

На правах рукописи



ШОГЕНОВ ВАДИМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА
АЛЮМИНИЕВОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ
НА БАЗЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный руководитель: **Малышева Татьяна Витальевна**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Фролова Елена Александровна**
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», заведующий кафедрой инноватики и интегрированных систем качества;

Евлоева Малика Вахаевна
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», доцент кафедры автоматизации и управления.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Защита состоится «30» июня 2026 года в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.2.312.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Учёного совета, А – 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=585235>

Автореферат диссертации разослан « _____ » 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.312.08,
доктор экономических наук, доцент



Кудрявцева
Светлана
Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Концепция технологического развития России до 2030 года предусматривает достижение технологического суверенитета критически важной промышленной продукции в сфере авиастроения. Конструкция летательных аппаратов предусматривает применение принципиально новых трехслойных элементов в виде силовых сотовых заполнителей на основе алюминиевой фольги и полимерных клеев, что позволяет существенно снизить вес самолета, повысить физико-механические и летно-тактические характеристики.

В России было освоено производство только алюминиевых сотовых заполнителей легких номиналов с удельным весом до 90 кг/м^3 в соответствии с ОСТ 1 00728–75, которые обладали низкими физико-механическими свойствами. Требовалось впервые в стране разработать и поставить на производство силовые алюминиевые сотовые заполнители с удельным весом 129 кг/м^3 и 192 кг/м^3 . Такой опыт в России полностью отсутствовал, как и необходимый научный задел, технологии производства, оборудование и оснащение. Технологией изготовления необходимых силовых сотовых заполнителей обладала только компания Hexcel (США).

Задача разработки отсутствующих в России силовых алюминиевых сотовых заполнителей, научно обоснованная разработка технологий их серийного производства, создание специализированного промышленного оборудования и освоение производства потребовала применения новых подходов к организации наукоемкого производства, а именно, к этапам исследования, разработки, планирования, тестирования продукции и выхода на серийный выпуск изделий. Результатом должно стать обеспечение выпуска продукции, соответствующей заданным техническим условиям, в запланированном количестве и в установленные сроки.

Ключевым законодательным актом для развития российского авиастроения является государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности». В документе обозначено, что в условиях высокой импортозависимости развитие отрасли ограничивается задержкой завершения программ создания новых видов авиационной техники и оборудования. В свою очередь, сложившиеся обстоятельства являются катализатором реализации программ импортозамещения, а именно, разработки и освоение новой технически сложной продукции в кратчайшие сроки.

Система ГОСТ по разработке и постановке продукции на производство охватывает более 20 стандартов, лишь 5 из которых разработаны (актуализированы) и введены в действие после 2015 года: ГОСТ 15.000-2016 (1982), ГОСТ 15.011-2024 (1982), ГОСТ 15.101-2021 (1998), ГОСТ 15.301-2016 (1988), ГОСТ Р 15.016-2016. При этом, в стандартах порядок разработки и постановки на производство наукоемкой или технически сложной продукции отдельно не выделен, соответственно, специфика организации работ в условиях ограничения критических технологий, оборудования, комплектующих изделий и материалов, не изучена, не унифицирована и не стандартизирована.

В этой связи существует необходимость разработки организационно-технических решений по организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия, что свидетельствует об актуальности выбранной темы исследования.

Степень разработанности темы исследования. Зарубежные и российские ученые уделяют большое внимание вопросам организации и управления наукоемким производством машиностроения и смежных отраслей, что ставит в приоритет вопросы формирования подходов, стандартов и методик организации процессов функционирования интегрированной научно-производственной структуры для целей разработки технологии и освоения серийного производства в рамках импортозамещения.

Вопросы организации производства, управления качеством и жизненного цикла наукоемких изделий машиностроения рассмотрены в трудах Андреевой С.А., Бром А.Е., Бурдина С.С., Иванченко Т.О., Краснова Ю.А., Тушавина В.А., Морозовой А.В., Ручьева А.Г., Жмаевой И.В., Кобина П.Н., Малышевой Т.В., Пястолова С.М., Шинкевича А.И., Вомака Д., Джонса Д., Кларка К., Уилрайта С., Карацу Х., Джорджа М., Хампрехта Г., Лайкера Д. и др.

Концептуальные основы и частные вопросы синтеза науки и производства, коммерциализации научных разработок на базе научно-производственного предприятия изучены в трудах Айрапетова А.Г., Ахмадиевой Г.М., Войта А.В., Егорова И.М., Кудрявцевой С.С., Мамурова Д.Э., Пророкова А.Н., Падемировой Р.М., Федоренко В.В., Сихля В., Мейера М., Ленерда Э., Смита П., Рейнертсена Д., Хирано Х., Файна Ч., Спира С. и др.

Проблемы базовых процессов, конструктивные технологии производства самолетов и цифровизация производства рассмотрены в трудах российских и зарубежных ученых, таких как Авдюхина Т.М., Буш А.В., Ведмидь П.А., Дружинин Т.С., Зиятдинов Н.Н., Иванов, А.И., Кузнецова Н.М., Магрицкий А.С., Нургалиев Р.К., Корогодова И.В., Пархимович В.А., Соловов А.В., Свиридов А.Г., Андерсон Д., Селлз М., Хейл Р., Захе Д., Цах М., Томпсон С., Тиemanн К., Даффи Б., Викери Д. и др.

Однако организация производств наукоемкого машиностроения в контексте освоения производства импортозамещающих изделий сдерживается рядом недостаточно исследованных областей и отсутствием организационно-технических решений, формирующих рекомендации в области разработки и выбора моделей и методов организации производства на базе научно-производственного предприятия, стандартизации работ критического пути цикла производства сотовых заполнителей

Цель диссертационного исследования состоит в разработке научно-технических решений по организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия.

Реализация поставленной цели предполагает формулировку и последовательное решение следующих научно-практических **задач**:

1) предложить новый научный подход к организации процесса разработки технологии и освоения серийного производства сотовых заполнителей на основе синтеза инженерных инструментов;

2) разработать методы и модели оптимизации критического пути цикла производства сотовых заполнителей в условиях научно-производственного предприятия;

3) разработать математические модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства в условиях отработки технологии;

4) провести апробацию предложенных научно-технических решений по организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя в условиях научно-производственного предприятия.

Объектом диссертационного исследования выступает производственная система на базе научно-производственного предприятия.

Предметом исследования является организация процесса разработки технологии и освоения серийного производства алюминиевого сотового заполнителя.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности. Область диссертационного исследования соответствует научной специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в части: п.15. Научно-практическое развитие инженерных инструментов управления, организации производственных систем, а также баз знаний; п.16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов; п.20. Анализ и синтез организационно-технических решений. Стандартизация, унификация и типизация производственных процессов и их элементов.

Научная новизна заключается в разработке научно-технических решений по организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия:

1. *Предложена* структурно-организационная модель освоения серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на основе синтеза инженерных инструментов и методов и активного (AM), быстореагирующего (QRM) и бережливого (LP) производства, *отличающаяся* интегрированным применением параллельного проектирования, сквозного цикла и принципа «точно в срок», *позволяющая* реализовать приоритет указанных подходов на разных этапах жизненного цикла производства, сократить сроки разработки, оптимизировать потоки для решения задач импортозамещения (пункт 20 паспорта специальности 2.5.22).

2. *Разработан* организационный инструментарий (методика, модель, сетевой график) оптимизации критического пути цикла производства сотовых заполнителей в условиях научно-производственного предприятия, *отличающийся* использованием инструментов сокращения длительности производственных процедур в логике процессного подхода и системной динамики (POLCA, стандартизация процессов, реорганизация потоков) и этапной интеграцией методики в модель планирования производства Stage-Gate («Стадии–Ворота»), *позволяющий* на основе сетевого графика с распределенными функциями сократить длительность цикла производства, создать фундамент для цифровизации производства в виде стандартных операционных процедур, а также обеспечить качество, прослеживаемость и снижение рисков на всех этапах жизненного цикла (пункт 15 паспорта специальности 2.5.22).

