

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., доцент Малышева Т.В.

Казань–2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	16
1.1 Современный уровень развития организации производства наукоемких изделий авиастроения на базе НПП.....	16
1.2 Стандарты и нормативно-правовая база организации производства импортозамещающей наукоемкой продукции самолетостроения.....	26
1.3 Анализ передовых практик организации производства наукоемкой продукции самолетостроения.....	38
Выводы по первой главе.....	46
2 ДИАГНОСТИКА ПРОБЛЕМ И КОНЦЕПЦИЯ НАУЧНОГО ПОДХОДА К ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ.....	48
2.1 Анализ технико-организационного уровня производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП.....	48
2.2 Разработка модели организации производства сотовых заполнителей на основе синтеза концепций бережливого (LP), быстро реагирующего (QRM) и активного (AM) производства.....	57
2.3 Разработка методики оптимизации критического пути производства сотовых заполнителей на основе интеграции метода POLCA, стандартизации и реорганизации логистики.....	65
Выводы по второй главе.....	80
3 МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА БАЗЕ НАУЧНО- ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	82
3.1 Синергия методов параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» для серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП.....	82

3.2 Модель «Stage-Gate» («Стадии-Ворота») для обеспечения качества сквозного процесса разработки сотового заполнителя	95
3.3 Имитационное моделирование управления процесса серийного производства импортозамещающих сотовых заполнителей	105
Выводы по третьей главе	115
4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА БАЗЕ НПП	117
4.1 Апробация модели организации производства сотового заполнителя на основе синтеза концепций LP, QRM, AM и их инструментов в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»	117
4.2 Нейросетевое моделирование и прогнозирование процесса запуска серийного производства сотового заполнителя на основе опытных данных по отработке технологии	126
4.3 Решение задачи линейного программирования для оптимизации расхода ресурсов (алюминиевая фольга, клей Вк-25) при максимальном выходе продукта	144
Выводы по четвертой главе	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	158
ПРИЛОЖЕНИЯ	175
Приложение 1	176
Патент на изобретение «Способ сборки пакета сотового заполнителя»	176
Приложение 2	177
Исходные данные задачи линейного программирования для оптимизации расхода ресурсов (алюминиевая фольга, клей Вк-25)	177

СПИСОК АББРЕВИАТУР

ЖЦ – жизненный цикл

ИРП – инструментально-раздаточный пункт

ИТ – информационные технологии

КД – конструкторская документация

КПП – критический путь производства

МС-21 – магистральный самолет XXI века

НЗП – незавершенное производство

НИИ – научно исследовательский институт

НИО – научно-исследовательский отдел

НИОКР – научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы

НПП – научно-производственное предприятие

НТС – научно-технический совет

ОАК – объединенная авиастроительная корпорация

ОГК – отдел главного конструктора

ОГТ – отдел главного технолога

ОМТС – отдел материально-технического снабжения

Ост – отраслевой стандарт

ОТК – отдел испытаний и контроля качества

ПО – программное обеспечение

САПР – система автоматизированного проектирования

СМК – система менеджмента качества

СОП – стандартная операционная процедура\

СТВ – стандартные временные показатели

ТД – техническая документация

ТЗ – техническое задание

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт

АФР – автоматизированное выкладывание волокна (Automated Fiber Placement)

AI – Искусственный интеллект (Artificial Intelligence)

AM – активное производство (Agile Manufacturing)

ASTM – Американское общество по испытаниям и материалам (American Society for Testing and Materials)

ATL – автоматизированная укладка ленты (Automated Tape Laying)

BFGS – итерационный алгоритм численной оптимизации Бройдена – Флетчера – Голдфарба – Шанно (Broyden – Fletcher – Goldfarb – Shanno)

CAD – Автоматизированное проектирование (Computer-Aided Design)

CAM – Автоматизированное производство (Computer-Aided Manufacturing)

CRM – Управление взаимодействием с клиентами (Customer Relationship Management)

IoT – интернет вещей (Internet of Things)

TPM – всеобщее обслуживание оборудования (Total Productive Maintenance)

JIT – «точно во время» (Just-In-Time)

VSM – картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping)

SMED – быстрая переналадка (Single-Minute Exchange of Die)

CNC – числовое программное управление (Computer Numerical Control)

DFA – проектирование для сборки (Design for Assembly)

E2E – сквозной цикл (End-to-End)

EN – европейские нормы/стандарты (European Norm)

ERP – планирование ресурсов предприятия (Enterprise Resource Planning)

FIFO – «первым пришел – первым ушел» (First In, First Out)

IEC – международная электротехническая комиссия (International Electrotechnical Commission)

IEEE – институт инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

LP – бережливое производство (Lean Production)

MES – система управления производственными процессами (Manufacturing Execution System)

MLP – многослойный перцептрон (Multilayer Perceptron)

PDCA – цикл «Планируй – Выполняй – Проверяй – Воздействуй» (Plan – Do – Check – Act)

PLC – программируемый логический контроллер (programmable logic controller)

PLM – управление жизненным циклом изделия (Product Lifecycle Management)

PMO – проектный офис (Project Management Office)

POLCA – система контроля потока работ на основе карточек (Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization)

QRM – быстро реагирующее производство (Quick Response Manufacturing)

RFID – радиочастотная идентификация (Radio-Frequency Identification)

SCADA – диспетчерское управление и сбор данных (Supervisory Control and Data Acquisition)

SCM – управление цепочкой поставок (Supply Chain Management)

TOC – теория ограничений (Theory of Constraints)

TQM – всеобщее управление качеством (Total Quality Management)

CALS – комплексная автоматизация/поддержка жизненного цикла изделия (Continuous Acquisition and Life-cycle Support)

ВВЕДЕНИЕ

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» [73]. 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 пп.: 15. Научно-практическое развитие инженерных инструментов управления, организации производственных систем, а также баз знаний; 16. Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов; 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), быстрореагирующего (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, *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 неустойчивости 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 быстро реагирующего 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, быстро реагирующего 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 наукоемких 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-XVII» (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.

1 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

1.1 Современный уровень развития организации производства наукоемких изделий авиастроения на базе НПП

Концепция технологического развития России до 2030 года предусматривает достижение технологического суверенитета критически важной промышленной продукции. В сфере авиастроения в условиях ограничения сырьевой базы активно ведутся научно-технические разработки по созданию производства критически важных комплектующих.

В конструкции летательных аппаратов отечественными разработчиками принято решение о широком применении полимерных композиционных материалов, что позволяет существенно снизить вес самолета, повысить физико-механические и летно-тактические характеристики. Изначальное применение полимерных композиционных материалов в элементах самолетов в настоящее время расширилось до изготовления крупных конструкций. К примеру, при производстве самолета МС-21, SJ-100, Ил-112В активно применяются отечественные композиционные материалы в силовых элементах и обшивках.

Освоение современных технологий изготовления самолетов в условиях ограничения ресурсов (интеллектуальных (знания и информация), материальных, временных, трудовых (квалифицированные специалисты)) требует от инженеров – менеджеров применения новых подходов к организации наукоемкого производства, а именно, к этапам исследования, разработки, планирования, тестирования продукции и выхода на серийный выпуск изделий. Результатом эффективного проектного управления и организации производством должно стать обеспечение выпуска продукции,

соответствующей заданным техническим условиям, в запланированном количестве и в установленные сроки.

Авиационная промышленность как изготовление наукоемких изделий включает в себя комплексную производственную активность и предполагает участие различных организаций: учебных заведений, научно-исследовательских институтов, проектных бюро, лётно-испытательных центров, предприятий машиностроения, включая авиационные компании и смежные промышленные секторы. Альтернативной организацией труда для производства наукоемких изделий является научно-производственное предприятие (НПП), призванное в комплексе осуществлять полный жизненный цикл от научных исследований и разработок до их освоения в производстве и выпуска продукции. Формат научно-производственного предприятия позволяет:

- усилить связь науки с производством;
- сократить сроки создания и освоения новой техники и технологии, повысить ее качество;
- обеспечить непрерывность научно-технического прогресса;
- задействовать проектировщиков, конструкторов, технологов и производителей к участию в разработке научно-технических идей.

Российская библиотека научных исследований в сфере организации и управления наукоемким производством машиностроения и смежных отраслей с 2010 года по настоящее время насчитывает ряд трудов по различным научным специальностям, изучающим проблемы функционирования научно-производственных объединений. Множество работ принадлежит ученым Московского государственного технического университета радиотехники, электроники и автоматики, Московского института электронной техники, Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета, Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения и др., чьи труды направлены как на развитие теории и практики организации производства и управления

качеством (технические науки), так и на формирование организационно-экономического механизма планирования наукоемкого производства (экономические науки).

В направлении технических наук организации производства Иванченко Т.О. в рамках кандидатской диссертации исследовал методики реорганизации наукоемкого предприятия, реструктуризации систем качества. В работе основной акцент сделан на использование инструментов бережливого производства, таких как Канбан, система 5S, система «точно вовремя», карты потока создания ценностей [38].

Диссертационное исследование Краснова Ю.А. посвящено автоматизации поддержки управленческих решений при организации наукоемкого производства на основе гибкой обратной связи [48]. Автор проводит статистический анализ отказов оборудования при производстве запасных частей и предлагает модели и алгоритмы формирования и оценки эффективности организационной структуры и технологии изготовления и ремонта сложных технических изделий.

Тушавин В.А. в своей докторской диссертации предложил подходы к улучшению качества процессов информационного обеспечения наукоемкого производства путем разработки научно-обоснованных математических моделей и методов решения квалиметрических задач [80]. Автор разработал регрессионную модель со смешанными эффектами зависимости числа обращений от количества обслуживаемых рабочих мест, информационную метамодель процесса технической поддержки, метод построения контрольных карт для информационного обеспечения наукоемкого производства и другие подходы.

В рамках исследования моделей организации наукоемкого производства Морозова А.В. сформировала методологию нейросетевой квалиметрико-компетентностной типизации инженерно-технических кадров для управления качеством отбора молодых специалистов для наукоемких машиностроительных производств [61]. В работе широко использованы

методы системного и структурного анализа, методология TQM, теории сложных систем, метод нейросетевой классификации и типизации объектов.

Диссертационная работа Ручьева А.Г. посвящена разработке моделей и методик мониторинга реализации этапов жизненного цикла продукции наукоемкого приборостроения, где автор моделирует информационно-мониторинговые сети для продукции наукоемкого приборостроения в целях улучшения мониторинга жизненного цикла продукции [75]. При этом разработка методики информатизации мониторинга этапов жизненного цикла продукции осуществляется на базе цифровых двойников для адаптации научно-методического аппарата к условиям цифровой экономики.

В сфере управления наукоемким производством Жмаева И.В. предложила подходы к созданию организационно-экономического механизма сбалансированного планирования наукоемкого предприятия в условиях открытых инноваций [36], Кислицыной А.Е. разработана стратегия коммерциализации технологических наукоемких инноваций [42], Вашлаев А.Д. исследовал проблемы и противоречия развития наукоемких предприятий в условиях санкционных ограничений, дефицита инженерно-технических кадров [18].

Описанные выше научные исследования объединяет схожая задача совершенствования производств по выпуску наукоемкой продукции, что в современной индустрии осуществляется на базе научно-производственных предприятий как интегрированных многоотраслевых систем. Учеными и практиками изучены различные аспекты наукоемких производств. Однако, при всем многообразии исследований, на сегодняшний день актуальные задачи импортозамещения и технологического лидерства, задачи освоения выпуска новой наукоемкой продукции, рассмотрены лишь фрагментарно, находятся на постановочном этапе. Более того, авиационная промышленность сопряжена с национальной безопасностью государства и ее результативное функционирование, направленное на выпуск изделий, имеет важное значение.

Именно такая форма организации производства как научно-производственные предприятия благодаря синтезу науки и производства способны в короткое время разработать и коммерциализировать результаты научной деятельности в готовый продукт. Изучению моделей организации и управления научно-производственными предприятиями посвящены работы Айрапетова А.Г. [5,6], Войт А.В. [20], Мамурова Д.Э. [58], Егорова И.М., Пророкова А.Н. [35], Ахмадиева Г.М., Падемировой Р.М. [9], Федоренко В.В. [81], Шинкевича А.И. [85,84] и др. Авторы данных работ рассматривали проблемы организации научно-производственных предприятий в контексте их основной задачи – преобразовывать эффекты интеграции науки и производства в конкретные продуктовые результаты.

Однако, анализ данных научной библиотеки и публикаций практиков показывает, что в последние годы интерес к проблеме организации производства в рамках научно-производственных предприятий значительно снизился. При этом, решение задач импортозамещения и технологического лидерства в установленные сроки с выходом на серийный выпуск стратегической продукции самолетостроения требует развития новых подходов к организации научно-производственных систем и управлению качеством продукции.

Изготовление наукоемкой продукции в рамках научно-производственных систем способствует сокращению цикла «наука – техника – производство». На практике интеграция науки и производства реализуется путем создания научно-производственных предприятий, где бизнес–процессы производства объединяются в единый жизненный цикл. За счет четкой организации работ на всех этапах жизненного цикла время на разработку и запуск производства нового продукта может быть сокращено до 50% [58].

«Узким» местом функционирования научно-производственных предприятий и реализации проектов по выпуску импортозамещающих изделий является разработка технологии и ее освоение. Этап опытно-конструкторских работ и отработки технологии занимает 50-70% жизненного

цикла производства нового наукоемкого изделия. По оценке Бурдина С.С., лишь очень немногие научно-промышленные предприятия имеют собственные полноценные НИОКР, на разработках которых и основываются в своей деятельности [16].

В этой связи, исследования в части оптимизации производственных процессов жизненного цикла предприятий машиностроения посвящены в большей степени этапам разработки и освоения технологии. Так, Кобин П.Н. в своих научных трудах рассматривал стадии жизненного цикла продукции черной металлургии на этапе ключевых стадий освоения производства [43]. Исследование сквозного управления жизненным циклом наукоемкой продукции, а именно разработка концепции и методологических основ создания организационной системы логистической поддержки производства принадлежит Бром А.Е. [15].

Конвенциональный подход к решению задач мобилизации наукоемких производств предложил использовать Пястолов С.М., где основными идеями стали концепция онтологий как механизм алгоритмизации взаимодействий в рамках мобилизационного проекта и схема развития институциональных форм по спирали в сочетании с концепцией вихревой динамики развития науки и техники [74]. Андреева С.А. и соавторы опубликовали исследование о применении концепции бережливого производства в ракетно-космической промышленности, направленной на сокращение жизненного цикла продукции и повышение эффективности деятельности предприятий [7].

Управление жизненным циклом наукоемкой авиационной продукции должно осуществляться в едином информационном поле, учитывающем комплекс научно-исследовательских разработок в области материалов, технологий, нормативного обеспечения, национальных и отраслевых стандартов, возможностью моделирования конструктивных элементов изделия как многофункциональных модулей. Ведмидь П.А. изучил возможности использования в управлении производством новой модели умного производства Smart Manufacturing, объединяющей жизненные циклы

всех процессов, объектов и субъектов производства, наборы потоков информации между ними и новые цифровые технологии [19].

В контексте цифрового производства Кузнецова Н.М. с научным коллективом определили иерархические уровни конфиденциальности информационных ресурсов промышленного предприятия в зависимости от этапов жизненного цикла производства [50]. Малышева Т.В. и соавторы исследовали различные аспекты автоматизации этапов жизненного цикла промышленного производства, включая интегрированную поддержку и CALS технологии [55,56,54]. В развитие имеющихся научно-практических наработок целесообразно и актуально в современных условиях изучение временных ресурсов и оптимизации критического пути этапов жизненного цикла производства новых импортозамещенных частей авиатехники.

Главной особенностью решения задачи импортонезависимости в авиастроительной отрасли является создание самодостаточной системы разработки, производства и обслуживания авиационной техники. В частности, задача обеспечения исполнения высоких требований технического задания параметров самолета требует от конструкторов, технологов, материаловедов поиска и реализации оптимальных решений и подходов, а также обеспечения возможности дальнейшей их модернизации и развития, с учетом, в том числе, и передового мирового опыта с его отечественной адаптацией и развитием.

Базовые технологические процессы, являющиеся общими для серийного производства, выпускающего авиационную технику, и для ремонтно-восстановительного предприятия, фундаментальные основы и типовые решения по конструкции самолетов подробно описаны Корогодовой И.В. [47], Пархимовичем В.А. [69], Солововым А.В. [76] и другими специалистами. Согласно теории, на стадии проектирования параллельно разрабатывают новые и закладывают применение уже хорошо освоенных методов изготовления, сборки, обслуживания и ремонта деталей, узлов, отсеков, агрегатов и самолета в целом. К примеру, Магрицкий А.С. и соавторы в развитие материаловедения авиатехники опубликовали исследование влияния

наномодифицированного полимерного заполнителя на физико-механические и технологические характеристики самолета [53]. Это не единичная работы, поскольку с начала 20-х годов активно изучается вопрос широкого применения полимерных композиционных материалов в конструкции планера. Авдюхиной Т.М. и Дружининым Т.С. выполнен сравнительный анализ методов определения массы и конструкции рессоры спортивно-пилотажного самолета из титанового сплава и полимерного композиционного материала [1]. По мнению научного коллектива под руководством Буша А.В., легкие материалы должны составлять не менее 25% веса пустого самолета и не менее 70% площади поверхности планера, что при правильном техническом подходе позволяет существенно снизить весовые характеристики в угоду летно-техническим характеристикам самолета и возможности повышения боевой нагрузки [17].

Свод результатов анализа научно-практических публикаций о развитии организации производства наукоемких изделий авиастроения на базе научно-производственного предприятия представлен на рисунке 1.1.1. Итоги научно-технического обзора систематизированы по направлениям исследований, ключевым словам и основным авторам. Пять направлений изучения тематики организации производства наукоемких изделий авиастроения позволяют охватить:

- сущность производства наукоемких изделий, которыми и являются авиационные конструкции;
- модель производства в рамках научно-производственного предприятия для оптимально эффективного выпуска изделий;
- структуризация производственного цикла на этапы для целей планирования и управления жизненным циклом разработки и производства сложных изделий;

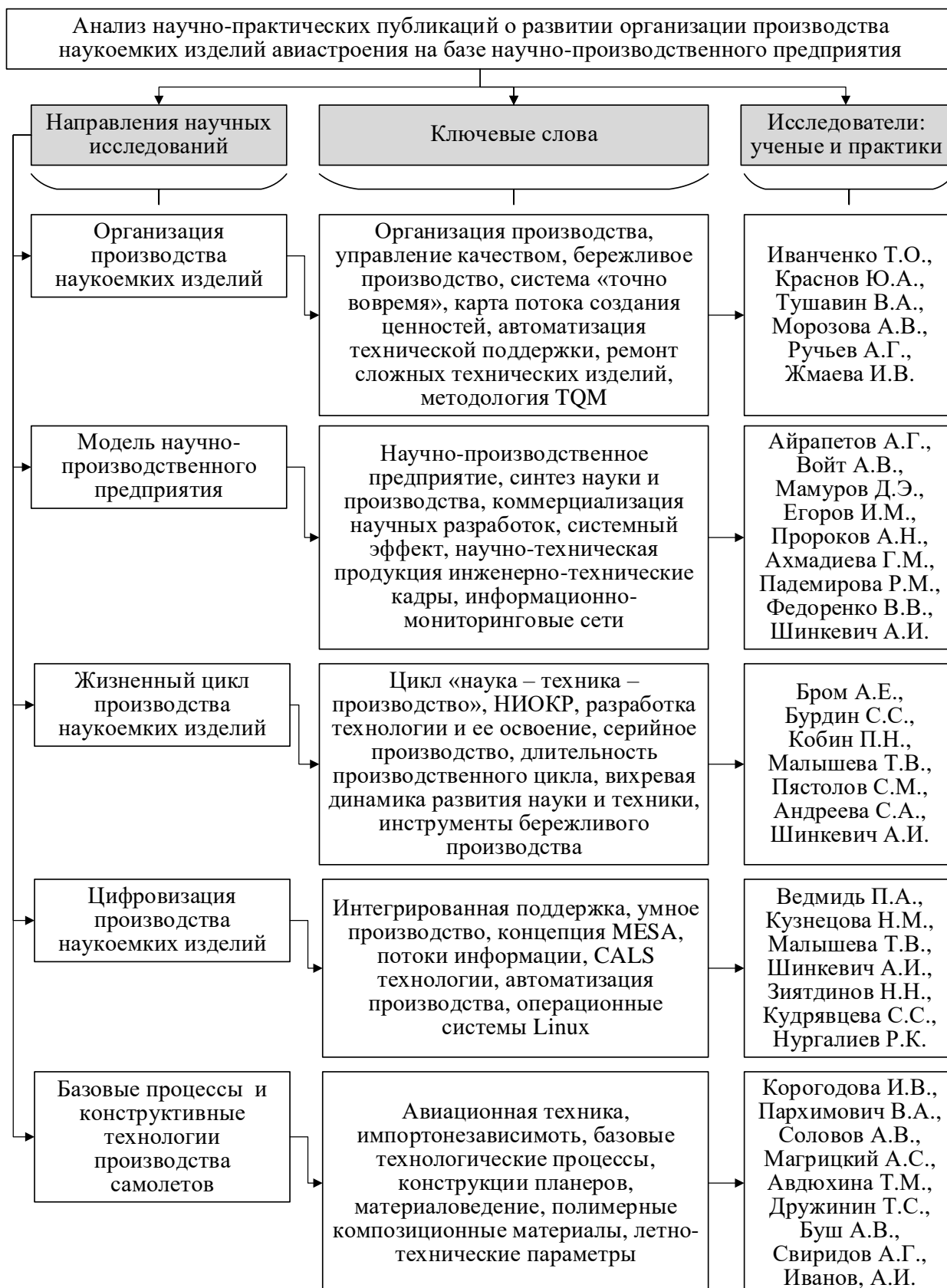


Рисунок 1.1.1 – Результаты анализа научно-практических публикаций о развитии организации производства наукоемких изделий авиастроения на базе научно-производственного предприятия (составлено автором)

– компьютеризация, информатизация, автоматизация, цифровизация производственных процессов как сквозная, так и дискретная технология по этапам жизненного цикла;

– уровень развития базовых процессов и совершенствование конструктивных технологий производства самолетов, требующее организации и реализации проектных работ в рамках научно-производственного предприятия.

Ключевые слова по имеющимся научным публикациям позволяют судить о разнонаправленности исследований, об их актуальности и соответствии текущим задачам развития промышленного производства, а также о имеющихся пробелах в развитии науки организации производства летательных аппаратов в условиях стратегических целей импортонезависимости.

Таким образом, описанные выше намерения авиационных производителей о совершенствовании конструкции планеров и перехода на независимое производство предполагают создание результативно действующих научно-производственных предприятий, способных оперативно и качественно реализовывать проекты по разработке и выпуску конструкций летательных аппаратов. В этой связи, возникает необходимость разработки новых подходов к организации профильных производств, и, в первую очередь, к реализации инженерно-конструкторских проектов создания новых технически сложных изделий. При этом работа предприятий должна проводиться в условиях ограничения производственных ресурсов: интеллектуальных (отсутствие готовой технологии), временных (требования оперативности разработок), материальных (поиск поставщиков сырья и входной контроль качества), трудовых (требования к квалификации инженерных и управленческих кадров).

1.2 Стандарты и нормативно-правовая база организации производства импортозамещающей наукоемкой продукции самолетостроения

Организация и управление процессом разработки новой продукции и освоения производства требует соответствующей научно обоснованной нормативной базы и базы стандартов. При этом нормативно-технические документы должны отражать прогрессивные изменения, происходящие в науке и технике, охватывать все элементы процесса производства и факторы внешней среды. Цели, задачи, условия создания новой технически сложной продукции имеют свое развитие, изменяются и влияют на систему нормативов, выдвигая к ней определенные требования.

Подготовка производства новой продукции включает определение основных направлений научно-технического и организационного развития процессов подготовки производства, обеспечения единой технической документации на предприятии, концентрацию производственных ресурсов на наиболее эффективных направлениях. Достижение цели осуществляется на основе непрерывного совершенствования технологии, форм и методов организации производства в условиях расширения номенклатуры выпускаемой продукции, что обуславливает необходимость применения гибких производственных систем [63]. В контексте диссертационного исследования производственная система на базе научно-производственного предприятия должна обладать определенной гибкостью, позволяющей реагировать на изменения ассортимента и количестве производимой продукции или способов ее производства.

Ключевым законодательным актом для развития российского авиастроения является государственная программа Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности» [73]. В документе обозначено, что в условиях высокой импортозависимости отечественного авиастроения развитие отрасли ограничивается задержкой завершения программ создания новых видов авиационной техники и оборудования. Производители

ограничены в импорте критических технологий, закупке оборудования, комплектующих изделий и материалов. В свою очередь, сложившиеся обстоятельства являются катализатором реализации программ импортозамещения в отечественном авиастроении, а именно, разработки и освоение новой технически сложной продукции в кратчайшие сроки.

Стандарты определяют цель и задачи системы разработки и постановки продукции производственно-технического назначения на производство. Объектами стандартизации являются стадии жизненного цикла продукции, а также разрабатываемая при этом документация. В основу формирования системы разработки и постановки продукции на производство положен принцип интеграции взаимосвязанных работ на стадиях жизненного цикла продукта, с учетом необходимого технического уровня и качества продукции, комплекса документированных организационно-технологических процедур.

Стандарты по разработке и постановке продукции на производство начали формироваться в 80-90х годах 20-го века. Система ГОСТ охватывает как общие стандарты для всех типов производств, так и локальные отраслевые ГОСТ, указывающие на специфику функционирования предприятий. В российской базе стандартов числится более 20 документов в системе разработки и постановки продукции на производство, лишь 5 из которых разработаны (актуализированы) и введены в действие после 2015 года. В контексте диссертационного исследования данная серия стандартов является основополагающей, поэтому остановимся на ней подробнее.

В таблице 1.2.1 систематизированы стандарты системы разработки и постановки продукции на производство, относящиеся к авиационному производству (исключены непрофильные отраслевые стандарты данной группы). Из перечисленных стандартов не действует в настоящее время только ГОСТ 15.214-1990, касающийся продукции, поставляемой организациям министерства обороны. Организации заказчики военной народнохозяйственной продукции контролировали реализацию своих требований на всех этапах разработки изделий.

Таблица 1.2.1 – Действующие стандарты серии ГОСТ Р 15 «Система разработки и постановки продукции на производство» (составлено автором по [41])

№ стандарта	Наименование стандарта	Статус стандарта
ГОСТ 15.000-2016 (1982)	Система разработки и постановки продукции на производство. Общие положения	Действует / обновлен
ГОСТ 15.004-1988	Система разработки и постановки продукции на производство. Средства индивидуальной защиты	Действует
ГОСТ 15.005-1986	Система разработки и постановки продукции на производство. Создание изделий единичного и мелкосерийного производства, собираемых на месте эксплуатации	Действует
ГОСТ 15.011-2024 (1982)	Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения	Действует / обновлен
ГОСТ 15.012-84	Система разработки и постановки продукции на производство. Патентный формуляр	Действует
ГОСТ 15.101-2021 (1998)	Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ	Действует / обновлен
ГОСТ 15.214-1990	Система разработки и постановки продукции на производство. Народнохозяйственная продукция, поставляемая организациям Министерства обороны СССР	Не действует
ГОСТ 15.301-2016 (1988)	Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство	Действует / обновлен
ГОСТ 15.309-1998	Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приёмка выпускаемой продукции. Основные положения	Действует
ГОСТ 15.311-1990	Система разработки и постановки продукции на производство. Постановка на производство продукции по технической документации иностранных фирм	Действует
ГОСТ 15.601-1998	Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое обслуживание и ремонт техники. Основные положения	Действует
ГОСТ Р 15.016-2016	Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание	Действует

Базовым стандартом, регламентирующим организацию производства новой продукции в России, является ГОСТ Р 15.000-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения» [23]. Он относится к серии стандартов ГОСТ Р 15, которые регламентируют систему разработки и постановки продукции на производство.

ГОСТ Р 15.000-2016 структурирует систему разработки и постановки продукции на производство на классификационные группы в зависимости от этапов работ. По каждой группе или на каждом этапе стандартом установлены требования к порядку проведения работ и составлению технической документации (рисунок 1.2.1). Стандарт опирается на ряд ГОСТов, связанных с системой конструкторской документации (ГОСТ 2.001, ГОСТ 2.051, 2.052, ГОСТ 2.053, ГОСТ 2.103), системой технологической документации (ГОСТ 3.1001), системой государственных испытаний продукции (ГОСТ 16504), технического обслуживания, эксплуатации и ремонта техники (ГОСТ 25866, ГОСТ 27.002, ГОСТ 18322), правилами стандартизации (ГОСТ Р 1.2, ГОСТ Р 1.5, ГОСТ Р 1.12), экологического менеджмента (ГОСТ Р 14.08), менеджмента организации и качества (ГОСТ Р ИСО 9004, ГОСТ Р ИСО 10014).

