

На правах рукописи



Чабаненко Александр Валерьевич

**МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА КОРПУСНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ**

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена на кафедре инноватики и интегрированных систем качества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

- Научный руководитель **Фролова Елена Александровна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
- Официальные оппоненты **Мироненко Игорь Германович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры микрорадиоэлектроники и технологии аппаратуры Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»
- Михеев Владислав Александрович**, кандидат технических наук, инженер-конструктор I категории АО «Северный пресс»
- Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1

Защита состоится «13» июня 2019 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.233.04 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А. Автореферат и текст диссертации размещены на сайте университета <http://dissov.guap.ru>.

Автореферат разослан «22» апреля 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
212.233.04
доктор технических наук, профессор



А.П. Ястребов

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Приоритетными направлениями промышленной политики России являются повышение конкурентоспособности производства и эффективное продвижение наукоемкой продукции на внутреннем и внешнем рынках.

В Послании Федеральному собранию 1 марта 2018 года Президент России обозначил особую роль новых технологий в развитии страны одним из приоритетов государственной политики России, в которой отмечена особая роль новых материалов и технологий в радиоэлектронике в которые входят аддитивные технологии.

Современные тенденции цифрового производства, интернета вещей, направлены на активное формирование отрасли аддитивных технологий, применение данных технологий особенно перспективно видится в сфере производства корпусных элементов радиоэлектронной аппаратуры. Особенно остро ощущается проблема усложнения формы радиоэлектронных устройств и печатных плат, корпуса которых должны учитывать их специфику и эргономику, особенности режимов эксплуатации оборудования.

Отмеченные обстоятельства обуславливают важную роль применения аддитивных технологий в производстве корпусов из композиционных материалов и обеспечения должного уровня качества, удовлетворяющего требованиям к размещённым компонентам радиоэлектронной аппаратуры.

Для обеспечения применения аддитивных технологий на отечественных предприятиях Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) в рамках ТК 182 «Аддитивные технологии» утвердило первые национальные стандарты в области аддитивных технологий, которые позволили сформировать требования для корпусных элементов, выполненных по данной технологии технологиям.

Аддитивные технологии позволили сформировать принципиально новое направление в технологии, предназначенное для изготовления опытных, единичных, эксклюзивных и уникальных образцов изделий за счет послойного наращивания материала методом послойного синтеза с одновременным получением заданной формы и размеров последующего серийноспособного изделия на основе цифрового прототипа.

Применение аддитивных технологий позволяет обеспечить индивидуализацию производства, снижение материалоемких затрат, повышение экономической эффективности и результативности производства корпусных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а также повысить качество выпускаемых корпусных элементов.

Однако, недостаточная разработанность механизмов и инструментов, направленных на обеспечение качества изделий, выполненных с применением аддитивных технологий, контроля работы аддитивной установки и свойств полимеров, используемых при послойном наплавлении, приводит к низкой результативности процессов печати, увеличению расхода материалов, применяемых в работе установки, торможению внедрения новых, механизмов производства, основанных на использовании цифрового прототипа.

Актуальность этих задач определяется в виду их соответствия таким критическим технологиям Российской Федерации как «Технологии информационных, управляющих, навигационных систем», «Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения», «Технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» и «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» Перечень критических технологий РФ, утвержденный Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899.

Таким образом, научная задача, направленная на обеспечение качества производства корпусных элементов РЭА с учётом компонентной базы, выполненных по аддитивным технологиям с использованием специфики цифрового производства, несомненно, актуальна.

Степень разработанности проблемы. Среди зарубежных ученых исследователей инновационных процессов и аддитивного производства следует отметить: Й.А. Шумпетера, А.К. Кляйнкнехта, Чака Халла, Магат Юджин Эдвард, Страчан Дональд Риттлер.

В разработку теории, методологии и практики управления качеством технологических процессов, внесли существенный научный вклад Е.Г. Семенова, А.Г. Варжапетян, Б.В. Бойцов, А.С. Васильев, Л.В. Черненькая, Г.Г. Азгальдов, Г.И. Коршунов. Необходимо отметить классиков управления качеством Э. Деминг, А.У. Шухарт, К. Ишикава, Д. Джуран и ряда других.

Однако, в исследованных материалах в полной мере не нашли отражения проблемы, связанные с применением аддитивных технологий в производстве корпусов РЭА с учётом требований национальных стандартов. Кроме того, не в полной мере исследованы теоретические и практические проблемы оценки качества процессов аддитивного производства и управления качеством конечного изделия, учитывающие требования международных стандартов серии ИЕС 61189.

Важным является не только соответствие требованиям, которые предъявляют стандарты к продукции, но и уменьшение потерь, связанных с несовершенством технологии и производственной системы в целом.

Дальнейшей проработки требует проблема, связанная с большим числом контролируемых параметров качества корпусных элементов РЭА и корреляцией свойств полимеров, оказывающая влияние на качество конечного изделия. Значимость проблем в области управления качеством корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям, а также не в полной мере изученная совокупность задач, относящаяся к данной научной сфере, определили выбор темы, цели и задач диссертационной работы.

Цель диссертационного исследования повышение результативности процесса производства корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям из композиционных материалов.

Для достижения цели исследования в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для подтверждения соответствия качества в условиях внешних и внутренних воздействующих факторов;
2. Разработать параметрическую модель послойного наплавления корпусных элементов, включающую прототипирование проектной компонентной базы РЭА;
3. Обосновать и дополнить номенклатуру показателей качества корпусных элементов РЭА, выполненных методом послойного наплавления, путем разработки стандарта организации на основе анализа и дополнения существующей;
4. Разработать методику выбора полимера для производства по аддитивной технологии из композиционных материалов;
5. Разработать методику обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов.

Объект исследования – технологический процесс производства корпусных элементов РЭА.

Предмет исследования – методы, критерии, процедуры и модели, обеспечивающие повышение качества производства и эксплуатации корпусов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям.

Методы исследования. В ходе исследования использованы **методы** унификации, агрегатирования, моделирования и статистики.

Продукция: корпусные элементы РЭА, выполненные по аддитивным технологиям.

Область исследования: соответствует пп. 1, 2, 4, 5, 11 паспорта специальности – 05.02.23 Стандартизация и управление качеством продукции.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для анализа влияния внешних и внутренних воздействующих факторов в процессе моделирования эксплуатации радиоэлектронного устройства.

2. Параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, включающая прототипированные элементы компонентной базы РЭА для обеспечения качества процесса функционирования аддитивной установки и выбор температурных режимов.

3. Дополненная номенклатура показателей качества корпусных элементов РЭА, регламентированная разработанным стандартом организации, учитывающая современные требования национальных, международных стандартов и требования технических регламентов к полимерам.

4. Методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.

Научной новизной обладают следующие результаты исследования:

1. Модель состояния корпусных элементов РЭА, включающая экспериментальные результаты комбинирования свойств различных композиционных материалов в процессах послойного наплавления при производстве корпусов РЭА, направленных на обеспечение сохранности внутренних компонентов.

2. Параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, отличающаяся наличием моделей прототипированных элементов компонентной базы РЭА, учитываемых при структурном проектировании радиоэлектронного устройства.

3. Дополненная номенклатура показателей качества, учитывающая нормированные температурные режимы, технологические допуски, и обновленные требования, содержащиеся в национальных стандартах и технических регламентах;

4. Разработанная методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.

Практическая значимость полученных научных результатов состоит в следующем:

1. Результаты использования основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечили сокращение несоответствий на 10-12 % в производстве корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям, снижение материальных, ресурсных и трудовых затрат на 15-20 %, что подтверждено актами внедрения.

2. Обеспечение качества процесса производства корпусных элементов РЭА за счет применения предложенных алгоритмов управления качеством технологических процессов аддитивного производства корпусных элементов РЭА обеспечивающих повышения выхода годных корпусных элементов на 10-12 %.

3. Внедрены статистические методы контроля процесса послойного синтеза корпусных элементов для управления качеством процесса аддитивного производства, обеспечивающие расчет ожидаемого уровня дефектности технологического процесса, что позволило сократить расход полимеров при печати изделия на 20-25 %.