3. *Разработан* комплекс математических моделей описания процесса производства сотового заполнителя (нейросетевая, оптимизационная, имитационная модели), *отличающийся* встраиванием системы коэффициентов подготовительных операций в нейросетевое моделирование объемов выпуска, решением задачи линейного программирования для оптимизации расхода ресурсов (алюминиевая фольга, клей) и вероятностной имитационной

моделью длительности цикла, *позволяющий* проводить многовариантный прогноз объема производства и выявлять «узкие операционные места» на основе анализа нестабильности коэффициентов, определять оптимальные нормы расхода материалов и уровень брака, что в комплексе обеспечивает количественное обоснование и сбалансированность плана запуска серийного производства в условиях отработки технологии (пункт 16 паспорта специальности 2.5.22).

Методология и методы исследования. При проведении исследования использованы теоретические положения в области организации производства, теории жизненного цикла производства продукции, бережливого и быстрореагирующего производства, всеобщего управления качеством, оптимизации и основополагающие принципы системотехнического моделирования.

Для обоснования выдвинутых в диссертации положений применены такие общенаучные методы исследования как диалектический и системный подход, метод формализации и моделирования, функционального моделирования, причинно-следственных связей, анализ и синтез; среди методов математического моделирования применены методы дескриптивной статистики, обучения нейронных сетей, имитационного моделирования, инструменты линейного программирования, позволившие провести исследование и обоснование разработанных решений.

Информационной базой исследования послужили данные, содержащиеся в трудах (монографиях, научных статьях, диссертациях) отечественных и зарубежных исследователей по анализируемой проблематике; законодательные акты, национальные и международные стандарты, инструктивные и методические материалы по организации производства авиастроения (ГОСТ 15.000-2016 (1982), ГОСТ 15.011-2024 (1982), ГОСТ 15.101-2021 (1998), ГОСТ 15.301-2016 (1988), ГОСТ Р 15.016-2016, ОСТ 1 00728-75 и др.), данные аналитических отчетов АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина».

Теоретическая значимость работы заключается в развитии инженерных инструментов организации и управления научно-производственными системами, подходов к синтезу концепций бережливого, быстрореагирующего и активного производства для синергетического эффекта в решении задач импортозамещения критических технологий, адаптации модели Stage-Gate для управления наукоемким производством, интегрирующей в единый контур НИОКР, стандарты качества, критерии технологической готовности, цифровые инструменты и процессы организационного обучения.

Обобщены результаты исследований и разработок, прослежены тенденции и закономерности, отражающие современный уровень организации наукоемкого производства самолетостроения, описанные в отечественных и зарубежных научных публикациях, и документах практической направленности. Доказаны положения, подтверждающие целесообразность использования методов и инструментов концепций организации производства LP, QRM и AM для повышения организационной гибкости, сокращения потерь и времени производственного цикла.

Практическая значимость исследования. Результаты диссертационного исследования имеют существенную практическую значимость для реализации инженерных проектов по разработке критических технологий и освоению серийного производства науко-

емких изделий российского самолетостроения, развития национальной системы стандартов в области организации полного цикла создания новой продукции, унифицированных требований к управлению сквозным процессом от научно-исследовательских работ до постановки на производство.

По итогам проведенного исследования разработан и внедрен ряд моделей, алгоритмов, методик организации производства алюминиевых сотовых заполнителей с постановкой приоритетов по этапам жизненного цикла производства, оптимизации критического пути и ключевых сырьевых ресурсов производственного процесса, создания стандартизированных операционных процедур с временными нормативами на основе математических зависимостей. Применение имитационной модели позволило разработать алгоритм оптимизации длительности производственного цикла, учитывающего объем и стоимость используемых ресурсов по этапам производства сотового заполнителя.

Положения, выносимые на защиту:

1. Структурно-организационная модель разработки технологии и освоения серийного производства сотовых заполнителей на основе синтеза инженерных инструментов организации производства LP, QRM и AM.

2. Организационный инструментарий оптимизации критического пути цикла производства сотовых заполнителей в условиях научно-производственного предприятия.

3. Комплекс математических моделей описания процесса разработки и производства сотового заполнителя.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность научных результатов подтверждается соответствием их положениям фундаментальной научной литературы по организации производственных систем элементов самолетостроения. Полученные теоретические результаты построены на известных научных положениях: практические результаты достигнуты с применением признанных информационных технологий, а ожидаемые результаты работы согласуются с опубликованным экспериментальным материалом по теме диссертации.

Основные результаты диссертации доложены и представлены на следующих научно-практических конференциях: «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (г. Казань, 2024), «Наука и технологии» (г. Москва, 2024), «Структурные основы модифицирования материалов МНТ-ХVII» (г. Обнинск, 2023), «Тенденции развития логистики и управления цепями поставок» (г. Казань, 2023), «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (г. Казань, 2022), «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (г. Москва, 2021) и др.

Результаты диссертационной работы внедрены в АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина» при разработке отечественных силовых сотовых заполнителей из алюминиевых сплавов и организации серийного производства. Методические рекомендации по развитию инженерных инструментов организации наукоемкого производства с использованием полимерных композиционных материалов использованы при разработке образовательных программ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», что подтверждено справками о внедрении результатов диссертации.

Научные положения и решения, полученные автором, зарегистрированы в виде патента на изобретение № 2766282 «Способ сборки пакета сотового заполнителя» (2022г.).

Публикации. По теме исследования опубликовано 12 научных работ общим объемом 7,44 п. л. (в т.ч. лично автора – 3,73 п. л.), из них 3 статьи в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ – «Компетентность», «Известия Самарского научного центра Российской академии наук», патент на изобретение, статьи в сборниках научно-практических международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержит 59 рисунков и 19 таблиц. Список литературы насчитывает 125 источников. Общий объем диссертационной работы – 177 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении освещена актуальность предлагаемого исследования; определены цели и задачи работы; раскрыты основные положения, выносимые на защиту, и их научная новизна; определена теоретическая и практическая значимость результатов исследования; обобщены основные результаты, полученные в рамках исследования.

В первой главе «Научно-технический обзор подходов к организации производства на базе научно-производственного предприятия» рассмотрены современный уровень развития организации производства наукоемких изделий авиастроения на базе научно-производственного предприятия, стандарты и нормативно-правовая база организации производства импортозамещающей наукоемкой продукции самолетостроения, а также проведен анализ передовых практик организации производства.

Действующая система стандартов с позиции организации производства новой продукции самолетостроения в рамках НПП не отражает специфики организации полного цикла создания новой продукции в наукоемких отраслях, таких как авиастроение, не содержит выделенных и унифицированных требований к управлению сквозным процессом – от научно-исследовательских работ до постановки на производство – в условиях ограничений по критическим технологиям, оборудованию и материалам. Стандарты направлены либо на общий производственный менеджмент и оценку качества, либо на регламентацию отдельных этапов (техническое и технологическое проектирование, выполнение НИОКР сторонними исполнителями), при этом не уделяя внимание внутренним процессам трансфера технологий между подразделениями НПП и не предлагая целостной нормативной модели для функционирования интегрированной научно-производственной структуры.

Анализ передовых практик производства наукоемкой продукции самолетостроения позволил изучить модели организации производства «вертикальная интеграция», «системный интегратор», «модель государственно-частного партнерства», «сетцентрическая модель», и выделить прогрессивную сетцентрическую модель на базе «системного интегратора», как наиболее соответствующую требованиям к сложностям разработки и производства сложных изделий (рисунок 1).



