,j}} (y_{i,j,l})_{np} / s_{i,j} \quad (5)$$

$$y_{i,j,l} = \begin{cases} 1, & \text{если } D_{i,j,l} > 1 \\ D_{i,j,l}, & \text{если } 1 \geq D_{i,j,l} \geq 0, \\ 0, & \text{если } D_{i,j,l} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$D_{i,j,l} = f(x_i) \quad (7)$$

где Y_k, Y_a - качественный и интегрированный обобщенный минимаксный критерий процесса изготовления стеклопластиковой оболочки; Y_{ik} и Y_{ia} - качественный и интегрированный критериальные показатели i -го этапа изготовления; $Y_{i,ja}$ и $Y_{i,jk}$ - качественный и интегрированный критериальные показатели процесса в i -м этапе изготовления; $y_{i,j,l}$ - частный критериальный показатель процесса изготовления стеклопластика; $D_{i,j,l}$ - функция от параметров технологической системы - x_i ; n_j - количество показателей $Y_{i,ja}$ и $Y_{i,jk}$ в j -м процессе; m_i - количество показателей Y_{ik} и Y_{ia} в i -м этапе; $p_{i,j}$ - количество особо ответственных показателей в j -м процессе i -го этапа изготовления; $r_{i,j}$ - количество ответственных показателей в j -м процессе i -го этапа изготовления; $s_{i,j}$ - количество не ответственных показателей в j -м процессе i -го этапа изготовления; $i = 1..3$ - номер этапа изготовления оболочки, предполагается: 1- пропитка, 2- намотка, 3 - отверждение; j - номер процесса в i -м этапе; l - номер частного критериального показателя j -го процесса; A, B, C - коэффициенты значимости, назначенные экспертным советом (в данном случае, 0,6; 0,3 и 0,1 соответственно).



В (5) индексом « vr » обозначены показатели, которые зависят от пяти и более параметров, « p » - показатели, которые имеют от 3 до 5 аргументов- параметров, « nr » - показатели, показатели, зависящие менее чем от трех параметров.

Безразмерные показатели - $U_{i,j,l}$ в форме (6) позволяют оценивать степень приближения значений параметров, имеющих различную физическую природу к критическим. Все критериальные показатели качества проранжированы интервале от 0 до 1,0.

Считается что при значениях показателя $U_{i,j,l}$ в диапазоне от 0 до 1,0 появление критической ситуации маловероятно. Она возникает в случае, если $U_{i,j,l} = 0$. Одновременно, если показатель равен 1,0, то значение соответствующего параметра является оптимальным для достижения удовлетворительного качества оболочки с точки зрения выбранного критерия.

Для достижения цели исследования предлагается следующий алгоритм прогнозирования качества изготовления

Рисунок 3 – Алгоритм методики прогнозирования качества изготовления стеклопластиковой оболочки (Рисунок 3).

На начальном этапе решается задача функционирования модели и выбирается критерий оптимизации (например, оценка функционирования системы с точки зрения получения оболочки с высокой прочностью), после чего

задаются начальные и определяются дополнительные параметры (подключаются базы данных).

Затем, рассчитываются значения обобщенных и частных критериальных показателей. В случае, когда значения показателей не входят в диапазон $[0;1,0]$, производится варьирование управляющими параметрами процесса. В конечном итоге, определяется совокупность значений параметров системы, отвечающих поставленной задаче.

В **третьей главе** найдены параметры технической системы «Изготовление стеклопластиковых оболочек методом намотки», определены методы и средства их измерений и предложены критерии оптимизации.

Для построения модели используется 157 начальных параметров, среди которых шероховатость оправки - Ra , средний диаметр элементарного волокна - d , парциальное давление материала - P_n^m , интенсивность отверждения - i_n , угол намотки - α и 56 вычисляемых (коэффициент весовой плотности стеклопластика - H_s , погонное усилие стекложгута на формуемую поверхность - N , площадь оправки, покрытая смазкой или клеем - S_l и др.)