В национальной системе стандартизации 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.

Управление новой продукцией в базе стандартов описывается лишь как инновационный менеджмент, где содержится характеристика инноваций, использование интеллектуальной собственности, финансирование разработок и прочие аспекты (ГОСТ Р 56261-2014, ГОСТ Р 58223-2018). Службы стандартизации различных стран стараются наиболее полно охватить сферу производства наукоемкой продукции, но на сегодняшний день это больше выражено в оценке качества продукции.

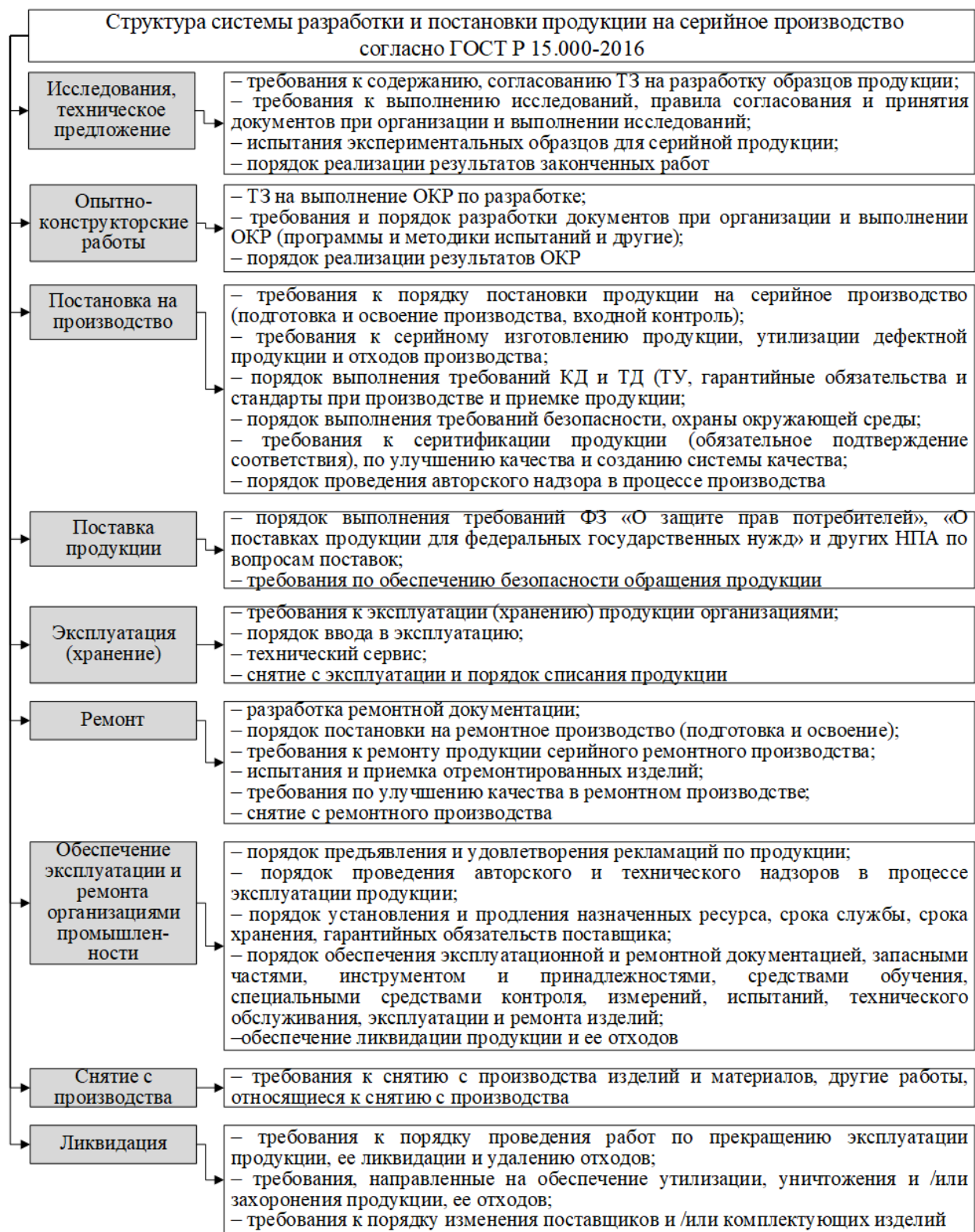


Рисунок 1.2.1 – Структура системы разработки и постановки продукции на серийное производство согласно ГОСТ Р 15.000-2016 (составлено автором по

[23])

Есть мнения, что преобразованная в продукцию инновация или новая продукция должна проходить оценку качества согласно группе стандартов ГОСТ Р ИСО 9000 [83]. Несомненно, это важное направление для организации полного цикла производства и управления качеством продукции и процессов. Согласно модели «петля качества», управление качеством продукции осуществляется циклически, проходит через этапы цикла Деминга (цикла PDCA) и показывает последовательное отражение качества процессов на качестве конечного продукта.

Стандарты, связанные с управлением жизненным циклом технически сложной продукции, объединены в серию «Система управления полным жизненным циклом изделий высокотехнологичных отраслей промышленности». В данной группе три стандарта, регламентирующие разработку той или иной документации для изготовления наукоемкой продукции (рисунок 1.2.2).

Порядок разработки документации на производство и управление жизненным циклом высокотехнологичных изделий описан в ГОСТ Р 56864-2016 и ГОСТ Р 56874-2016, регламентирующих порядок работ по разработке конструкторских документов высокотехнологичных изделий на этапе технического проекта и подготовки рабочей документации [28,29]. Стандарт применяется организациями, участвующими в разработке, согласовании, утверждении и приемке конструкторской документации на изделие. Высокотехнологичное изделие в данных стандартах определяется как наукоемкое изделие, изготавливаемое по критическим технологиям совокупностью предприятий и научно-исследовательских организаций. К наукоемкому изделию относится изделие, в стоимости которого затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы составляют не менее 10 %.

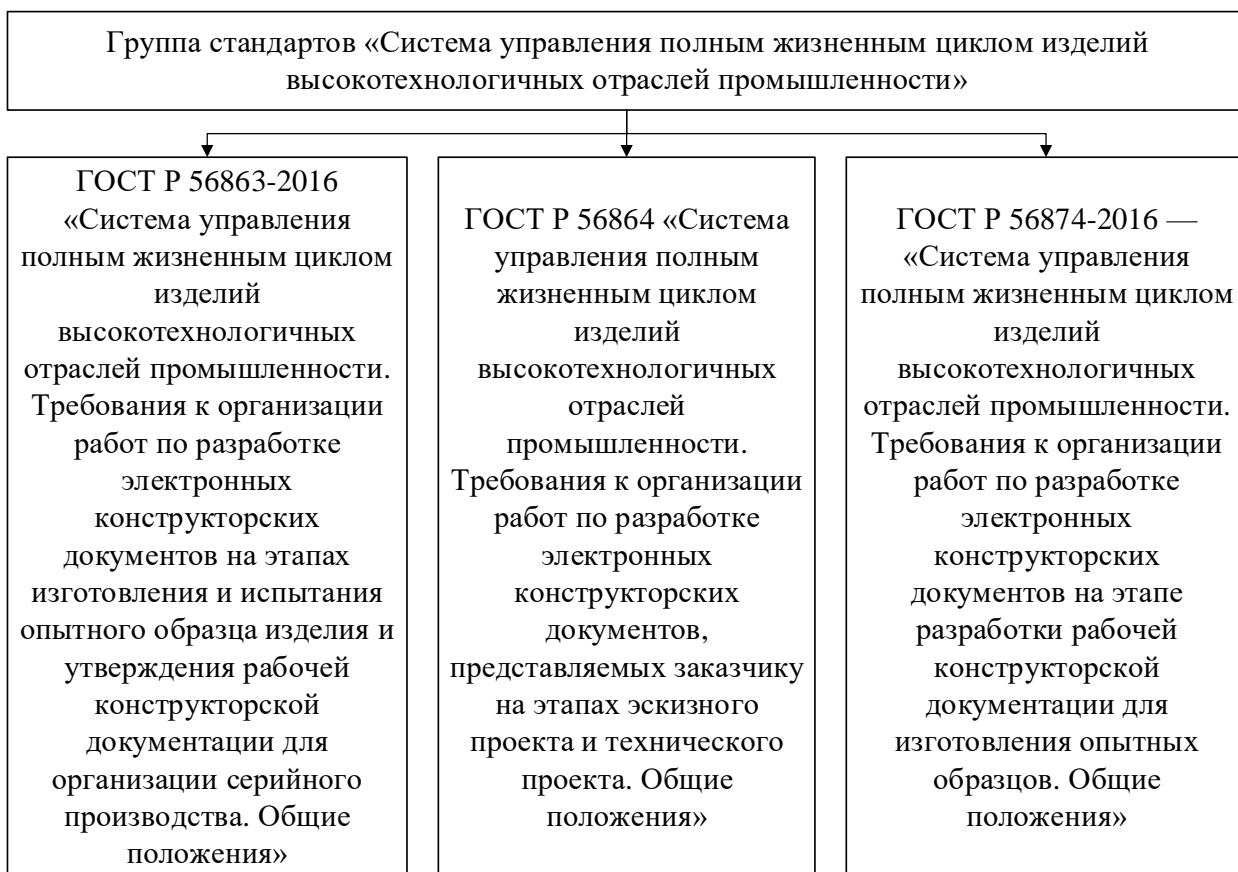


Рисунок 1.2.2 – Группа стандартов «Система управления полным жизненным циклом изделий высокотехнологичных отраслей промышленности»
(составлено автором по [41])

Прямых стандартов в части норм и правил организации и функционирования научно-производственных предприятий в системе стандартизации не отмечено. Вместе с тем, есть ряд стандартов в направлении проектирования промышленных предприятий, проведения научно-исследовательских работ и прочее, которые не интегрированы в единую сетевую структуру. В России действует ГОСТ Р 56639-2015 «Технологическое проектирование промышленных предприятий. Общие требования» для целей выполнения требований технологического процесса и обеспечения выпуска продукции заданной номенклатуры и объема [26]. Стандарт устанавливает требования к технологическому проектированию промышленных предприятий на этапе строительства или существенной реконструкции

производств. Технологические решения определяют уровень продукции, ее соответствие требуемому качеству.

В рамках системы разработки и постановки продукции на производство разработаны стандарты, регламентирующие порядок выполнения научно-исследовательских работ (ГОСТ Р 15.101-2021) и патентных исследований (ГОСТ Р 15.011-2024) [25,24]. Данные ГОСТ предполагают проведение научно-изыскательских работ на различных стадиях жизненного цикла продукции любыми организациями – исполнителями НИОКР. Соответственно, это могут быть как научно-исследовательские институты, так и научно-производственные предприятия. ГОСТ Р 15.101-2021 структурирует проведение НИОКР на типовые этапы, от выбора направления исследований до внедрения результатов и определения эффекта, включая разработку проекта технического задания на опытно-конструкторские работы и внедрение результатов исследования на производстве.

С позиции системной и программной инженерии существует ряд стандартов, направленных на управление процессами жизненного цикла производства. Данные стандарты полностью идентичны или основаны на международных стандартах ISO/IEC/IEEE (рисунок 1.2.3). Стандарты касаются всех видов систем, созданных из аппаратных, программных средств, процессов, процедур, материалов, и предназначены для управления компьютерными и информационными технологиями.

В части разработки технологий производства продукции существует ГОСТ Р 56861-2016, регламентирующий работы на этапе жизненного цикла продукции «Разработка концепции изделия и технологий». Реализация бизнес-процесса создания продукта в стандарте основывается на принципах управления любыми проектами в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54869. Стандарт не выделяет специфических требований к реализации научно-технического проекта в рамках создания технически сложной или наукоемкой продукции.

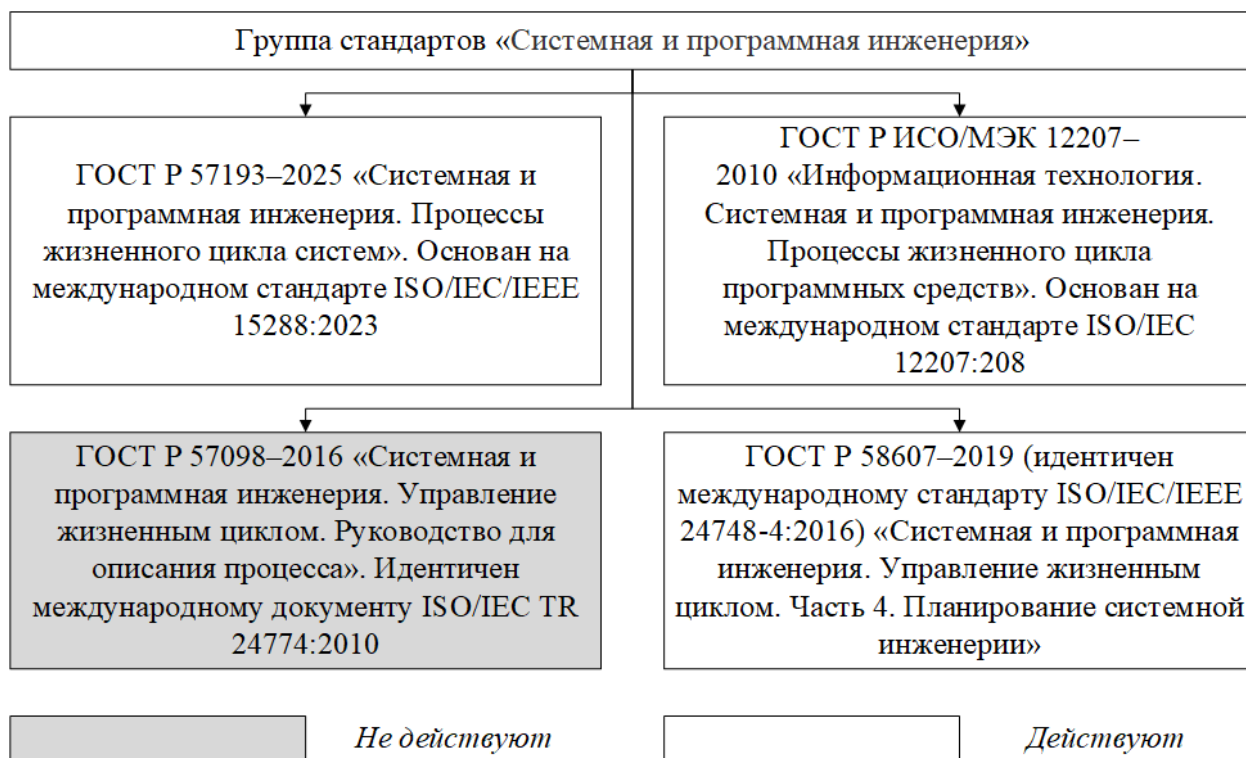


Рисунок 1.2.3 – Группа стандартов «Системная и программная инженерия»
(составлено автором по [41])

Базовые принципы в области трансфера технологий и их практического применения описываются в ГОСТ Р 57194.1-2016. Стандарт определяет стадии разработки технологии и освоение в производстве принципиально новой продукции в высокотехнологичных отраслях промышленности: шесть этапов от научно-технического задела до освоения образца в производстве (рисунок 1.2.4). Данные этапы предполагают продвижение инновации от научных исследований на базе локальных НИИ или заводских лабораторий непосредственно до серийного производства. Трансфер технологий подразумевает передачу результатов интеллектуальной деятельности между самостоятельными организациями. Трансфер технологий внутри научно-производственного объединения (между его подразделениями) данным стандартом не предусмотрен. Несомненно, базовые принципы продвижения разработок будут одинаковы для любых научно-производственных систем, однако, необходимые для организации работ механизмы, будут различаться

для обособленных предприятий и единого организма научно-производственного объединения.

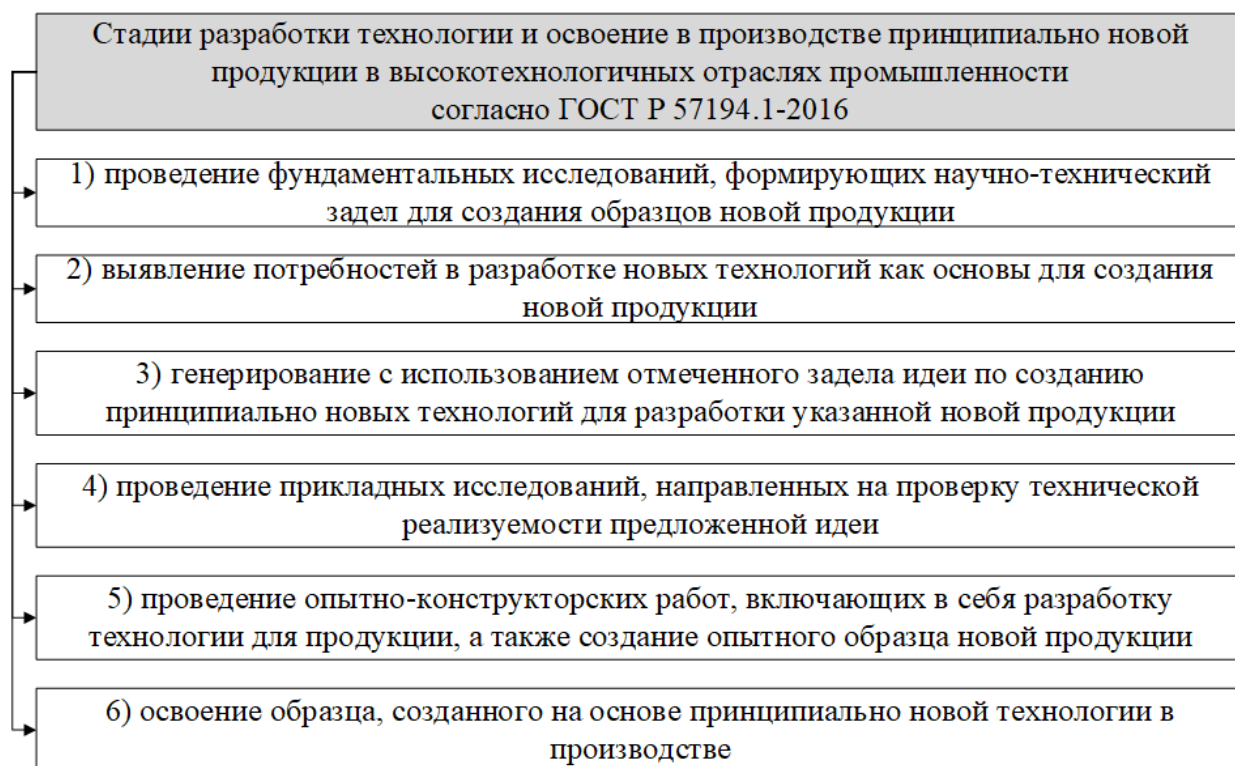


Рисунок 1.2.4 – Стадии разработки технологии и освоение в производстве принципиально новой продукции в высокотехнологичных отраслях промышленности согласно ГОСТ Р 57194.1-2016 (составлено автором по [30])

Таким образом, база действующих стандартов в области организации производства импортозамещающей наукоемкой продукции самолетостроения, на сегодняшний день представлена определенными документами, которые, по нашему мнению, имеют ряд «узких» мест, не позволяющих охватить все вопросы разработки и постановки на производство изделий (таблица 1.2.2).

Таблица 1.2.2 – Результаты анализа национальной базы стандартов в области организации производства импортозамещающей наукоемкой продукции самолетостроения (составлено автором)

Область организации производства	Действующие стандарты	Недостатки стандартов с позиции организации производства новой продукции самолетостроения в рамках НПП
Разработка и постановка продукции на производство	Серия «Система разработки и постановки продукции на производство»: ГОСТ 15.000-2016, ГОСТ 15.011-2024, ГОСТ 15.011-2024, ГОСТ 15.101-2021, ГОСТ 15.301-2016, ГОСТ 15.309-1998, ГОСТ 15.311-1990, ГОСТ 15.601-1998, ГОСТ Р 15.016-2016	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
Производство наукоемкой или технически сложной продукции продукцией	ГОСТ Р 56261-2014, ГОСТ Р 58223-2018, группа ГОСТ Р ИСО 9000	В базе стандартов описывается лишь как инновационный менеджмент (характеристика инноваций, использование интеллектуальной собственности, финансирование разработок). Больше выражено в оценке качества продукции («петля качества», цикл PDCA), как последовательное отражение качества процессов на качестве конечного продукта
Управление жизненным циклом технически сложной продукции	Серия «Система управления полным жизненным циклом изделий высокотехнологичных отраслей промышленности»: ГОСТ Р 56864-2016, ГОСТ Р 56874-2016	Регламентируют порядок работ по разработке конструкторских документов высокотехнологичных изделий на этапе технического проекта и подготовки рабочей документации
Организация и функционирование научно-производственных предприятий	ГОСТ Р 56639-2015	Регламентирует требования к технологическому проектированию промышленных предприятий на этапе строительства или существенной реконструкции производств. Прямых стандартов в части норм и правил организации и функционирования научно-производственных предприятий в системе стандартизации не отмечено.

Область организации производства	Действующие стандарты	Недостатки стандартов с позиции организации производства новой продукции самолетостроения в рамках НПП
Порядок выполнения научно-исследовательских работ и патентных исследований	ГОСТ Р 15.101-2021, ГОСТ Р 15.011-2024	Данные ГОСТ предполагают проведение научно-исследовательских работ на различных стадиях жизненного цикла продукции любыми организациями – исполнителями НИОКР. Соответственно, это могут быть как научно-исследовательские институты, так и научно-производственные предприятия
Информационное сопровождение жизненного цикла производства	Группа стандартов «Системная и программная инженерия»: ГОСТ Р 57193-2025, ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-2010, ГОСТ Р 58607-2019	Стандарты касаются всех видов систем, созданных из аппаратных, программных средств, процессов, процедур, материалов, и предназначены для управления компьютерными и информационными технологиями
Разработка и трансфер технологий	ГОСТ Р 56861-2016, ГОСТ Р 57194.1-2016	Стандарт не выделяет специфических требований к реализации научно-технического проекта в рамках создания технически сложной или наукоемкой продукции. Трансфер технологий подразумевает передачу результатов интеллектуальной деятельности между самостоятельными организациями. Трансфер технологий внутри научно-производственного объединения (между его подразделениями) не предусмотрен

К недостаткам стандартов с позиции организации производства новой продукции самолетостроения в рамках научно-производственного предприятия можно отнести отсутствие специфики организации работ в условиях ограничения критических технологий и ресурсов, отсутствие прямых стандартов в части норм и правил функционирования научно-производственных предприятий.

1.3 Анализ передовых практик организации производства наукоемкой продукции самолетостроения

Модели организации производства в наукоемком самолетостроении прошли развитие от относительно простых интеграционных схем до сложных сетевых систем. Специфика наукоемкой продукции зачастую требует полной интеграции всех этапов производства, благодаря чему возможно выполнение следующих функций:

- контроль над качеством технологий производства критически важных компонентов по узкоспециализированным стандартам;
- безопасность технологии или защита интеллектуальной собственности при закрытой технологии изготовления изделия;
- увеличение скорости разработки технологии производства и сокращение числа итераций согласования (тестирования, внесения изменений в конструкцию) технологической документации;
- контроль над поставками сырья и компонентов, сокращение рисков сбоев в цепях поставок наукоемкой продукции;
- оптимизация производственных затрат за счет синергии процессов научных разработок, индустриального дизайна, производства компонентов, сборки, логистики в единую систему.

С конца прошлого века широко применялась модель организации производства – «вертикальная интеграция» как расширение основного производства на предыдущие или последующие этапы производственно-сбытовой цепочки. Возможны были варианты полной вертикальной интеграции – от добычи сырья до производства и реализации продукции заказчику. На сегодняшний день данная модель в самолетостроении считается неэффективной ввиду системных причин, связанных с технологиями, финансами, конкуренцией и прочими рисками [62,4].

Во-первых, содержание заводов по производству каждого элемента (крылья, фюзеляж, двигатели, шасси, авионика) требует значительных

инвестиций. Во-вторых, при полной вертикальной интеграции все технические риски производства изделий ложатся на одного производителя, в то время как наличие подрядчиков позволило бы разделить риски и инвестировать средства поставщиков в разработку производства компонентов. В-третьих, один производитель не может быть специалистом экспертом во всех узких технологиях одновременно, и, соответственно, производство комплектующих эффективнее отдать на аутсорсинг специалистам. В-четвертых, наличие поставщиков за пределами основного производителя позволяет более гибко и быстро реагировать на изменения в конструкциях изделий и масштабировать производство в связи с требованиями заказчика.

Развитие практик организации производства наукоемкой продукции позволило от модели вертикальной интеграции перейти к модели «системного интегратора», где основной производитель наукоемкой продукции (интегратор) оставляет за собой ключевые производственные функции:

- разработка архитектуры самолета и общее проектирование;
- производство критически важных технологичных узлов;
- конечная сборка изделия и проведение испытаний;
- сертификация и поддержка заказчиков.

При модели организации производства «системный интегратор» сеть поставщиков классифицирована на несколько уровней в зависимости от наукоемкости и важности компонента авиационного изделия (рисунок 1.3.1). Преимуществом данной модели является гибкость доступ к прогрессивным технологиям через поставщиков, снижение затрат на компоненты за счет конкуренции среди поставщиков, а также большая гибкость при изменении производственной документации на изделие. Вместе с тем, присутствует сложность в управлении цепью производства и сборки изделия, риск невыполнения сроков поставщиками компонентов [34,39].

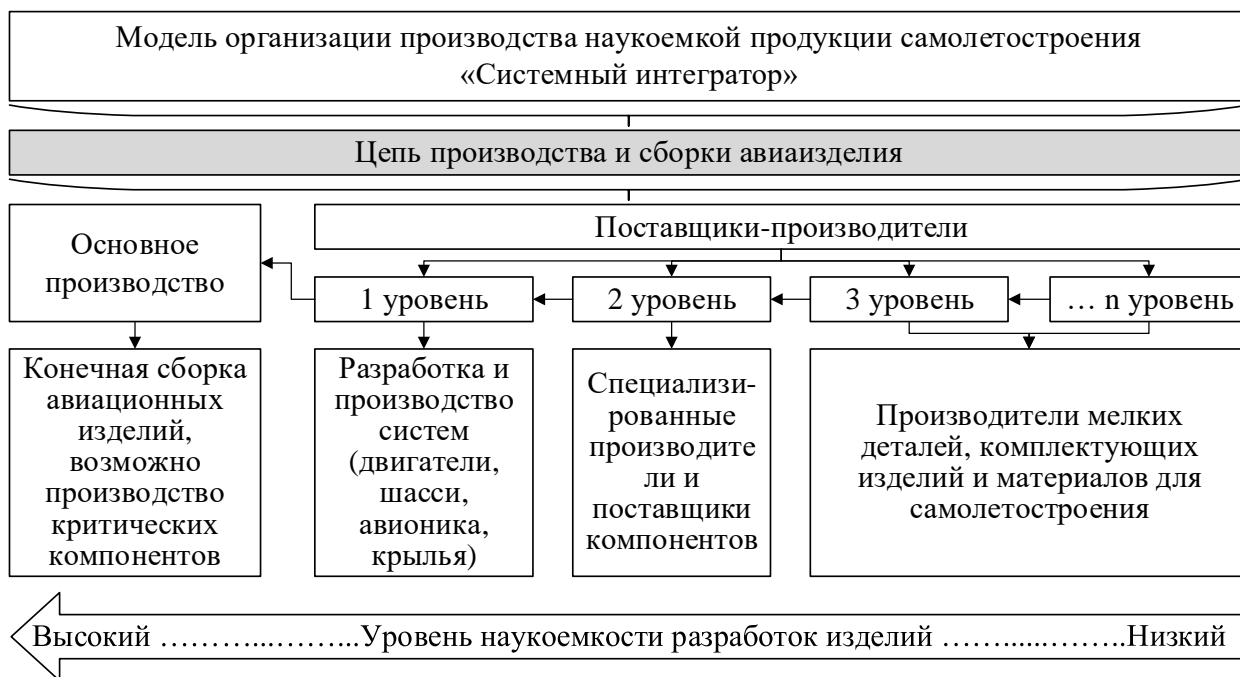


Рисунок 1.3.1 – Модель организации производства наукоемкой продукции самолетостроения «Системный интегратор»: цепь производства и сборки авиаизделия (составлено автором по [34,39])

Многие производители наукоемких изделий оставляют за собой разработку технологий и производство критически важных систем самолета для сохранения ключевых компетенций и технологий («синдром OEM-сборщика») и снижения потенциальной зависимости от поставщиков.