Рисунок 1 – Характеристика сетецентрической модели организации производства наукоемкой продукции (обобщено автором)

Сетецентрическая модель основана на принципе взаимосвязи всех участников процесса в единую гибкую бесшовную сеть распределенного производства, объединяющую поставщиков разного уровня, научные и инженеринговые центры.

Во второй главе «Диагностика проблем и концепция научного подхода к организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП» выполнен анализ технико-организационного уровня производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП, разработана модель организации производства на основе синтеза концепций бережливого производства (LP), быстро реагирующего производства (QRM) и активного

производства (AM), а также предложена методика оптимизации критического пути производства, основанная на интеграции метода POLCA, стандартизации процессов и реорганизации логистических потоков.

Алюминиевый сотовый наполнитель представляет собой легкий и сверхпрочный конструкционный материал, состоящий из соединенных шестигранных ячеек из фольги (рисунок 2), используемый в качестве «промежуточного» слоя в панелях летательных

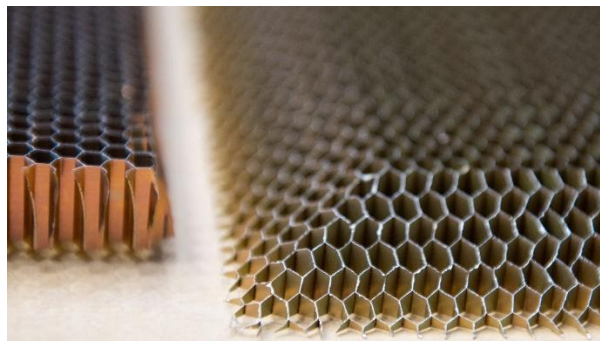


Рисунок 2 – Алюминиевый сотовый наполнитель

аппаратов. В диссертации определены этапы процесса организации производства сотовых наполнителей с учетом уровня наукоемкости предприятия, степени разработки изделия и готовности технической документации. Проведен сравнительный анализ концепций организации производства LP, QRM и AM с целью использования их принципов и инструментов для решения производственных задач:

повышения организационной гибкости, сокращения потерь и времени производственного цикла (таблица 1). Обосновано использование синтеза концепций LP, QRM, AM для решения задачи импортозамещения, что позволит повысить эффективность организации производства за счет синергетического эффекта.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики концепций организации производства LP, QRM и AM (обобщены автором)

Фактор	Активное производство	Быстрореагирующее производство	Бережливое производство
Цель	Повышение организационной гибкости	Сокращение времени общего цикла работ	Сокращение производственных потерь
Объект	Сеть создания продукта	Критический путь производства	Поток создания продукта
Тип производства	Мелкосерийное и единичное	Средне- и мелкосерийное	Крупносерийное
Организационная структура	Сетевая	Плоская	Иерархическая
Научный потенциал	Высокий	Средний	Низкий
Результат	Сокращение времени разработки и выпуска готового продукта	Сокращение времени жизненного цикла производства	Снижение производственных затрат и повышение качества продукции

Разработана концептуальная модель организации производства сотовых наполнителей на основе синтеза методов и инструментов активного, быстрореагирующего и бережливого производства с постановкой приоритетов подходов по этапам жизненного цикла производства (рисунок 3). Первый этап является наиболее наукоемким – разработка конструкции, выбор сырья и оборудования, испытание опытных образцов, разработка документации. Здесь параллельно задействуются подразделения, задача которых заключается в проведении опытно-конструкторских работ в кратчайшие сроки. Полагаем, что на дан-

ном этапе в приоритете должны быть принципы и инструменты концепции активного производства (АМ), такие как параллельное проектирование, реверс инжиниринг, быстрые циклы разработки для сокращения времени разработки нового продукта.

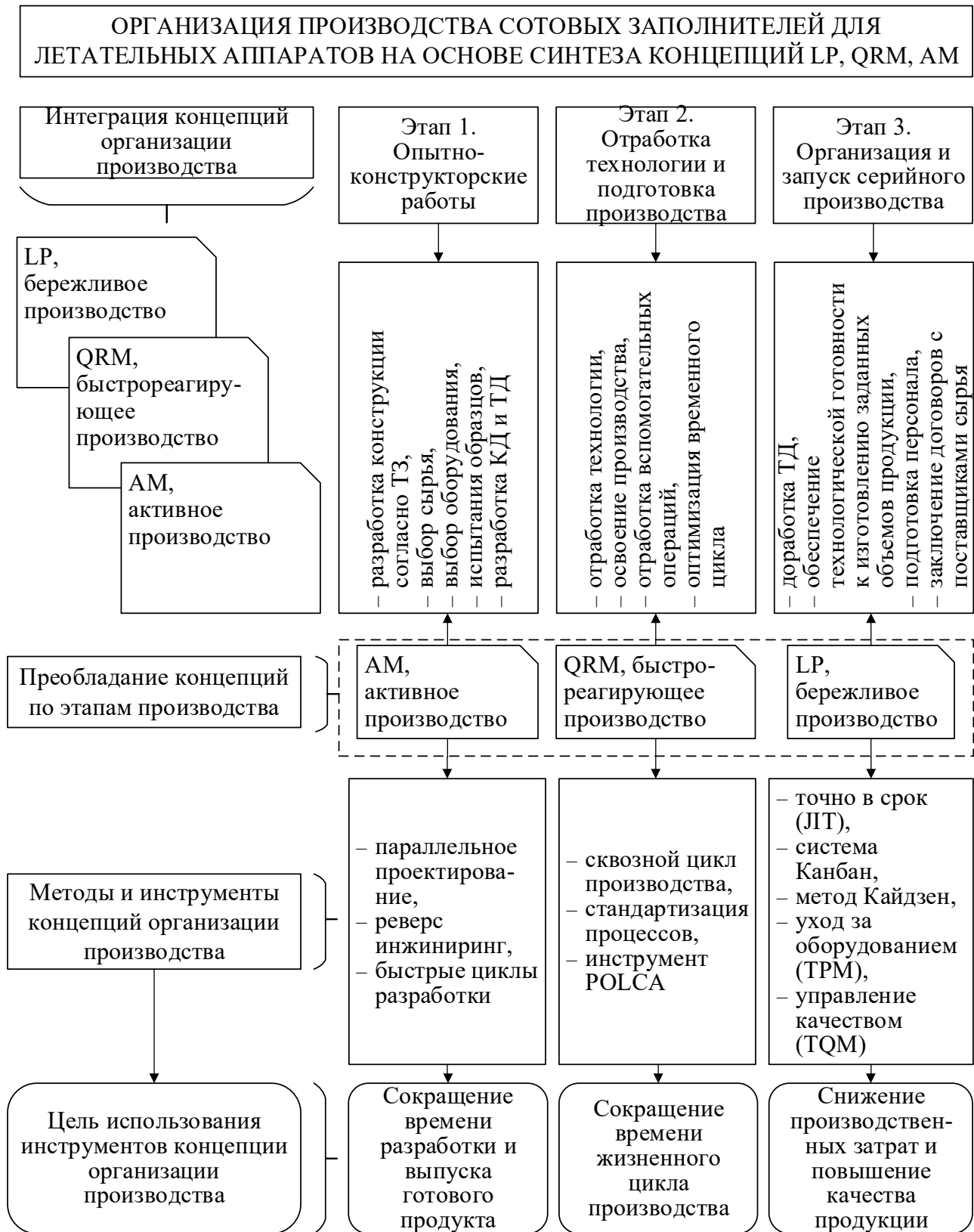


Рисунок 3 – Концептуальная модель организации производства сотовых заполнителей на основе синтеза LP, QRM и АМ (предложена автором)

На втором этапе производится отработка технологии, освоение производства, отработка основных и вспомогательных операций для достижения оптимальной продолжи-

тельности производственного цикла. В данном случае, в приоритете должны быть принципы и инструменты концепции быстрореагирующего производства (QRM), такие как сквозной цикл производства, стандартизация процессов, инструмент POLCA и др. Важным критерием этого этапа должно стать определение минимального критического пути производства (КПП).