Из них выделены параметры управления, позволяющие эффективно изменять состояние системы. К таким параметрам относятся угол смачивания наполнителя связующим - $\theta_{см}$, скорость протяжки ленты армирующей основы - V_1 , вязкость - ν_0 и масса связующего - M_c , длительность взаимодействия наполнителя с армирующей основой - τ_l , расход связующего - Q , температура - $T_{пл}$ и длительность - $\tau_{пл}$ полимеризации и др.

В **четвертой главе** разработаны в форме критериальных показателей 73 количественные оценки приближения к критическим ситуациям на каждом этапе изготовления оболочки, связанные со свойствами наполнителя, связующего, параметрами оборудования и оснастки и процессами пропитки, намотки и отверждения.

Например, возникновение критических ситуаций, связанных с оборудованием оценивается показателями $У_{2.4.1}$, $У_{2.4.3}$, $У_{2.4.5}$ - $У_{2.4.9}$, $У_{3.1.1}$ - $У_{3.1.6}$,

Уз.2.2 – Уз.2.5, Уз.2.9 – Уз.2.11, Уз.2.13, Уз.2.14, Уз.3.1, Уз.3.2, У1.1.4, У1.1.5, У1.3.5, У1.3.6, У1.3.8. При этом, учитываются такие ситуации как несоответствие натяжения стекложгута нормативному, выход значения температуры отверждения за рамки допустимого диапазона (скачки), падение давления до нерасчетного значения и др.

Для каждого выражения показателя вида (6) разработаны функции $D_{i,j,l} = f(x_i)$.

Например, критическая ситуация, связанная со значением поверхностной плотности армирующей основы, не удовлетворяющей техническим условиям, оценивается показателем $y_{1.2.4}$ вида (6), у которого

$$D_{1.2.4} = 1 - \frac{(\rho''_n - \rho_n)^2}{2 \cdot \Delta_{1.4}^2}, \quad (7)$$

где ρ_n - поверхностная плотность армирующей основы, $\rho''_n \pm \Delta_{1.4}$ - нормативная поверхностная плотность армирующей основы с допуском.

Всего, математическая модель содержит 73 частных критериальных показателя.

В пятой, заключительной, главе представлено решение прикладной задачи прогнозирования качества изготовления стеклопластиковой оболочки и оптимизации параметров системы исходя из выбранных критериев.

При установленных исходных данных, получено решение задачи определения параметров технической системы, при которых достигается удовлетворительное качество оболочки одновременно по всем параметрам.

В этом случае значения обобщенных минимаксных критериев $\{Y_a\}$, $\{Y_k\} \rightarrow 1$.

Такому технологическому режиму соответствуют угол намотки - α , равный 50° и температура отверждения 390°K .

В этом случае, значение интегрированного критериального показателя - Y_a процесса равно 0,981, а значение о качественного - Y_k - 0,990.

В результате моделирования были установлены зависимости выходных параметров оболочки, таких как прочность, масса и требуемое количество связующего от параметров компонентов стеклопластика.

Так же были рассмотрены задачи оптимизации параметров технической системы с целью получения оболочки с минимальной массой, максимальной прочностью и экономичностью.

Для оптимизации параметров по прочности используется частный критерий с целевой функцией

$$\sigma_{cp} \xrightarrow{x_i} \max, \quad (8)$$

где σ_{cp} - средняя приведенная прочность, x_i - совокупность зависимых параметров.

$$x_i = \{a; \xi; d_1; d_2; d_5; \alpha; \sigma_c\}, \quad (9)$$

где a – количество пасм одного направления d_1, d_2, d_5 – диаметры волокон и нитей; ξ – коэффициент упаковки волокон в нити; α – угол намотки; σ_c – предел прочности связующего.

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_p^c + \sigma_c^c}{2} \quad (10)$$

$$\sigma_p^c = 2 \cdot [(\sigma_a \cdot \cos^2 \alpha - \sigma_c) \nu H_0 + \sigma_c] \quad (11)$$

$$\sigma_c^c = 0,5 \cdot H_0 (2\sigma_a \nu \cos^2 \alpha - \sigma_c) + \sigma_c (1 + H_0) \quad (12)$$

где σ_p^c, σ_c^c – действительные пределы прочности стеклопластика на растяжение и сжатие; $H_0 = \xi \frac{a \cdot n}{a \cdot n + m}$ – коэффициент объемной плотности;