В оборонно-промышленном комплексе зачастую заказчиком на серийное производство авиационной техники выступает государство, оно же является совладельцем технологии или участвует в управлении предприятием [64]. В этом случае используется «модель государственно-частного партнерства», способная реализовать масштабные национальные проекты, особенно в военной сфере. Примером являются следующие госкорпорации:

- «Объединенная авиастроительная корпорация» (ОАК, Россия), имеет смешанную модель госзаказа и системной интеграции, т.к. головной научно-исследовательский институт и заводы работают в одной сети;
- «COMAC» (Китай), реализация национальных программ (ARJ21, C919) с привлечением западных поставщиков 1-го уровня;

– «Lockheed Martin» (США), реализация национальных программ (F-35), где «Lockheed Martin» выступал интегратором и управлял глобальной цепочкой поставок.

Высокими характеристиками разработки и производства новой наукоемкой продукции обладает «сетевая модель» организации производства, основанная на принципе взаимосвязи всех участников производственного процесса в единой сети. Цель данной модели заключается в оптимизации процессов производства за счет гибкости и адаптивности к ограничениям и внешним условиям. Неотъемлемым элементом сетевой модели является информационная интеграция участников сети в единую систему, например, с помощью PLM-систем управления жизненным циклом изделия.

В отличие от модели системного интегратора, сетевая модель объединяет не только поставщиков разного уровня, но и научные, инжиниринговые центры. Ключевым принципом модели является распределенное производство, где различные компоненты и модули производятся независимыми предприятиями – экспертами в своих узких областях. При этом, сеть является гибкой и динамичной, а ее состав может оперативно меняться под конкретный продукт [60,33].

Благодаря единой цифровой платформе возможна высокая скорость обмена данными и принятия решений между участниками сети производства наукоемкой продукции. Ограничением вступления в производственную сеть при сетевой модели организации производства является высокая цифровая зрелость (в том числе кибербезопасность) и стандартизация участников. Цифровые технологии позволяют синхронизировать процессы производства в реальном времени, проводить удаленный мониторинг, оперативно внедрять новшества всеми участниками сети.

Сетевая модель организации производства наукоемкой продукции на сегодняшний день является лучшей мировой теорией и практикой для отрасли самолетостроения. Наиболее близки к данной модели

производители, изначально построенные на принципах цифрового двойника и сквозной цифровой нити (Boeing, Airbus, Dassault) (рисунок 1.3.2).

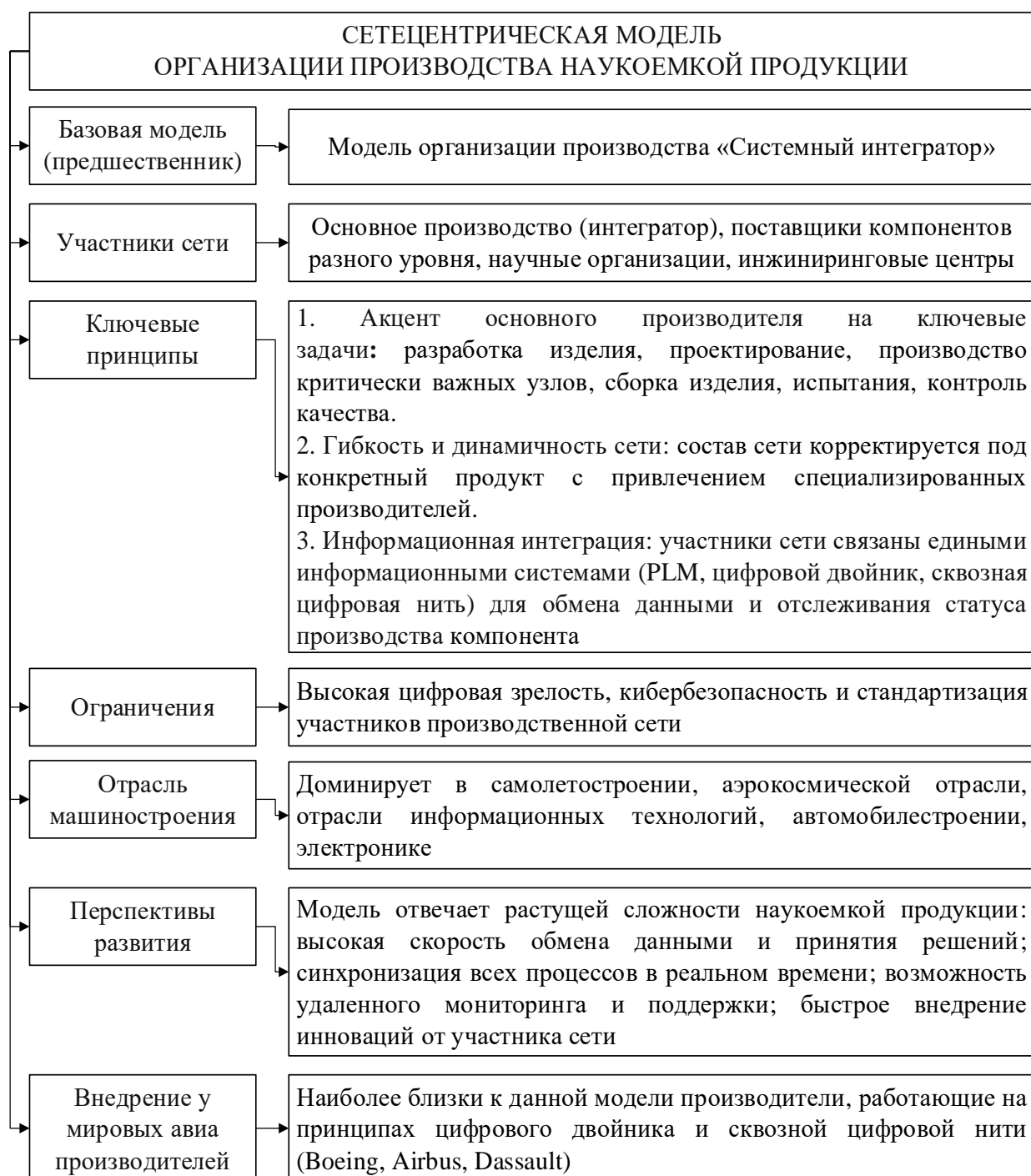


Рисунок 1.3.2 – Характеристика сетецентрической модели организации производства наукоемкой продукции (составлено автором по [60,33])

Результаты сравнительного анализа моделей организации производства, применяемых для изготовления наукоемкой продукции самолетостроения, приведены в таблице 1.3.1. Пять моделей выстроены по мере их развития и актуальности в современной авиационной индустрии: от вертикальной интеграции до прогрессивной сетецентрической модели.

Таблица 1.3.1 – Сравнительный анализ моделей организации производства наукоемкой продукции (составлено автором)

Модель организации производства	Уровень риска разработки и производства новой продукции	Уровень контроля за производством	Гибкость производства	Примеры в сфере мирового самолетостроения
1.Вертикальная интеграция	Очень высокий	Абсолютный	Низкая	Boeing (генезис)
2.Генеральный подрядчик	Распределенный	Высокий (через контракты)	Высокая	Boeing 787, Airbus A350
3.Промышленный альянс	Распределенный	Средний (делегирование)	Средняя	Airbus, Eurofighter
4.Симбиоз государства и производства для ВВСТ	Низкий (основной риск у государства)	Высокий (со стороны государства)	Низкая	ОАК (Россия), COMAC (Китай)
5.Сетецентрическая модель	Распределенный управляемый	Очень высокий (цифровой)	Максимальная	Передовые проекты Boeing и Airbus

Так или иначе, передовые мировые практики организация производства в наукоемком самолетостроении представляет собой комплексную задачу инженерии, производственного менеджмента и цифровых технологий.

Цифровой двойник и сквозное цифровое проектирование является базой современного авиастроения. 3D-модель жизненного цикла изделия позволяет проводить виртуальные испытания и оптимизировать конструкции без физических прототипов. Сквозная цифровая нить сетцентрической модели организации производства связывает все этапы и участников (конструкторов, технологов, производство, поставщиков, сервисные службы) в единой информационной среде [78].

Использование аддитивных технологий (3D-печати металлом и полимерами) перешло из стадии прототипирования в стадию производства серийных деталей. Изготовление сложнотехнологичных полых деталей, консолидация узлов изделий, производство технологической оснастки для сборки и проверки деталей более надежно и экономично выполнять не традиционным способом, а путем 3D-печати. Это значительно ускоряет подготовку производства. Роботизация отдельных производственных операций сборки самолетов (сверление отверстий, установка заклепок, нанесение герметиков) обеспечивает высокую точность и снижает нагрузку на рабочих [46].

Поскольку современные самолеты более чем на 50% состоят из композиционных материалов, автоматическая укладка ленты (ATL) и автоматическое выкладывание волокна (AFP) с помощью роботов позволяет с высокой скоростью и точностью создавать крупногабаритные и сложные детали (крылья, фюзеляжи). Кроме того, внедрение термопластичных композитов в отличие от терморезистивных, можно подвергать вторичной переработке и сварке, что открывает новые возможности для ремонта и устойчивого производства [53].

И конечно же повышение эффективности производства невозможно без внедрения новых методов управления и организации производства. В настоящее время в производстве самолетостроения преобладают следующие организационные подходы и методы:

– бережливое производство для постоянного устранения всех видов потерь, в том числе наиболее актуально для самолетостроения внедрение вытягивающего производства (следующий этап производства «вытягивает» детали у предыдущего, когда они требуются), внедрение системы «Канбан» для визуального управления потоками материалов, стандартизация операций и непрерывное улучшение (Kaizen);

– agile-подходы в инженерном проектировании для быстрого реагирования на изменения требований и итеративного улучшения продукта;

– сквозные интегрированные команды (конструкторы, технологи, производство, логисты, заказчик) для работы над конкретным узлом или системой для ускорения принятия решений.

В части оптимального управления цепями поставок (SCM) на производстве возможно использование предиктивной аналитики для прогнозирования рисков своевременных поставок и оптимизации уровня запасов. Для работы с поставщиками актуальны единые цифровые платформы, где размещается информация о планах производства, требованиях к качеству компонентов. Контроль движения деталей от поставщика до готового самолета и в течение всего жизненного цикла будет более прозрачным и информативным при внедрении технологий маркировки и отслеживания, таких как RFID-метки и QR-коды.

Обобщая вышеизложенное, полагаем, что сетецентрическая модель (база – модель системного интегратора) является передовым трендом организации производства наукоемкой продукции самолетостроения, способная соответствовать растущим требованиям к сложностям разработки и производства сложных изделий. Данная модель успешно внедряется в аэрокосмической отрасли, самолетостроении, автомобилестроении, электронике, отрасли информационных технологий и компьютерной индустрии. Эффективность сетецентрической модели напрямую зависит от способности выстроить управляемую цифровую систему, где данные

являются главным инструментом управления, а взаимодействие участников – бесшовным и непрерывным.

Выводы по первой главе

Научно-технический обзор подходов к организации производства на базе научно-производственного предприятия позволил сделать следующие выводы:

1. Литературный обзор современного уровня развития организации производства авиастроения на базе НПП показал основную направленность научных трудов на информационное обеспечение наукоемкого производства и CALS технологии, использование инструментов бережливого производства, мониторинг этапов жизненного цикла «наука – техника – производство», логистическую поддержку производства, базовые процессы производства самолетов и т.д. «Узким» местом функционирования НПП и реализации проектов по выпуску импортозамещающих изделий является разработка технологии и ее освоение.

2. Анализ данных научной библиотеки и публикаций практиков показывает, что в последние годы интерес к проблеме организации производства в рамках научно-производственных предприятий значительно снизился. При этом, решение задач импортозамещения и технологического лидерства в установленные сроки с выходом на серийный выпуск стратегической продукции самолетостроения требует развития новых подходов к организации научно-производственных систем и к реализации инженерно-конструкторских проектов создания новых технически сложных изделий.

3. 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.

4. Анализ передовых практик производства наукоемкой продукции самолетостроения позволил изучить модели организации производства «вертикальная интеграция», «системный интегратор», «модель государственно-частного партнерства», «сетевая модель», и выделить прогрессивную сетевую модель на базе «системного интегратора», как наиболее соответствующую требованиям к сложностям разработки и производства сложных изделий. Сетевая модель основана на принципе взаимосвязи всех участников процесса в единую гибкую бесшовную сеть распределенного производства, объединяющую поставщиков разного уровня, научные и инжиниринговые центры.

2 ДИАГНОСТИКА ПРОБЛЕМ И КОНЦЕПЦИЯ НАУЧНОГО ПОДХОДА К ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩЕГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

2.1 Анализ технико-организационного уровня производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП

Концепция технологического развития России до 2030 года предусматривает достижение технологического суверенитета критически важной промышленной продукции. В сфере авиастроения в условиях ограничения сырьевой базы активно ведутся научно-технические разработки по созданию производства критически важных комплектующих. В конструкции летательных аппаратов отечественными разработчиками принято решение о широком применении полимерных композиционных материалов, что позволяет существенно снизить вес самолета, повысить физико-механические и летно-тактические характеристики.

Одним из элементов летательных аппаратов являются сотовые заполнители, используемые в качестве «промежуточного» слоя конструкций. Для совершенствования данных элементов в связи с развитием отечественного самолетостроения требуются сотовые заполнители с более высокими физико-механическими характеристиками [95]. Имеющееся в России производство заполнителей легких номиналов на сегодняшний день не удовлетворяет требованиям конструкций современных самолетов. При этом, опыт производства подобных сотовых заполнителей имеется в мировой практике.

В Российской Федерации основным нормативным документом, который определяет требования к алюминиевому сотовому заполнителю, является ОСТ 1 00728-75, который устанавливает требования к легким алюминиевым сотовым заполнителям на основе фольги АМГ-2Н и А5-Т тонких номиналов, изготавливаемым путем склеивания листов фольги с последующей растяжкой.

Сложность организации производства сотовых заполнителей заключалась в том, что:

- полностью отсутствовал отечественный опыт создания таких сотовых заполнителей;
- отсутствовала технология формообразования тяжелых сотовых заполнителей с использованием фольги толстых номиналов;
- отсутствовали технологические решения подготовки поверхности фольги и выбора клеевого состава, обеспечивающие высокие характеристики прочности соединения слоёв фольги, позволяющие реализовать процесс формообразования ячеек сотового заполнителя;
- отсутствовало оборудование и оснащение, обеспечивающее полный цикл изготовления сотовых заполнителей тяжелых номиналов, включая точное позиционирование клеевых полос, формообразование методом растяжки и т.п.

Для решения задачи создания сотовых заполнителей с плотностью до 192 кг/м³ необходима была разработка принципиально новых технологических решений, подходов и новых материалов в части обеспечения требований по прочности клеевых соединений, технологии подготовки поверхности фольги и растяжки склеенного пакета, с созданием нового оснащения.

В рамках Государственной программы развития оборонно-промышленного комплекса до 2036 года (распоряжение Правительства РФ от 31.05.2025 №1412-р) перед отечественными производителями поставлена задача по разработке и организации производства новых изделий – тяжелых сотовых заполнителей. Задача включает разработку состава и технологии получения алюминиевых сотовых заполнителей на основе отечественной фольги с антикоррозионным покрытием, что требует реализации следующих этапов:

- экспериментально-теоретические исследования по разработке клеевых составов;

- исследования и выбор оптимального антикоррозионного покрытия;
- изготовление и испытания опытных партий заполнителя сотового;
- проведения полного комплекса физико-механических и эксплуатационных исследований и испытаний;
- разработка технологических решений формирования сотовых заполнителей тяжелых номиналов.
- проведение паспортизации заполнителей сотовых из алюминиевой фольги толстых номиналов;
- изготовление и физико-механические испытания конструктивно-подобных образцов с отечественным силовым сотовым заполнителем.

Требования технического задания на разработку и производство конструкций самолета предусматривают создание принципиальных конструктивно-технологических решений, таких как высокий уровень ремонтпригодности при эксплуатации, высокая технологичность и минимальные затраты на этапе серийного производства. Максимально отвечает заданным требованиям использование композитного комбинированного варианта – трехслойно-монолитного с сотовым заполнителем из алюминиевого сплава в качестве типового конструктивного решения панели самолета (рисунок 2.1.1).

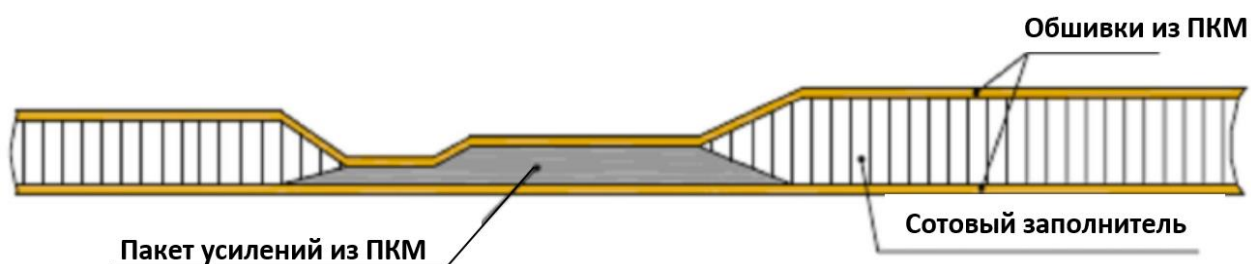


Рисунок 2.1.1 – Типовое конструктивное сечение панели самолета из полимерных композиционных материалов [47]

Алюминиевый сотовый наполнитель представляет собой легкий и сверхпрочный конструкционный материал, состоящий из соединённых между собой шестигранных ячеек из фольги, используемый как сердцевина в панелях. Данная конструкция широко применяется в авиационно-космической промышленности, судостроении, строительстве и машиностроении благодаря исключительному соотношению прочности и веса.

Решение поставленной задачи создания эффективных композиционных панелей и агрегатов наукоемкого авиационного изделия требует реализации трех масштабных этапов работы:

1) формирование принципиальных подходов, конструктивно-технологических решений композитных панелей, с формированием технических, физических, технологических требований к составляющим элементам конструктива, включая сотовый наполнитель;

2) разработка и отработка технологии производства составляющего элемента конструктива – силового сотового наполнителя;

3) внедрение и организация серийного производства составляющих элементов конструктива с разработкой серийной технологии изготовления панелей и обеспечение их эффективной эксплуатации.

Реализации плана выполнения выше обозначенных задач должен предшествовать анализ технико-организационного уровня действующего производства сотового наполнителя. Как было отмечено выше, это сотовый наполнитель, изготавливаемый по ОСТ 1 00728-75 с удельной массой до 55 кг/м³, которые не обеспечивает создания оптимальной структуры «пакета» даже при значительном увеличении его толщины. На имеющейся производственной базе планировалось создание сотовых наполнителей с значительно более высокими физико-механическими характеристиками. Подобные изделия уже имелись в мировой практике в виде аналога CRIII-1/8-5052-003N-12.0 фирмы «Hexcel», однако такой опыт в России полностью отсутствовал, как и необходимые для их производства технологии и оснащение.

Далее нами предложена структура анализа технико-организационного уровня действующего производства сотового заполнителя, включающая два блока: технический и организационный (рисунок 2.1.2).



Рисунок 2.1.2 – Структура анализа технико-организационного уровня производства сотового заполнителя (составлено автором с использованием [79,51])

Анализ технического уровня производства представляет собой оценку состояния и прогрессивности применяемой техники, технологии и выпускаемой продукции.

При анализе продукции – выпускаемого сотового заполнителя оценивается:

– соответствие стандартам авиастроения, в том числе соответствие продукции международным (ASTM, ISO, EN) и отечественным (ГОСТ, ОСТ) стандартам;

– параметры качества, такие как удельная прочность (прочность на сжатие/сдвиг относительно плотности), стабильность геометрических параметров (размер ячейки, толщина фольги, точность склейки), качество поверхности (отсутствие вмятин, загрязнений), долговечность и стойкость к усталости, коррозии, температуре и влажности;

– производится сравнение характеристик сотового заполнителя (плотность, прочность, размеры панели) с продукцией основных конкурентов.

При анализе уровня применяемой технологии оценивается:

- прогрессивность каждого этапа процесса производства, а именно:
- # раскрой фольги (использование лазерной или ультразвуковой резки вместо механической для минимизации деформации кромки);
 - # нанесение клея и автоматизации процесса (точность и равномерность нанесения, трафаретная печать, щелевое нанесение);
 - # подпрессовка пакета (использование прецизионных штампов и контролируемых температурно-силовых режимов);
 - # сборка пакета и отверждение (применение автоклавов с компьютерным управлением температурой и давлением, автоклавная технология);
 - # механическая обработка (использование станков с водяной или лазерной резкой для окончательной обработки панелей);

- уровень автоматизации и механизации, в том числе наличие автоматизированных линий и роботизированных комплексов для минимизации доли ручного труда, особенно при укладке пакетов;

- эффективность использования материалов: раскрой фольги, применение современных высокопрочных клеев (эпоксидные, фенольные).

И, при *анализе уровня, применяемого в производстве сотовых заполнителей оборудования*, оценивается:

- состояние производственного оборудования: степень физического и морального износа;

- наличие прогрессивного оборудования: автоклавы большого объема, высокоточные станки, автоматизированные линии нанесения клея;

- уровень компьютеризации: оснащенность оборудования компьютерным числовым управлением (CNC), PLC-контроллерами, системами SCADA для сбора данных в реальном времени.

Анализ организационного уровня производства представляет собой оценку эффективности системы управления основным, обслуживающим и вспомогательным производством, логистики и труда.

При *оценке уровня организации управления производством* проводится диагностика:

- внедрения современных систем, в том числе применение систем ERP, MES, PLM для управления ресурсами, производственными процессами и данными о продукции;

- структуры управления производством: гибкость и адаптивность организационной структуры, наличие системы менеджмента качества (СМК) по ISO 9001 и отраслевым стандартам (AS/EN 9100 в аэрокосмической промышленности);

- систем управления инновациями и развитием производства: наличие отдела исследований и разработок, потенциал создания новых марок сотового заполнителя, оптимизации технологий.

При оценке уровня организации основного, обслуживающего производства и труда производится диагностика:

- организации производственного процесса: поточность (поточные линии, цеховая структура), ритмичность выпуска, минимизация межоперационных заделов;
- производственной логистики в части эффективности управления цепями поставок сырья (алюминиевая фольга, клеи), соблюдения принципа «точно в срок»;
- организации труда на предприятии в части соответствующей квалификации персонала (операторы, технологи, контролеры), системы обучения и повышения квалификации, нормирования труда.

При анализе уровня организации вспомогательного производства оценивается работа следующих служб:

- системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР), где целесообразно наличие предиктивной аналитики системы ТОиР по фактическому состоянию на основе данных с датчиков оборудования;
- энергетической подсистемы производства в части эффективного использования энергоресурсов;
- системы контроля качества на глубину входного, операционного, выходного контроля, а также на предмет оснащённости лабораторий испытательными машинами, микроскопами, приборами неразрушающего контроля.

Анализ технико-организационного уровня производства алюминиевого сотового наполнителя показывает, что это высокотехнологичное производство, где ключевыми тенденциями являются полная автоматизация критических этапов, цифровизация управления производством и жизненным циклом продукции, а также постоянная работа над повышением характеристик материала. Результаты анализа структурированы на рисунке 2.1.3.



Рисунок 2.1.3 – Результаты анализа технико-организационного уровня и направления развития производства сотового заполнителя (составлено автором)

К системным проблемам организации производства сотового заполнителя на российских предприятиях можно отнести высокую долю ручного труда на операциях сборки и контроля, моральный износ оборудования (устаревшие автоклавы, прессы).

В части контроля качества отмечается нестабильность партий ввиду «человеческого фактора» и устаревших технологий контроля, высокую долю брака и отходов материала. Производство является недостаточно гибким для выполнения мелкосерийных заказов. Отсутствуют интегрированные ERP/MES системы, что приводит к информационному разрыву на производстве.

В целом, российское производство алюминиевого сотового заполнителя обладает высоким научно-техническим заделом и способно покрывать потребности оборонных программ, но зачастую за счет более высокой трудоемкости и стоимости. В этой связи, главным вызовом является преодоление технологической зависимости от импорта и проведение глубокой модернизации производства для повышения гибкости и эффективности.

2.2 Разработка модели организации производства сотовых заполнителей на основе синтеза концепций бережливого (LP), быстореагирующего (QRM) и активного (AM) производства

Организация производства наукоемкого продукта основывается на системно-процессном подходе, где каждый из этапов процесса может быть выполнен за счет использования совокупности методов, моделей и инструментов. Выбор модели производства зависит как от уровня наукоемкости предприятия, так и от степени разработки изделия и готовности технической документации. Производство нового наукоемкого изделия является наиболее рациональным на базе научно-производственного предприятия, где возможна организация полного жизненного цикла, от разработки конструкции до запуска массового производства [22].

Согласно ГОСТ 15.301-2016 реализация задачи создания сотовых заполнителей для летательных аппаратов включает два основных этапа – разработку и постановку продукции на производство [31]. Полагаем, что в случае, если продукция является новой и не имеет аналогов производства, этап разработки изделия может быть разграничен на две стадии: разработка конструкции согласно требуемых свойств и ее испытания, и, отработка технологии производства с выбором сырья, материалов, оборудования. Таким образом, процесс организации производства сотовых заполнителей будет включать три объемных этапа работы:

- опытно-конструкторские работы: разработка конструкции согласно технического задания с выбором сырья, материалов, оборудования, испытания опытных образцов, разработка конструкторской (КД) и технической документации (ТД);

- отработка технологии и подготовка производства: отработка технологии, освоение производства, оптимизация временного цикла с учетом вспомогательных операций;

- организация и запуск серийного производства: доработка технической документации, обеспечение технологической готовности организации к изготовлению продукции в заданных объемах, подготовка персонала, заключение договоров с поставщиками сырья и материалов.

Каждый из этапов имеет свои особенности и требует особого подхода к реализации.

Стратегические задачи замены импортной научно-технической продукции авиастроения с коротким временем разработки и производства требуют новых подходов к организации производства. По нашему мнению, этапы разработки и организации производства могут быть выполнены на принципах и инструментах концепций организации производства:

- бережливое производство (lean production, LP);
- быстро реагирующее производство (quick response manufacturing, QRM);

- активное производство (agile manufacturing, AM).

Основной идеей бережливого производства (LP) является устранение всех видов потерь для создания максимальной ценности при минимальных затратах, т.е. сделать производственный поток непрерывным и эффективным, производя только то, что нужно, когда нужно, и в нужном количестве. Основные инструменты и методы организации производства в концепции LP следующие:

- канбан – система вытягивания производства, основанная на сигналах-карточках;
- система 5S – организация рабочего места (сортировка, соблюдение порядка, содержание в чистоте, стандартизация, совершенствование);
- «пока-еке» («защита от ошибки») – методы, предотвращающие возникновение дефектов;
- всеобщий уход за оборудованием (TPM);
- картирование потока создания ценности или визуализация потока материалов и информации.

Инструменты бережливого производства применяются чаще всего в массовом и крупносерийном производстве (машиностроение, автомобилестроение), а также в производственных процессах с низкой изменчивостью и высоким объемом [52]. Результатом применения концепции LP в производстве является снижение затрат, сокращение времени цикла, повышение качества продукции и процессов.

Основной идеей быстро реагирующего производства (QRM) является радикальное сокращение времени выполнения всех операций, от получения заказа до отгрузки, реагировать на изменения в условиях высокой неопределенности. Основные принципы и методы QRM следующие:

- ориентация на время выполнения заказа – ключевой показатель, измеряющий общее время от получения заказа до отгрузки;

- принцип 1/4 – необходимо перепроектировать систему, чтобы добиться сокращения времени в 4 раза и более, т.к. ускорение существующей системы дает лишь небольшие улучшения;
- ячейки QRM (Q-ROCs) – организация производства не по функциональным цехам, а в многофункциональные производственные ячейки, полностью отвечающие за продукт или группу продуктов;
- система планирования POLCA – гибридная система планирования для производства с высокой вариативностью, которая помогает управлять нагрузкой на ячейки.