Третий этап – это организация и запуск серийного производства. Вывод нового продукта в масштабное производство должен осуществляться, преимущественно, на принципах бережливого производства, позволяющих минимизировать производственные затраты и обеспечить соответствующее качество продукции. В данном случае целесообразно применение систем «точно в срок» (JIT) и Канбан, непрерывного совершенствования Кайдзен, всеобщего ухода за оборудованием (TPM), всеобщего управления качеством (TQM). Инструменты бережливого производства, актуальные при серийном производстве, позволяют выстроить эффективный поток создания продукта.

Предложена методика оптимизации критического пути цикла производства сотовых заполнителей, где ключевыми инструментами сокращения длительности производственных процедур с позиции процессного подхода и системной динамики являются методы организации производства POLCA, стандартизация процессов, реорганизация схем хранения запасов, комплектующих и инструмента (рис. 4). Реализация предлагаемого подхода к организации производства сотового заполнителя обеспечивает цифровой фундамент для цифровизации производства: методика создает для IT-системы дисциплинированные, стандартизированные и оцифрованные процессы; стандартные операционные процедуры (СОП) с точными временными нормативами являются готовыми алгоритмами для «цифровых двойников»; сбалансированные, визуализированные потоки, управляемые картами POLCA, – это модель для автоматизации диспетчеризации и планирования с помощью MES-систем. Материалы могут быть использованы при разработке и реализации программ импортозамещения на производстве, разработки новой продукции и организации производственного процесса, оптимизации длительности производственного цикла, внедрения инструментов концепций организации производства LP, QRM, AM.

В третьей главе «Модели и методы организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП» рассмотрена синергия методов параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» для организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия, представлена модель «Stage-Gate» («Стадии-Ворота»), обеспечивающая качество сквозного процесса разработки сотового заполнителя, а также выполнено имитационное моделирование управления процессом серийного производства импортозамещающих сотовых заполнителей.

Разработана диаграмма декомпозиции процесса создания серийного производства алюминиевого сотового заполнителя, преимуществом которой является возможность организации сквозного проектирования изделия, представляющего собой последовательность взаимосвязанных этапов, от зарождения идеи до выпуска серийного образца с участием всех ключевых подразделений в рамках единой команды научно-производственного предприятия (рисунок 4).



Рисунок 4 – Методика оптимизации критического пути производства сотовых заполнителей на основе интеграции метода POLCA, стандартизации и реорганизации логистики (разработана автором)

Обосновано, что методы параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» синергетичны, и, целесообразны для использования в реализации разработки и организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя. Данные методы связаны через организацию процессов проектирования и управления производством и направлены на сокращение сроков разработки изделий, повышение качества продукции и оптимизацию цепей поставок.

Для обеспечения качества сквозного процесса разработки сотового заполнителя процесс создания серийного производства формализован в формате модели Р. Купера Stage-Gate («Стадии-Ворота»), адаптированной под специфику НПП. Модель «Стадии-Ворота» позволяет снизить технические риски разработки, обеспечить максимальное соответствие стандартам, документирование и прослеживаемость, сокращение итераций и доработок, многоэтапную валидацию и верификацию процесса, обеспечить акцент на технологичность. В модель «Стадии-Ворота» встроена интеграция методов «сквозного цикла», «параллельного проектирования» и «точно в срок» (рисунок 5). Построен сетевой график реализации процесса разработки и производства сотового заполнителя на базе НПП, включающий 12 основных этапов жизненного цикла процесса, выполнение которых осуществляется 11 производственными подразделениями. Формализованы ключевые функции подразделений НПП и функции на этапах жизненного цикла сквозного процесса разработки и производства сотового заполнителя.

Разработана имитационная модель процесса производства сотового заполнителя, на основе которой проведен анализ структуры производственного процесса, вероятностный анализ длительности предшествующих производственным этапам и производственного цикла (рисунок 6). Анализ результатов моделирования показывает высокую сходимость математического ожидания и средних значений по всем этапам производства, что свидетельствует об устойчивости разработанной модели и незначительном разбросе случайных факторов.

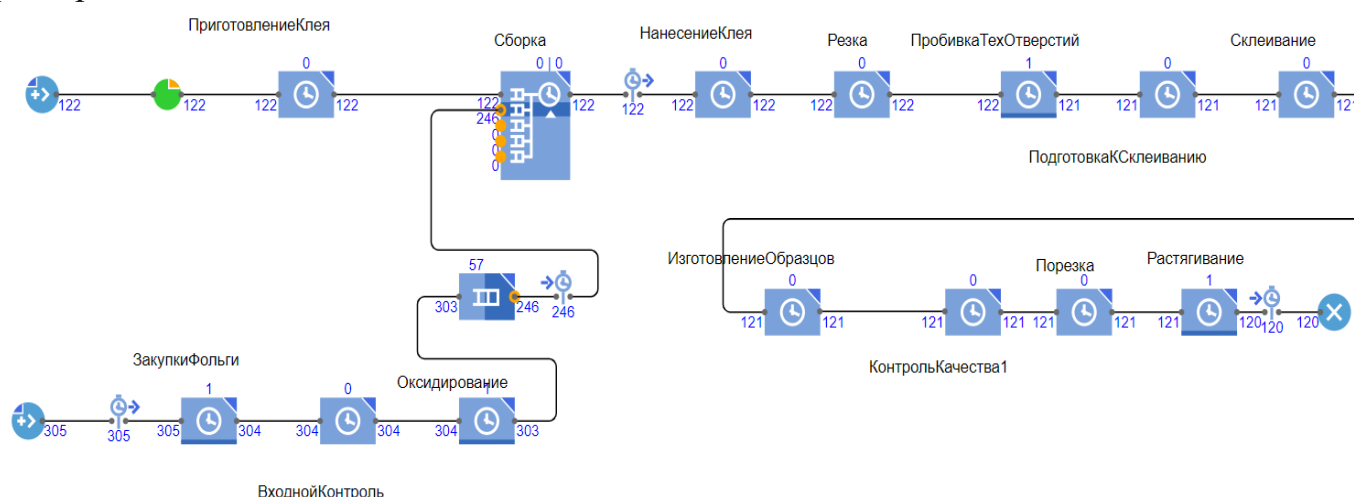


Рисунок 6 – Имитационная модель процесса производства сотового заполнителя (построена автором)

Общая продолжительность производственного процесса формирования сотового заполнителя стабильно составляет около 54 дней, при этом допроизводственные этапы и производственный цикл имеют сопоставимую длительность (около 27 дней каждый).