4. Возможность при прототипировании корпусов РЭА использовать композиционные материалы, что позволяет повысить прочностные характеристики филаментов с последующей оценкой имитационной оценкой.

5. Сокращение времени производства сложно-профильных корпусных элементов и компонентной базы РЭА при применении аддитивной технологии на 40-50 %.

Достоверность результатов диссертационной работы основана на корректном применении математического аппарата системного анализа, математической статистики и теории вероятности, квалиметрического оценивания и методов математического моделирования, а также результатами практического внедрения.

Личный вклад автора состоит в непосредственной разработке моделей динамики функционирования корпусных элементов РЭА в условиях внешних температурных воздействий, модели отказов оборудования в процессе послойного наложения полимерной нити, модели управления показателями качества корпусных элементов РЭА, метода управления

качеством формирования корпусных элементов РЭА и научно-технических предложений по его реализации, документированной процедуры, создания базы данных.

Внедрение результатов диссертационного исследования

Результаты основных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертационном исследовании, использованы в АО «НПП «Радар ммс», ООО «ПАНТЕС групп» для повышения результативности технологических процессов аддитивного производства, обеспечили сокращение времени разработки корпусных элементов РЭА при выполнении требований к надежности и безопасности эксплуатации аддитивной установки, снижение материальных и трудовых затрат, в образовательном процессе ФГАО ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», что подтверждено актами внедрения.

Апробация работы. Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на различных конференциях, семинарах и круглых столах:

- Форум «Формирование современного информационного общества – проблемы, перспективы, инновационные подходы» 2015 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

- VIII Санкт-Петербургском конгрессе «Профессиональное образование, наука, инновации». В круглом столе №3 «Молодежь в научной, научно-технической и инновационной деятельности, ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина)», 2015 год.

- Научно-технической конференции ОАО «НПП «Радар ммс» (Санкт-Петербург, 2016).

- 67-й, 68-й, 69-й международной студенческой научно-технической конференции ГУАП (Санкт-Петербург, 2014-2017).

- Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» (Москва, 2016, 2017, 2018, 2019 гг.).

- Всероссийской очно-заочной научно-практической конференции с международным участие: «Формирование престижа профессии инженера у современных школьников», Политехнический университет (Санкт-Петербург, 2018).

- Конкурс «Инновационная радиоэлектроника» V сезон 2018.

- Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, Программа «УМНИК» 2018.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 8 международных и 5 всероссийских научных конференциях.

По теме диссертации опубликовано 29 работ, из них: 8 – без соавторов, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, 4 статьи в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, 5 статей и 10 докладов в других изданиях, одно свидетельство о государственной регистрации.

Структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений. Содержание работы изложено на 217 страниц машинописного текста.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель, основные задачи, объект и предмет исследования, отражена научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и внедрении результатов работы.

В первом разделе описаны основные подходы к внедрению аддитивных технологий в производство корпусных элементов РЭА и их преимущества по сравнению с традиционными технологиями на основании ГОСТ Р 57586-2017 в аддитивном производстве, что позволяет обеспечить непрерывную информационную поддержку жизненного цикла производства корпусов РЭА.

Рассмотрены особенности функционирования аддитивных технологий применительно к производству корпусных элементов РЭА с использованием композиционных материалов.

В работе сформулирован подход производству корпусных элементов РЭА на основе аддитивного производства с использованием цифрового прототипа с дополнением показателей качества.

Проведен сопоставительный анализ стандартов, моделей и подходов к аддитивному производству, применимый в рамках производства корпусных элементов РЭА.

Применение аддитивных технологий в производстве позволяет включить в этап «Проектирование» этапы «Модель», «Чертеж» и «Оснастка». Этап «Оснастка» не требуется в процессах с использованием аддитивных технологий. Этапы «Проектирование» и «Печать» объединяют в себе большую часть процессов традиционных технологий производства корпусных элементов, что позволяет сократить количество этапов производства корпусов РЭА.

Рассмотрена технология проектирования и изготовления корпусных элементов РЭА, включающая цифровое прототипирование компонентной базы РЭА. Показано что традиционные технологии, нацелены на решение лишь отдельных частных задач и не обеспечивают весь процесс подготовки и изготовления корпусных элементов РЭА (рис.1).

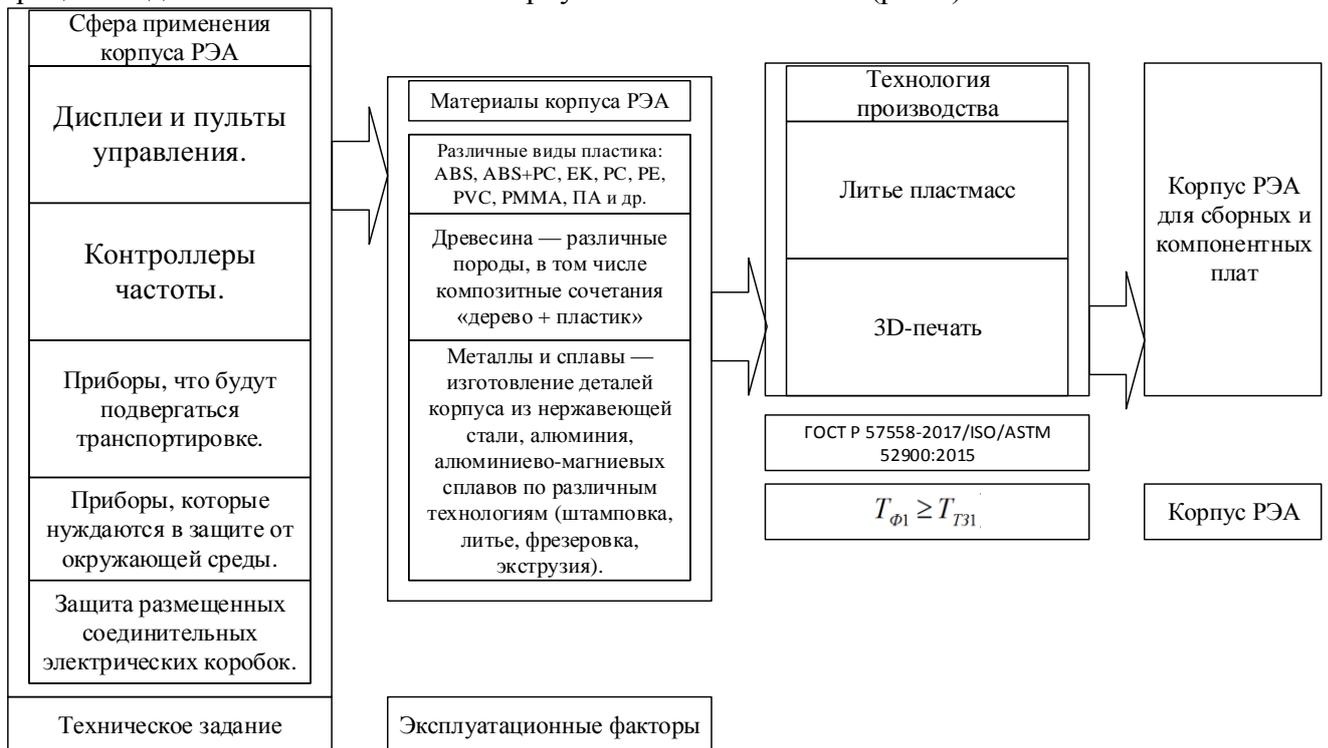


Рисунок 1 – Определение технологии для производства корпусных элементов РЭА

Выбор того или иного корпусного элемента определяется условиями эксплуатации аппаратуры, а также конструктивно-технологическими параметрами РЭА с учётом влияния окружающей среды и свойств компонентной базы.

Исходя из данных по температурным режимам полимеров, применяемых в аддитивном производстве, проведено имитационное моделирование механической деформации композиционных материалов.

Выбора подходящего композиционного материала для производства корпусных элементов РЭА проводится на основе результатов моделирования физических свойств композиционного материала.