Принципы и методы QRM целесообразно применять в производстве с высокой вариативностью продукции и малыми партиями (аэрокосмическая отрасль, специализированное оборудование). Результатом применения концепции QRM должно стать увеличение гибкости и скорости реакции производства, сокращение времени выполнения заказов на 75% и более.

Основной идеей гибкого или активного производства (AM) является создание производственной системы, способной быстро и эффективно реагировать на требования заказчиков продукции и новые возможности, адаптивность и устойчивость в условиях нестабильности. Основные принципы и методы концепции AM заключаются в следующем:

- образование сетевых структур с партнерами для использования их компетенций в производственном процессе;
- массовая кастомизация – использование гибких систем для производства продукции под индивидуальные запросы при затратах, близких к массовому производству;
- инвестиции в интеллектуальный капитал и обучение персонала, сотрудники многозадачны, креативны и готовы к изменениям;
- интеграция с ИТ – использование передовых цифровых технологий (IoT, большие данные, AI) для обеспечения прозрачности и быстрого принятия решений;

– управление отношениями с клиентами (CRM) для понимания их текущих и будущих потребностей.

Принципы и методы концепции AM наиболее оптимальны в производствах с коротким жизненным циклом продукта и высокой степенью неопределенности (электроника, программное обеспечение). Результатом применения концепции AM должен стать быстрый вывод новых продуктов на рынок.

Таким образом, LP – это философия оптимизации существующих процессов для максимальной эффективности в относительно предсказуемой среде, QRM – стратегия перепроектирования процессов, где скорость является главным драйвером в условиях изменчивости, AM – стратегический подход к построению всей модели производства в условиях неопределенности. Отметим, что данные концепции не всегда являются взаимоисключающими, а современные производственные корпорации часто комбинируют их элементы. Например, можно использовать инструменты Lean для повышения эффективности внутри ячеек QRM, а само производство в целом строить по принципам Agile для большей гибкости.

Для описания концепций организации производства LP, QRM и AM применен метод сравнительного анализа по организационно-методологическим критериям. Сравнительные характеристики концепций представлены в таблица 2.2.1.

Каждая из этих концепций предназначена для решения определенных производственных задач при определенных типах производства. Целью LP является сокращение производственных потерь, QRM – сокращение времени производственного цикла, AM – повышение организационной гибкости.

Таблица 2.2.1 – Сравнительные характеристики концепций организации производства LP, QRM и AM (составлено с использованием [32,111])

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

В настоящее время высокотехнологичные промышленные предприятия все большее внимание уделяют интеграции различных концепций организации производства, адаптируя определенные их принципы и инструменты под свои задачи. Исследователи доказывают эффективность и синергетический эффект от синтеза концепций [102]. Полагаем, что для задач импортозамещения синтез концепций организации производства LP, QRM, AM может стать эффективным решением. Поскольку, модели организации производства должны учитывать, как скорость реагирования и гибкость, так и производственные ресурсы, и затраты на управление качеством продукции и процессов.

Более того, зарубежные авторы Sharp J., Irani Z., Desai S. в своих трудах рассматривают концепции LP и QRM как инструменты AM [116]. Т.е. модель

организационной гибкости активного производства позиционируется как основополагающая, а модели ресурсного управления LP и QRM – как платформа для AM.

Исходя из характера концепций организации производства считаем целесообразным адаптировать их принципы и инструменты под задачу создания импортозамещающих сотовых заполнителей для летательных аппаратов. В общем виде концептуальная модель организации производства сотовых заполнителей на основе принципов и инструментов концепций LP, QRM и AM представлена на рисунке 2.2.1. Для разработки модели использованы методы структуризации факторов производства по категориям и функциональным признакам, формализация последовательности производственных операций, описание взаимосвязей между объектами системы.

Жизненный цикл создаваемой научно-производственным предприятием научно-технической продукции включает в себя три основных этапа, каждый из которых имеет наиболее характерные признаки для применения принципов и инструментов той или иной концепции организации производства.

Первый этап является наиболее наукоемким, где необходимо выполнить ряд задач, связанных с разработкой конструкции, выбором сырья и оборудования, испытанием опытных образцов, разработкой документации. Здесь параллельно задействуются разные подразделения предприятия, задача которых заключается в проведении опытно-конструкторских работ в кратчайшие сроки.

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

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА СОТОВЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗА КОНЦЕПЦИЙ LP, QRM, AM

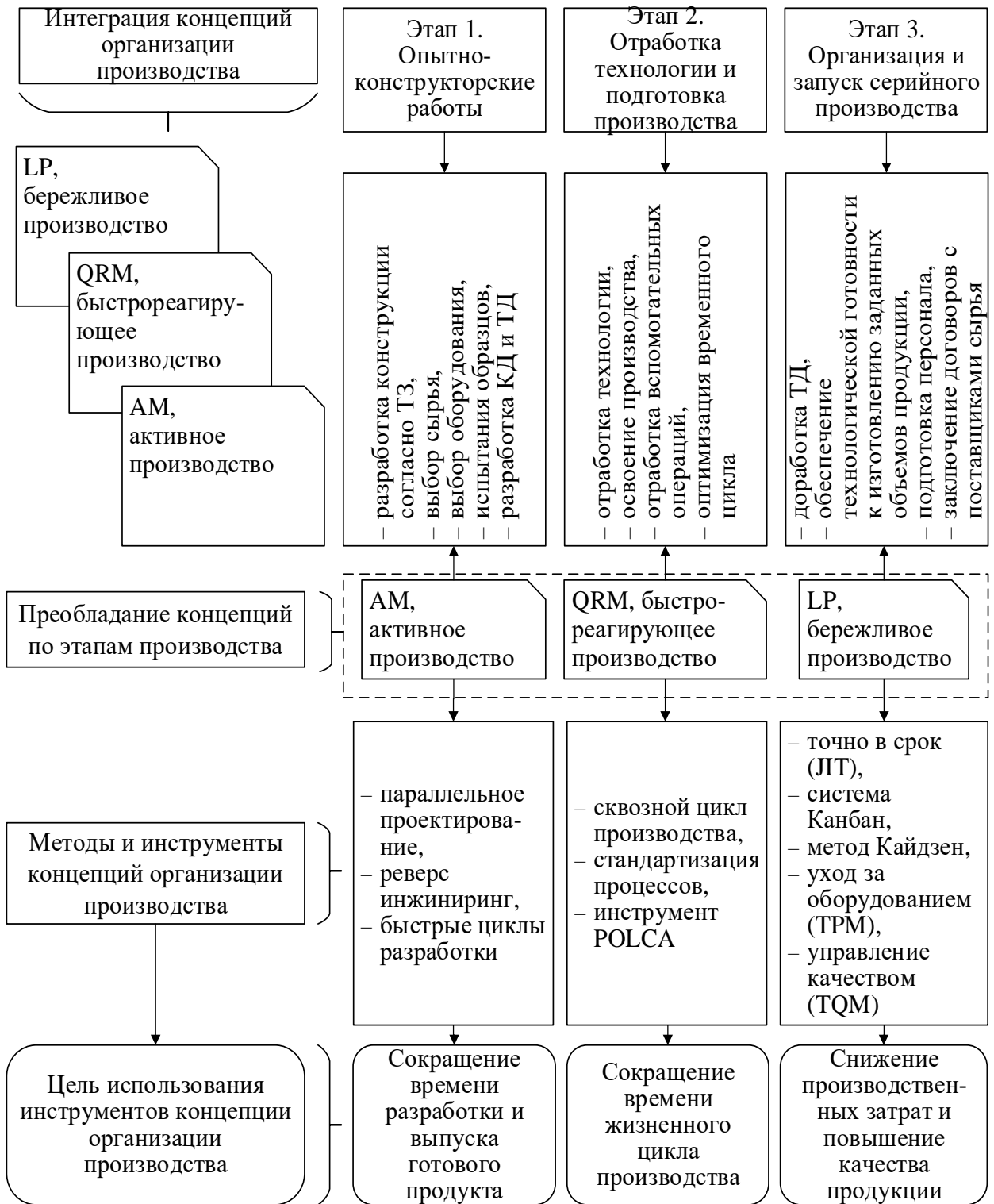


Рисунок 2.2.1 – Концептуальная модель организации производства сотовых заполнителей на основе синтеза LP, QRM и AM

На втором этапе производится отработка технологии, освоение производства, отработка основных и вспомогательных операций для достижения оптимальной продолжительности 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 сотового заполнителя. 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, позволят выстроить эффективный поток создания продукта.

Следует отметить, что предлагаемое организационно-техническое решение основано именно на синтезе концепций LP, QRM и AM, где возможно преобладание принципов того или иного подхода на этапах жизненного цикла разработки и производства сотовых заполнителей.

2.3 Разработка методики оптимизации критического пути производства сотовых заполнителей на основе интеграции метода POLCA, стандартизации и реорганизации логистики

Ключевой проблемой, сдерживающей эффективность производства сотовых заполнителей, является длительный критический путь – общее время, необходимое для прохождения заказом всех обязательных этапов от запуска

до отгрузки. Эта протяженность формируется не столько самими технологическими операциями, сколько целым комплексом организационных потерь (рисунок 2.3.1).

Во-первых, технологическая цепочка является сложной и разнородной. Она включает в себя последовательные, но принципиально разные по своей физико-химической сути этапы: от механического раскроя рулонной фольги до прецизионного нанесения клеевого состава, формовки и последующего расширения («растягивания») сотовой структуры, высокотемпературного формования (склейки в пакет), финальной механической обработки до заданных форм и, наконец, многоступенчатого контроля. Каждая из этих операций требует своего уникального оборудования, режимов, квалификации персонала и контрольных точек. Такая гетерогенность создает естественные «швы» в потоке, где изделие вынужденно переходит из одной технологической среды в другую, что само по себе порождает паузы и логистические задержки.

Во-вторых, и это следствие первой причины, возникают хронические, нерегламентированные ожидания между операциями, вызванные дисбалансом их пропускной способности. Если участок формования, работающий на стабильном, но длительном цикле, является «узким местом», то перед ним образуется очередь из полуфабрикатов с предыдущих этапов (подпрессовки). При этом участки, расположенные раньше в цепочке (например, раскрой), могут простаивать в ожидании освобождения буферов или, наоборот, продолжать производство, усугубляя накопление незавершенной продукции. Такой дисбаланс не управляется системно: каждый участок работает в своем ритме, ориентируясь на локальные показатели, а не на общую скорость потока, что приводит к длительным простоям одних ресурсов и перегрузке других.

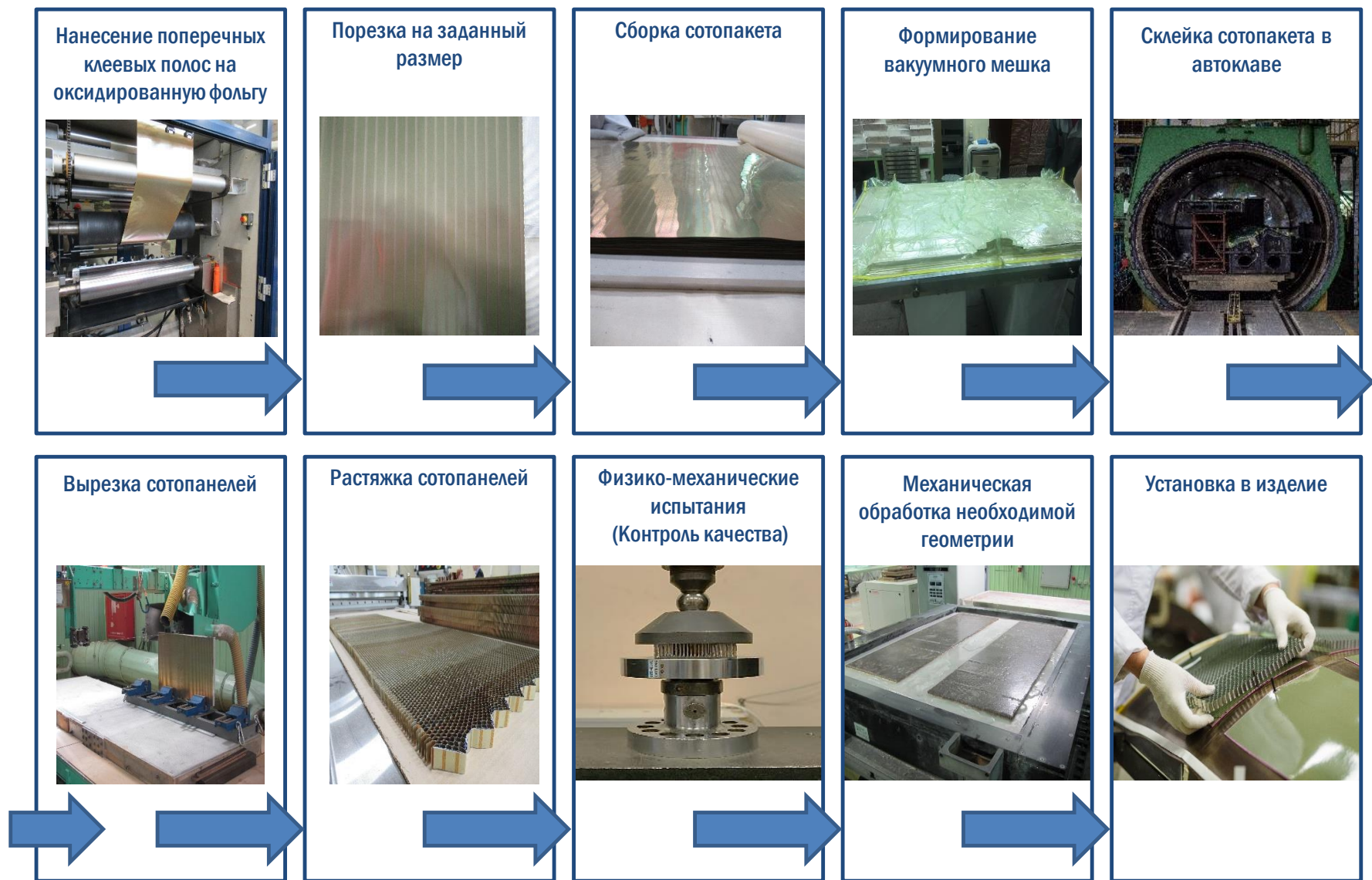


Рисунок 2.3.1 – Технологическая цепь производства алюминиевых сотовых заполнителей (составлено автором по [95])

В-третьих, значительные временные потери происходят на этапах подготовки и обеспечения производства. Перед началом обработки каждой новой партии или при смене типоразмера требуются существенные затраты времени на поиск и доставку на рабочее место специфичных материалов (фольги определенного сплава и толщины), специализированной оснастки (валов, матрицы, столов) и калиброванного измерительного инструмента. Если система хранения не организована по принципам визуального управления и не синхронизирована с производственным планом, эти подготовительные операции могут занимать сопоставимое с самой обработкой время, увеличивая общую длительность цикла и создавая простои дорогостоящего оборудования.

Наконец, все перечисленные факторы закономерно приводят к четвертой проблеме – массивному накоплению незавершенного производства (НЗП) перед операциями – «бутылочными горлышками». Эти запасы полуфабрикатов материализуют в себе время ожидания, «замораживая» стоимость и создавая риски порчи, повреждения или смешивания модификаций. НЗП не только увеличивает финансовые издержки, но и маскирует истинные проблемы потока, создавая иллюзию занятости, в то время как фактическая скорость прохождения заказа через систему остается недопустимо высокой.

Таким образом, длительный критический путь образуется вследствие системных организационных разрывов между разнородными операциями, отсутствия синхронизации их работы, неэффективной логистики внутренних ресурсов и возникающих в результате заторов в виде НЗП.

Целью методики является сокращение длительности критического пути за счет синхронизации потока, устранения простоев и непроизводительных затрат времени. Для этих целей предлагается интегрированный системный подход в виде комбинации трех инструментов, что дает существенный синергетический эффект:

POLCA (система визуального контроля на основе карточек) – для управления потоком и выравнивания загрузки;

стандартизация процессов – для стабилизации и предсказуемости выполнения операций;

реорганизация схем хранения – для исключения потерь на транспортировку и поиск.

Методика состоит из пяти последовательных этапов.

Этап 1. Диагностика реальных событий и анализ потерь.

Прежде чем приступать к преобразованиям, необходимо получить объективную количественную картину реальных событий. На данном этапе производится диагностика всего производственного процесса, цель которого – увидеть не то, как процесс должен работать согласно технологическим картам, а как он работает в текущих организационных условиях.

Процесс начинается с составления карты потока создания ценности (VSM) для одного или нескольких типовых заказов на сотовый наполнитель. Группа специалистов (технолог, мастера, логист, методолог) проходят вместе с заказом по всему цеху, фиксируя каждый шаг жизненного цикла.

На карту наносятся все операции производственного процесса.

Во-первых, это ценностные операции – время непосредственного преобразования материала: раскрой фольги, нанесение клеевой полосы, цикл расширения и пр. Замеряется фактическое время выполнения («такт-время») для нескольких повторений, чтобы получить достоверную среднюю величину. Во-вторых, это непроизводительные этапы, такие как транспортировка тележек с полуфабрикатами между участками. Фиксируются продолжительные ожидания в очередях, например, сколько часов расширенная сотовая заготовка лежит у цеха пропитки, ожидая своей очереди. Отдельно отмечаются все контрольные операции (измерения, визуальный осмотр, лабораторные пробы) с их длительностью. В-третьих, это время ожидания незавершенной продукции (НЗП). Измеряются и визуализируются на карте объемы незавершенного производства, накопившиеся между

каждыми операциями. Такие запасы являются наглядным индикатором разрывов в потоке. В-четвертых, это информационные потоки, где отслеживается поступление заказа в цех (наряд-задание, электронная система), передача информации между участками и возвращение данных о выполнении. Зачастую хаотичный информационный поток является причиной задержки материального потока.

Результатом данной работы становится временная лента процесса, где сумма длительностей всех операций дает исходную длительность критического пути. На карте становятся видны «бутылочные горлышки», т.е. операции, перед которыми скапливается наибольшее НЗП и которые имеют самое длительное время цикла или наименьшую пропускную способность.

Далее следует глубокий анализ потерь, структурированный по известным принципам бережливого производства. Каждый временной промежуток, не добавляющий ценности продукту, классифицируется как:

- ожидание (простой заготовки, отсутствие оператора, занято оборудование, нет оснастки и т.д.);
- лишние перемещения (целесообразность маршрутов, неправильная планировка цеха и т.д.);
- излишняя обработка (невыполненные клиентом операции, сверхточная калибровка и т.д.);
- запасы (накопление НЗП, дисбаланс производительности, некорректное планирование и т.д.);
- исправления брака (затрачено времени и ресурсов на переделку).

Главный результат этапа – переход от субъективных ощущений к объективным, измеримым данным. В ходе диагностики получаем понимание, какая часть общего времени процесса является реальным преобразованием материала, а какая потерями; где расположены ключевые зоны «затора»; какие виды потерь преобладают. Карта «как есть» принимается как база для проектирования эффективного состояния и позволяет на последующих этапах целенаправленно воздействовать на выявленные проблемы.

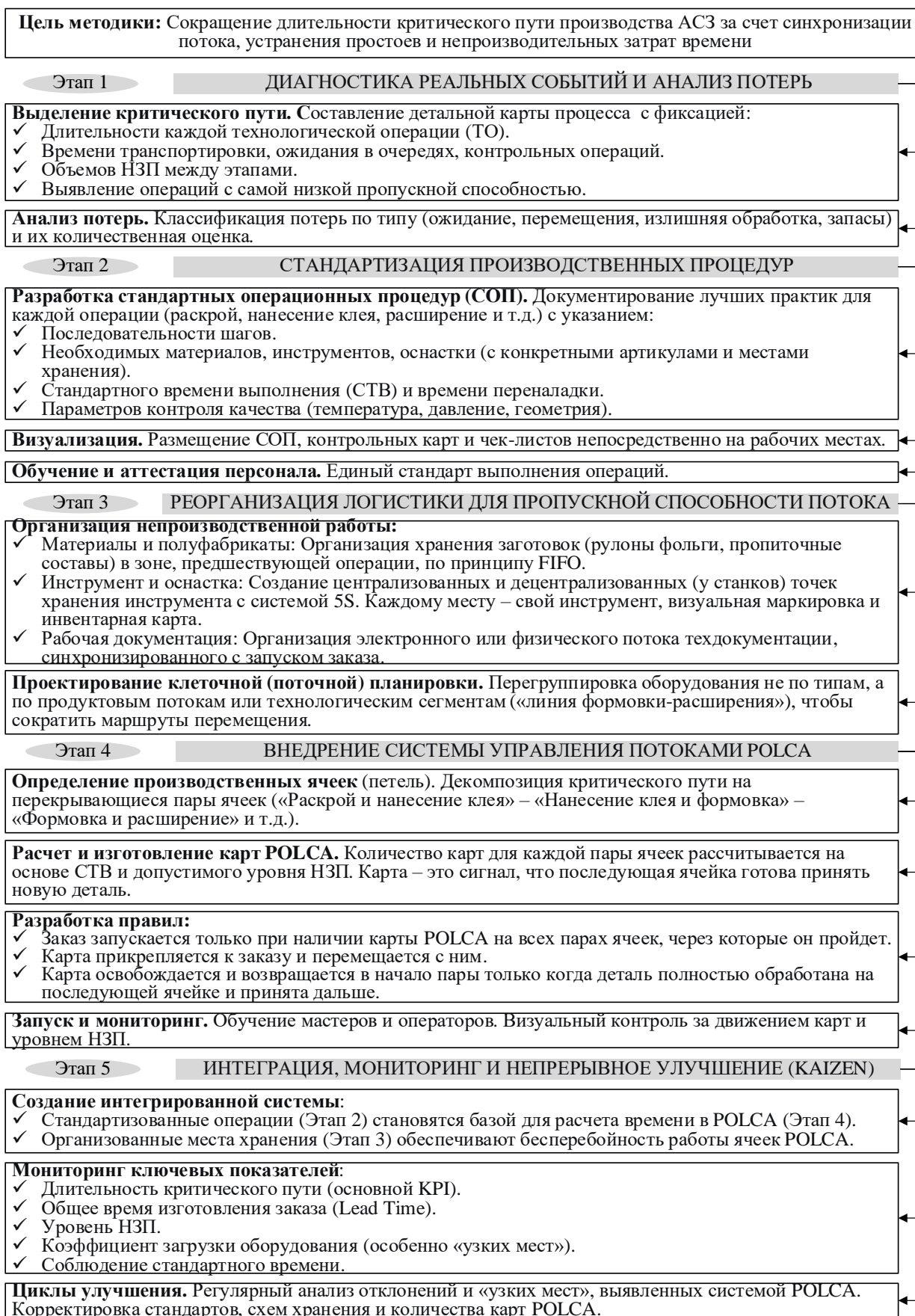


Рисунок 2.3.2 – Методика оптимизации критического пути производства сотовых заполнителей на основе интеграции метода POLCA, стандартизации и реорганизации логистики (составлено автором)

Этап 2. Стандартизация ключевых производственных процедур.

После того как диагностика выявила потери необходимо создать основу для управляемого процесса. Этап стандартизации направлен на преобразование каждой технологической операции в стабильный, предсказуемый, воспроизводимый процесс. Это необходимо для возможности реализации последующих усовершенствований: синхронизация потоков (POLCA) и точного планирования.

Этап начинается с разработки стандартных операционных процедур (СОП) для каждой критической операции, выявленной на карте потока: раскрой, нанесение клеевой полосы, формовка пакета, расширение в печи, пропитка, спекание. В отличие от общих технологических инструкций, СОП является практическим, пошаговым алгоритмом, документирующим наилучшую научно обоснованную практику выполнения работы.

Каждая СОП становится исчерпывающей инструкцией, которая включает:

- детализированное описание последовательности шагов;
- описание используемых материальных ресурсов и инструмента, что связывает стандартизацию операции с будущей реорганизацией логистики;
- временные стандарты с фиксацией стандартного времени выполнения (СТВ) для партии определенного размера и времени переналадки (SMED) при смене типоразмера, что впоследствии становится объективной основой для расчета пропускной способности и планирования в системе POLCA;
- ключевые параметры качества указанием конкретных контрольных точек с допустимыми диапазонами (например, по температуре в зоне печи расширения, по ширине клеевой дорожки, по усилию отрыва ячейки после спекания).

Следующим критически важным шагом является визуализация. Разработанные СОП переводятся в формат пиктограмм, чек-листов и контрольных карт, которые размещаются непосредственно на рабочих местах (на стендах, рядом со станком, на пульте управления). Это делает

стандарт частью рабочей среды, позволяет оперативно свериться с эталоном и исключает ошибки «по памяти».

Завершает этап системное обучение и аттестация всего персонала. Все операторы, наладчики и мастера проходят обучение по новым СОП не формально, а с демонстрацией и отработкой навыков. Введение единого стандарта нивелирует разницу в качестве и скорости между сменами и сотрудниками. Последующая аттестация подтверждает, что каждый исполнитель не только знает, но и может стабильно выполнять операцию в соответствии с установленными требованиями по времени и качеству.

Таким образом, результатом второго этапа становится создание цифровой основы производства. Каждая операция имеет четко описанный, измеренный и зафиксированный эталон. Это позволяет в дальнейшем:

- объективно выявлять отклонения как сигналы для улучшения;
- с большей точностью рассчитывать возможности оборудования для синхронизации потоков (POLCA);
- гарантировать стабильное качество, не зависящее от человеческого фактора;
- эффективно обучать новых сотрудников.

Стандартизация производственных процедур является надежной платформой для дальнейшей оптимизации критического пути изготовления сотового заполнителя.

Этап 3. Реорганизация логистики для поддержки пропускной способности потока.

Этап реорганизации нацелен на ликвидацию всех непроизводительных затрат времени, связанных с поиском, ожиданием и перемещением ресурсов. Его суть – превратить производственное пространство в слаженную систему, где материалы, инструмент и информация подаются точно в нужное место и в нужный момент для непрерывной работы. Действия этого этапа реализуют принцип «Поддержки линии» (Line Support), где вся инфраструктура

направлена на решение задачи бесперебойного выполнения ценностных операций.

В целях упорядочивания материальных потоков для материалов и полуфабрикатов внедряется система адресного хранения по принципу FIFO «первым пришел – первым ушел» (First In, First Out). Это означает, что сырье, материалы и незавершенная продукция хранятся не хаотично, а в четко обозначенных, промаркированных зонах непосредственно перед операцией, которая их использует. Например, стеллаж с рулонами фольги для раскроя в 5 метрах от размоточного станка гарантирует, что оператору не нужно тратить время на «поход» и поиск, и исключает риск использования не предназначенной для операции партии. Поток материалов становится видимым и управляемым.

Для систематизации мест хранения инструмента и оснастки организуется двухуровневая система с применением методики 5S (сортировка, соблюдение порядка, содержание в чистоте, стандартизация, совершенствование). Актуально также децентрализованное хранение, когда ежедневно используемый инструмент (специальные ключи, калибры, шаблоны) размещается на перфорированных панелях непосредственно в зоне выполнения операции. Организуется централизованный инструментально-раздаточный пункт (ИРП), где хранится специализированная, редко используемая или требующая поверки оснастка (сложные матрицы, пресс-формы).

В целях синхронизации информационного потока рабочая документация (маршрутные карты, чертежи, СОП) организуется так, чтобы она поступала на рабочее место синхронно с запуском заказа. Идеальным решением является цифровизация и вывод информации на терминалы у станков. Если используется бумажный носитель, то он перемещается вместе с пачкой заготовок в специальном планшете, становясь частью физического потока. Это исключает простои из-за ожидания технической документации.

Второе ключевое действие – проектирование поточной (клеточной) планировки. Традиционная планировка, где оборудование сгруппировано по типу (все режущие станки в одном углу, все печи в другом), вынуждает длительно транспортировать полуфабрикаты по цеху, накапливая время транспортировки и ожидания.

В рамках оптимизации производится перегруппировка оборудования по логике продукта или технологического сегмента. Например, создается компактная «линия формовки-расширения», где станок нанесения клеевой полосы, пресс для формовки пакетов и печь предварительного расширения установлены буквой «П» или в линию. Полуфабрикат передается с одной единицы оборудования на другую или по короткому рольгангу. Это радикально сокращает маршруты перемещения, объемы межоперационного НЗП и время цикла для данного технологического передела.

Результатом данного этапа является создание логистического каркаса, соответствующего стандартизированным операциям. Производственная среда становится предсказуемой и эффективной: оператор быстро находит все необходимое, полуфабрикаты движутся по кратчайшим маршрутам, а информация всегда актуальна. Это не только сокращает непроизводительное время на 20-30%, но и создает необходимые физические условия для успешного внедрения системы управления потоками (POLCA) на следующем этапе, так как сейчас потоки можно организовывать вокруг четко выделенных, логически завершенных ячеек.