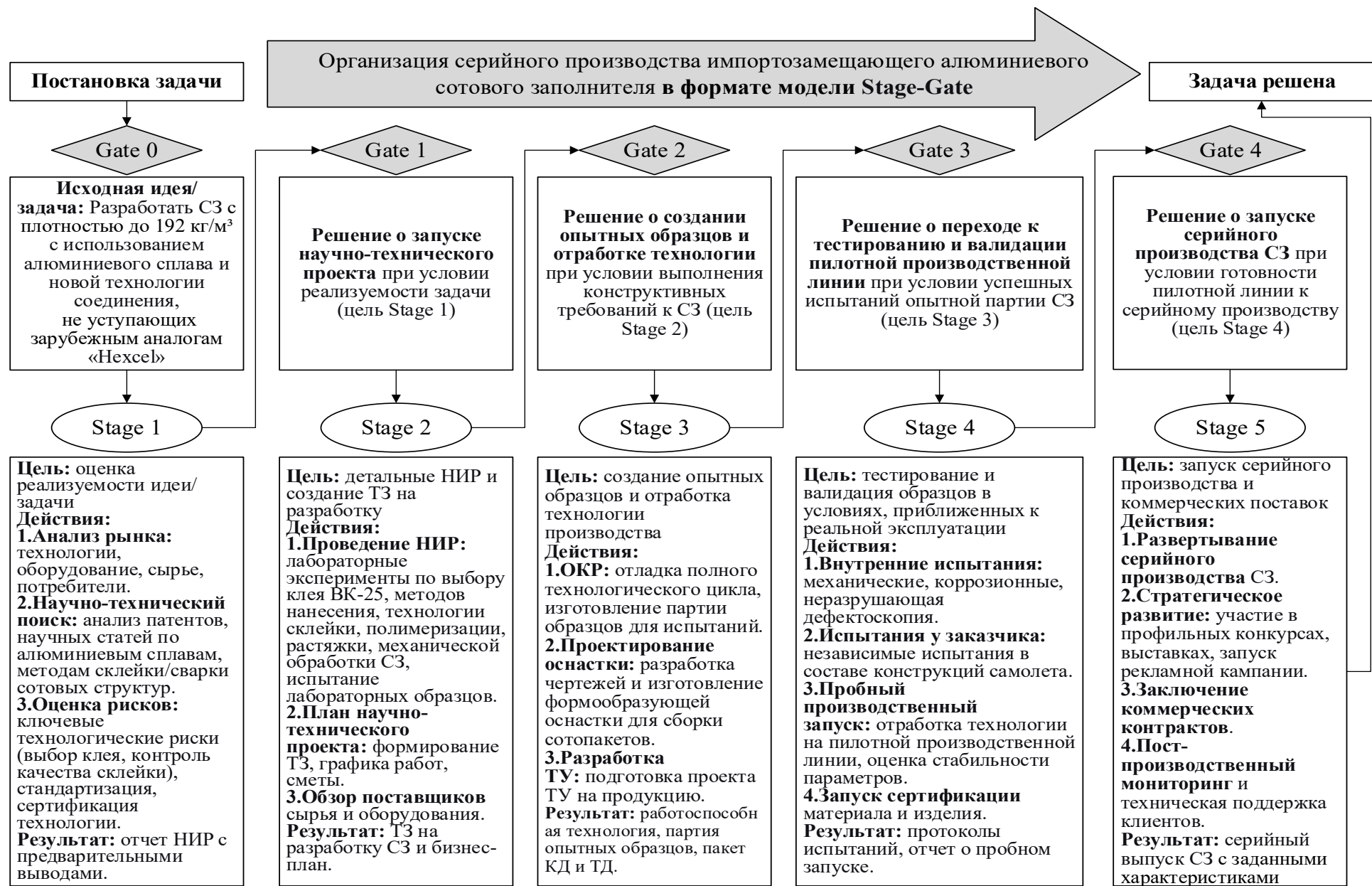


Рисунок 5 – Модель организации серийного производства импортозамещающего алюминиевого сотового заполнителя в формате Stage-Gate «Стадии-Ворота» (разработана автором)

Применение имитационной модели для совершенствования процесса производства сотового заполнителя позволило разработать алгоритм оптимизации длительности производственного цикла, учитывающего объем и стоимость используемых ресурсов по этапам производства (рисунок 7).

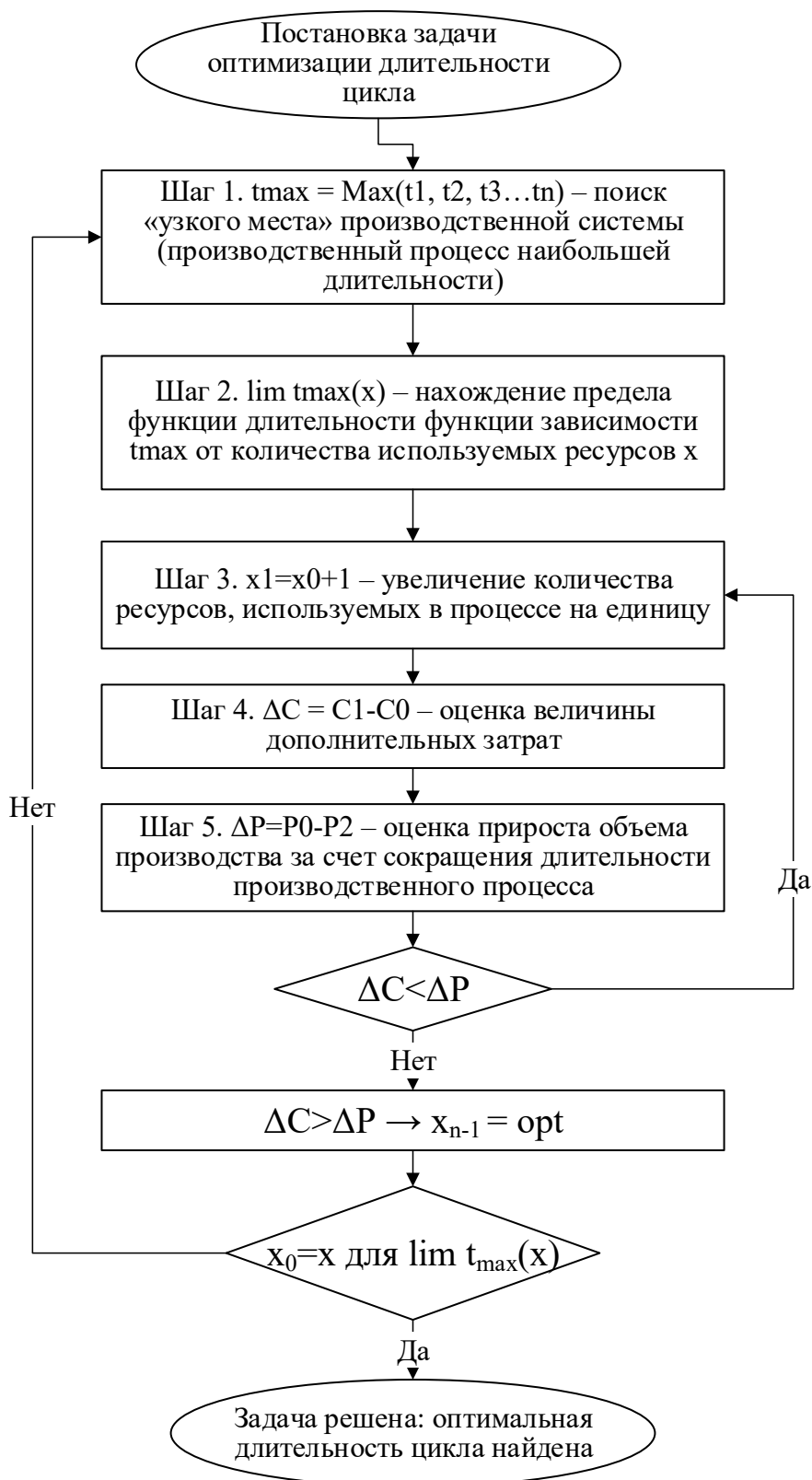


Рисунок 7 – Алгоритм оптимизации длительности производственного цикла с учетом ограниченности ресурсов и минимизации совокупных затрат основе полученной имитационной модели (разработан автором)

Использование данного алгоритма для оптимизации длительности производственного процесса и объема используемых ресурсов позволило определить оптимальный объем ресурсов для каждого этапа процесса производства сотового заполнителя.

В четвертой главе «Практическая реализация научно-технических решений по организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП» проведена апробация модели организации производства сотового заполнителя на основе синтеза концепций LP, QRM и AM в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина, выполнено нейросетевое моделирование и прогнозирование процесса запуска серийного производства на основе опытных данных, а также решена задача линейного программирования для оптимизации расхода ресурсов (алюминиевая фольга, клей ВК-25) при максимальном выходе продукта.