Был рассмотрен процесс ползучести композиционного материала и на основе формулы скорости деформации полимеров проведено имитационное моделирование ползучести композиционного материала:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp \left[-\frac{Q_0 - \alpha \sigma}{RT} \right],$$

где ε_0 – частотный фактор; Q_0 – энергия активации процесса ползучести; α – константа, характеризующая активационный объем, RT – среднее значение удельной кинетической

энергии.

Проведенное моделирование вынужденной эластической неупругой деформации для групп полимеров, происходящий во времени под воздействием напряжений при участии термических флуктуаций, позволяет определить участки номинальных напряжений полимеров при различных температурных режимах (рис. 2) для параметрического моделирования режимов формирования послойным синтезом и определения режимов работы оборудования и контроля технологических параметров.

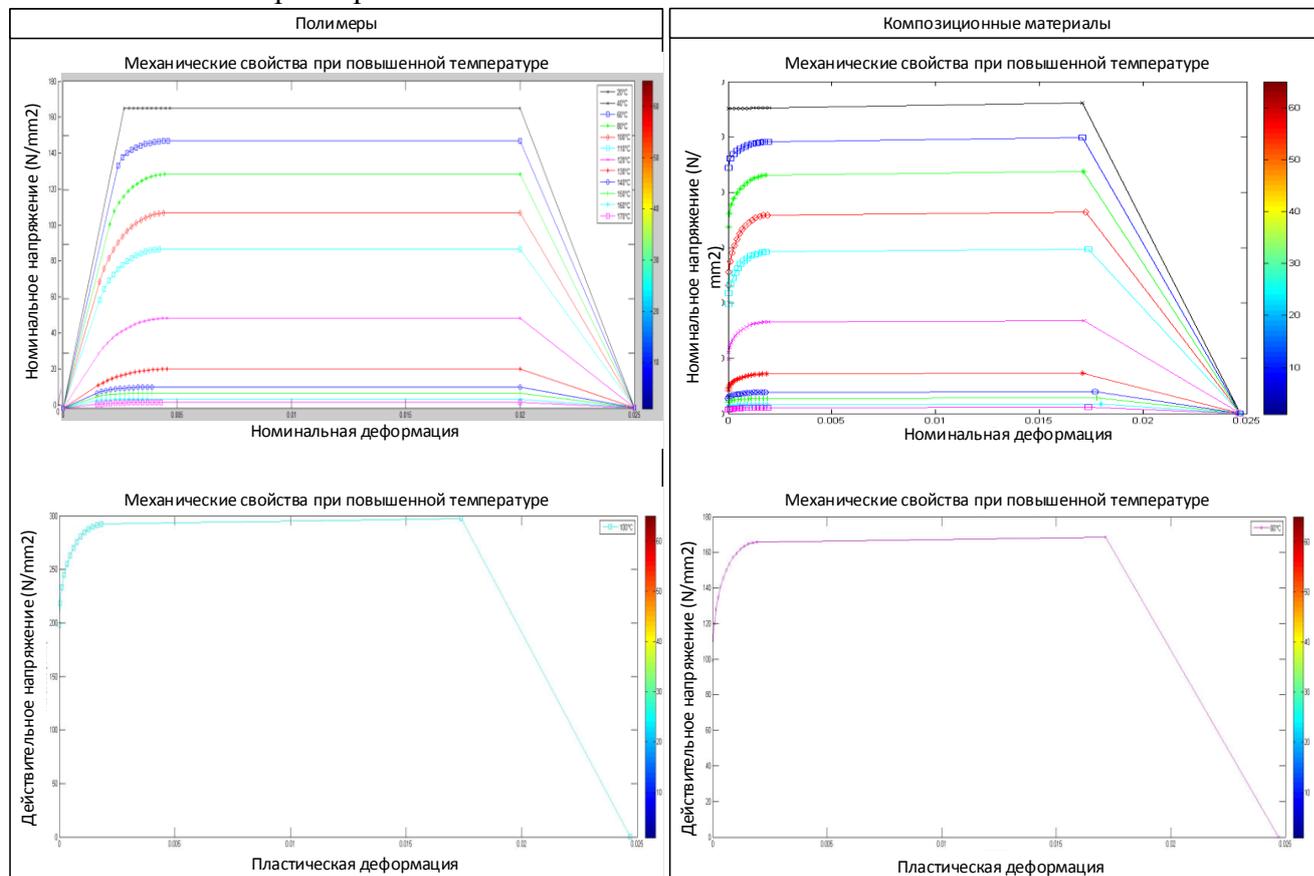


Рисунок 2 – Расчёт максимальных нагрузок при различных температурах корпуса РЭА произведённого по МПН технологии

Что позволяет спрогнозировать для каких температурных режимов предназначен корпус РЭА, выполненный из различных композиционных материалов.

Для управления характеристиками изделий, в том числе и точностными, необходима параметрическая модель, отражающая зависимость этих характеристик от технологических факторов температуры, давления, что позволяет установить режимы формирования корпуса РЭА на аддитивной установке.

Таблица 1 – Уровни варьирования параметров технологического процесса формирования

Уровни	Температура				Давление экструдера			
	T1, °C	tt1, мин	T2, °C	tt2, мин	tp0, мин	P1, МПа	tp1, мин	P2, МПа
Обозначение показателя	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
+1	190	70	180	240	40	0.5	80	1.0
0	210	50	150	180	30	0.3	60	0.6
-1	230	30	120	120	20	0.1	40	0.2

Для решения задачи построения ядра необходимо использовать априорную модель и набор генерируемых соотношений, не приводящих к смешиванию линейных слагаемых модели:

$$\begin{aligned}
Y = & A_0 + A_1X_1 + A_3X_3 + A_4X_4 + A_5X_5 + A_6X_6 + A_7X_7 + A_8X_8 + A_9X_1X_2 + \\
& + A_{10}X_1X_5 + A_{11}X_1X_6 + A_{12}X_3X_4 + A_{13}X_3X_6 + A_{14}X_6X_7 + A_{15}X_1X_2X_3 + \\
& + A_{16}X_1X_2X_4 + A_{17}X_1X_2X_5 + A_{18}X_1X_2X_8 + A_{19}X_3X_4X_5 + A_{20}X_3X_4X_8 + \\
& + A_{21}X_3X_5X_8 + A_{22}X_3X_6X_7 + A_{23}X_4X_6X_7 + A_{24}X_5X_6X_7 + A_{25}X_6X_7X_8 + \\
& + A_{26}X_1X_2X_6X_7 + A_{27}X_1^2 + A_{28}X_3^2X_4 + A_{29}X_4^2X_3 + A_{30}X_5^2X_1 + A_{31}X_6^2X_7
\end{aligned}$$

Из анализа результатов экспериментальных исследований и полученных регрессионных моделей можно сделать выводы о температурных режимах формирования корпуса РЭА, учитывающие температуру от 210°C до 215°C и давление филамента в диапазоне 0.1...0.6 МПа, благодаря чему удаётся обеспечить прочность на межслоевой сдвиг (рис. 3).