Этап 4. Синхронизация путем внедрения системы управления потоками POLCA.

После стандартизации операций (этап 2) и реорганизации логистики (этап 3), возникает необходимость связывания производственных звеньев в единую саморегулируемую систему. Целью данного этапа является синхронизация работы смежных участков для, выравнивание их нагрузки для предотвращения накопления заделов перед «узкими местами».

Для решения этой задачи внедряется система POLCA для регулирования производственных потоков. POLCA дает производственным ячейкам инструмент для сигнализации о готовности к приему новой работы, основанный на их реальной загрузке. На данном этапе просматриваются 4 ключевых действия.

Во-первых, производится определение производственных петель, т.е. критический путь разбивается на перекрывающиеся пары соседних ячеек, что является ключевым отличием от линейных систем. Например, формируются петли: «Раскрой и нанесение клея», «Нанесение клея и формовка», «Формовка и расширение». Каждая ячейка входит в две петли – с предыдущей и с последующей, что создает гибкость. Например, ячейка «Нанесение клея» взаимодействует и с «Раскроем», и с «Формовкой», что позволяет балансировать нагрузку в обоих направлениях.

Во-вторых, осуществляется расчет и создание физического инструмента в виде карт POLCA. Для каждой пары ячеек рассчитывается и изготавливается ограниченное количество карт (бумажных или электронных). Количество карт является главным регулируемым параметром системы и рассчитывается на основе стандартного времени выполнения (СТВ, полученного при стандартизации) и целевого, допустимого уровня незавершенного производства между ячейками. Карта POLCA дает разрешение на передачу работы: наличие свободной карты в паре «А и Б» сигнализирует, что ячейка «Б» (последующая) имеет свободные мощности и готова принять полуфабрикат от ячейки «А».

В-третьих, производится разработка четких правил:

– правило запуска, где новый заказ может быть запущен в первую ячейку только при наличии свободной карты POLCA на всех парах ячеек, через которые ему предстоит пройти;

– правило сопровождения, когда после запуск заказа к нему прикрепляются карты со всех необходимых пар и следуют с полуфабрикатом по маршруту;

– правило освобождения, когда карта из пары «А и Б» не освобождается в момент, когда деталь покинула ячейку «А», а освобождается и возвращается в начало этой пары только тогда, когда деталь полностью обработана на ячейке «Б» и принята следующей ячейкой (например, «Формовкой» в паре «Б и В»).

Таким образом, карта POLCA контролирует факт завершения обработки на следующем этапе, что предотвращает затоваривание входа смежной ячейки и заставляет систему реагировать на ее реальную пропускную способность.

В-четвертых, производится запуск и визуальный мониторинг. После обучения персонала система запускается в пилотном режиме. Движение карт становится индикатором состояния потока. Визуальные панели, на которых отображаются карты в работе и свободные карты для каждой пары, позволяют мастеру оценить ситуацию: если перед какой-то ячейкой не осталось свободных карт, значит, она перегружена и стала «узким местом», требующим вмешательства. Если же все карты свободны, поток идет беспрепятственно.

Результатом данного этапа является создание саморегулируемого ритма производства. Система POLCA, опираясь на стандарты и организованное пространство, автоматически ограничивает выпуск на ранних этапах, если последующие перегружены. Она предотвращает скопление заготовок в «узких местах» работой и выравнивает нагрузку. Производство «вытягивает» полуфабрикаты с той скоростью, с которой может справиться наиболее медленное, но критически важное звено. Обеспечивается синхронизация, превращающая набор отдельных операций в управляемый, непрерывный поток.

Этап 5. Интеграция и запуск цикла непрерывного улучшения (Kaizen).

Реализация предыдущих этапов позволила создать работоспособную производственную систему, которая требует интеграции, мониторинга и совершенствования. Целью этапа является объединение всех элементов в единый механизм и обеспечение его адаптации к меняющимся условиям. На данном этапе просматриваются 3 ключевых действия.

Во-первых, необходимо создать интегрированную систему на основе синергии инструментов стандартизации (этап 2) и POLCA (этап 4). Стандартное время выполнения (СТВ), зафиксированное в СОП, выступает ключевой константой, на основе которой рассчитывается количество карт в каждой петле POLCA. Стандарт становится цифровой основой для синхронизации.

В свою очередь, реорганизованная логистика (этап 3) становится проводящей системой для ячеек POLCA. Четкие места хранения, принцип FIFO и визуальный контроль инструмента гарантируют, когда карта POLCA дает «зеленый свет» на обработку заказа, оператору не нужно тратить время на поиск. Бесперебойность материального обеспечения позволяет ячейкам реализовывать свой производственный потенциал в отведенное стандартное время.

Во-вторых, нужно обеспечить в динамике мониторинг и анализ ключевых производственных показателей:

- длительность критического пути;
- общее время изготовления заказа;
- уровень незавершенного производства;
- коэффициент загрузки оборудования;
- отклонение от времени стандартной операционной процедуры (СОП).

В-третьих, организуются циклы улучшения (Kaizen), где POLCA выступает в роли диагностической системы и позволяет выявлять проблемы в производственном потоке. Могут возникать следующие ситуации:

- если карты для пары «А и Б» постоянно задерживаются, это сигнал, что ячейка Б является критическим узлом, и необходимо провести анализ причин;
- регулярный анализ отклонений от стандартного времени на операции может выявить необходимость корректировки самой СОП или доработки оснастки;

– если операторам требуется много времени на получение материалов, несмотря на систему FIFO, то необходимо скорректировать схемы хранения или размер страхового запаса;

– на основе данных о реальной пропускной способности и целевых показателях по времени выполнения проводится перенастройка количества карт POLCA в каждой петле, после чего карт становится меньше для дальнейшего сжатия НЗП или больше для повышения гибкости производственной системы.

Таким образом, данный этап замыкает петлю непрерывного совершенствования. Внедренная система на основе интеграции «Стандарты + Логистика + POLCA» генерирует данные, далее данные выявляют проблемы, команды решают проблемы через корректировку стандартов, логистики или параметров POLCA, что приводит к новым, улучшенным показателям, которые снова отслеживаются. Производство сотовых заполнителей превращается в обучающуюся систему, способную не только поддерживать достигнутый уровень эффективности, но и постоянно повышать бесперебойность потока.

В результате внедрения методики ожидается создание производственного потока нового качества:

- сокращение длительности критического пути на 25-40%;
- снижение объема незавершенного производства на 30-50%;
- повышение предсказуемости сроков изготовления заказа;
- повышение ритмичности производственного процесса;
- рост эффективности использования ресурсов;
- сокращение логистических издержек.

Реализация предлагаемого подхода к организации производства сотового заполнителя обеспечивает цифровой фундамент для цифровизации производства: методика создает для ИТ-система 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.

Таким образом, внедрение методики не ограничивается единовременным сокращением издержек. Фактически, предприятие строит отлаженную «физическую» операционную систему, которую в будущем можно будет дополнить «программной» цифровой надстройкой для достижения следующего уровня эффективности.

Выводы по второй главе

Исследование подходов к разработке и организации производства отечественных сотовых заполнителей для летательных аппаратов позволило получить следующие научно-практические результаты:

1. Определены этапы процесса организации производства сотовых заполнителей 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.

2. Обосновано использование синтеза концепций LP, QRM, AM для решения задачи импортозамещения, что позволит повысить эффективность организации производства за счет синергетического эффекта. Разработана концептуальная модель организации производства сотовых заполнителей на основе синтеза методов и инструментов активного, быстрореагирующего и бережливого производства с постановкой приоритетов подходов по этапам жизненного цикла производства.

3. 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. 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.

3 МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА БАЗЕ НАУЧНО- ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

3.1 Синергия методов параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» для серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП

Производственная система, отвечающая за разработку и выпуск нового наукоемкого продукта на научно-производственном предприятии, состоит из нескольких ключевых подразделений, которые работают в тесной взаимосвязи. Часто эту связку координирует сквозная система управления проектами (Проектный офис).

Ключевыми исполнителями, непосредственно участвующими в процессе разработки и производства изделия, являются подразделения основной и вспомогательной подсистем предприятия:

- научно-исследовательский отдел (НИО);
- отдел главного конструктора (ОГК);
- отдел главного технолога (ОГТ);
- опытное производство (опытный цех);
- производственные цеха (серийное производство);
- отдел испытаний и контроля качества (ОТК).

Обслуживающая подсистема производства выполняет задачи обеспечения непрерывности функционирования производственных мощностей, оптимизации работы всех систем предприятия и удовлетворения потребностей производственных цехов:

- проектный офис (РМО);
- отдел маркетинга и продаж;
- патентно-лицензионный отдел (юридическая служба);
- отдел материально-технического снабжения (ОМТС);

– отдел стандартизации и нормативного контроля.

Используя методологию процессного моделирования на рисунке 1.1.3 представлена контекстная диаграмма процесса разработки и организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП.

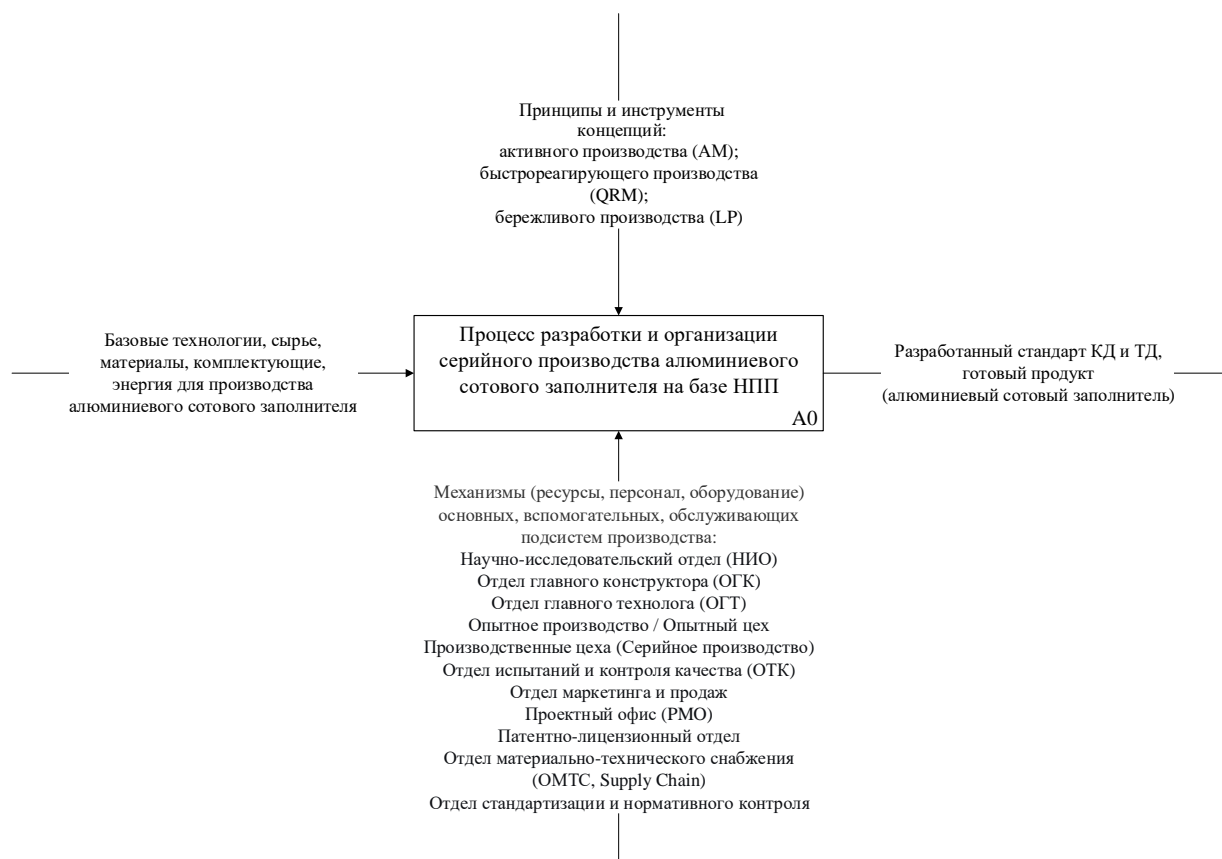


Рисунок 3.1.1 – Контекстная диаграмма процесса разработки и организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП (составлено автором)

В контексте настоящего исследования управляющие воздействия (правила, регламенты, процедуры) представлены инструментами концепций активного производства (AM), быстро реагирующего производства (QRM) и бережливого производства (LP). Механизмы реализации управляющих воздействий (ресурсы, персонал, оборудование) представлены службами основных, вспомогательных, обслуживающих подсистем производства. На входе в процесс присутствуют существующие технологии производства,

которые можно рассматривать как базовые или альтернативные способы производств сотового заполнителя, а также сырье, материалы, комплектующие, энергия для производства. На выходе – результат в виде разработанных и стандартизированных технологий производства и непосредственно готовый продукт – алюминиевый сотовый заполнитель.

Процесс разработки и организации серийного производства декомпозирован на три этапа:

Этап 1. Опытно-конструкторские работы:

- разработка конструкции согласно техническому заданию (ТЗ),
- выбор сырья,
- выбор оборудования,
- изготовление и испытания образцов,
- разработка конструкторской документации (КД) и технической

документации (ТД);

Этап 2. Отработка технологии и подготовка производства:

- отработка технологии,
- освоение производства,
- отработка вспомогательных операций,
- оптимизация временного цикла;

Этап 3. Организация и запуск серийного производства:

- доработка технической документации (ТД),
- обеспечение технологической готовности к изготовлению заданных объемов продукции,
- подготовка персонала,
- заключение договоров с поставщиками сырья.

Диаграмма декомпозиции процесса разработки и организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия представлена на рисунке 3.1.2.

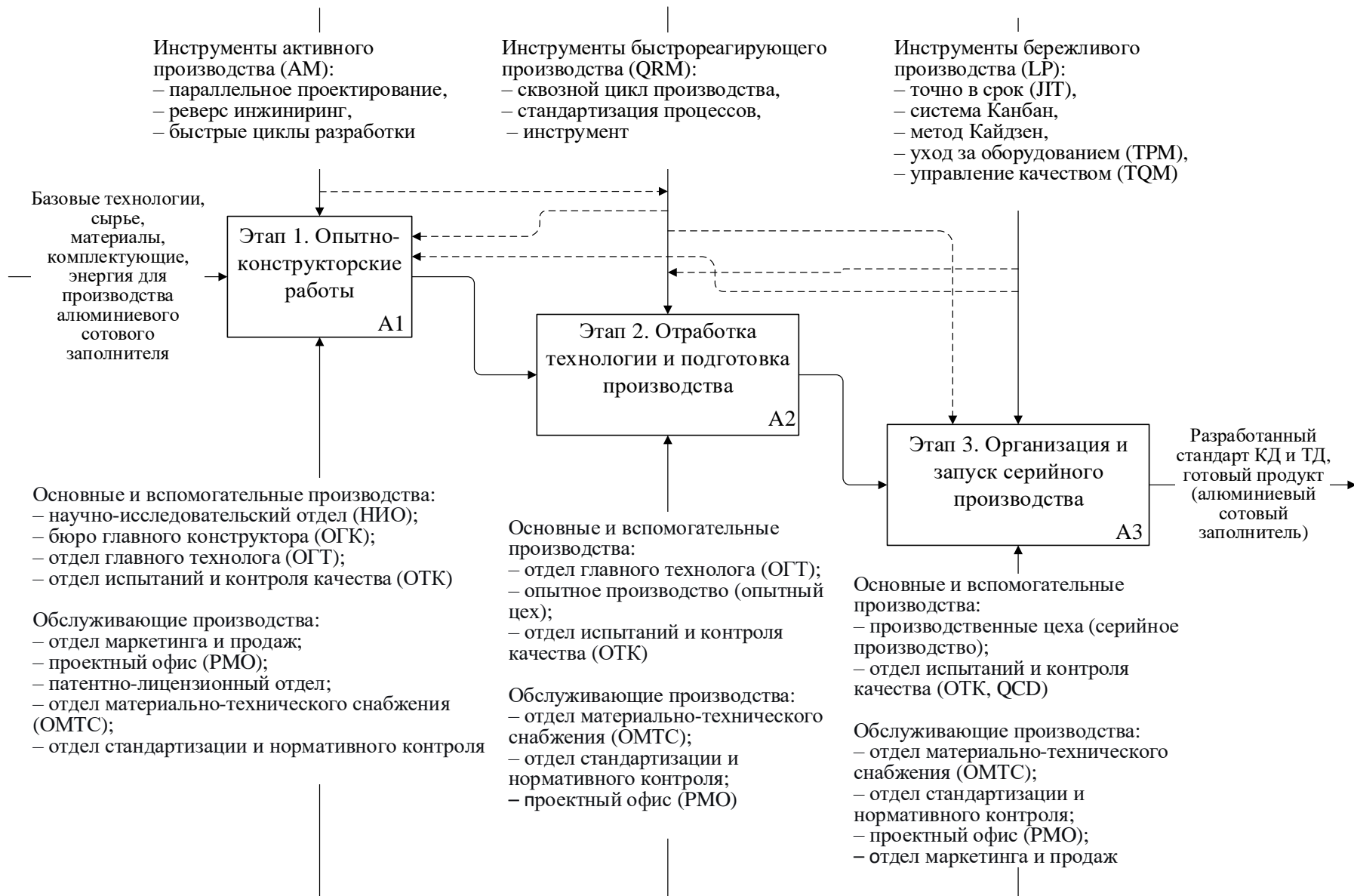


Рисунок 3.1.2 – Диаграмма декомпозиции процесса разработки и организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП на три этапа (составлено автором)

Преимуществом научно-производственного предприятия является возможность организации сквозного проектирования (инжиниринга) сотового заполнителя, представляющего собой последовательность взаимосвязанных этапов, от зарождения идеи до выпуска серийного образца, в котором участвуют все ключевые подразделения в рамках единой команды НПП.

Опираясь на исследования в области создания нового наукоемкого продукта, полагаем, что организацию сквозного процесса разработки и производства сотового заполнителя целесообразно выстраивать с использованием следующих инструментов (рисунок 3.1.3):

этап 1. Опытно-конструкторские работы – инструмент концепции активного производства (AM) «параллельное проектирование»;

этап 2. Отработка технологии и подготовка производства – инструмент концепции быстореагирующего производства (QRM) «сквозной цикл производства»;

этап 3. Организация и запуск серийного производства – инструмент концепции бережливого производства (LP) «точно в срок (JIT)».

Методы параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» (JIT) связаны через организацию процессов проектирования и управления производством. Эти подходы направлены на сокращение сроков разработки изделий, повышение качества продукции и оптимизацию цепочек поставок.

Связь методов заключается в том, что параллельное проектирование – это подход к разработке изделия, при котором различные этапы выполняются одновременно, а сквозной цикл – это комплексный подход к решению задач проектирования и подготовки производства, при котором данные и результаты текущего этапа передаются сразу на все последующие этапы. Метод «точно в срок» (JIT) – это система управления производственными процессами и логистикой, при которой материалы и комплектующие доставляются ровно в тот момент, когда они необходимы для производства.



Рисунок 3.1.3 – Преобладающие инструменты концепций AM, QRM, LP для организации сквозного процесса разработки и производства сотового заполнителя (составлено автором)

Сквозной цикл (E2E) является философией организации производства («скелет»), задает общее видение и требует нивелировать функциональные барьеры между отделами. Параллельное проектирование – «мозг и нервная система», тактический инструмент внутри E2E, реализующий принцип E2E на самой ранней и критически важной стадии разработки. Точно в срок (JIT) можно рассматривать как «кровеносную систему», инструмент исполнения и логистики, а его успех напрямую зависит от двух предыдущих методов.

Синергия методов параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» (JIT) в создании сотового заполнителя заключается в следующем.

При *параллельном проектировании* технологи и производственники с самого начала участвуют в разработке и требуют от конструкторов:

– унификации компонентов, деталей, что позволяет ЛТ-системе заказывать меньше номенклатур позиций;

– упрощения сборки (минимизация операций, проектирование сборки на принципах DFA), что ускоряет производственный цикл, делая ЛТ более стабильным;

– стандартизации процессов для предсказуемого и ритмичного производства, необходимого для ЛТ.

Сквозной цикл (система E2E) как площадка для интеграции всех методов побуждает рассматривать процесс от идеи до поставки клиенту как единое целое. При ограниченных временных ресурсах вывода на рынок нового силового сотового заполнителя возникает потребность сокращения общего времени от заказа до отгрузки готового изделия (Lead Time). Для достижения этого целесообразно применение параллельного проектирования для ускорения процесса. Одновременно требуется внедрение ЛТ на производстве и в логистике, чтобы сократить время изготовления и не «замораживать» капитал в запасах.

Стратегия сквозного цикла требует использования параллельного проектирования для скорости и качества разработки и «точно в срок» для эффективности производства (таблица 3.1.2).

Таким образом, методы параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» синергетичны. Использование только одного из них даст ограниченный эффект. Наиболее мощные результаты достигаются, когда сквозной цикл как философия объединяет параллельное проектирование для создания продукта и «точно в срок» для его эффективного производства.



Таблица 3.1.2 – Синергия методов параллельного проектирования, сквозного цикла и «точно в срок» для разработки и организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя (составлено автором)

Метод	Роль в системе	Главная цель	Вклад в общий процесс
Сквозной цикл (E2E)	Стратегия и философия	Управление всей цепочкой создания ценности, устранение разрывов	Создает среду для взаимодействия и общую цель для всех подразделений
Параллельное проектирование	Тактика в разработке	Сокращение времени выхода на рынок, снижение стоимости изменений	Создает «производимый» и оптимизированный продукт, готовый для JIT
Точно в срок (JIT)	Тактика в производстве и логистике	Устранение потерь (запасов, ожидания), снижение издержек	Обеспечивает быструю, гибкую и рентабельную реакцию на спрос, созданный новыми продуктами

Сетевой график реализации процесса разработки и производства сотового заполнителя на базе НПП представлен на рисунке 3.1.4. Жизненный цикл процесса состоит из 12 основных этапов, выполнение которых осуществляется силами 11 производственных подразделений. Проектный офис производит координацию всех этапов жизненного цикла продукта, управление сроками, ресурсами и бюджетом проекта, организацию межфункционального взаимодействия.

Использование подхода последовательного проектирования ведет к потерям времени, ресурсов и качества. Параллельное же проектирование является современным, гибким и эффективным подходом, который является стандартом для разработки сложных продуктов в машиностроении, аэрокосмической отрасли.

Этапы ЖЦ сквозного проекта	Этап 1. Опытно-конструкторские работы					Этап 2. Отработка технологии и подготовка производства				Этап 3. Организация и запуск серийного производства		
	Разработка конструкции согласно ТЗ	Выбор сырья	Выбор оборудования	Изготовление и испытания образцов	Разработка КД и ТД	Отработка технологии	Освоение производства	Отработка вспомогательных операций	Оптимизация временного цикла	Доработка ТД	Обеспечение готовности к серийному производству	Заключение договоров с поставщиками
Ключевые подразделения НИИП												
Проектный офис	<i>Координация жизненного цикла сквозного процесса</i>											
Научно-исследовательский отдел	1											
Отдел главного конструктора		2			5							
Отдел главного технолога			3		5	6				10		
Опытный цех				4								
Производственные цеха							7	8	9		11	
Отдел маркетинга и продаж												
Патентно-лицензионный отдел (юридический отдел)												
Отдел материально-технического снабжения												12
Отдел испытаний и контроля качества												
Отдел стандартизации и нормативного контроля												

 Основной исполнитель
 Вспомогательный исполнитель

1-12 Этапы жизненного цикла сквозного процесса при последовательном проектировании

Рисунок 3.1.4 – Сетевой график реализации процесса разработки и производства сотового заполнителя на базе научно-производственного предприятия (составлено автором)

Для реализации параллельного управления проектом в рамках НПП необходимо формализовать наличие производственных подразделений и их функции. В таблице 3.1.1 структурированы ключевые функции и функции на этапах жизненного цикла процесса разработки и производства сотового заполнителя.

Ключевые задачи по разработке конструкторской документации (чертежей, спецификаций, 3D-моделей), технологической документации (маршрутных карт, технологических инструкций) принадлежат отделам главного конструктора и главного технолога. На протяжении всего процесса данные подразделения производят сопровождение КД в производстве, подбор и подготовку оборудования, проектирование оснастки и инструментов. Производственные цеха, ответственные за серийное производство, также участвуют в разработке документации совместно с ОГК и ОГТ.

Таблица 3.1.1 – Функции подразделений НПП, реализующих процесс разработки и производства сотового заполнителя (составлено автором)

Ключевые подразделения	Ключевая функция	Функции на этапах жизненного цикла сквозного процесса
Подразделения основных и вспомогательных подсистем НПП		
Научно-исследовательский отдел (НИО)	Проведение фундаментальных и прикладных исследований, поиск новых научных идей и технических решений, доказательство принципиальной осуществимости продукта	Участвует в решении сложных технических проблем, возникающих при запуске в серию
Отдел (бюро) главного конструктора (ОГК)	Разработка конструкторской документации (КД) – чертежей, спецификаций, 3D-моделей. Проектирование продукта, отвечающего техническому заданию	Передача и сопровождение КД в производство, внесение изменений по результатам испытаний и отработки технологии
Отдел главного технолога (ОГТ)	Разработка технологической документации (ТД) – маршрутных карт,	Отработка технологических процессов,

Ключевые подразделения	Ключевая функция	Функции на этапах жизненного цикла сквозного процесса
	технологических инструкций. Подбор и подготовка оборудования, проектирование оснастки и инструментов	обеспечение стабильности и повторяемости производства
Опытный цех	Изготовление опытных образцов и опытных партий для проведения испытаний и отработки технологий. Это связка между разработкой и серийным выпуском	Обкатка и доводка технологии перед передачей в серийные цеха
Производственные цеха (серийное производство)	Непосредственно выпуск нового сотового заполнителя. Обеспечение плана выпуска, соблюдение качества	Участвует в разработке документации совместно с ОГК и ОГТ
Отдел испытаний и контроля качества (ОТК)	Проведение всех видов испытаний (лабораторных, стендовых, приемосдаточных) опытных и серийных образцов. Контроль качества на всех этапах производства	Обеспечение соответствия сотового заполнителя всем заявленным требованиям и стандартам
Подразделения обслуживающей подсистемы НПП		
Проектный офис (РМО)	Координация всех этапов жизненного цикла продукта, управление сроками, ресурсами и бюджетом проекта, организация межфункционального взаимодействия	
Отдел маркетинга и продаж	Исследование рынка, формирование требований к продукту, прогнозирование спроса, подготовка к коммерческому запуску	Разработка стратегии вывода на рынок, подготовка рекламных материалов, обучение отдела продаж
Отдел материально-технического снабжения (ОМТС)	Поиск и закупка комплектующих и материалов, организация взаимодействия с поставщиками для запуска серийного производства	
Отдел стандартизации и нормативного контроля	Обеспечение соответствия сотового заполнителя требованиям технических регламентов, ГОСТов и других стандартов	
Патентно-лицензионный отдел (юридическая служба)	Проверка патентной чистоты и патентоспособности разработки, оформление прав на интеллектуальную собственность	

Суть параллельного проектирования заключается в одновременной и совместной работе всех подразделений (конструкторы, технологи, маркетологи, производственники, снабженцы) над продуктом на самых ранних этапах, что позволяет сразу учитывать все аспекты его жизненного цикла и избежать дорогостоящих ошибок на поздних стадиях. Данный подход требует большей координации и зрелости команды, но окупается за счет скорости, снижения затрат и создания более качественного продукта.

Ключевыми принципами параллельного проектирования являются:

- раннее вовлечение всех участников: все заинтересованные стороны работают вместе с этапа идеи;
- параллельность процессов: разные задачи решаются одновременно, а не последовательно;
- фокус на жизненном цикле продукта: учитывается не только «как сделать», но и «как использовать, обслуживать и утилизировать»;
- коллективная ответственность: команда отвечает за успех продукта в целом, а не за «узкий» участок;
- итеративность и быстрые прототипы: идеи быстро проверяются на макетах и моделях, получается оперативная обратная связь.

Анализ производства сотового заполнителя на базе НПП «Технология им. А.Г. Ромашина» в условиях внедрения современных концепций показывает значительную положительную динамику объема производства за три года: с 20 м³ в январе 2021 года до 120 м³ в декабре 2023 года, что соответствует шестикратному росту (рис. 3.1.5).