Математическое описание длительности производственного цикла основано на методике определения критического пути, когда изначально все работы имеют нулевой запас времени. Начальные сроки выполнения работ ($T_{st(i)}$) определены как:

$$T_{st}(i) = \sum_{i=0}^n t_{max} , \quad (1)$$

где t_{max} – продолжительность производственных процедур до оптимизации;

i – производственная процедура;

n – количество производственных процедур.

Продолжительность выполнения работ после совершенствования критического пути ($T_{fn(i)}$) определено по формуле:

$$T_{fn}(i) = \sum_{i=0}^n t_{mix} , \quad (2)$$

где t_{mix} – продолжительность производственных процедур после оптимизации.

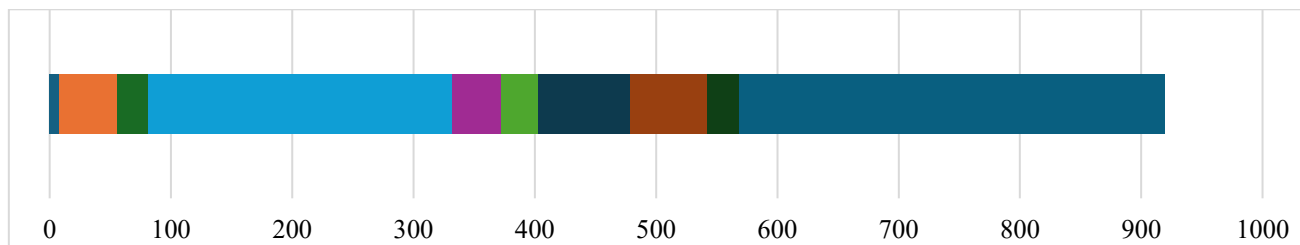
Временной резерв продолжительности производственных процедур или резерв сокращения критического пути производства (R_{knp}) равен:

$$R_{knp(i)} = T_{st}(i) - T_{fn}(i). \quad (3)$$

В результате внедрения модели организации производства на основе синтеза LP, QRM и AM и организационного инструментария оптимизации критического пути производства в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» длительность производственного цикла удалось сократить на 261,9 ч/ч или 28,5%, нарастить объемы производства сотового заполнителя с 20 до 120 м³ в течение 36 месяцев (табл. 2, рис. 8).

Таблица 2 – Сокращение длительности производственного цикла после совершенствования процесса на основе методов организации производства концепций QRM и LP (рассчитано автором)

Этапы ПЦ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ, ч/ч
Длительность до оптимизации, ч/ч	7,9	47,9	25,3	250,3	40,3	31,3	75,9	63,1	26,8	350,3	919,1
Длительность после оптимизации на основе методов QRM и LP, ч/ч	5,1	34,6	21,9	197,0	20,3	26,0	51,8	21,2	21,1	258,2	657,2
Сокращение цикла, ч/ч	2,8	13,3	3,4	53,3	20,0	5,3	24,1	41,9	5,7	92,1	261,9



а) длительность производственного цикла до оптимизации, ч/ч



б) длительность производственного цикла после оптимизации на основе методов QRM и LP, ч/ч

Рисунок 8 – Критический путь цикла изготовления сотовых наполнителей до и после совершенствования организации производства (рассчитано автором)

Для расчета и моделирования процесса запуска серийного производства предложен коэффициент подготовительных операций для изготовления сотового пакета в зависимости от уровня отработки технологии, рассчитываемый как отношение объема работ на этапе подготовительной операции к выпуску готового продукта (рис. 9):

$$K_{по_i} = \frac{V_{по_i}}{V_{гп}}, \quad (4)$$

где $K_{по}$ – коэффициент подготовительной операции; $V_{по}$ – объем работ подготовительной операции, м³; $V_{гп}$ – объем выпуска готового продукта; i – подготовительная операция.

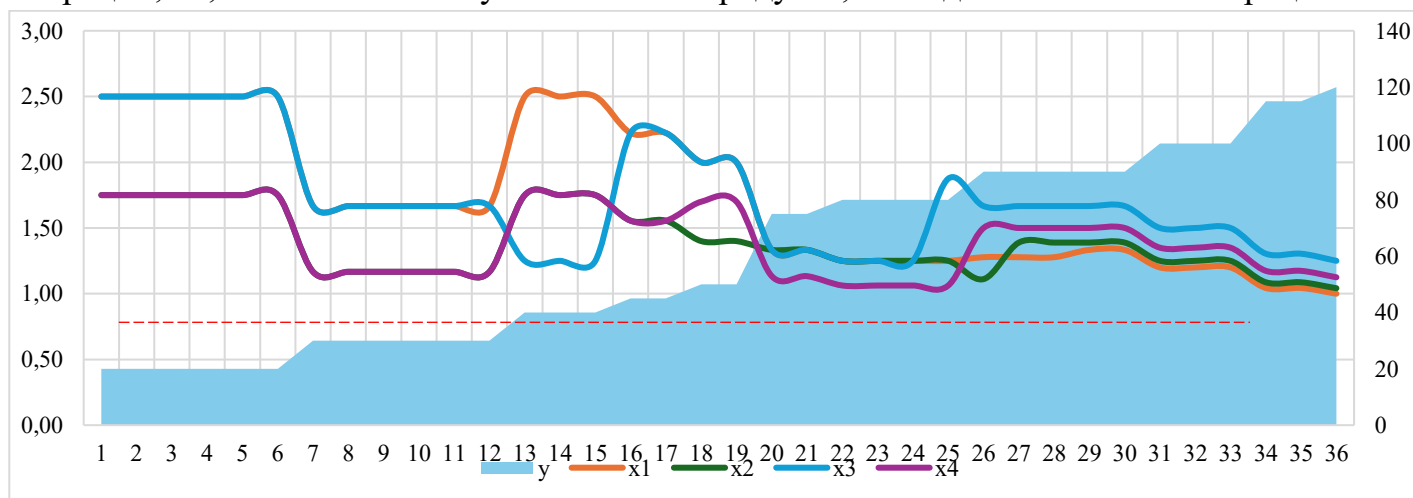


Рисунок 9 – Динамика коэффициентов подготовительных операций для изготовления сотового пакета в зависимости от уровня отработки технологии (построено автором)

Примечание:

y – объем выпуска готового продукта ($V_{гп}$);

x_1 – коэффициент нанесения клеевых полос ($K_{по_1}$); x_2 – коэффициент сборки сотового пакета ($K_{по_2}$); x_3 – коэффициент склейки в автоклаве ($K_{по_3}$); x_4 – коэффициент растяжки в сотовой панели ($K_{по_4}$).

Разработана нейросетевая модель процесса запуска серийного производства импортозамещающего сотового заполнителя в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», описывающая зависимость между параметрами длительного процесса запуска серийного производства – взаимосвязь объема обрабатываемых подготовительных операций с объемом выпуска готового сотового заполнителя (табл. 3).