Таким образом, ядро плана эксперимента строится на основе следующих генерирующих соотношений:

$$X_1 = X_5X_7X_8; \quad X_2 = X_4X_7; \quad X_3 = X_5X_6.$$

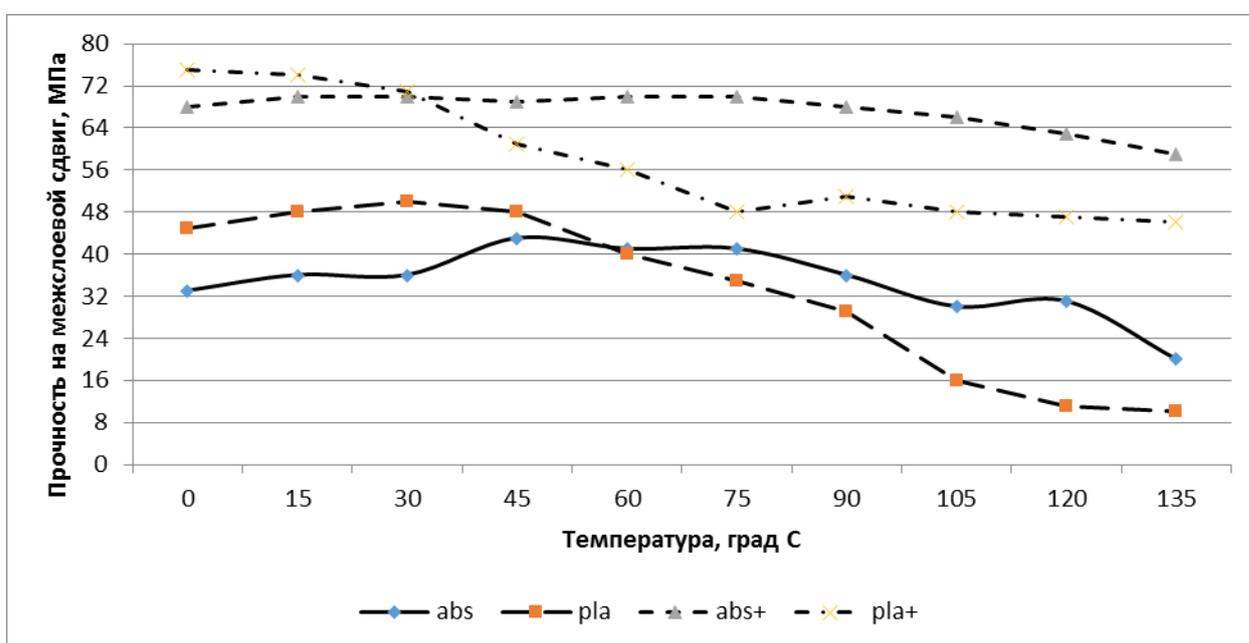


Рисунок 3 – Параметрическая модель зависимости прочности полимеров ABS на межслоевой сдвиг от температуры для различных связующих

Приведены режимы формования корпусных элементов на основе композиционных материалов по отдельным физико-механическим характеристикам, полученным с помощью регрессионных зависимостей.

Таким образом, наблюдается увеличение прочностных характеристик полимеров за счёт учёта температурного режима формирования, что позволяет добиваться более высокой прочности готового слоя изделия.

Из множества факторов, влияющих на характеристики получаемого изделия, выделяют три основных технологических параметра: температура, давления формования. Однако, немаловажными являются и другие факторы: скорость нагрева и охлаждения, градиенты температуры и давления и т. п.

Благодаря выбранным режимам формирования и технологии проектирования получается достигнуть требуемой точности синтеза филаментов на основе цифрового прототипа РЭА с использованием отсканированной цифровой модели с точностью, мкм 50, результаты прототипирования компонентной базы РЭА и корпуса РЭА приведены на (рис. 4).

Анализ приведенных данных показывает, что для достижения определенной точности поверхности корпуса могут быть использованы различные технологические маршруты и материалы, применяемые в аддитивном производстве.

В работе рассматривались свойства различных полимеров, применяемых в аддитивном производстве и изучено их влияние на качество корпусных элементов и возможность комбинирования посредством модели выбора полимера с учётом особенностей проектирования и требований РЭА и возможностей аддитивных установок.

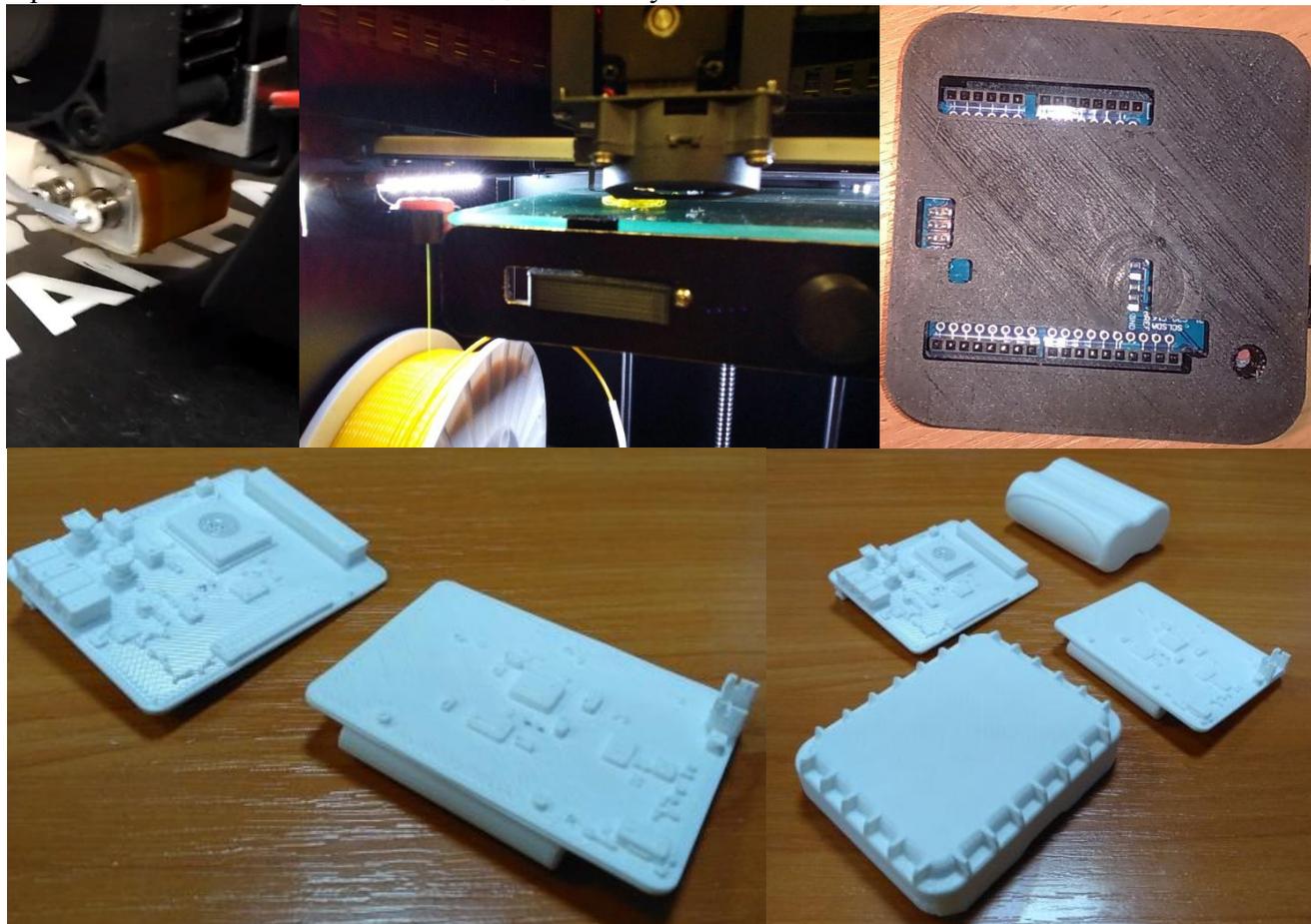


Рисунок 4 – Экспериментальный стенд работы с полимерами и прототипирование компонентной базы РЭА

Во втором разделе проведен анализ механизмов управления качеством разработки корпусных элементов РЭА, разработана схема выбора композиционного материала, процедуры обеспечения качества аддитивного производства корпусных элементов РЭА, произведена оценка экологических параметров 3D печати и возмущающих факторов, влияющих на производство.

Алгоритм выбора композиционного материала позволяет решить противоречие выбора материала, применяемого в аддитивном производстве, выбор ограничивается техническими характеристиками, которые указаны в паспортах установок, согласно требованиям потребителей и требованиям стандартов, но допустимо изменение ряда оцениваемых параметров (рис. 5).

Установлены обязательные требования ТЗ, каждый из которых должны строго соблюдаться: Температура, прочность, модуль и пр. полимера должны превышать или равно соответствующему числу, указанное в ТЗ. Если не соблюдается хотя бы одно требование ТЗ, то полимер не подходит для филаментизации.