Анализ данных в разрезе внедряемых на предприятии методов параллельного проектирования, сквозного цикла и системы «точно в срок» позволяет сделать следующие выводы:

1. Этап стабильности и подготовки (2021 год). Первая половина 2021 года характеризуется абсолютной стабильностью (20 м³ ежемесячно). Это соответствует периоду завершения разработки нового наукоемкого изделия и началу внедрения новой технологии производства. Во второй половине года

виден первый структурный скачок до 30 м³, который может быть следствием начальной адаптации параллельного проектирования. Эта методология, подразумевающая одновременную работу над разными этапами проекта, позволила сократить общее время разработки и подготовки производства, что и привело к росту мощностей.

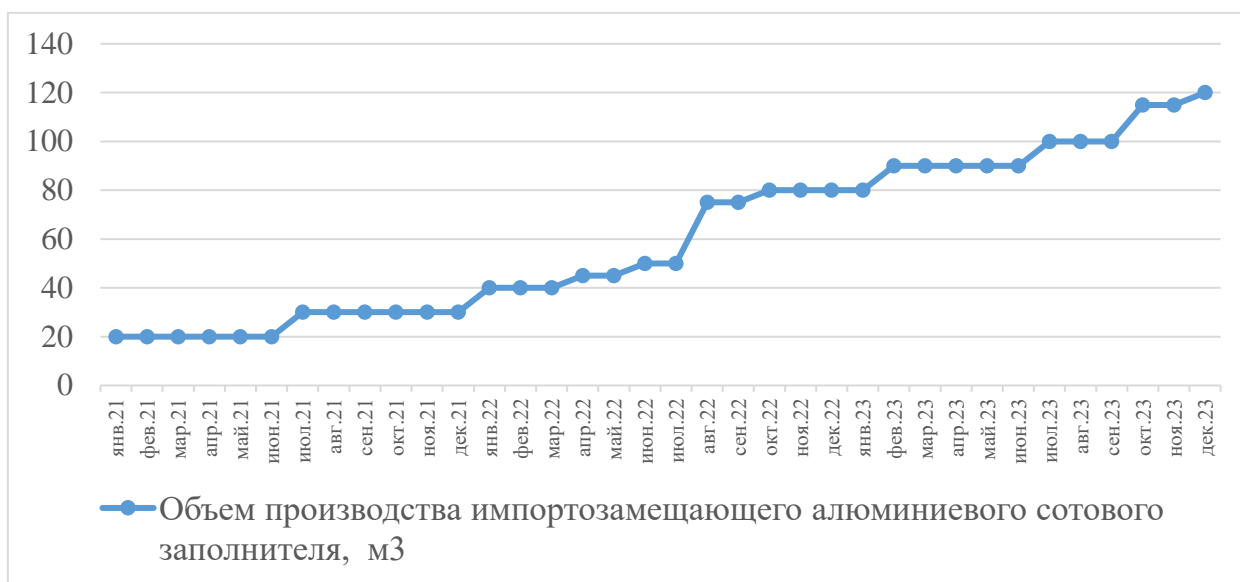


Рисунок 3.1.5 – Анализ динамики производства сотового заполнителя на базе НПП «Технология им. А.Г. Ромашина» в условиях внедрения современных концепций (составлено автором)

2. *Этап адаптации и роста (2022 год).* В 2022 году наблюдается выход на уровень 40 м³. Ключевой особенностью является переход от статичных показателей к наращиванию объемов выпуска до 50 м³ и далее до 75 м³ в сентябре 2022 года, что можно объяснить полноценным запуском серийного производства и отладкой сквозного цифрового цикла. Устранение «узких мест» производственных процедур (столы для сборки сотовых пакетов, малая производительность сборки, малая производительность станка для растяжки сотового заполнителя, пресса однополочного типа) повысило оперативность, снизило количество ошибок и простоев, позволив гибко наращивать выпуск. Внедрение принципов «точно в срок» на этом этапе, вероятно, позволило

оптимизировать запасы сырья и незавершенного производства, высвободив ресурсы и складские площади под увеличение объемов. Рост до 80 м³ в конце 2022 года и его стабилизация подтверждают, что новые процессы успешно интегрированы.

3. *Этап зрелости и оптимизации (2023 год)*. В 2023 году производство демонстрирует выход на устойчивый уровень с дальнейшим поступательным ростом: начало года с 80 м³ переходит в планомерное увеличение до к концу года до 120 м³. Эта динамика свидетельствует о полной синхронизации всех внедренных инструментов концепций AM, QRM, LP:

- параллельное проектирование обеспечивает быстрый запуск нового наукоемкого изделия – сотового заполнителя;
- сквозной цикл гарантирует бесперебойное прохождение заказа по всем этапам с минимальными задержками;
- система «точно в срок» позволяет точно подстраивать поставки материалов и производственные партии под заданные объемы производства.

3.2 Модель «Stage-Gate» («Стадии-Ворота») для обеспечения качества сквозного процесса разработки сотового заполнителя

Преимуществом научно-производственного предприятия является возможность организации сквозного инжиниринга сотового заполнителя, представляющего собой последовательность взаимосвязанных этапов, от зарождения идеи до выпуска серийного образца, в котором участвуют все ключевые подразделения в рамках единой команды НПП.

Основателем модели Stage-Gate в конце 1970-1980 годов является Роберт Дж. Купер, разработавший данную концепцию на основе многолетних исследований проектов по разработке новых продуктов. В наукоемком производстве (аэрокосмическая отрасль, ВПК) риски, сложность и затраты многократно выше, поэтому здесь модель Stage-Gate раскрывается максимально полно и приносит наибольшую пользу [40].

Преимуществами использования модели Stage-Gate в наукоемком производстве является:

- снижение технических рисков: каждая контрольная точка (Gate) – это проверка, что все технические и научные проблемы предыдущего этапа решены, и риски следующего этапа приемлемы;
- соответствие стандартам: непрерывный процесс проверки соблюдения отраслевых стандартов (ГОСТы, ОСТы, ISO, AS9100, GMP);
- документирование и прослеживаемость: модель требует создания полного пакета документов на каждом этапе (конструкторская и технологическая документация, протоколы испытаний), что важно для сертификации продукции и в случае расследования инцидентов;
- параллельное проектирование: модель структурно внедряет этот подход, где технологи, специалисты по производству, снабжению и надёжности начинают работу вместе с учёными и конструкторами на самых ранних стадиях;
- сокращение итераций и доработок: выявление проблем на этапе проектирования (Stage 2-3) позволяет избежать дорогостоящих переделок оснастки и техпроцессов на этапе подготовки производства (Stage 5).
- многоэтапная валидация и верификация: процесс включает несколько независимых этапов испытаний (лабораторные, натурные, квалификационные, приёмочные);
- акцент на технологичность: изделие изначально проектируется с учётом возможностей и ограничений конкретного наукоемкого производства.

Для наукоемкого производства модель Stage-Gate превращает высокорисковую и сложную разработку в управляемый, предсказуемый и повторяемый процесс, ведущий к созданию конкурентоспособной продукции. В рамках НПП сквозным процессом управляет руководитель проекта, курирует научно-технический совет (НТС). Общая схема сквозного процесса инжиниринга сотового заполнителя следующая: Идея → Исследование → Конструкторское проектирование → Технологическое проектирование →

Опытное производство → Подготовка серийного выпуска → Серийный выпуск.

Нами разработана структура процесса сквозного инжиниринга сотового заполнителя, где за основу принята гибкая модель Stage-Gate, адаптированная под специфику НПП (рисунок 3.2.1). Модель Stage-Gate является поэтапной системой управления разработкой новых продуктов, которая делит процесс на стадии (stages) и контрольные точки (gates). Опираясь на исследования в области применения модели Stage-Gate полагаем, что организация процесса сквозного инжиниринга сотового заполнителя эффективно сочетается с инструментами концепций активного производства (AM), быстро реагирующего производства (QRM) и бережливого производства (LP).

Постановка задачи производится на входе в систему – на Gate 1: разработать сотовый заполнитель с плотностью до 192 кг/м³ с использованием алюминиевого сплава и новой технологии соединения, не уступающих зарубежным аналогам CRH-1/8-5052-003N-12.0 фирмы «Hexcel». Далее, наступает этап Stage 1, целью которого является первичная оценка реализуемости идеи проекта. Этап включает три основных действия:

- анализ рынка для изучения технологий, оборудования, сырья и потребителей;
- научно-технический поиск, подразумевающий анализ патентов и научных статей по конкретным технологиям (алюминиевым сплавам и методам соединения сотовых структур);
- оценку ключевых технологических рисков, связанных с выбором материалов, контролем качества, стандартизацией и сертификацией.

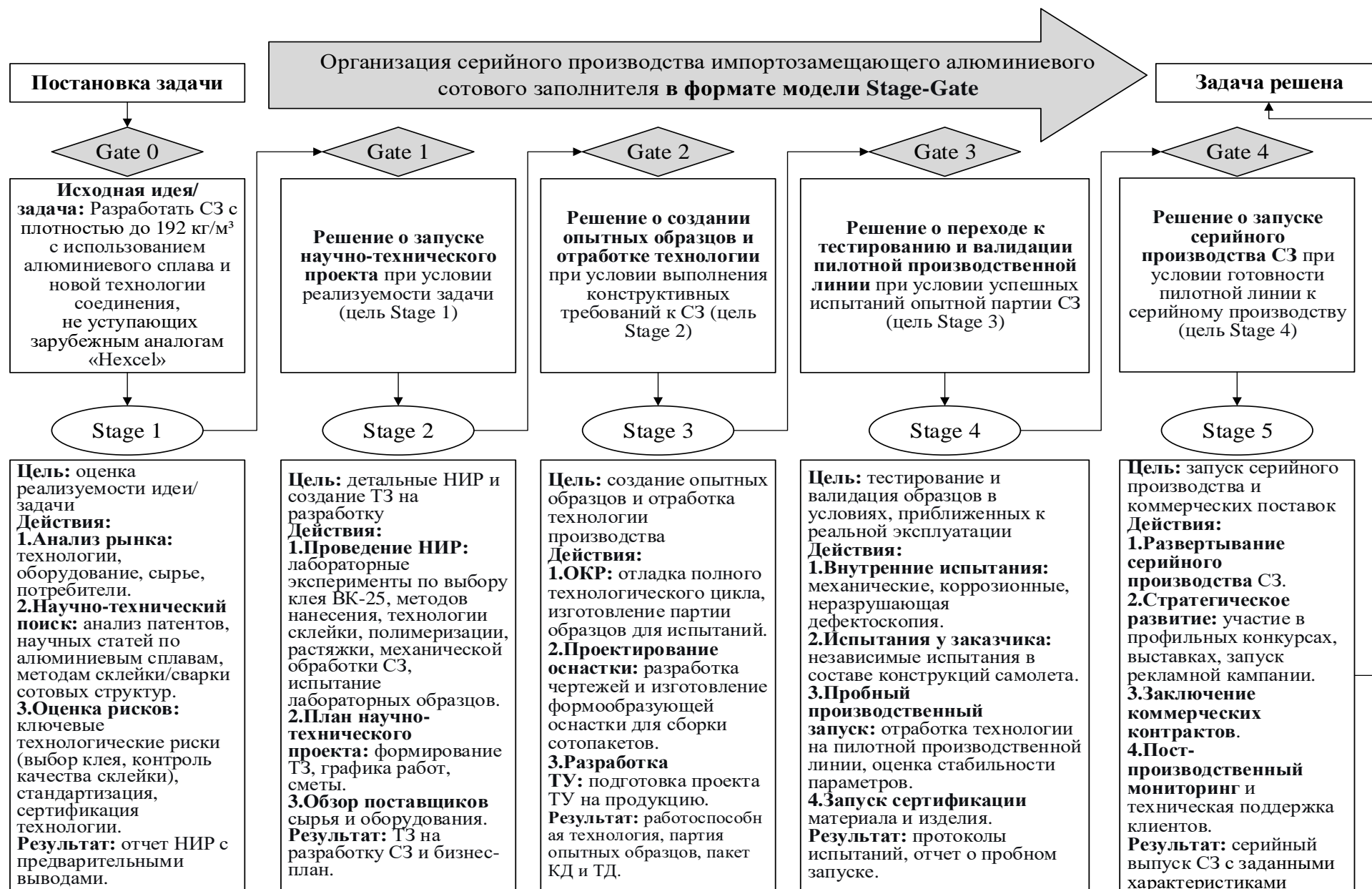


Рисунок 3.2.1 – Модель организации серийного производства импортозамещающего алюминиевого сотового заполнителя в формате Stage-Gate (составлено автором)

Результатом этой стадии является отчет о научно-исследовательской работе, содержащий предварительные выводы о реализуемости и жизнеспособности проекта, который далее проводится через ворота Gate 1. В Gate 1 принимаются решения о запуске научно-технического проекта при условии реализуемости задачи согласно цели Stage 1.

Стадия Stage 2 направлена на проведение детальных научно-исследовательских работ и формирование технического задания на разработку. Здесь ключевыми задачами являются:

- проведение глубоких НИР, включающих лабораторные эксперименты по выбору конкретных материалов (клея ВК-25 и др.), методов нанесения и технологии склейки, полимеризации, растяжки и механической обработки сотового заполнителя (СЗ);

- испытание лабораторных образцов;

- разработка плана научно-технического проекта с формированием технического задания (ТЗ), графика работ и сметы;

- проведение обзора рынка поставщиков сырья и оборудования.

Результатом стадии становится утвержденное техническое задание на разработку сотового заполнителя и предварительный бизнес-план проекта, который далее проводится через ворота Gate 2. В Gate 2 принимаются решения о создании опытных образцов и отработке технологии при условии выполнения конструктивных требований к сотовому заполнителю согласно цели Stage 2.

Стадия Stage 3 имеет целью создание опытных образцов и отработку промышленной технологии их производства, для чего осуществляются следующие действия:

- проведение опытно-конструкторских работ (ОКР) по отладке полного технологического цикла и изготовлению партии образцов для всесторонних испытаний;

- проектирование и изготовление специализированной оснастки, в частности, формообразующей оснастки для сборки сотовых пакетов;

– разработка проектов технических условий (ТУ) на готовую продукцию. Ключевым результатом стадии является готовая, работоспособная технология, партия прошедших испытания опытных образцов, а также полный пакет конструкторской и технологической документации (КД и ТД) для последующего запуска в производство. Контроль выполнения Stage 3 производится на воротах Gate 3, где принимается решение о переходе к тестированию и валидации пилотной производственной линии при условии успешных испытаний опытной партии изделия.

Стадия Stage 4 (тестирование и валидация) направлена на всестороннее подтверждение соответствия готового продукта и процесса его производства всем заявленным требованиям в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации. Тестирование и валидация включает следующие действия:

- проведение внутренних испытаний образцов на механическую прочность (сжатие, сдвиг, расслаивание), коррозионную стойкость и осуществление неразрушающего контроля (дефектоскопия);
- передача партии образцов заказчику для проведения им независимых испытаний в составе конечного изделия (например, в стенде крыла);
- организация пробного производственного запуска на пилотной линии для оценки стабильности и повторяемости технологии;
- инициирование процесса официальной сертификации материала в соответствующих органах.

Итогом стадии является полный пакет протоколов испытаний, отчет о результатах пробного запуска и получение предварительного одобрения технологии от заказчика. Контроль выполнения Stage 4 и перехода на заключительную стадию Stage 5 производится на воротах Gate 4, где принимается решение о запуске серийного производства сотового заполнителя при условии готовности пилотной линии к серийному производству.

Стадия Stage 5 имеет конечной целью развертывание полномасштабного серийного производства и старт коммерческих поставок продукта на рынок. Это достигается за счет выполнения следующих ключевых действий:

- непосредственный запуск и отладка серийного производства сотового заполнителя в заданном объеме;
- реализация стратегии коммерциализации через участие в профильных выставках и конкурсах, запуск целевой рекламной кампании и заключение долгосрочных коммерческих контрактов с клиентами;
- организация системы пост-производственного мониторинга качества и технической поддержки для обеспечения бесперебойных поставок и удовлетворенности заказчиков.

Ключевым результатом успешного прохождения стадии является налаженный серийный выпуск сотового заполнителя со стабильными, подтвержденными характеристиками и его выход на рынок.

В модель организации серийного производства импортозамещающего алюминиевого сотового заполнителя в формате Stage-Gate органично встраивается интеграция трех ключевых подходов: сквозного цикла, параллельного проектирования и философии управления «точно в срок». Эти методологии образуют единый каркас инновационного процесса, где сквозное проектирование обеспечивает целостность цифрового контура и прослеживаемость данных на всех этапах жизненного цикла, параллельное проектирование устраняет функциональные барьеры, организуя совместную работу мультидисциплинарной команды для одновременного решения конструкторских, технологических и производственных задач, а принцип «точно в срок» минимизирует издержки и ускоряет цикл разработки за счет «вытягивающего» планирования, фокуса на завершении критически важных задач и поставки информации, ресурсов и прототипов именно в момент их востребованности следующей стадией. Их синергичное применение позволяет трансформировать поставленную задачу в серийный продукт с оптимальными характеристиками, минимальными рисками и в сжатые сроки (рисунок 3.2.2).

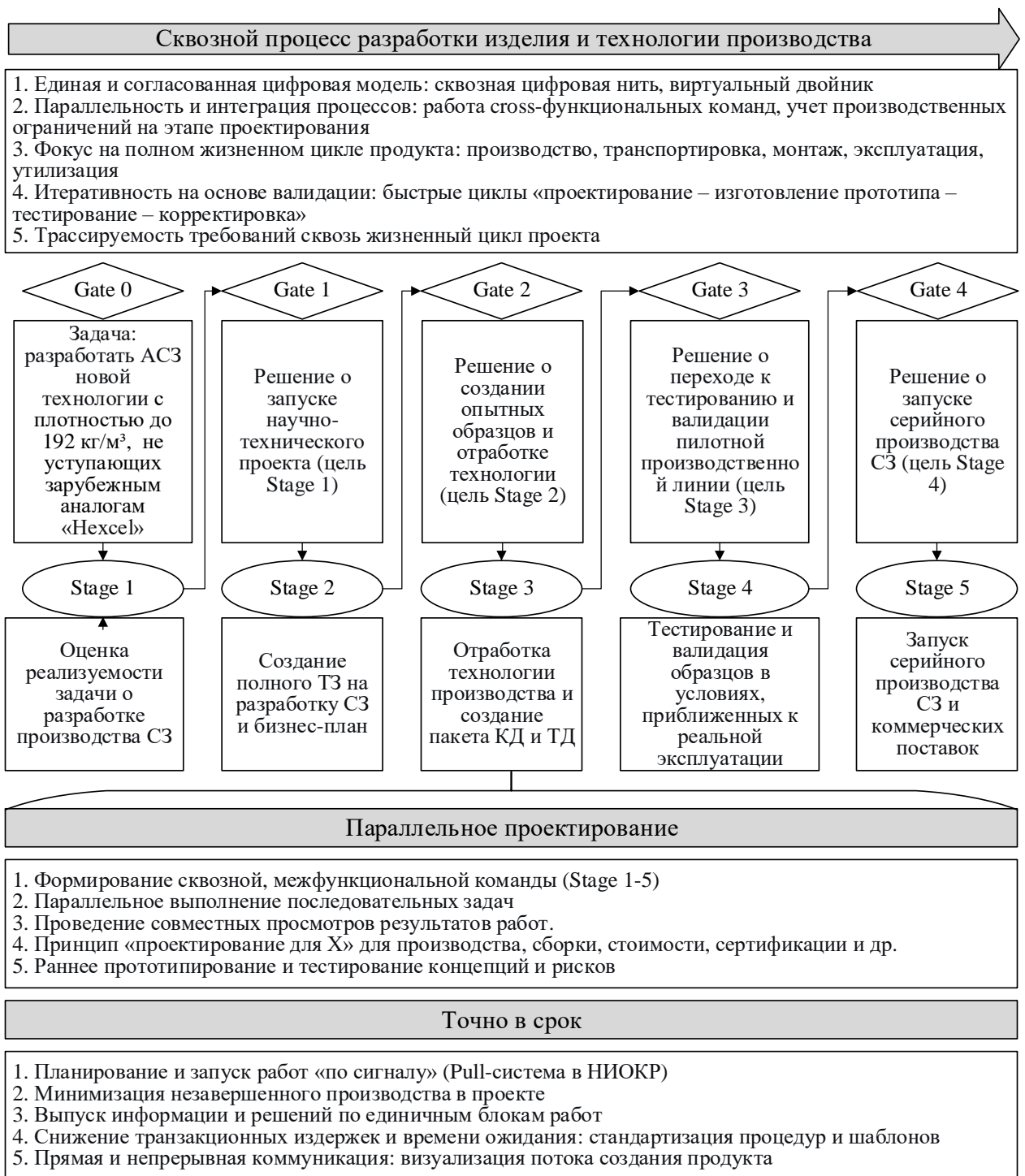


Рисунок 3.2.2 – Интеграция «сквозного цикла производства», «параллельного проектирования» и «точно в срок» в модели организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя в формате Stage-Gate
(составлено автором)

Применение методологии сквозного проектирования при разработке алюминиевого сотового заполнителя основано на пяти взаимосвязанных принципах, формирующих единый цифровой и процессный контур. Во-первых, это создание единой и согласованной цифровой модели, включающей как сквозную цифровую нить, связывающую все данные об изделии в единой PLM/PDM-среде, так и виртуальный двойник самого продукта и процесса его производства для виртуальных испытаний и оптимизации.

Во-вторых, параллельность и интеграция процессов обеспечиваются через работу кросс-функциональных команд с первого дня и учет производственных ограничений на этапе проектирования, что позволяет одновременно решать конструкторские и технологические задачи. Третий ключевой принцип – фокус на полном жизненном цикле продукта, который подразумевает проектирование с учетом всех последующих стадий (от производства и транспортировки до эксплуатации и утилизации) и проведение раннего анализа совокупной стоимости владения.

В-четвертых, итеративность на основе валидации реализуется через быстрые циклы «проектирование – изготовление прототипа – тестирование – корректировка», где результаты физических испытаний напрямую влияют на корректировку цифровых моделей и техпроцессов. Наконец, строгая трассируемость требований гарантирует, что каждое техническое решение четко прослеживается до конкретного требования заказчика или отраслевого стандарта, что является критическим условием для успешной сертификации конечного продукта.

Основой успешной разработки алюминиевого сотового заполнителя в рамках методологии параллельного проектирования является формирование сквозной, межфункциональной команды, объединяющей на всех стадиях (Stage 1-5) исследователей, инженеров, конструкторов, технологий, химиков, материаловедов, логистов, юристов и экономистов. Это позволяет перейти к параллельному выполнению традиционно последовательных задач: например, пока материаловеды тестируют адгезию клея ВК-25, технологи одновременно

моделируют процесс его нанесения, а конструкторы на основе предварительных данных уже закладывают прочностные характеристики в САЕ-модель структуры.

Для синхронизации такой работы и немедленного устранения противоречий регулярно проводятся совместные просмотры промежуточных результатов, где любое техническое решение всесторонне оценивается по принципу «проектирование для X» – одновременно с точек зрения производства (осуществимость на имеющемся оборудовании), сборки (удобство монтажа в конечное изделие), стоимости (влияние на цену) и сертификации (соответствие нормам Авиарегистра России). Для минимизации рисков и быстрой проверки гипотез команда активно использует раннее прототипирование, создавая простые образцы для валидации технологических концепций, обсуждения эргономики сборки и заблаговременного выявления фундаментальных проблем, что в итоге радикально сокращает общий цикл разработки и повышает качество конечного продукта.

Внедрение философии «Точно в срок» в процесс разработки нового сотового наполнителя проявляется в следующих ключевых признаках, направленных на устранение потерь и ускорение научно-технического цикла. Первым и основополагающим признаком является организация планирования и запуска работ по «вытягивающему» принципу (Pull-система), когда следующий этап проекта инициирует выполнение задачи, тем самым гарантируя, что ресурсы расходуются только на востребованные действия.

Например, лаборатория проводит испытания не всех возможных клеев, а строго того объема, который необходим для принятия решения на ближайшем контрольном пункте (Gate). Это напрямую связано со вторым признаком – минимизацией незавершенной работы в проекте, где приоритет отдается не количеству параллельных экспериментов, а фокусу на завершении одной критически важной задачи, результат которой блокирует продвижение вперед, а любые незавершенные прототипы или отчеты расцениваются как организационные потери.

Третий признак – это культура выпуска информации и принятия решений «партиями единичного размера», что означает оперативную передачу промежуточных результатов (например, данных об адгезии клея) смежным специалистам сразу по готовности, без ожидания финального отчета, что ускоряет общий темп работы. Для обеспечения такой оперативности четвертый признак предусматривает снижение операционных затрат за счет стандартизации всех процедур, что устраняет задержки на согласования и поиск. Пятый, визуальный признак – это внедрение прямой и непрерывной коммуникации через инструменты типа Канбан-досок, которые позволяют команде в реальном времени видеть поток задач, мгновенно идентифицировать узкие места (например, задержку испытаний) и оперативно перераспределять ресурсы для поддержания движения проекта.

3.3 Имитационное моделирование управления процесса серийного производства импортозамещающих сотовых заполнителей

Задачи оптимизации затрат на организацию и развитие производственных процессов порождают необходимость разработки цифровых моделей производственных систем, позволяющих моделировать ресурсные и временные параметры его работы с целью поиска оптимальной структуры с точки зрения критериев надежности, производительности и эффективности.

Возросшие логистические риски поставок отдельных видов материалов и элементов для высокотехнологичных производств определяют необходимость собственных импортозамещающих производств. Данное обстоятельство особенно актуально для сложных и высокотехнологичных видов продукции, так как альтернативных вариантов поставок крайне мало (даже в тех случаях, когда они есть). Помимо прочего данная проблема актуализируется для материалов двойного назначения, которые в значительной части подвержены санкционным ограничениям. В этой связи

поиск инструментов, позволяющих быстро и эффективно разрабатывать производственные проекты – гибкие модели производственных систем – является основной задачей, обеспечивающей высокую реакцию на возникающие производственные потребности.

В настоящее время применяется достаточно много подходов к моделированию производственных систем, в том числе математическое, статистическое, физическое и имитационное моделирование. Каждый из указанных подходов решает ряд специфических задач. Так, методы математического моделирования решают задачи количественного анализа и прогнозирования поведения производственных систем. Статистическое моделирование позволяет выявлять количественные закономерности изменения параметров системы и их взаимосвязи [88]. Имитационное моделирование позволяет решать целый комплекс задач по анализу динамики изменения параметров функционирования системы и существенно сокращает затраты на управление за счет большей точности оценки результативности управленческих воздействий.

В основе предлагаемого подхода лежит именно имитационное моделирование, которое фактически интегрирует в себе комплекс преимуществ прочих методов моделирования и характеризуется большим практическим применением. Имитационное моделирование позволяет учитывать комплексное влияние факторов, воздействующих на производственную систему, а также учитывать вероятностный характер поведения отдельных ее элементов [14]. Ограничениями для реализации методов имитационного моделирования являются недостаточность знаний о производственной системе и особенностях поведения ее отдельных элементов, необходимость специализированного ПО и достаточно высокие требования к вычислительной мощности используемых средств.

В данном параграфе осуществляется построение имитационной модели процесса производства сотового наполнителя с применением программного продукта Anylogic, а также разработка алгоритма применения данной модели

для управления и оптимизации данного процесса. Anylogic позволяет создавать модели процессов разного уровня сложности, от простых схем до многоуровневых систем с множеством элементов.

В качестве объекта исследования была выбрана производственная система по выпуску сотового заполнителя. В настоящее время в авиации активно применяются трехслойные сотовые панели. Особенностью таких конструкций является наличие жестких несущих слоев (обшивок) и расположенного между ними сотового заполнителя различной степени жесткости. Использование сотовых заполнителей в панелях и конструкциях из ПКМ значительно расширяет диапазон конструктивно-технологических решений, которые могут быть использованы при создании крупногабаритных нагруженных изделий. При разработке учитываются массовая эффективность, динамические и эксплуатационные свойства изделий. Ранее 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 крайне низкими физико-механическими свойствами. В связи с этим возникла необходимость организации производства силовые алюминиевые сотовые заполнители с удельным весом 129 кг/м^3 и 192 кг/м^3 .