Таблица 3 – Параметры нейронной сети для моделирования процесса запуска серийного производства (рассчитано автором)

Параметр нейронной сети	Значение
Архитектура	MLP 4-3-1
Производительность обучения	0,999847
Контрольная производительность	0,999125
Тестовая производительность	0,999902
Ошибка обучения	0,141277
Контрольная ошибка	3,468262
Тестовая ошибка	0,17019
Алгоритм обучения	BFGS 100
Функция активации скрытых нейронов	Экспонента
Функция активации выходных нейронов	Тождественная

Сумматоры входных переменных x_1, x_2, x_3, x_4 и синаптических весов t_1, t_2, t_3 :

$$\begin{aligned} t_1 &= 0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91; \\ t_2 &= 0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32; \\ t_3 &= -2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88. \end{aligned} \quad (5)$$

Функция активации скрытых нейронов преобразует сумматоры t_1, t_2, t_3 в выходной сигнал нейрона скрытого слоя ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Для скрытых нейронов используем экспоненту $\exp(t) = e^t$ (рост с коэффициентом):

$$\begin{aligned} \sigma(x_1) &= e^{0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91}; \\ \sigma(x_2) &= e^{0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32}; \\ \sigma(x_3) &= e^{-2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88}. \end{aligned} \quad (6)$$

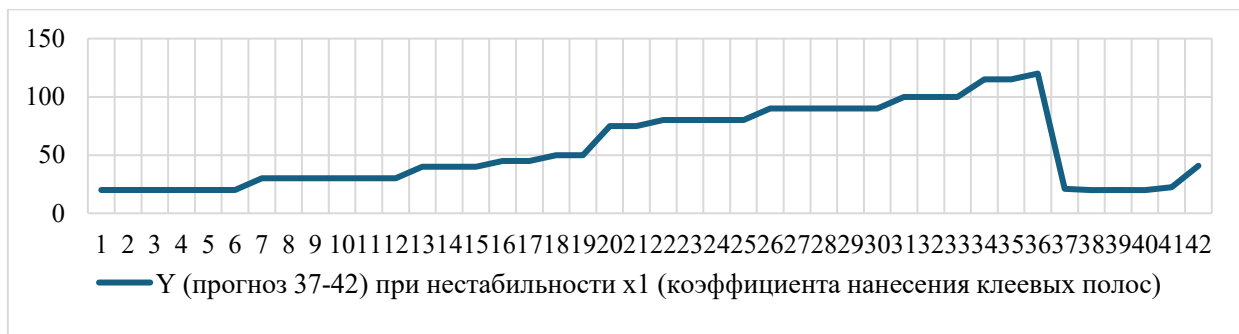
Сумматор выходной переменной y и синаптических весов t_4 :

$$t_4 = 2,34e^{0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91} - 1,35e^{0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32} + 0,58e^{-2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88} - 1,15. \quad (7)$$

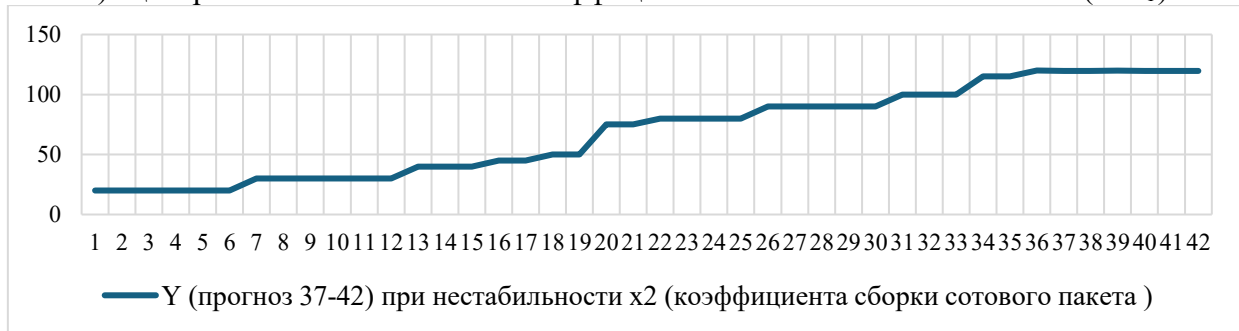
Функция активации выходного нейрона (y) – тождественная $g(t) = t$. Модель процесса запуска серийного производства сотового заполнителя:

$$y = 2,34e^{0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91} - 1,35e^{0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32} + 0,58e^{-2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88} - 1,15. \quad (8)$$

Проведено прогнозирование объема выпуска готового сотового заполнителя по трем сценариям обработки технологии производства при условии нестабильности коэффициентов подготовительных операций для выявления «узких мест» технологической цепи (рисунк 10).



а) сценарий 1 – нестабильность коэффициента нанесения клеевых полос (Kno_1)



б) сценарий 2 – нестабильность коэффициента сборки сотового пакета (Kno_2)



в) сценарий 3 – нестабильность коэффициента склейки в автоклаве (Kno_3)



г) сценарий 4 – нестабильность коэффициента растяжки в сотовопанели (Kno_4)

Рисунок 10 – Прогноз объема готового сотового заполнителя с учетом нестабильности подготовительных операций по четырем сценариям на 37–42 месяца (построено автором)

Нестабильность начальной операции нанесения клеевых полос вызывает наибольшее падение производительности с плановых 120 м³ до уровня 20-40 м³, операции сборки сотового пакета – минимальное влияние и объемы производства сохраняются на уровне 119,7 м³, операции склейки в автоклаве – производство снижается до уровня 68-95 м³ и ограничивает пропускную способность производства, операция растяжки в сотовопанели не вызывает снижение объемов производства. Для минимизации рисков необходимо внедрение системы превентивного обслуживания, создание банка валидированных режимов и резервирование мощностей.

Путем решения задачи линейного программирования с введенными ограничениями по доле брака и объемам операций сборки сотового пакета и нанесения клеевых полос определены оптимальные значения расхода алюминиевой фольги в 75,05 м²/м³ и клея Вк-25 в 33,53 кг/м³ при объеме производства сотового заполнителя 95,92 м³ (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты задачи линейного программирования для определения оптимальных объемов расхода ресурсов при максимальном выходе сотового заполнителя (рассчитано автором)

Параметры		Найденное значение
Объем производства сотового заполнителя, м ³	y	95,92
Оптимальное значение расхода алюминиевой фольги, м ²	x1	75,05
Оптимальное значение расхода клея Вк-25, кг	x2	33,53
Доля бракованной продукции (средняя по операциям), %	z	13,64
Объем операции по сборке сотового пакета, м ³	w1	123,45
Объем операции по нанесению клеевых полос, м ³	w2	120,00

Целевая функция задачи линейного программирования:

$$y = 243,73 - 0,146x_1 - 4,082x_2, y \rightarrow \max \quad (9)$$

где y – выход готового сотового заполнителя, м³; x₁ – расход алюминиевой фольги, м²; x₂ – расход клея Вк-25, кг.

В качестве ограничений приняты прямые условия по величине x₁ и x₂, а также неравенства, выраженные как взаимосвязь:

- расхода алюминиевой фольги (x₁, м²) и доли бракованной продукции (z, %);
- расхода клея Вк-25 (x₂, кг) и доли бракованной продукции (z, %);
- расхода алюминиевой фольги (x₁, м²) и объема операции по сборке сотового пакета (w₁, м³);
- расхода клея Вк-25 (x₂, кг) и объема операции по нанесению клеевых полос (w₂, м³).

Система ограничений линейной функции (9) будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 75 \leq X_1 \leq 105 \\ 30 \leq X_2 \leq 50 \\ 11,33 \leq -24,97 + 0,51x_1 \leq 31,67 \\ 11,33 \leq -13,68 + 0,82x_2 \leq 31,37 \\ 35 \leq 355,20 - 3,09x_1 \leq 125 \\ 50 \leq 247,07 - 3,79x_2 \leq 120. \end{array} \right. \quad (10)$$

Расчетные объемы технологических операций, составляющие 123,45 м³ для сборки сотового пакета и 120,00 м³ для нанесения клеевых полос, количественно подтверждают сбалансированность производственного плана.

Важным результатом является прогнозируемое сокращение средней доли бракованной продукции в период отработки технологии до уровня 13,64%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проведенного исследования получены важные научно-технические результаты в области организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия. Обобщающий результат работы за-

ключается в разработке и выборе моделей и методов организации производства, стандартизации работ критического пути цикла производства сотовых заполнителей в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

1. Действующая система стандартов с позиции организации производства новой продукции самолетостроения в рамках НПП не отражает специфики организации полного цикла создания новой продукции в наукоемких отраслях, не содержит выделенных и унифицированных требований к управлению сквозным процессом – от научно-исследовательских работ до постановки на производство – в условиях ограничений по критическим технологиям, оборудованию и материалам.