Установлены 5 групп для поиска наиболее близкого по совокупности своих свойств филамента к требованиям ТЗ:

$$C_F = \begin{cases} \text{Прочность при растяжении } M_{pa}. \\ \text{Прочность при изгибе } M_{pa}. \\ \text{Модуль упругости } M_{pa}. \\ \text{Температура начала деформации } C \\ \text{Температура размягчения Вика } C. \end{cases}$$

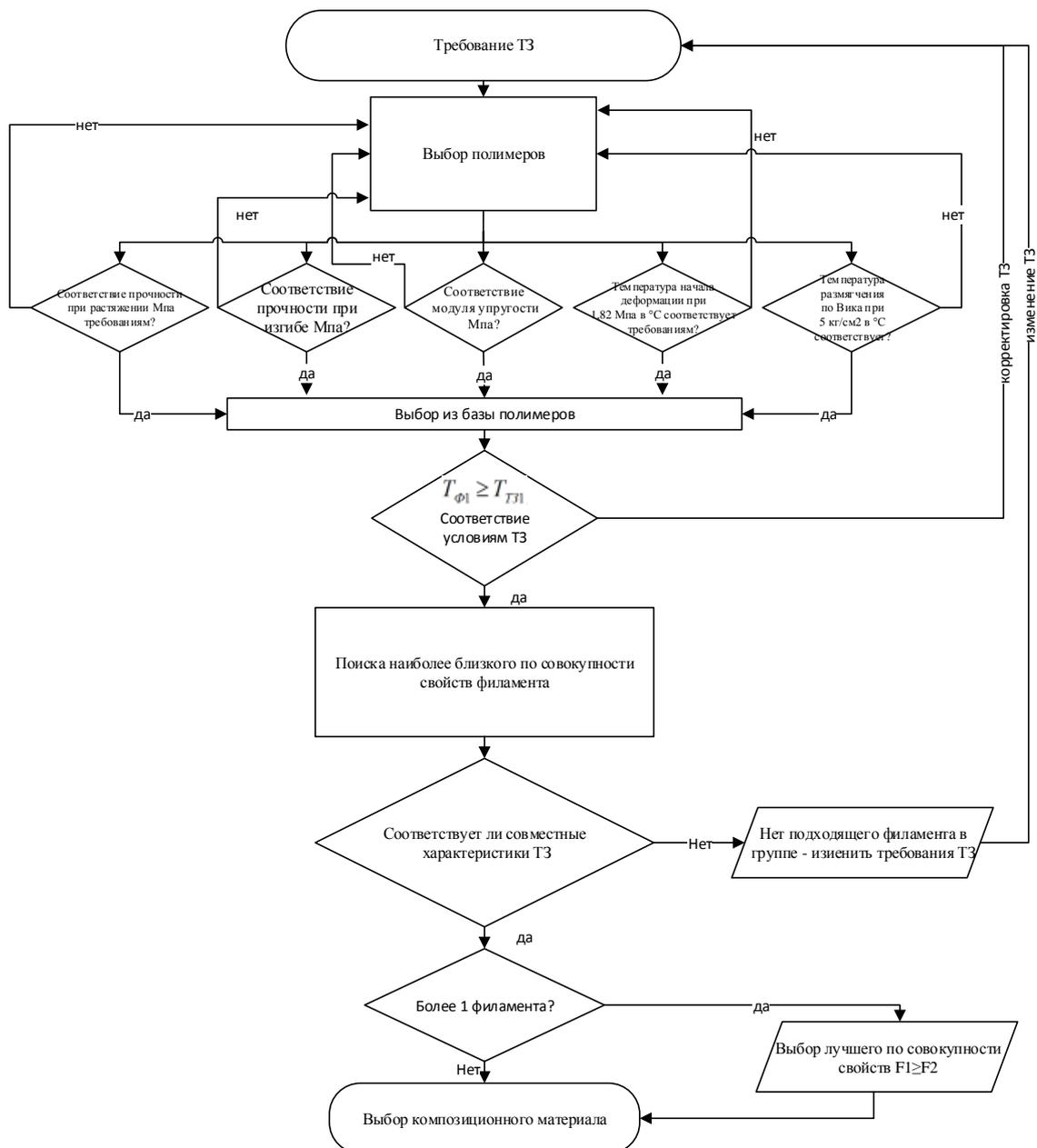


Рисунок 5 – Алгоритм выбора композиционного материала

Проведён анализ по блокам свойств композиционных $T_{\phi 1-5}$ материалов и зависимости связующих компонентов при перемешивании с учётом печати разными филаментами на этапе гомогенизации.

$$a_1 = [T_{\phi 1} \geq T_{T31}]$$

$$a_2 = [T_{\phi 2} \geq T_{T32}]$$

$$a_3 = [T_{\phi 3} \geq T_{T33}],$$

$$a_4 = [T_{\phi 4} \geq T_{T34}]$$

$$a_5 = [T_{\phi 5} \geq T_{T35}]$$

где T_{ϕ} – требование к полимеру, T_{T3} – требование ТЗ

Применяется логическая операция "И", которая позволяет установить 0.

"И"=1(истина), если все операнды равны единицам.

"И"=0(ложь), если хотя бы один операнд равен нулю.

$$C_F = \bigcap_{i=1}^n a = 1$$

$$a_i = \begin{cases} 0, & \text{если } x_i < x_{0i} \\ 1, & \text{если } x_i \geq x_{0i} \end{cases}$$

x_{0i} – i требование ТЗ;

x_i – характеристика полимера, соответствующая i -му требованию ТЗ.

Операция реализована в ячейке "Пригодности полимера".

Возможны три ситуации:

$$\text{Полимер} = \begin{cases} a_1 - \text{нет подходящего полимера в группе. } T3 \leq \text{Полимер.} \\ a_2 - \text{только один подходящий полимер в группе полимер.} \\ a_3 - \text{несколько подходящих полимеров в группе. } F_1 \geq F_2 \end{cases}$$

Набор признаков качества выбранных полимеров соответствует характеристикам аддитивного производства и предусматривает возможность изменять технические характеристики в зависимости от требований к корпусам РЭА.

Для управления процессом производства и определения качества объекта рассчитана величина интегрального показателя ресурсоэффективности на основе физических свойств корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям.

Произведен анализ показателей качества, оказывающих влияние на технологический процесс аддитивного производства, с учётом специфики проектирования и изготовления корпусных элементов РЭА (рис. 7).

Благодаря произведённому моделированию стало возможным дополнить номенклатуру показателей в рамках физико-механических свойств полимеров, применяемых в аддитивном производстве.

Дополненная номенклатура показателей качества, учитывает особенности аддитивного производства и композиционных материалов в форме дополнения свойств композиционных материалов с учётом специфики аддитивного производства.

Проведённый анализ, что текущие показатели качества не учитывают особенности аддитивных технологий по прочностным показателям композиционных материалов и температурным режимам.

Таблица 2 – Дополненные показатели качества полимеров

№	Показатель полимера	Вид показателя	Гос. стандарт на базовые требования
1	Прочность при растяжении	Мпа	ГОСТ Р 57556–2017
2	Прочность при изгибе	Мпа	ГОСТ Р 57556–2017
3	Модуль упругости	Мпа	ГОСТ Р 57556–2017
4	Температура начала деформации при 1,82 Мпа	в °С	ИСО/ASTM CD 52903–2
5	Температура размягчения по Вика при 5 кг/ см ²	в °С	ИСО/ASTM CD 52903–2

Ввиду неполного охвата особенностей цифрового производства разработан стандарт организации, который учитывает все технологические особенности аддитивных технологий и требования современной РЭА.

Использование аддитивных технологий в процессе производства корпусных элементов позволяет практически полностью исключить этап изготовления опытных образцов и изделий вручную или на традиционных станках с ЧПУ, а также разработку технологической оснастки,

сокращая сроки подготовки производства новых изделий на 50-80 %.

Сравнение значений интегральных показателей различных технологий подтверждает преимущества аддитивных технологий в производстве корпусных элементов РЭА с позиции функционирования установки и ресурсной эффективности.

Определение численных значений частных показателей организации производственных процессов аддитивного производства. Предлагаемые частные показатели учитывают принципы и особенности аддитивного производства.

Для снижения уровня дефектности на основании диаграммы Исикавы были разработаны и реализованы корректирующие действия по изменению размеров корпуса в технологической документации и корректировке температурного режима на основании проведенных исследований построен алгоритм обеспечения качества аддитивного производства (рис. 6).