В рамках проекта были разработаны новые режимы приготовления клея ВК-25 с учётом требований повышенной вязкости для реализации высокопроизводительной технологии нанесения клея на алюминиевую фольгу методом глубокой печати, разработана технология склейки сотовых пакетов, что позволило увеличить прочность клеевого соединения при расслаивании на 12% по сравнению с лучшим зарубежным аналогом компании Hexcel (США). А также разработан состав антикоррозионного покрытия и инновационная технология его нанесения методом электрохимического оксидирования поверхности алюминиевой фольги, что позволило повысить коррозионную стойкость сотовых заполнителей в условиях солевого тумана и тепловлажностного воздействия соответственно на 15% и на 7% по сравнению с лучшим зарубежным аналогом компании «Hexcel» (США).

Традиционно процесс создания модели в среде имитационного моделирования AnyLogic включает в себя три основных этапа:

- 1) разметка пространства модели;
- 2) создание агентов и ресурсов;
- 3) разработка алгоритма, описывающего процесс работы терминала [12].

Однако в силу того, что целью исследования является не визуализация процесса, а оптимизация производственного процесса по времени и объему используемых ресурсов нами были реализованы следующие этапы:

- 1) создание агентов и ресурсов;
- 2) создание процессной логики производственного процесса.

В результате была разработана процессная модель, имитирующая продолжительность и мощность отдельных элементов производственного процесса (рисунок 3.3.1). Данная модель отражает последовательность выполнения отдельных этапов производства с учетом мощности и длительности выполнения отдельных элементов процесса. В модели отдельно выделены допроизводственная стадия, которая связана с закупкой необходимых материалов, и производственный этап, который включает непосредственно процесс переработки сырья в готовую продукцию.

На основе анализа данных статистики реализации отдельных этапов производства с применением метода имитационного моделирования был сформирован график распределения длительности производственных операций (рисунок 3.3.2).

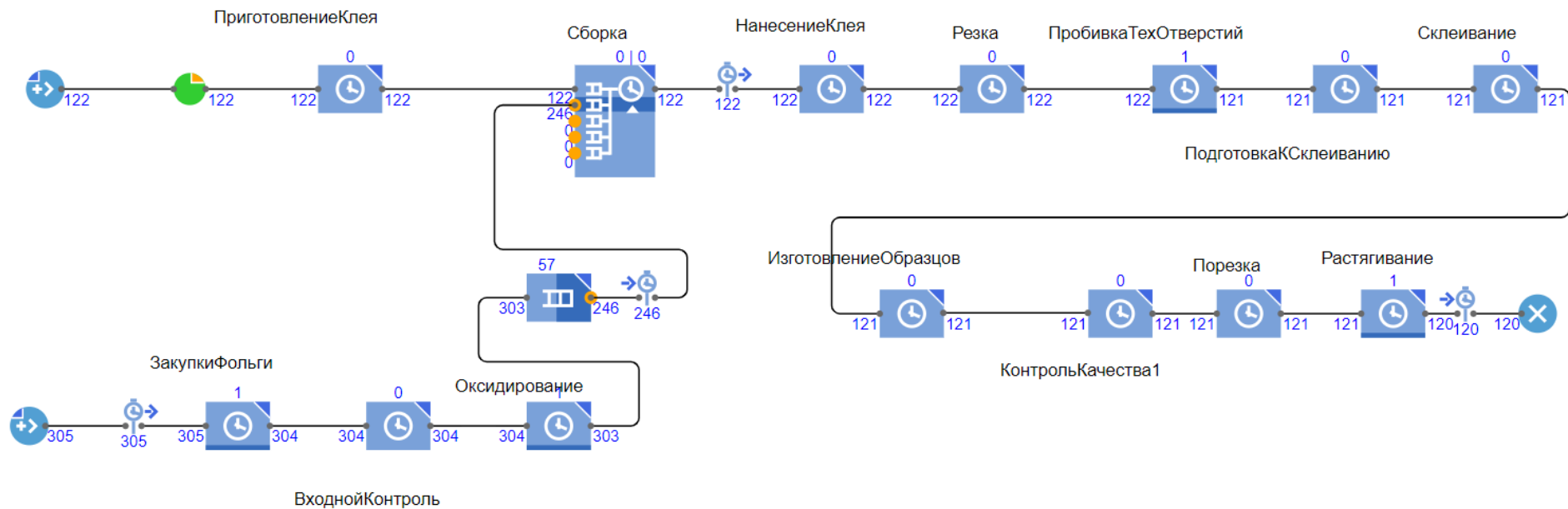
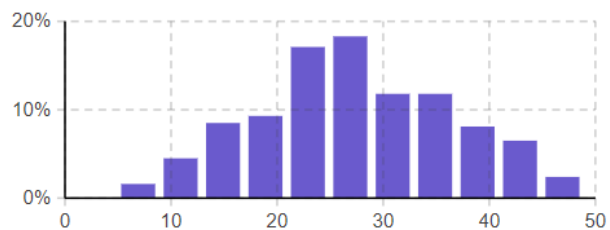
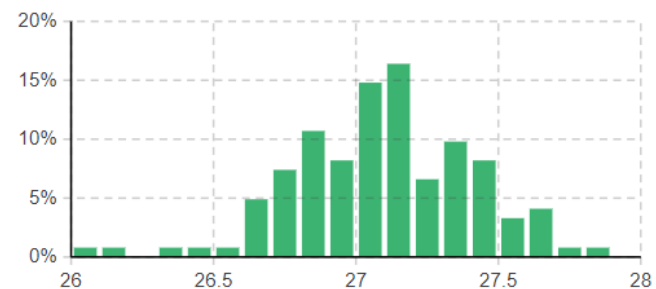


Рисунок 3.3.1 – Разработанная процессная модель производства сотового заполнителя (разработано автором)



● Распределение времени допроизводственных этапов 27.38



● Распределение длительности производственного цикла 27.1

Рисунок 3.3.2 – Распределение времени допроизводственных этапов и производственного цикла, полученные на основе имитационной модели (разработано автором)

На основе имитационного моделирования производства за период в один месяц были получены следующие параметры длительности производственных циклов (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1 – Результаты имитационного моделирования процесса производства сотового заполнителя (рассчитано автором)

Показатель / Этап	Математическое ожидание, дней	Среднее значение, дней
Допроизводственные этапы	26,84	27,38
Производственный цикл	27,15	27,10
Общий производственный процесс	53,99	54,48

Величина математического ожидания для допроизводственных этапов составила 26,84 дня с учетом длительности процедуры закупок и последующего оксидирования материала. При этом среднее значение несколько выше этого числа и составляет 27,38 дней. Значение математического ожидания длительности производственного цикла составляет 27,15 дней, при этом среднее значение отличается от этой величины незначительно и составляет 27,1 день. Таким образом, математическое ожидание общей длительности производственного процесса с учетом допроизводственных этапов составило 53,99 дней, в структуре которого доля допроизводственных и производственных этапов составляет практически равные значения.

В условиях задачи импортозамещения закупка сырья у местных производителей, позволяющая оптимизировать длительность допроизводственного цикла, позволит значительно сократить длительность производственного цикла.

Кроме анализа временных циклов целесообразно проанализировать структуру длительности по этапам процессов. Так, в рамках имитационной модели были выявлены следующие узкие места производственного процесса, определяющие общую длительность производственного процесса:

- пробивка технических отверстий для направляющих;
- изготовление образцов для контроля качества;
- растягивание сотового пакета.

На основе полученной имитационной модели предлагается использовать следующий алгоритм оптимизации длительности производственного цикла с учетом ограниченности ресурсов и минимизации совокупных затрат:

1) $t_{\max} = \text{Max}(t_1, t_2, t_3 \dots t_n)$ – поиск «узкого места» производственной системы (производственный процесс наибольшей длительности);

2) $\lim t_{\max}(x)$ – нахождение предела функции длительности функции зависимости t_{\max} от количества используемых ресурсов x ;

3) $x_1 = x_0 + 1$ – увеличение количества ресурсов, используемых в процессе на единицу;

4) $\Delta C = C_1 - C_0$ – оценка величины дополнительных затрат;

5) $\Delta P = P_0 - P_2$ – оценка прироста объема производства за счет сокращения длительности производственного процесса;

6) если $\Delta C < \Delta P$, повторить шаги 3-5,

$\Delta C > \Delta P \rightarrow x_{n-1} = \text{opt}$;

7) повторить шаги 1-6 до тех пор, пока $x_0 = x$ для $\lim t_{\max}(x)$.

Таким образом, алгоритм завершается тогда, когда для максимального по длительности этапа текущая длительность определяется пределом используемых ресурсов, то есть дополнительное увеличение объема используемых ресурсов не позволит сократить длительность производственного этапа (рис. 3.3.3).

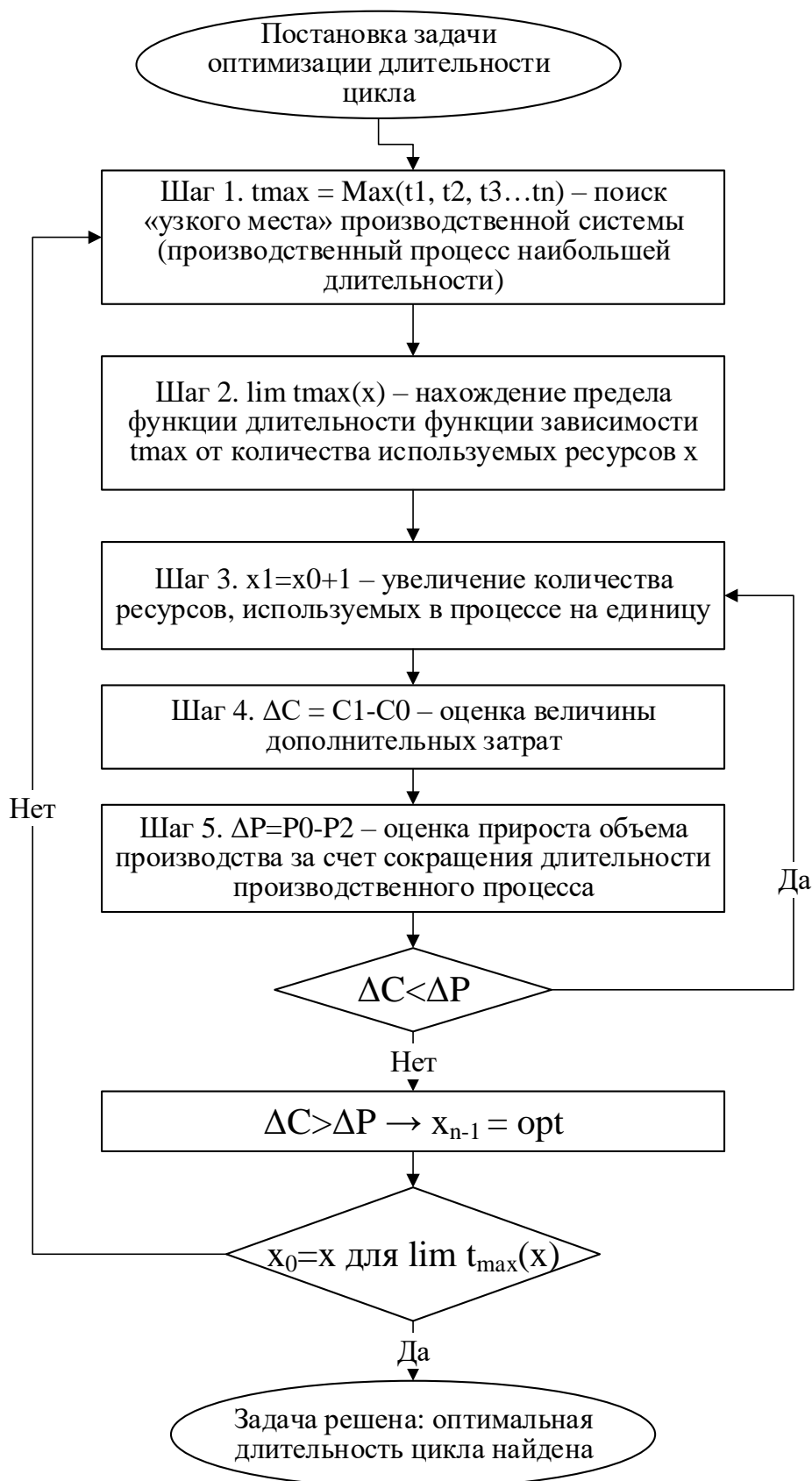


Рисунок 3.3.3 – Алгоритм оптимизации длительности производственного цикла с учетом ограниченности ресурсов и минимизации совокупных затрат основе полученной имитационной модели (составлено автором)

Представленный алгоритм реализован на языке JavaScript:

```
import java.util.List;
import java.util.Collections;
public class ProductionOptimization { // Класс для описания одного
этана производства
static class Stage {
private int duration; // Длительность этана
private double costPerUnit; // Стоимость единицы ресурса
private double productionVolume; // Объем производства
public Stage(int duration, double costPerUnit, double productionVolume) {
this.duration = duration;
this.costPerUnit = costPerUnit;
this.productionVolume = productionVolume;
}
public int getDuration() {
return duration;
}
public void setProductionVolume(double newVolume) {
this.productionVolume = newVolume;
}
public double getCostPerUnit() {
return costPerUnit;
}
public double getProductionVolume() {
return productionVolume;
}
} // Основная функция оптимизации
public static double optimize(List<Stage> stages, double periodDuration)
{
while (true) { // Шаг 1: Выбираем самый длинный этан
производства
Stage longestStage = Collections.max(stages, (s1, s2) ->
Integer.compare(s1.getDuration(), s2.getDuration())); // Шаг 2:
Увеличиваем количество используемых ресурсов
double currentVolume = longestStage.getProductionVolume();
double incrementedVolume = currentVolume + 1; // Увеличение на единицу
longestStage.setProductionVolume(incrementedVolume); // Шаг 3: Оценка
стоимости дополнительного объема производства за период
```

```

double additionalProductionVolume = incrementedVolume -
currentVolume;
double additionalProductionCost = additionalProductionVolume *
longestStage.getCostPerUnit(); // Шаг 4: Оценка дополнительных
заплат на ресурсы
double totalAdditionalResourceCost = additionalProductionCost *
periodDuration / longestStage.getDuration(); // Шаг 5: Сравнение
дополнительных затрат на ресурсы и дополнительного объема
производства
    if (totalAdditionalResourceCost > additionalProductionVolume) {
        break; // Прерывание цикла, если затраты больше объема
    }
} // Шаг 7: Возвращаем найденное количество ресурсов для
анализируемого этапа производства
return longestStage.getProductionVolume();
}
public static void main(String[] args) {
    List<Stage> stages = List.of(
        new Stage(10, 100.0, 500.0),
        new Stage(15, 120.0, 600.0),
        new Stage(20, 150.0, 700.0)
    );
    double periodDuration = 30.0; // Продолжительность периода
    double optimizedResources = optimize(stages, periodDuration);
    System.out.println("Оптимизированный объем ресурсов: " +
optimizedResources);
}
}

```

Использование данного алгоритма для оптимизации длительности производственного процесса и объема используемых ресурсов позволило определить оптимальный объем ресурсов для каждого этапа процесса производства сотового заполнителя. При этом построенная имитационная модель обеспечила не только наглядную демонстрацию связи объема использованных ресурсов и длительности производственного цикла, но и

позволила реализовать задачи оптимизации за счет алгоритмических инструментов ПО.

Таким образом, имитационное моделирование позволяет не только сокращать затраты, связанные с проектированием и анализом производственных процессов, но и обеспечивает наглядность для целей модификации и совершенствования производственных систем, при этом высокие требования к результатам прогнозного анализа определяют необходимость тщательной проработки модели, качественной проработки статистических данных функционирования реальных систем, а также высокого уровня квалификации исполнителей.

Выводы по третьей главе

Исследование моделей и методов организации серийного производства алюминиевого сотового заполнителя на базе НПП позволило получить следующие научно-практические результаты:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Для обеспечения качества сквозного процесса разработки сотового заполнителя процесс создания серийного производства формализован в формате модели Stage-Gate, адаптированной под специфику НПП. Модель Stage-Gate 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 Stage-Gate встроена интеграция методов «сквозного цикла», «параллельного проектирования» и «точно в срок».

5. Разработана имитационная модель процесса производства сотового заполнителя, на основе которой проведен анализ структуры производственного процесса, вероятностный анализ длительности допроизводственных этапов и производственного цикла. Раскрыта сущность методов имитационного моделирования, как инструмента исследования поведения сложных систем, элементы которых могут демонстрировать вероятностные параметры функционирования.

6. 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.

4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА БАЗЕ НПП

4.1 Апробация модели организации производства сотового заполнителя на основе синтеза концепций LP, QRM, AM и их инструментов в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

Практическая реализация решений по использованию синтеза концепций LP, QRM и AM была осуществлена в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» при организации производства сотовых заполнителей. После разработки изделия и подготовки производства перед предприятием стояла задача оптимизации длительности или критического пути производственного цикла за счет сокращения длительности работ на разных участках: сокращение времени простоев, ожиданий, переналадок, обработки заказов.

Концепция критического пути является важным аспектом организации и управления производством, а его оптимизация сопряжена с рядом проблем. Критический путь (КП) представляет собой максимальную по времени последовательность операций в производственном процессе. Операции на критическом пути не имеют резервов времени («запасов прочности»). Любая задержка в любой операции на КП напрямую увеличивает общее время выполнения производственного заказа.

Проблемы и сложности оптимизации критического пути заключаются в следующем:

1. Выявление и динамичность критического пути. Поскольку критический путь не статичен, то после сокращения времени на одну операцию на КП, критическим может стать другой путь, который до этого имел резерв. Постоянное отслеживание и пересчет КП требуют оперативных систем управления данными в реальном времени.

2. *Проблема уменьшающейся отдачи.* При ускорении решения задач на КП могут игнорироваться не критические задачи, что приводит к перерасходу ресурсов на критическом пути. Каждое следующее ускорение на КП является более капиталоемким и дает все меньший эффект.

3. *Конфликт оптимизаций «время – стоимость – риски».* Сокращение критического пути всегда требует увеличения затрат и/или повышения рисков: сверхурочные работы, привлечение высокооплачиваемых специалистов, использование дорогого оборудования или материалов, риск ошибок и переделок.

4. *Учет ограниченности ресурсов.* Классическое определение критического пути не учитывает ограничения по ресурсам. Две производственные операции могут идти параллельно, но на практике их должен выполнять один и тот же специалист или станок. В этом случае они выполняются последовательно, что меняет критический путь.

5. *Влияние изменчивости (теория ограничений, ТОС).* В производстве длительность операций не является constans, а является переменной величиной с определенной дисперсией (из-за поломок, человеческого фактора, разного качества сырья и т.д.). Ввиду изменчивости задержки в не критических операциях, могут повлиять на другие операции (запустить цепь) и сделать критическим другой путь. Согласно теории ограничений, для защиты критического пути необходимо создавать буферы времени, запасов перед ним.

6. *Сложность в условиях высокой кастомизации (QRM и AM).* В мелкосерийном производстве каждый новый заказ имеет свой критический путь. Соответственно, невозможно создать универсальную оптимальную модель КП как в массовом производстве. Поэтому, согласно «общему времени от получения заказа до отгрузки» (MCT) по QRM, оптимизация направлена не на перепланирование каждого шага, а на радикальное сокращение MCT через организационные изменения (например, создание многопрофильных производственных ячеек).

Ключевыми разработчиками метода критического пути производства, заложившими основы стратегий оптимизации, являются Морган Р. Уолкер (DuPont) и Джеймс Е. Келли (Remington Rand). Четыре стратегии оптимизации критического пути предусматривают сжатие расписания, параллельное выполнение задач, перераспределение ресурсов и изменение технологии или метода выполнения работ (рисунок 4.1.1). Критический путь показывает, от каких операций зависят общие сроки производства. Проблемы его оптимизации заключаются в его динамичности, необходимости балансировать время, стоимость и риски, а также учитывать реальную изменчивость производственной системы. Успешная оптимизация требует не просто механического ускорения задач, а применения системного подхода на принципах QRM и LP.

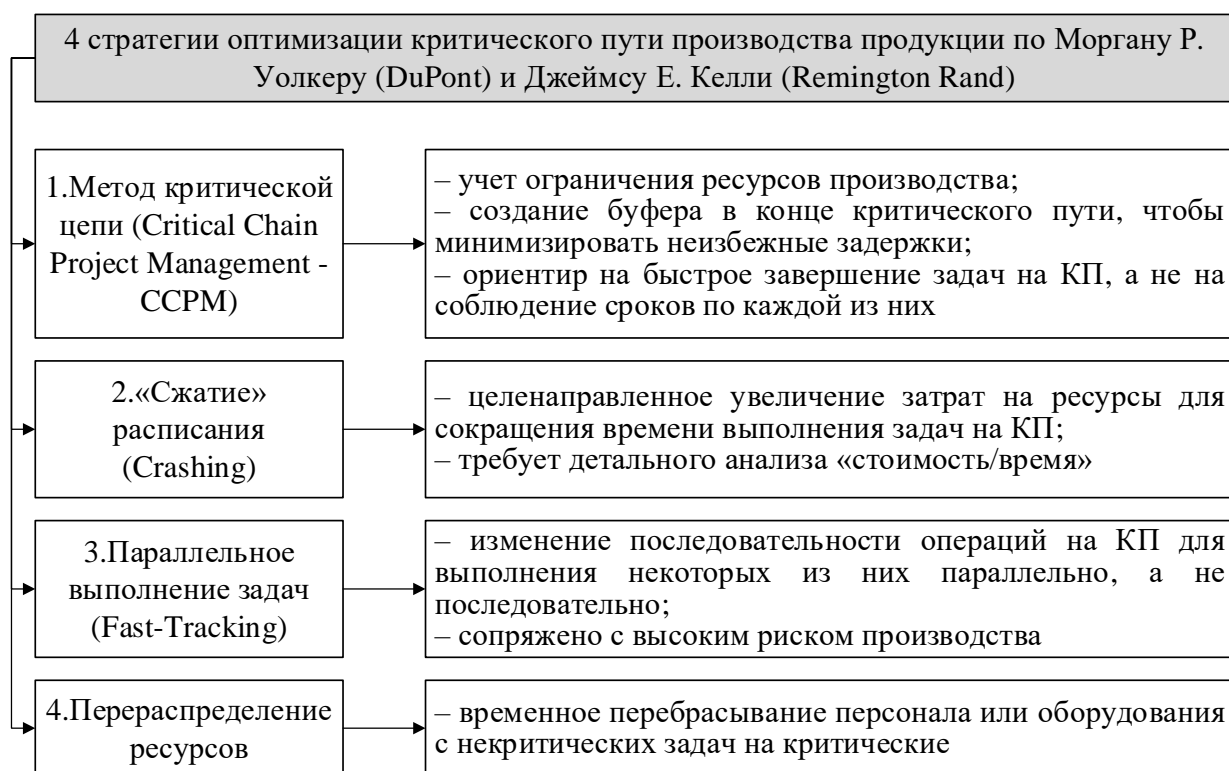


Рисунок 4.1.1 – Стратегии оптимизации критического пути производства продукции по Моргану Р. Уолкеру и Джеймсу Е. Келли (составлено автором по [59])

Математическое описание длительности производственного цикла основана на методике определения критического пути, когда изначально все работы имеют нулевой запас времени [52,27]. Начальные сроки выполнения работ ($T_{st(i)}$) определяются по формуле:

$$T_{st}(i) = \sum_{i=0}^n t_{max} , \quad (4.1.1)$$

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

i – производственная процедура;

n – количество производственных процедур.

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

$$T_{fn}(i) = \sum_{i=0}^n t_{mix} , \quad (4.1.2)$$

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

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

$$R_{кпп(i)} = T_{st}(i) - T_{fn}(i). \quad (4.1.3)$$

Формализация процесса производства сотовых заполнителей для летательных аппаратов осуществлена с использованием регламентирующих документов в сфере разработки и постановки продукции производственно-технического назначения на производство (ГОСТ 15.301-2016), управления качеством продукции (ГОСТ Р ИСО 9001-2015), внедрения инструментов организации производства (ГОСТ Р 56404-2021, ГОСТ Р ИСО 31000-2010 и др.).

Для отработки длительности процесса производства были намечены четыре задачи:

1. Определение границ процесса для анализа КПП.
2. Построение цепи процесса, определение его длительности.
3. Построение карты КПП и определение планового КПП.
4. Оценка динамики улучшения на основе методов QRM и LP.

Границы процесса для анализа КПП были приняты в рамках 2-го этапа «Отработка технологии и подготовка производства». Согласно технической документации, цикл производства, как участок жизненного цикла разработки и производства сотовых заполнителей, включает 10 технологических процедур:

- 1) приготовление клея;
- 2) нанесение клеевых полос;
- 3) резка рулона с клеевыми полосами на листы;
- 4) пробивка направляющих отверстий и сборка сотового пакета;
- 5) подготовка сотового пакета к склейке;
- 6) склейка сотового пакета в автоклаве;
- 7) изготовление образцов для испытаний;
- 8) контроль качества изделия;
- 9) порезка сотового пакета на сотовые панели;
- 10) растяжка сотовых панелей.

Изначально, КПП цикла производства из 10-ти технологических этапов составлял 919,1 часов работы одного человека (ч/ч). Ввиду того, что организация данного производства осуществляется впервые, значения планового КПП было установлено обобщенно, с учетом имеющейся практики: первичное сокращение длительности на 25%. Инженеры-технологи, руководствуясь ТД, изыскивали возможность уменьшения времени по каждой из 10-ти процедур производства без нарушения технологии.

С позиции сквозного управления производством важно было организовать управление потоком заданий на заводе. В данном случае

целесообразно использование инструмента быстрореагирующего производства POLCA, представляющего собой систему визуального контроля производства на основе карточек [8,77]. Система обеспечивает эффективное использование мощностей на этапах производства, предотвращая чрезмерное накопление незавершённых работ при неожиданном появлении узких мест.

В таблице 4.1.1 показана динамика улучшения производственного цикла после совершенствования процесса на основе методов организации производства концепций QRM и LP. В целом, общее сокращение производственного цикла, как сумма длительности работ на разных участках, составило 261,9 ч/ч или 28,5%.

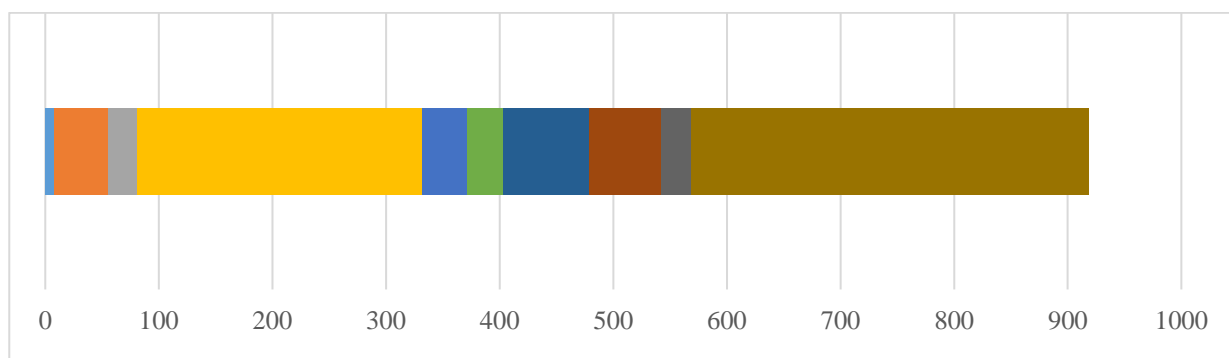
Таблица 4.1.1 – Сокращение длительности производственного цикла после совершенствования процесса на основе методов организации производства концепций QRM и LP (составлено автором)

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

Как видно из таблицы видно, наибольшее сокращение длительности работ удалось добиться на участках, менее зависимых от технологии изготовления изделия, а именно, на участке контроля качества (-66,4%), подготовки сотового пакета к склейке (-49,6%), подготовки образцов для испытаний (-31,8%). Здесь были разработаны и внедрены различные инженерные приспособления для удобства работ на данном участке.

Значительно удалось уменьшить продолжительность работ по приготовлению клея (-35,4%) путем совершенствования данного процесса, на 21,3% стало меньше время пробивки отверстий и сборки сотовых панелей за счет модернизации установки.

На рисунке 4.1.2 представлен критический путь цикла изготовления сотовых заполнителей до и после совершенствования организации производства.



а) длительность производственного цикла до оптимизации, ч/ч



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

Рисунок 4.1.2 – Критический путь цикла изготовления сотовых заполнителей до и после совершенствования организации производства (составлено

автором)

В таблице 4.1.2 дано обоснование по сокращению КПП производственного цикла и приведены соответствующие инструменты QRM и LP, используемые или рекомендуемые к внедрению для дальнейших работ по оптимизации процесса.