2. Обосновано использование синтеза концепций LP, QRM, AM для решения задачи импортозамещения и разработана концептуальная модель организации производства сотовых заполнителей с постановкой приоритетов подходов по этапам жизненного цикла, что позволит повысить эффективность организации производства за счет синергетического эффекта. Предложена методика оптимизации критического пути цикла производства сотовых заполнителей, где ключевыми инструментами сокращения длительности производственных процедур с позиции процессного подхода и системной динамики являются методы организации производства POLCA, стандартизация процессов, реорганизация схем хранения запасов, комплектующих и инструмента.

3. Для обеспечения качества сотового заполнителя процесс создания серийного производства формализован в формате модели Stage-Gate («Стадии–Ворота»), адаптированной под специфику НПП. В модель «Стадии–Ворота» встроена интеграция методов «сквозного цикла», «параллельного проектирования» и «точно в срок». Результатом предложенных решений является уменьшение длительности производственного цикла в целом на 261,9 ч/ч или 28,5%, наращивание объемов производства сотового заполнителя с 20 до 120 м³ в течение 36 месяцев.

4. На основе опытных данных ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» разработаны: имитационная модель и алгоритм оптимизации длительности процесса производства сотового заполнителя с вероятностной оценкой времени производственных процедур; нейросетевая модель и прогнозирование объема выпуска готового изделия по трем сценариям отработки технологии производства при условии нестабильности коэффициентов подготовительных операций для выявления «узких мест» технологической цепи; оптимизационная модель расхода алюминиевой фольги и клея Вк-25 при максимальном объеме производства и уровне брака.

5. В результате практической реализации организационно-технических решений получено, что нестабильность операции нанесения клеевых полос вызывает падение производительности со 120 м³ до уровня 20-40 м³, операции сборки сотового пакета – объемы производства сохраняются на уровне 119,7 м³, операции склейки в автоклаве – производство снижается до уровня 68-95 м³, операция растяжки в сотовой панели не вызывает снижение объемов производства. Оптимальные значения расхода алюминиевой фольги составляют 75,05 м²/м³, клея Вк-25 – 33,53 кг/м³ при объеме производства сотового заполнителя 95,92 м³. Расчетные объемы технологических операций – 123,45 м³ для сборки сотового пакета

и 120,00 м³ для нанесения клеевых полос – количественно подтверждают сбалансированность производственного плана. Средняя доля брака в период отработки технологии прогнозируется на уровне 13,64%.

Рекомендуется использовать результаты исследования в практике научно-производственных предприятий машиностроения для целей реализации проектов импортозамещения по разработке и освоению производства технически сложных изделий в кратчайшие сроки при отсутствии научного задела, технологии, оборудования и оснащения; в деятельности профильных органов государственной власти, госкорпорации «Ростех» при формировании приоритетов научно-технологического развития в военной и гражданской сферах, создании документов национальной системы стандартизации для решения задач ускорения бизнес-процессов, внедрения цифровых технологий на предприятиях ОПК, увеличения скорости выпуска продукции высокого качества.

Перспективы темы заключаются в развитии системы стандартов по разработке критических технологий и освоению производства технически сложных изделий машиностроения, методов стандартизации и менеджмента качества на различных стадиях жизненного цикла серийного производства, в том числе с использованием CALS-технологий в автоматизированных, цифровых производственных системах.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

1. Шогенов, В. А. Моделирование процессов серийного производства импортозамещающих сотовых заполнителей / В. А. Шогенов // Компетентность. – 2025. – № 6. – С. 46–49. – 0,69 п.л.
2. Шогенов, В. А. Организация производства отечественных сотовых заполнителей для летательных аппаратов на основе синтеза концепций LP, QRM, AM / В. А. Шогенов, Т. В. Малышева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 2(124). – С. 108–115. – 0,92 п.л./0,64 п.л.
3. Шогенов, В.А. Некоторые аспекты обеспечения технологического суверенитета научно-производственного предприятия / А.И. Шинкевич, В.А. Шогенов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25, № 1(111). – С. 23–27. – 0,58 п.л./0,41 п.л.

Патент на изобретение

4. Шогенов, В. А. Патент № 2766282 Российская Федерация. Способ сборки пакета сотового заполнителя : № 2021400001 : заявл. 29.01.2021: опубл. 10.02.2022 / А.Г. Свиридов, Н.В. Выморков, Н.В. Степанов, В.А. Шогенов, А.А. Богачев, Д.В. Моторин ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – 3,47 п.л./0,87 п.л.

Публикации в сборниках материалов конференций

5. Шогенов, В. А. Автоматизация производства импортозамещающих алюминиевых сотовых заполнителей для авиастроения / В. А. Шогенов, Т. В. Малышева // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 30–31 октября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 285–288. – 0,2 п.л./0,14 п.л.

6. Шогенов, В.А. Исследование микроструктуры алюминиевой фольги с антикоррозионными покрытиями на основе оксида алюминия, полученными различными методами / А. А. Богачев, А. Н. Корнейчук, И. В. Авцынова, В. А. Шогенов // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*. – Пермь, 2025. – Т. 1. – С. 67–68. – 0,12 п.л./0,06 п.л.

7. Шогенов, В.А. Зависимость прочности клевого соединения в трехслойных конструкциях, осуществляемого без давления, от конструктивно-технических параметров / Е.Ю. Куприкова, А.С. Магрицкий, В.А. Жуков, В.А. Шогенов // *Сборник научных трудов «Наука и технологии»*. Том 1: сборник статей XLIV Всероссийской конференции, посвященной 300-летию РАН и 100-летию академика В.П. Макеева. – Москва, 2024. – с.85-90. – 0,35 п.л./0,20 п.л.

8. Шогенов, В. А. Влияние наномодифицированных полимерного заполнителя ПЗ-1 на физико-механические и технологические характеристики / А.С. Магрицкий, А.А. Богачев, И.В. Авцынова, В.А. Шогенов // *Сборник докладов XVII международного семинара «Структурные основы модифицирования материалов МНТ-XVII»*. – Обнинск, 2023. – С. 13-15. – 0,2 п.л./0,1 п.л.

9. Шогенов, В. А. Структура прошитых слоистых УКМ и ее влияние на ФМХ при сжатии в плоскости листа / П.Г. Бабаевский, А.Ю. Сеницын, В.А. Шогенов, А.Г. Свиридов // *Сборник докладов XVII международного семинара «Структурные основы модифицирования материалов МНТ-XVII»*. – Обнинск, 2023. – С. 17–19. – 0,22 п.л./0,12 п.л.

10. Шогенов, В.А. Диагностика материально-технической базы снабжения ресурсами НПП в российской промышленности / В. А. Шогенов // *Тенденции развития логистики и управления цепями поставок: сборник статей IV международной научно-практической конференции, Казань, 20–22 сентября 2023 года*. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 221–224. – 0,23 п.л./0,12 п.л.

11. Шогенов, В.А. Роль научно-производственных предприятий в модернизации промышленности / В. А. Шогенов // *Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 21–24 сентября 2022 года*. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2022. – С. 325–328. – 0,29 п.л./0,15 п.л.

12. Шогенов, В. А. Исследование свойств клея ВК-25, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками / А.А. Богачев, И.В. Авцынова, В.А. Шогенов, С.В. Ворвуль // *Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (г. Москва, 19 ноября 2021 г.)*, [Электронный ресурс] / НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. – М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. – С. 89–96. – 0,46 п.л./0,23 п.л.