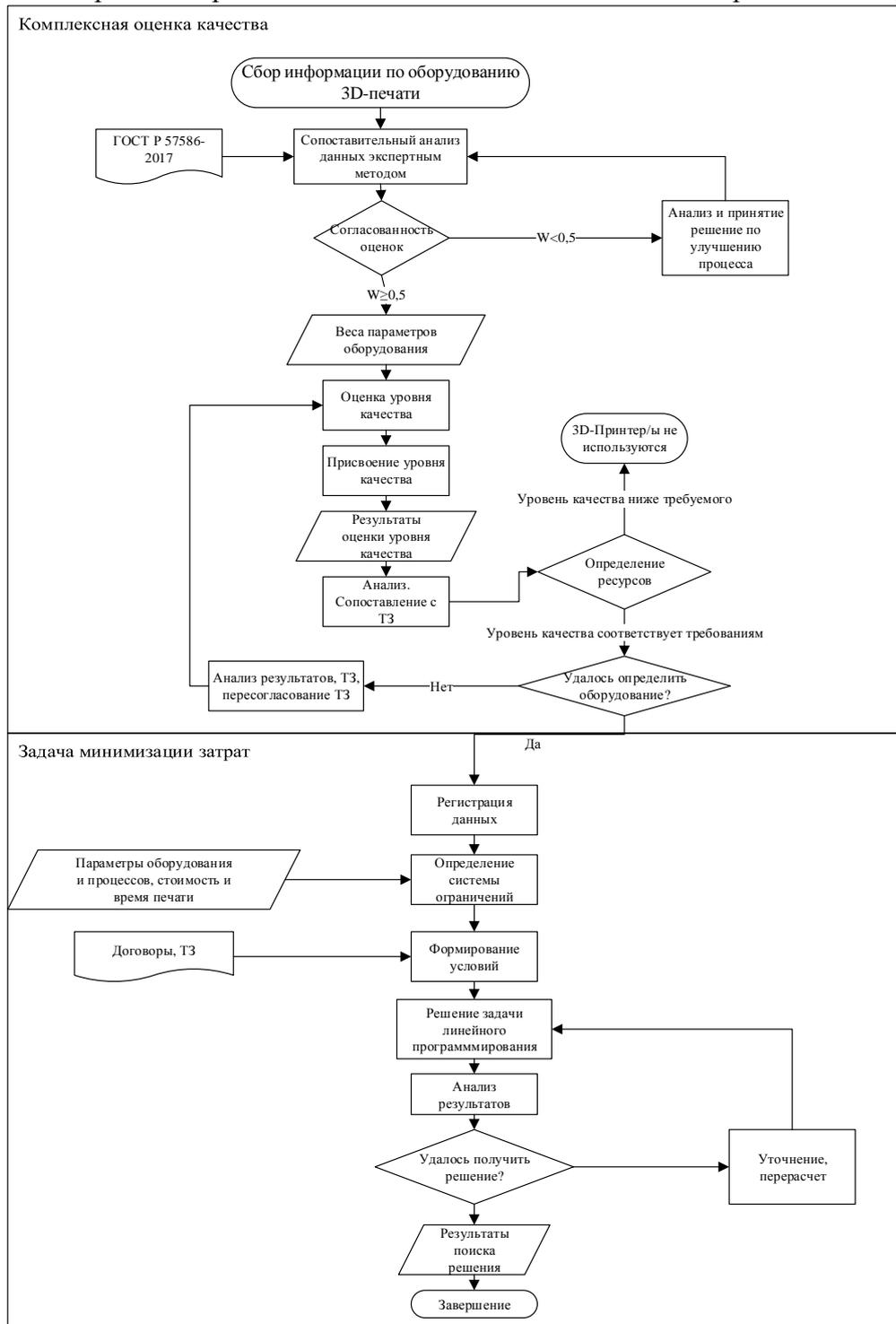


Рисунок 6 – Алгоритм обеспечения качества аддитивного производства

Уровень качества производственных процессов аддитивного производства определяется выходом годных по формуле:

$$Y_K = N_{\text{без.д.}} / N_{\text{общ.}},$$

где Y_K – коэффициент качества продукции;

$N_{\text{без.д.}}$ – количество изделий, выполненных без дефектов;

$N_{\text{общ.}}$ – общее количество изделий.

Показатель гибкости и адаптивности организации производственного процесса аддитивного производства определяется по формуле:

$$Y_{\text{гиа}} = (t_{\text{губ}} + t_{\text{адап}}) / \sum_{i=1}^n T_{\text{ц}},$$

где $t_{\text{адап}}$ – время адаптации к изменениям производственного процесса;

$t_{\text{губ}}$ – время изменения производственного процесса под внешние требования;

$\sum_{i=1}^n T_{\text{ц}}$ – общая длительность производственного цикла изделия.

Показатель параллельности выполнения работ определяется по формуле:

$$Y_n = 1 - \sum_{i=1}^n T_{\text{ц}} / \sum_{i=1}^n T_{\text{ц.оп}},$$

$\sum_{i=1}^n T_{\text{ц.оп}}$ – сумма операций, составляющих изделие;

$\sum_{i=1}^n T_{\text{ц}}$ – общая длительность производственного цикла изделия.

Показатель интеграции рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{инт}} = (N_{\text{КИС}} / N_{\text{общ}}) * 100\%,$$

где $C_{\text{инт}}$ – степень интеграции аддитивного производства;

$N_{\text{общ}}$ – общее количество подразделений/организаций;

$N_{\text{КИС}}$ – количество производственных этапов, использующих аддитивные технологии.

Разработана документированная процедура, распространяющаяся на приёмо-сдаточный контроль корпусов РЭА произведённых с использованием аддитивных технологий.

Определена экологическая составляющая аддитивного производства и сделан вывод о возможности его применения на производстве согласно СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

В третьем разделе описана предложенная методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной с использованием статистических методов управления качеством и инструментов менеджмента качества в аддитивном производстве основу, которой, составляет разработанная многоуровневая структура обеспечения качества для аддитивного производства с учётом требований и особенностей аддитивного производства.

Для прогнозирования количества несоответствий корпусных элементов на аддитивной установке представлено построение базовой структуры прогнозирования нейронной сети Matlab.

Для оценки точности использована максимальная абсолютная погрешность, составившая 0,0795 при достижении суммарной квадратичной ошибкой результата на выходе сети, относительная погрешность составила 7.95 %, что говорит о продуктивной работе системы, что используется при расчёте риска и затрат при производстве корпусных элементов, значения получены в ходе обучения нейронной сети в количестве 991 итерации.

Все изделия после печати соответствует номинальному значению отклонения (0.1 мм при толщине 16 мм), что подтверждено контрольной X-картой. Технологический процесс приведен к нормальному распределению. Количество несоответствий снижено до 800 ppm.

($C_{pD} = 1,217$ и $C_{pK} = 1,120$).

Оценка текущего состояния ТП показала, что процесс нестабилен и смещен к верхней границе поля допуска. Уровень дефектности, рассчитанный с помощью показателей возможностей процессов C_p – поведения процесса относительно границ поля допуска, и C_{pk} – отражающего настройку на середину этого поля, составил около 21,5 %, что ведёт к повышению результативности процесса.

Для снижения уровня дефектности на основании диаграммы Исикавы разработаны и реализованы предупреждающие действия по изменению размеров корпуса в технологической документации и предупреждению температурного режима.

Проведенный анализ данных о дефектах и причинах их возникновения показал, что накопленная 80 % доля несоответствий, возникающих в аддитивном производстве, возникает из-за несоответствия температурного режима. (рис.7).

Для определения качества корпусного элемента рассчитывались механические свойства и участки кривых растяжения для тонкостенных полимерных конструкций при повышенных температурах.