$m = \frac{e}{d}$ – относительная величина технологического зазора; $\mu = \frac{d_1}{d_2}$ –

характеристика сплющивания нитей; $\bar{d} = 0,9974d$; d_1, d_2 – толщина и ширина жгута; a – количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки; $n = \frac{d_1 d_2}{d_5^2}$ – количество нитей в жгуте; α – угол армирования

(намотки); ψ_1 - коэффициент неравномерности натяжения нитей в стекловолоконном жгуте; ξ - коэффициент упаковки волокон в нити; σ_c - предел прочности материала связующего; d_s - средний диаметр стекловолоконной нити; γ_1 - объемная масса стекловолоконной нити; $\sigma_a = \psi_1 H_0 \sigma_b^{min} \cos^2(\alpha)$ - прочность армирующей основы; σ_b^{min} - минимальный предел прочности стекловолокон при конкретной разрывной длине; ψ_1 - коэффициент неравномерности натяжения нитей в стекловолоконном жгуте; $\nu = \frac{a_{1s}}{a_{1s} + a_{2s}}$ - анизотропный критерий; a_{1s} , a_{2s} - количества стекловолокон в арматуре стеклопластика в направлениях 1 и 2.

При этом устанавливаются следующие ограничения:

$$\left[\begin{array}{l} 0,5 \leq y_{2.2.4} \leq 1; 0,5 \leq y_{2.2.6} \leq 1; 0 < y_{2.4.2} \leq 1; 0 < y_{2.4.4} \leq 1; \\ 0,5 \leq y_{2.4.5} \leq 1; 0,5 \leq y_{2.4.9} \leq 1; 0,85 \leq Y_{2a} \leq 1; x_i = x_i^n \pm \Delta_i \end{array} \right] \quad (13)$$

В выражении (13) x_i^n - нормативные значения зависимых параметров, Δ - допуск на изменение их значений.

Установлено, что максимальные значения средней приведенной прочности - 281,587 МПа и пределов прочности оболочки на растяжение и сжатие 519,806 МПа и 43,369 МПа соответственно, достигаются при количестве пасм одного направления, равном 16 шт, значении коэффициента упаковки волокон в нити - 0,8, среднем диаметре стекловолоконной нити - 0,0021 м, толщине жгута - 0,006 м, ширине жгута - 0,008 м, угле намотки - 47,15 ° и пределе прочности связующего - 260 МПа. При этих значениях параметров полностью исключается появление критических ситуаций.

При оптимизации параметров технической системы для получения максимально экономичной оболочки, целевая функция будет иметь вид:

$$\{Y_a\}, \{Y_k\} \xrightarrow{x_i} [\min] \quad (14)$$

где x_i - совокупность зависимых параметров (67 изменяемых параметров в т. ч. угол намотки, температура отверждения, шаг намотки и др.).

В этом случае, единственным ограничением будет

$$y_{i.j.l} \longrightarrow 0 \quad \text{но} \quad y_{i.j.l} \neq 0 \quad (15)$$

Математическим моделированием были установлены значения 67 параметров, при которых оболочка оказывается наиболее экономичной и исключено появление критических ситуаций.

Это удастся достичь при значении угла намотки 48° , предельной вязкости связующего, при которой происходит полное заполнение пор - 22,4 Па·с, и угловой скорости вращения шпинделя намоточного станка - 17,9 об/мин.

При реализации технологического процесса по этим параметрам, интенсивность проявления свойств минимальна, а вероятность возникновения критических ситуаций значительно увеличивается. Тем не менее, качество оболочки остается на приемлемом уровне, что доказывают результаты моделирования.

Тогда, интегрированный критерий - Y_a процесса равен 0,507, а качественный - Y_k - 0,785.

При оптимизации параметров технической системы с целью получения оболочки с минимальной массой использовались два критерия: наивысшее качество оболочки по всем параметрам или ее максимальная экономичность.