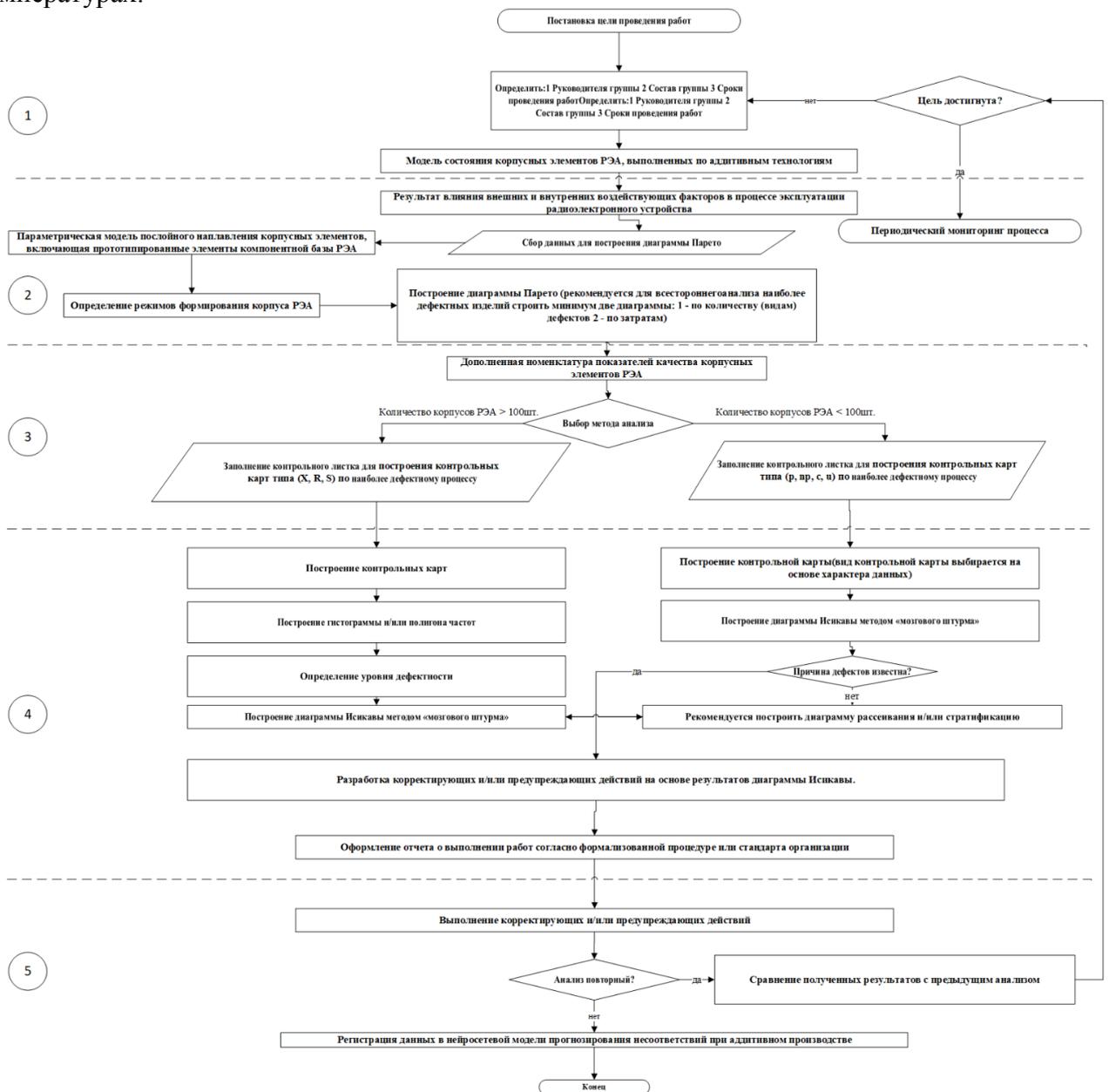


Рисунок 7 – Алгоритм методики проведения работ по снижению уровня дефектности с использованием статистических методов управления качеством в аддитивном производстве

Реализация корректирующих действий позволило добиться статистически управляемого поведения процесса построения физической модели, настроенного на середину поля допуска (рис. 8).

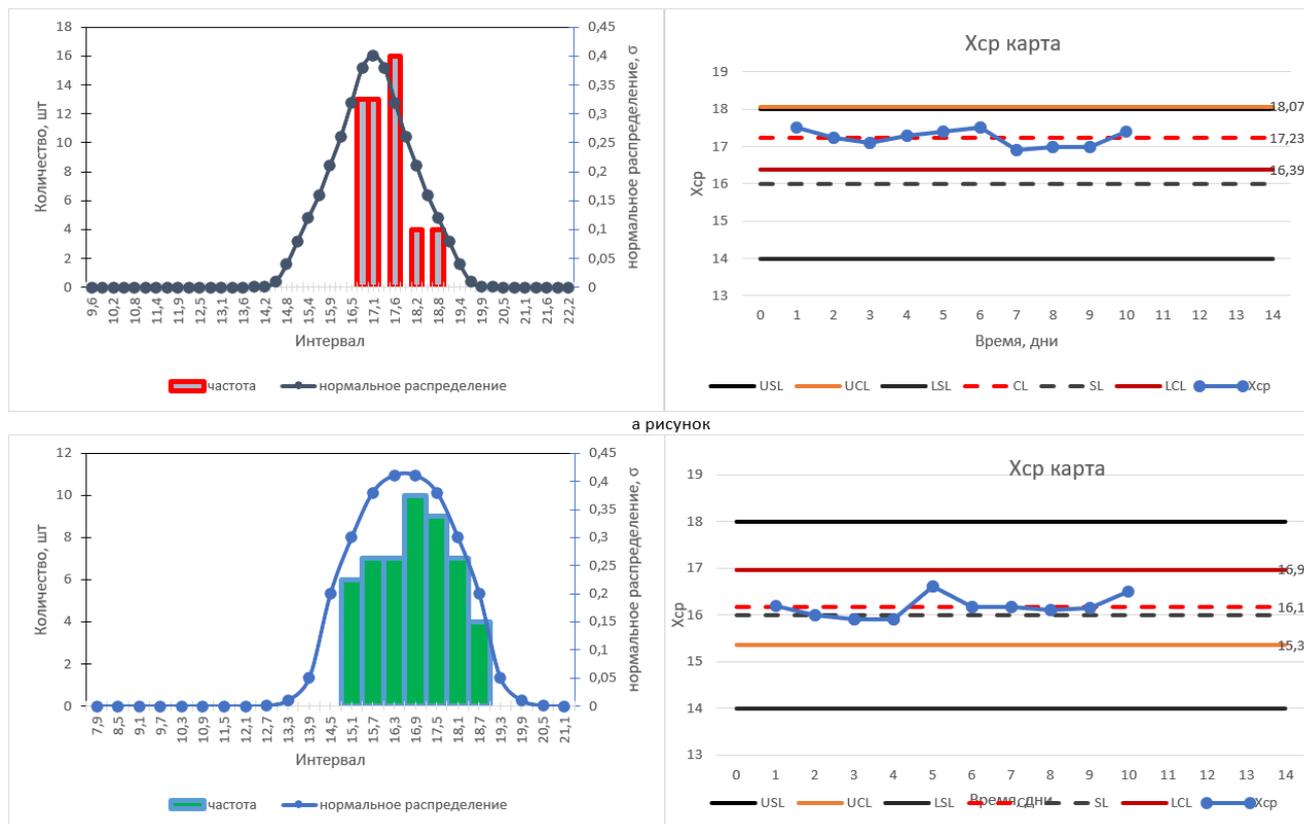


Рисунок 8 – (а) – Положение технологического процесса производства корпусных элементов до реализации корректирующих мероприятий; (б) – после реализации корректирующего действия

Разработанные модель и методика обеспечили постоянное улучшение процесса организации производства корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям в соответствии с принципами управления качеством сократило количество ошибок на 10-12 %, за счёт применения картирования и инструментов управления качеством в аддитивном производстве.

При внедрении результатов исследования достигнуто снижение материальных и временных затрат в среднем на 10-20 %, на разработку корпусных элементов РЭА выполненных по аддитивным технологиям с учётом требований национальных стандартов и требований к корпусам РЭА.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе достигнута поставленная цель повышение результативности процессов производства корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям на основе разработки моделей и методики обеспечения качества процесса производства и качеством работ выполняемых на базе национальных стандартов в сфере аддитивных технологий.