В этом случае, целевая функция оптимизации будет иметь вид:

$$G_{заг} \xrightarrow{x_i} \min \quad (16)$$

$$G_{заг} = G_{св} + G_a \quad (17)$$

$$x_i = \{a; \xi; d_1; d_2; d_5; \gamma_{cm}; d_B; L_0\}; \quad (18)$$

$$G_a = 0,12 \gamma_{cm} D_{0cc} \delta_0 H_n \cdot L_n \left(1 + \frac{\delta_0}{2D_{0cp}} \right) \quad (19)$$

$$G_{ca} = G_a \frac{1 - H_6}{H_6} \quad (20)$$

где x_i - совокупность зависимых параметров γ_{cm} - плотность материала, из которого изготовлено стекловолокно; d_6 - диаметр элементарного волокна; L_0 - длина оболочки; d_1 и d_2 - толщина и ширина жгута; a - количество пасм одного направления, перекрывающих один шаг намотки; ξ - коэффициент упаковки волокон в нити; d_5 - средний диаметр стекловолоконной нити; G_{ca} - масса связующего; G_a - масса армирующего вещества; $G_{заг}$ - масса оболочки. $D_{0cp} = 0,5(D_{0min} + D_{0max})$; $H_n = m \left(\frac{d}{d_n} \right)^2$ - критерий компоновки структуры стеклонити; $d_n = \frac{d_3 + d_4}{2}$ - средний диаметр стекловолоконной нити; γ_{cm} - плотность материала стекловолокон; L_0, δ_0 - длина и толщина стенки; D_{0min}, D_{0max} - минимальный и максимальный диаметры оболочки; d - толщина нитей; d_3 - максимальный диаметр стекловолоконной нити; d_4 - минимальный диаметр стекловолоконной нити; L_n - длина стекложгута, необходимая для намотки; $H_6 = H_0 \frac{\gamma_{cm}}{\gamma_c}$ - коэффициент весовой плотности стеклопластика; γ_c - плотность стеклопластика.

С помощью математического моделирования определены значения зависимых параметров для обоих случаев (Таблица 1).

Таблица 1 - Масса наполнителя и связующего и зависимые параметры

№	Обозначение параметра	Размерность	Значение	Gсв, МПа	Gа, МПа	Gа, МПа
При максимальной экономичности процесса						
1	a	шт	13	4,349	45,623	49,923
2	ξ	-	0,8			
3	d_5	м	0,002			

Продолжение таблицы 1

4	d_1	м	0,006			
5	d_2	м	0,008			
6	γ_{cm}	кг/м ³	2380			
7	d_6	м	0,00001			
8	L_0	м				
При минимальной массе наполнителя и связующего						
1	a	шт	13	1,746	37,362	39,109
2	ξ	-	0,8			
3	d_5	м	0,002			
4	d_1	м	0,0045	1,746	37,362	39,109
5	d_2	м	0,008			
6	γ_{cm}	кг/м ³	2800			
7	d_6	м	0,0000087			
8	L_0	м	1,78			
При высоком качестве оболочки						
1	a	шт	16	5,887	82,472	88,360
2	ξ	-	0,8			
3	d_5	м	0,002			
4	d_1	м	0,006			
5	d_2	м	0,008			
6	γ_{cm}	кг/м ³	2800			
7	d_6	м	0,00001			
8	L_0	м	2,2			

Минимальная приведенная масса оболочки, которую удалось достичь при полном отсутствии критических ситуаций, составляет 39,109 кг.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

При проведении диссертационного исследования получены следующие результаты и научные выводы:

1) Предложен и экспериментально подтвержден алгоритм прогнозирования качества изготовления стеклопластиковых оболочек методом намотки.

На его основе построена новая математическая модель, учитывающая 153 различных по физической природе параметров и возникновение 73 критических ситуаций.

В результате реализации модели определяются значения количественных оценок качества процесса изготовления, которые оказывают существенную интеллектуальную поддержку при принятии управленческих решений, позволяют выявлять моменты возникновения проблемных (критических) ситуаций и конструировать альтернативы развития технологических процессов с их учетом.

Структура математической модели допускает возможность корректировки выражений показателей и дополнение комплекса новыми - по мере выявления других свойств наполнителя и связующего, режимов и процессов пропитки, намотки и сушки оболочки;

2) Выбраны критерии оптимизации технологических параметров изготовления стеклопластиковых оболочек, на которые в значительной степени оказывают влияние возникающие критические ситуации. К таким критериям относятся максимальная прочность и экономичность и минимальная масса изделия.

Определены параметры технической системы, позволяющие эффективно управлять ее состоянием, среди которых угол смачивания наполнителя связующим, вязкость и температура связующего, степень обезжиривания, толщина - и масса подслоя и др.

3) Выявлены 73 критические ситуации, возникающие в процессе изготовления стеклопластиков, составлены выражения их количественных оценок в виде частных и обобщенных показателей критичности. Использование этих оценок позволило свести многокритериальную задачу оптимизации технологического процесса к однокритериальной и прогнозировать качество каждого этапа изготовления стеклопластиковых оболочек.

4) Разработана методика прогнозирования качества процесса изготовления стеклопластиковых оболочек, применение которой в практической деятельности позволяет снизить количество брака при изготовлении на 20 %, более чем на 40 %, сократить длительность отработки новых композиционных изделий и осуществлять адаптацию процесса изготовления к изменяющимся условиям производства.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю. Математическая модель пропитки препрега для изготовления волокнистых конструкционных композитных материалов/ Ф.А. Уразбахтин// Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – №2 (22). - С 100-110. (Входит в перечень ВАК)
2. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю., Уразбахтин, В.Ф. Математическая модель теплозащиты головной части с учетом возникновения критических ситуаций в процессе полета ракеты/ Ф.А. Уразбахтин// Известия вузов. Авиационная техника. - 2014. - №1. - С 73-77. (Входит в перечень ВАК, SCOPUS)
3. Кумаченкова,* Ю.Ю., Уразбахтин, Ф.А. Комбинированные теплозащитные покрытия как эффективное средство сохранности боевых зарядов в стратегических ракетах от температурных воздействий/ Ф.А. Уразбахтин// XXIII 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»: сборник материалов.(Казань, КВВКУ 17-19 мая 2011 г.). -Казань, 2011. - С. 177-178
4. Уразбахтин, Ф.А., Харинова, Ю.Ю., Рыбин, А.Н. Принципы построения математической модели нанесения теплозащитных покрытий на поверхности многоступенчатых ракет/ Ф.А. Уразбахтин// 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012»: тезисы докладов. (Москва МАИ, 13-15 ноября 2012 г.). – СПб.: Мастерская печати. - 2012. – С 160-161.

5. Уразбахтин Ф.А., Рыбин А.Н., Харинова Ю.Ю. Применение отсечки тяги как управляемой критической ситуации в РДТТ/ Ф.А. Уразбахтин // 11-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012»: тезисы докладов. (Москва МАИ, 13-15 ноября 2012 г.). – СПб.: Мастерская печати. - 2012. – С 131-132.
6. Харинова Ю.Ю., Уразбахтин Ф.А. Принципы построения математической модели нанесения теплозащитных покрытий на поверхности ракет методом напыления / Ю.Ю.Харинова// Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке-2013: сборник научных трудов. (Ижевск, ИжГТУ, 23-25 апреля 2013 г.). – Ижевск, изд-во ИжГТУ. - 2013. – С 254-255.
7. Уразбахтин Ф.А., Харинова Ю.Ю., Болонкин В.А. Предельные состояния в процессе отверждения волокнистых стеклопластиков/ Ф.А. Уразбахтин // Известия вузов. Авиационная техника. – 2015.- №3. – С 79-85. (Входит в перечень ВАК, SCOPUS)
8. Уразбахтина А.Ю., Никитина О.В., Уразбахтин Ф.А., Харинова Ю.Ю. Разработка системы количественных оценок качества выполнения технологических процессов изготовления силовых корпусов частей многоступенчатой ракеты/ А.Ю. Уразбахтина // Отчет о НИР № 14. В37.21.1838 от 14.10.2012 (Министерства образования и науки). – Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2013. – 300 с.
9. Уразбахтин, Ф.А., Харинова Ю.Ю., Уразбахтина А.Ю. Оптимизация параметров формования стеклопластиковых оболочек головных частей ракеты по критерию критичности/ Ф.А. Уразбахтин// Известия вузов. Авиационная техника. – 2017. - №1. – С 10-17. (Входит в перечень ВАК, SCOPUS).

* Фамилия автора до 2011 г.