Автором достигнуты следующие **результаты диссертационного исследования:**

– разработана модель состояния корпусных элементов РЭА, выполненных по аддитивным технологиям, для анализа влияния внешних и внутренних воздействующих факторов в процессе моделирования эксплуатации радиоэлектронного устройства;

- разработана параметрическая модель послойного наплавления корпусных элементов, включающая прототипированные элементы компонентной базы РЭА, для обеспечения качества процесса функционирования аддитивной установки и выбор температурных режимов.
- Обоснована и дополнена номенклатура показателей качества корпусных элементов РЭА, регламентированная разработанным стандартом организации, учитывающая современные требования национальных, международных стандартов и требования технических регламентов к полимерам.
- разработана методика обеспечения качества процесса производства корпусных элементов, выполненных по аддитивной технологии из композиционных материалов, с применением статистических методов регулирования потока процесса и методики выбора полимера для аддитивного производства на основе композиционных материалов.

Внедрение указанных выше модели, метода, методики и формализованной процедуры позволило добиться сокращения времени производства корпусных элементов РЭА учитывающего ПК в среднем в 1,4-1,8 раза, а также снижения количества допущенных на этапе разработки ПК ошибок на 10-12 % и уменьшения затрат временных ресурсов, связанных с разработкой и производством корпусных элементов, в среднем на 40-50 %, что подтверждено соответствующими актами о внедрении результатов диссертационной работы.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

1. Чабаненко, А.В. Обеспечение качества аддитивного производства посредством системы контроля послойного синтеза / А.В. Чабаненко, Е.Г. Семенова, В.О. Смирнова, А.О. Смирнов, Н.Н. Рожков // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №10. С. 75-79.
2. Чабаненко, А.В. Оценка качества дрейфующих моделей базовых структур инновационных технологий / А.В. Чабаненко, С.А. Назаревич, В.М. Балашов, А.Ю. Гулевитский // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 10. С. 109-114.
3. Чабаненко, А.В. Разработка методов повышения качества аддитивного производства конструктивных элементов РЭА / А.О. Смирнов, А.В. Чабаненко // Вопросы радиоэлектроники. 2018. №1. С. 118-122.
4. Чабаненко, А.В. Управление качеством корпусных элементов РЭА / А.В. Чабаненко // Стандарты и качество». 2018. №2. С. 90-94.
5. Чабаненко, А.В. Выявление ключевых показателей качества технологического процесса производства корпуса РЭА на основе FDM / А.В. Чабаненко., Е.Г. Семенова, С.А. Назаревич // Радиопромышленность. 2017 №4. С. 141-145.
6. Чабаненко, А.В. Анализ технического уровня производственных мощностей предприятия /А.В. Чабаненко // Вопросы радиоэлектроники 2017. № 5. С. 58-60.
7. Чабаненко, А.В. Совершенствование процессов управления наукоемким производством и оценки его потенциала / А.В. Чабаненко // Радиопромышленность. 2016.№4. С. 45-48.
8. Чабаненко, А.В. Стандартизация наукоемкой продукции / А.В. Чабаненко // Стандарты и качество, 2015. №1. С. 169-176.

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в системы цитирования Web of Science и Scopus

9. Chabanenko, A.V. Application of numerical simulation systems when using composite materials used in additive production / A.V. Chabanenko ,A.V. Kurlov , A.S. Smirnova, G.V. Getmanova, A.U. Gulevitskiy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 502034.
10. Chabanenko, A.V. Construction of mathematical model of training and professional development of personnel support of additive production of REA / A.V. Chabanenko, A.V. Kurlov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 502041.
11. Chabanenko, A.V. Quality assurance of hull elements of radio-electronic equipment by means of control system / A.V. Chabanenko, A.P. Yastrebov // 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). 2018. №18232134.
12. Chabanenko, A.V. Electrodynamics analysis of materials for the antenna elements / A.V. Chabanenko, E.A. Frolova, V.M. Balashov, M.S. Smirnova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. №450.

Учебно-методические издания

13. Чабаненко, А.В. Технология аддитивного производства, моделирование и управление качеством

процесса послойного синтеза: учебное пособие / А.В. Чабаненко, С.А. Назаревич, А.Ю. Гулевитский, Я.А. Щеников. СПб.: Изд-во: ГУАП, 2018. С. 206.

14. Чабаненко, А.В. Инструменты управления качеством: учебно-методическое пособие / А.В. Чабаненко, С.А. Назаревич. СПб.: Изд-во: ГУАП, 2015. С. 106.

Статьи и материалы конференций

15. Чабаненко, А.В. Имитационное моделирование процессов построения физических моделей объекта / А.В. Чабаненко, Е.А. Фролова // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. ГУАП, 2018. С. 158-169.

16. Чабаненко, А.В. Statistical quality control of the process of layered synthesis of hull elements REA А. В. Чабаненко // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование». ГУАП. 2018. С. 32-34

17. Чабаненко, А.В. Управление качеством 3D печати посредством моделирования компонентной базы аддитивной установки/ А.В. Чабаненко// Избранные научные труды Восемнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством» М. 2019. С. 362-368.

18. Чабаненко, А.В. Обеспечение качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям с учётом входимости модулей РЭА / А.В. Чабаненко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. ГУАП, 2018. С. 192-194.

19. Чабаненко, А.В. Управление качеством процесса послойного синтеза корпусных элементов РЭА // А.В. Чабаненко, Е.Г. Семенова, В.О. Смирнова // Избранные научные труды Семнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством» М. 2018. №1 (444). С. 332-337.

20. Чабаненко, А.В. Обучение основам работы на аддитивных установках с учётом экологических требований 3d-печати / А.В. Чабаненко, С.А. Назаревич // Всероссийская научно-практическая конференция: «Формирование престижа профессии инженера у современных школьников». СПб. 2018. С. 249-253.

21. Чабаненко, А.В. Диагностические методики для повышения качества технической системы / А.В. Чабаненко, Е.Г. Семенова, С.А. Назаревич // Избранные научные труды Семнадцатой Международной научно-практической конференция «Управление качеством» М.,2018. № 1 (444) С. 280-288.

22. Чабаненко, А.В. Обучение основам работы на аддитивных установках с учётом экологических требований 3D-печати / А. В. Чабаненко, С.А. Назаревич // Всероссийская научно-практическая конференция: «Формирование престижа профессии инженера у современных школьников». СПб. 2017. С. 248-251.

23. Чабаненко, А.В. Production of CEA casings based on combined FDM technology / А. В. Чабаненко // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование». ГУАП. 2017. С. 9-12.

24. Чабаненко, А.В. Оценка производства корпусов РЭА на основе комбинированной FDM технологии / А. В. Чабаненко // Избранные научные труды Шестнадцатая Международная научно-практическая конференция «Управление качеством» М. 2017. №1(416). С. 374-379.

25. Чабаненко, А.В. Analysis and synthesis of organizational and technical solutions in the organization of the high-tech production А. В. Чабаненко // Известия кафедры UNESCO «Дистанционное инженерное образование». ГУАП. 2016. С. 24-28.

26. Чабаненко, А.В. Комбинированная технология производства в авиастроительной промышленности / А. В. Чабаненко // Международная научно-практическая конференция «Новая наука: стратегии и вектор развития» Ижевск. 2016. №1 С. 32-37.

27. Чабаненко, А.В. Разработка и внедрение системы управления производством инновационной продукции / А.В. Чабаненко // Избранные научные труды Четырнадцатой Международной научно-практической конференции «Управление качеством» М. 2015. №1 (931) С. 159-164.

28. Чабаненко, А.В. Стандартизация наукоёмкой продукции / А.В. Чабаненко // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем. ГУАП. 2015. С. 48-56.

Свидетельство о государственной регистрации

29. Чабаненко, А.В. «База данных компонентов обеспечения качества корпусных элементов, выполненных по аддитивным технологиям» // Чабаненко А.В., Семенова Е.Г. рег. № 20186221531 от 27.09.2018 г.