Для сокращения производственного цикла в целом на 28,5% использованы такие инструменты, как система POLCA с позиции системной динамики, создание карты потока создания ценности, стандартизация процессов, 5S как реорганизация схем хранения запасов, комплектующих и инструмента. Следует отметить, что успешность минимизации КПП можно достигнуть только при системном и процессном подходе к сокращению времени производства [57].

Таблица 4.1.2 – Обоснование сокращения КПП производственного цикла на основе методов организации производства концепций QRM и LP (составлено автором)

Этапы ПЦ	Сокращение цикла, %	Что было сделано	Инструмент QRM, LP
Производственный цикл в целом	28,5	Система POLCA (принцип системной динамики) Карта потока создания ценности Стандартизация 5S (реорганизация схем хранения запасов и инструмента)	
1.Приготовление клея	35,4	Совершенствование приготовления клеевой композиции	Метод Кайдзен Стандартизация 5S
2.Нанесение клеевых полос	27,8	Уменьшение брака при нанесение клеевых полос	Всеобщее управление качеством (TQM) Сокращение дефектов (6 Sigma)
3.Резка рулона с клеевыми полосами на листы	13,4	Закупка специализированных ножей для порезки	Всеобщий уход за оборудованием (TPM) 5S

Этапы ПЦ	Сокращение цикла, %	Что было сделано	Инструмент QRM, LP
		алюминиевой фольги на плоттере	
4.Пробивка отверстий и сборка сотопакета	21,3	Модификация установки для пробивки фольги	Быстрая переналадка (SMED)
5.Подготовка сотопакета к склейке	49,6	Изготовление и применение специализированных вакуумных столов больших габаритов	Всеобщий уход за оборудованием (TPM)
6.Склейка сотопакета в автоклаве	16,9	Унификация режимов отверждения клеевой полосы	Стандартизация
7.Изготовление образцов для испытаний	31,8	Изготовление и применение специализированных штативов для сборки образцов	Всеобщий уход за оборудованием (TPM)
8.Контроль качества	66,4	Разработка и применение приспособления для испытательных установок	Всеобщее управление качеством (TQM)
9.Порезка сотопакета на сотопанели	21,3	Выбор инструмента для обработки сотопакетов и отработка режимов подачи при резке	Быстрая переналадка (SMED) 5S
10.Растяжка сотопанелей	26,3	Изготовление двух специализированных растяжных установок с большой рабочей площадью	Быстрая переналадка (SMED)

К примеру, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, уже более 15 лет использующая в работе принципы QRM, внедрила процессное управление, что позволило обеспечить координацию усилий всех служб для ускорения новых разработок и сокращения времени

выполнения заказов [21]. Материалы исследования 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.

Таким образом, апробация предложенной автором модели организации производства сотового заполнителя на основе синтеза концепций LP, QRM, AM, где ключевыми инструментами сокращения длительности производственных процедур с позиции системной динамики являются методы быстореагирующего и бережливого производства POLCA, создание карты потока создания ценности, стандартизация процессов, показала уменьшение длительности производственного цикла в целом на 261,9 ч/ч или 28,5%.

4.2 Нейросетевое моделирование и прогнозирование процесса запуска серийного производства сотового заполнителя на основе опытных данных по отработке технологии

Запуск серийного производства нового алюминиевого сотового заполнителя представляет собой комплексный процесс, объединяющий научно-исследовательские и производственно-технические работы. Это последовательное преодоление технологических барьеров, оптимизация производственных цепочек и непрерывное совершенствование каждого этапа. Внедрение любой новой технологии в промышленных объемах закономерно проходит через три ключевые фазы: первоначальную отработку и валидацию концепции, этап масштабирования с выявлением системных ограничений и, наконец, фазу глубокой оптимизации для достижения проектной эффективности и стабильности.

Ниже показан процесс внедрения серийного производства алюминиевого сотового заполнителя в АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина», демонстрирующий целевое наращивание объемов производства с

20 до 120 м³ благодаря последовательному решению критических задач, возникавших на этапе роста (рисунок 4.2.1).



Рисунок 4.2.1 – Процесс запуска серийного производства нового алюминиевого сотового заполнителя в АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина» (составлено автором)

Процесс запуска серийного производства нового алюминиевого сотового заполнителя можно разделить на три этапа, каждый из которых включает 12 месяцев.

Этап 1. Пилотный запуск и технологическая отработка (1-12 месяцы). Первый год проекта был посвящен фундаментальной работе: выбору базовой технологии и ее первоначальной обкатке в производственных условиях. Основной задачей являлся переход от лабораторных образцов к стабильному, хотя и ограниченному, выпуску. За этот период удалось обеспечить планомерный рост объемов производства с 20 до 30 м³ в месяц. Этот этап стал

фазой валидации, когда была доказана принципиальная работоспособность новой технологии, определен базовый цикл операций и сформирована первичная производственная база. Работа велась, по сути, в режиме опытной партии, где главным результатом стал не объем продукта, а подтверждение технологической концепции.

Этап 2. Масштабирование и выявление системных проблем (13-24 месяцы). С началом второго года началась фаза активного масштабирования и перехода к полноценному серийному производству, где было реализовано наращивание объемов с 30 до 80 м³. Однако в процессе быстрого роста проявились критические «узкие места» и системные проблемы, ограничивавшие эффективность и рентабельность:

1) высокая доля брака при нанесении клеевых полос: нестабильность процесса приводила к непрочности или избыточному нанесению состава, что напрямую влияло на прочность будущей сотовой структуры;

2) большой коэффициент запуска на материал (высокая норма расхода): технологические потери алюминиевой фольги были велики, что значительно увеличивало себестоимость продукта;

3) повреждение листов фольги с нанесенным клеем: хрупкие после обработки листы деформировались и рвались на последующих этапах транспортировки и сборки.

Указанные проблемы четко обозначили, что выбранная на первом этапе технологическая цепочка нуждается в настройке и модернизации ключевых процессов.

Этап 3. Оптимизация и выход на проектные мощности (25-36 месяцы). Третий год стал этапом целенаправленной инженерной доработки и радикальной оптимизации. Задачи по дальнейшему росту объемов с 80 до 120 м³ могли быть решены только после устранения ранее выявленных проблем. Была инициирована программа технологических улучшений, включавшая:

1) совершенствование приготовления клеевой композиции: проведена работа по модификации рецептуры и параметров смешивания, что позволило

добиться стабильной вязкости и адгезионных свойств клея, сократить брак при нанесении и повысить надежность склейки в готовом изделии;

2) разработка новейшей технологии сборки сотовых пакетов: внедрен автоматизированный метод укладки и прессования, минимизирующий ручной труд и механические воздействия на материал, что позволило увеличить скорость сборки и существенно снизить риск повреждения ячеек;

3) разработка методики пошаговой намотки рулона алюминиевой фольги: новая методика обеспечила бережное обращение с фольгой на всех этапах перемотки, резки и переноса, что позволило значительно снизить коэффициент запуска и гарантировать сохранность клеевого слоя.

Итогом третьего этапа стало достижение целевого показателя в 120 м³, создание стабильного, контролируемого и эффективного серийного производства.

Для производства сотового наполнителя в АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина» выделены 4 подготовительные операции:

- нанесение клеевых полос;
- сборка сотового пакета;
- склейка в автоклаве;
- растяжка в сотовой панели.

Каждый этап требует ручной подготовки и многочисленных проверок: клеевые полосы наносятся методом трафаретной печати с послойным контролем геометрии и веса, сборка пакета ведется на специальной плите с настройкой каждой ячейки, формование в автоклаве проверяется пробными циклами для отработки температурного режима и давления. Растяжка в панель выполняется на универсальном оборудовании с ручным контролем усилия и визуальной оценкой раскрытия ячеек. При переходе к серийному производству и высокой степени отработки технологии подготовка становится формализованной и максимально автоматизированной. Нанесение клея осуществляется программируемым оборудованием с дозаторами и контролем вязкости клея, методом глубокой печати с помощью прецизионных

высокоточных валов, сборка стандартизирована с использованием кондукторов и специализированной оснастки, гарантирующей точность. Режимы автоклава строго регламентированы и интегрированы в единый технологический цикл, а растяжка выполняется на специализированных установках для с заданными программными параметрами, обеспечивая стабильное качество и воспроизводимость сотовых панелей (Приложение 1).

Для дальнейшего 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, по формуле:

$$K_{по_i} = \frac{V_{по_i}}{V_{гп}}, \quad (4.2.1)$$

где $K_{по}$ – коэффициент подготовительной операции;

$V_{по}$ – объем работ подготовительной операции, м³;

$V_{гп}$ – объем выпуска готового продукта;

i – подготовительная операция.

Расчет коэффициентов подготовительных операций представлен в таблице 4.2.1. Введены условные обозначения переменных:

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 ($K_{по_4}$).

Таблица 4.2.1 – Исходные данные для моделирования процесса запуска серийного производства нового алюминиевого сотового заполнителя (составлено автором)

	<i>Этап 1. Пилотный запуск и технологическая отработка (1-12 месяцы)</i>											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
y (VГн)	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30
x1 (Kno ₁)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
x2 (Kno ₂)	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
x3 (Kno ₃)	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	2,50	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
x4 (Kno ₄)	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
	<i>Этап 2. Масштабирование и выявление системных проблем (13-24 месяцы)</i>											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
y (VГн)	40	40	40	45	45	50	50	75	75	80	80	80
x1 (Kno ₁)	2,50	2,50	2,50	2,22	2,22	2,00	2,00	1,33	1,33	1,25	1,25	1,25
x2 (Kno ₂)	1,75	1,75	1,75	1,56	1,56	1,40	1,40	1,33	1,33	1,25	1,25	1,25
x3 (Kno ₃)	1,25	1,25	1,25	2,22	2,22	2,00	2,00	1,33	1,33	1,25	1,25	1,25
x4 (Kno ₄)	1,75	1,75	1,75	1,56	1,56	1,70	1,70	1,13	1,13	1,06	1,06	1,06
	<i>Этап 3. Оптимизация и выход на проектные мощности (25-36 месяцы)</i>											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
y (VГн)	80	90	90	90	90	90	100	100	100	115	115	120
x1 (Kno ₁)	1,25	1,28	1,28	1,28	1,33	1,33	1,20	1,20	1,20	1,04	1,04	1,00
x2 (Kno ₂)	1,25	1,11	1,39	1,39	1,39	1,39	1,25	1,25	1,25	1,09	1,09	1,04
x3 (Kno ₃)	1,88	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,50	1,50	1,50	1,30	1,30	1,25
x4 (Kno ₄)	1,06	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,35	1,35	1,35	1,17	1,17	1,13

Коэффициенты показывают трудоемкость/ресурсоемкость или объем подготовительных операций на единицу готовой продукции:

значение $Knoi > 1$ – подготовительных условно работ производится больше, чем объема конечного продукта (запас, доводка, потери);

значение $Knoi \approx 1$ – оптимальное соотношение;

значении $Knoi < 1$ – возможно, использование ранее созданного задела.

Динамика коэффициента подготовительных операций для изготовления сотопакета в зависимости от уровня отработки технологии показана на рисунке 4.2.2.

На первом этапе (месяцы 1-12) все коэффициенты значительно превышают 1, что свидетельствует о высоком объеме подготовительных и доводочных работ для выпуска каждого кубического метра заполнителя. Наиболее ресурсоемкими являются операции «Нанесения клеевых полос» и «Склейки в автоклаве» ($Kno = 2,5$). Положительным сигналом является заметное снижение всех коэффициентов в 7ом месяце (с 2,5 до 1,67 и с 1,75 до 1,17) при одновременном росте выпуска продукции с 20 до 30 м³. Это свидетельствует о начальной отработке технологии: производится больше продукта с относительно меньшими затратами подготовительного труда, повышается общая эффективность.

В начале 2ого этапа (месяцы 13-15) наблюдается регресс до высоких значений ($Kno = 2,5$ и 1,75), что, вероятно, связано с освоением новых, увеличенных объемов и форматов продукции. Однако по мере прохождения этапа наступает выраженная устойчивая оптимизация. Коэффициенты по всем операциям демонстрируют четкий тренд к снижению, приближаясь к 1 к концу этапа. Например, к 24-му месяцу «Нанесение клеевых полос» достигает $Kno = 1,25$, а «Растяжка» – $Kno = 1,06$. Это прямое следствие выявления и устранения системных проблем, стандартизации и накопления опыта, что позволило значительно сократить избыточные подготовительные операции.

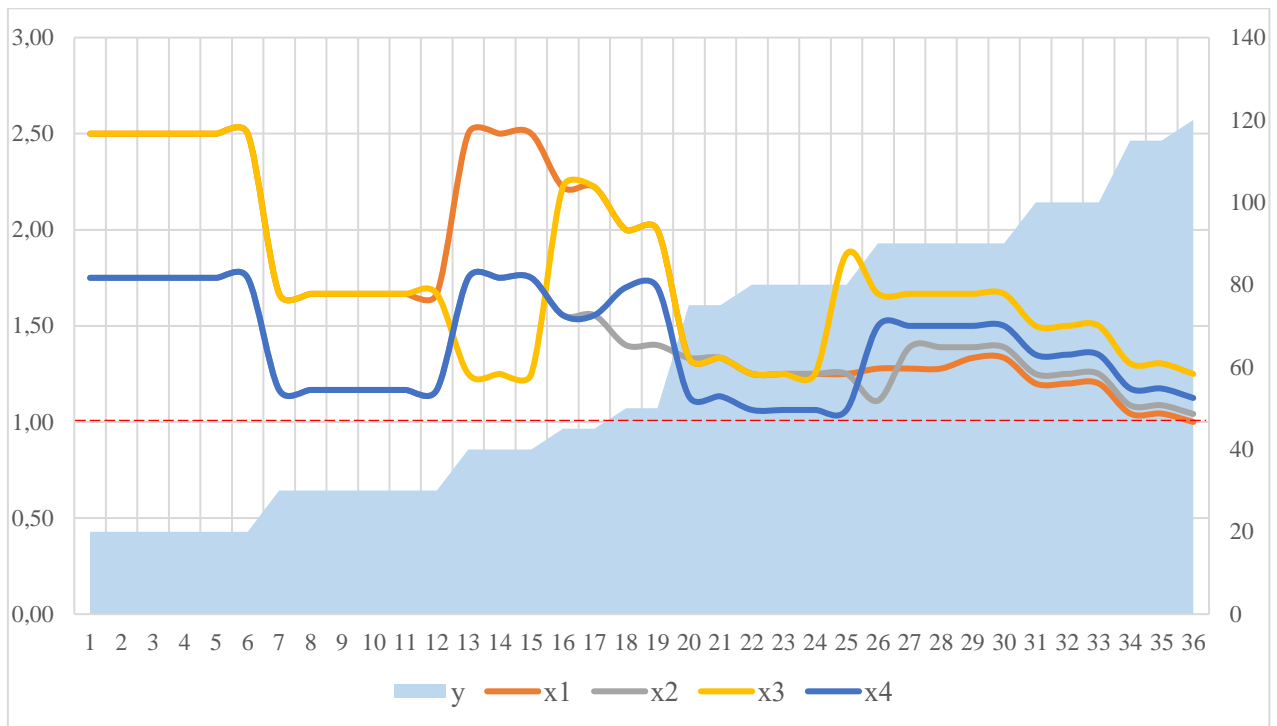


Рисунок 4.2.2 – Динамика коэффициентов подготовительных операций для изготовления сотового пакета в зависимости от уровня отработки технологии (составлено автором)

Примечание:

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

x1 – коэффициент нанесения клеевых полос (Kno_1);

x2 – коэффициент сборки сотового пакета (Kno_2);

x3 – коэффициент склейки в автоклаве (Kno_3);

x4 – коэффициент растяжки в сотовой панели (Kno_4).

Третий этап (месяцы 25-36) характеризуется выходом на режим оптимальной серийной эффективности. К завершению 36-месячного цикла ключевые операции достигают наилучших показателей: «Нанесение клеевых полос» $Kno_1=1,0$, «Сборка» $Kno_2=1,04$, «Склейка» $Kno_3=1,25$, «Растяжка» $Kno_4=1,125$. Значение 1,0 для операции нанесения клеевых полос показывает отлаженный процесс без избыточных затрат. Небольшое превышение коэффициента для автоклавной склейки ($Kno_3=1,25$) может указывать на ее остаточную технологическую сложность или требования к созданию гарантированного запаса. Итоговый тренд доказывает, что по мере отработки технологии предприятие не только наращивает объемы, но и радикально

повышает операционную эффективность, минимизируя объем подготовительных работ на единицу качественной продукции.

Для моделирования процесса запуска серийного производства на основе опытных данных используем метод создания математических моделей на основе искусственных нейронных сетей. Нейросетевое моделирование реализовано в профессиональном программном продукте для анализа и моделирования данных «Statistica». Факт нелинейности задачи не вызывает сомнения, поэтому и отдано предпочтение нейронным сетям. Нейронные сети способны обучаться на примерах, когда неизвестен вид и структура взаимосвязей между входными и выходными данными, и выявлять скрытые закономерности [117,107].

На входе в нейронную сеть примем следующие переменные:

зависимая переменная y – объем выпуска готового продукта (Vgn);

независимая переменная x_1 – коэффициент нанесения клеевых полос (Kno_1);

независимая переменная x_2 – коэффициент сборки сотового пакета (Kno_2);

независимая переменная x_3 – коэффициент склейки в автоклаве (Kno_3);

независимая переменная x_4 – коэффициент растяжки в сотовой панели (Kno_4).

Для достижения баланса переобучения и недообучения сети разобьем множество данных на подвыборки в соотношении: обучающая – 70%, тестовая – 30%. Воспользуемся универсальным аппроксиматором функций для регрессионных моделей – нейронной сетью прямого распространения MLP. Обучение сети осуществляем на основе итерационного алгоритма численной оптимизации BFGS.

Образованная нейронная сеть с производительностью обучения 0,99 имеет трехслойную архитектуру MLP 4-3-1 с тремя скрытыми нейронами, где каждый нейрон первого слоя связан с каждым нейроном скрытого слоя.

Функции активации скрытых нейронов – экспоненциальные, выходного нейрона – тождественная (таблица 4.2.2).

Таблица 4.2.2 – Параметры нейронной сети для моделирования процесса запуска серийного производства (составлено 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

Синаптические веса нейронной сети показывают силу и характер влияния каждого входного сигнала на принимающий нейрон, являясь количественной мерой связи между элементами сети в процессе обучения. При более точном приближении функции $y = f(x)$ синаптические веса представлены в таблице 4.2.3.

Таблица 4.2.3 – Коэффициенты, характеризующие связи (синапсы) между переменными нейронной сети (составлено автором)

Связи MLP 3-3-1	Значения весов
x1 → скрытый нейрон 1	0,04089
x2 → скрытый нейрон 1	-0,14681
x3 → скрытый нейрон 1	-0,59847
x4 → скрытый нейрон 1	-0,63985
x1 → скрытый нейрон 2	0,58764
x2 → скрытый нейрон 2	-0,36283
x3 → скрытый нейрон 2	-1,36979
x4 → скрытый нейрон 2	-1,50031

Связи MLP 3-3-1	Значения весов
x1 → скрытый нейрон 3	-2,88297
x2 → скрытый нейрон 3	0,96040
x3 → скрытый нейрон 3	-4,25472
x4 → скрытый нейрон 3	-2,94715
входное смещение → скрытый нейрон 1	0,90749
входное смещение → скрытый нейрон 2	1,31962
входное смещение → скрытый нейрон 3	0,87654
скрытый нейрон 1 → y	2,33718
скрытый нейрон 2 → y	-1,34393
скрытый нейрон 3 → y	0,58551
скрытое смещение → y	-1,15362

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

$$t_1 = 0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91;$$

$$t_2 = 0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32; \quad (4.2.2)$$

$$t_3 = -2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88.$$

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):

$$\sigma(x_1) = e^{0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91};$$

$$\sigma(x_2) = e^{0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32}; \quad (4.2.3)$$

$$\sigma(x_3) = e^{-2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88}.$$

Сумматор выходной переменной y и синаптических весов t_4 будет иметь вид:

$$t_4 = 2,34e^{0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91} - 1,35e^{0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32} + 0,58e^{-2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88} - 1,15. \quad (4.2.4)$$

Функция активации выходного нейрона (y) – тождественная $g(t) = t$. Соответственно, модель процесса запуска серийного производства импортозамещающего сотового заполнителя будет иметь вид формульного выражения

$$y = 2,34e^{0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91} - 1,35e^{0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32} + 0,58e^{-2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88} - 1,15, \quad (4.2.5)$$

или комплекса уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} y = 2,34e^{t_1} - 1,35e^{t_2} + 0,58e^{t_3} - 1,15 \\ t_1 = 0,04x_1 - 0,15x_2 - 0,60x_3 - 0,64x_4 + 0,91 \\ t_2 = 0,59x_1 - 0,36x_2 - 1,37x_3 - 1,50x_4 + 1,32 \\ t_3 = -2,88x_1 + 0,96x_2 - 4,25x_3 - 2,95x_4 + 0,88. \end{array} \right. \quad (4.2.6)$$

Полученная модель описывает зависимость между параметрами длительного процесса запуска серийного производства, а именно взаимосвязь объема обрабатываемых подготовительных операций с объемом выпуска готового сотового заполнителя, и может быть использована для прогнозирования. Возможно также моделирование трех этапов запуска производства по-отдельности для прогнозирования последующего этапа.

На основании полученной модели проведено прогнозирование объема выпуска готового сотового заполнителя. Выбраны три сценария дальнейшей отработки технологии производства:

- 1 сценарий – увеличение коэффициента нанесения клеевых полос (Kno_1);
- 2 сценарий – увеличение коэффициента сборки сотового пакета (Kno_2);
- 3 сценарий – увеличение коэффициента склейки в автоклаве (Kno_3);

4 сценарий – увеличение коэффициента растяжки в сотопанели (K_{no4}).

Причины увеличения коэффициентов и предполагаемые их значения на период прогноза (6 месяцев) представлены в таблице 4.2.4.

Таблица 4.2.4 – Причины увеличения коэффициентов подготовительных операций и их значения на период прогноза (6 месяцев) (составлено автором)

	Причина увеличения коэффициента	Значения коэффициентов подготовительных операций по месяцам						
		36 факт	37	38	39	40	41	42
K_{no1}	– освоение нового типа клея или нового поставщика фольги; – переход на более сложную архитектуру сотопанели; – повышение требований к чистоте и активации поверхности; – работа в условиях повышенной влажности/ температуры в цехе	1,00	1,85	2,05	2,10	2,05	1,80	1,55
K_{no2}	– увеличение формата панели или усложнение контура; – необходимость закладки дополнительных элементов в пакет; – работа с фольгой минимальной толщины или повышенной хрупкости (спецсплавы); – внедрение системы промежуточного неразрушающего контроля	1,04	1,55	1,60	1,75	1,55	1,50	1,45
K_{no3}	– освоение нового цикла склейки; – повышение требований к точности термостатирования и вакуумирования; – работа с оснасткой сложной формы; – необходимость обеспечения высокой чистоты	1,25	1,85	2,05	2,10	2,05	1,80	1,55
K_{no4}	– освоение нового формата или угла растяжки; – работа с менее пластичным материалом фольги; – требование получения ячейки с особыми геометрическими параметрами; – минимизация остаточных напряжений и деформаций после растяжки	1,13	1,55	1,60	1,75	1,55	1,50	1,45

В целом, увеличение подготовительных работ возможно в четырех случаях:

- освоение нового (материала, конструкции, оборудования);
- повышение требований к качеству, точности, надежности;
- усложнение изделия (крупногабаритность, встроенные элементы, сложная форма);
- работу со сложными материалами (сверхтонкими, хрупкими, высокопрочными).

Если на этапе НИОКР и отработки технологии изменение условий вызывает увеличение коэффициентов подготовительных операций и является нормальным явлением, то в серийном производстве это свидетельствует о том, что процесс недостаточно стабилен, стандартизирован и требует оптимизации.

В таблицах 4.2.5 – 4.2.8 сведены прогнозные данные выпуска готового продукта ($V_{гп}$) при всех сценариях.

Таблица 4.2.5 – Прогноз объема выпуска готового продукта ($V_{гп}$) при сценарии 1 – нестабильности коэффициента нанесения клеевых полос (Kno_1)

Месяцы Параметры	37	38	39	40	41	42
$Kno_1(x1)$	1,85	2,05	2,10	2,05	1,80	1,55
$Kno_2(x2)$	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
$Kno_3(x3)$	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$Kno_4(x4)$	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Прогноз $V_{гп}$, м ³ ($y_{-}(t)$)	21,09	20,01	20,00	20,01	22,28	40,70

Таблица 4.2.6 – Прогноз объема выпуска готового продукта ($V_{гп}$) при сценарии 2 – нестабильности коэффициента сборки сотового пакета (Kno_2)

Месяцы Параметры	37	38	39	40	41	42
$Kno_1(x1)$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Kno_2(x2)$	1,55	1,60	1,75	1,55	1,50	1,45

$Kno_3(x3)$	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$Kno_4(x4)$	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Прогноз $V_{ГП}$, м ³ ($y_{-}(t)$)	119,75	119,78	119,85	119,75	119,71	119,66

Таблица 4.2.7 – Прогноз объема выпуска готового продукта ($V_{ГП}$) при сценарии 3 – нестабильности коэффициента склейки в автоклаве (Kno_3)

Месяцы Параметры	37	38	39	40	41	42
$Kno_1(x1)$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Kno_2(x2)$	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
$Kno_3(x3)$	1,85	2,05	2,10	2,05	1,80	1,55
$Kno_4(x4)$	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
Прогноз $V_{ГП}$, м ³ ($y_{-}(t)$)	74,65	69,18	68,25	69,18	76,72	94,79

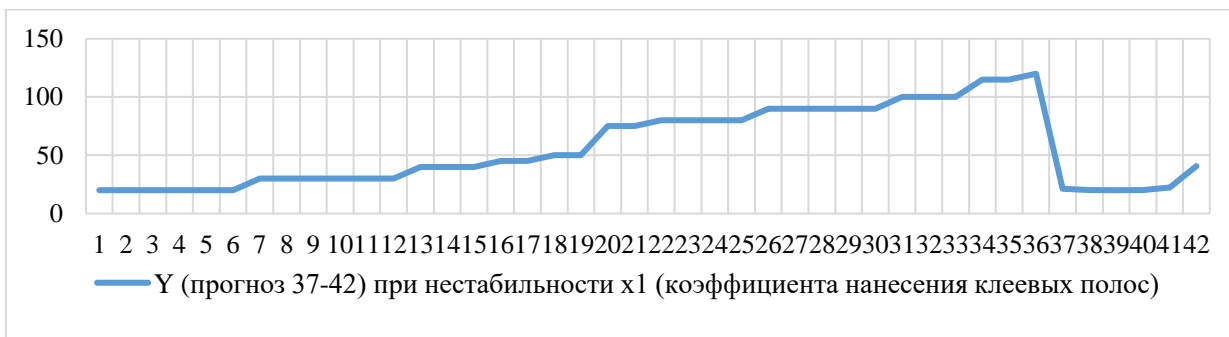
Таблица 4.2.8 – Прогноз объема выпуска готового продукта ($V_{ГП}$) при сценарии 4 – нестабильности коэффициента растяжки в сотопанели (Kno_4)

Месяцы Параметры	37	38	39	40	41	42
$Kno_1(x1)$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$Kno_2(x2)$	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
$Kno_3(x3)$	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$Kno_4(x4)$	1,55	1,60	1,75	1,55	1,50	1,45
Прогноз $V_{ГП}$, м ³ ($y_{-}(t)$)	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00

Внедрение фактора нестабильности по каждому коэффициенту выявляет «узкие места» технологической цепочки. Визуально динамика объема готового сотового заполнителя с учетом нестабильности подготовительных операций по всем 4-ем сценариям представлена на рисунке 4.2.3.

Нестабильность коэффициента x_1 (нанесение клеевых полос) вызывает наибольшее падение производительности. Объемы падают с плановых 120 до уровня 20-40 единиц, что соответствует первому году работы.

Нанесение клеевых полос – это критическая операция в начале цепочки и ее нестабильность, вынужденное повторение операций ввиду брака в геометрии, нарушения режимов приводит к тому, что все последующие этапы (сборка, склейка, растяжка) не могут компенсировать этот сбой. Определяется высокая зависимость всего процесса от стабильности и точности работы линий по нанесению клеевых систем.



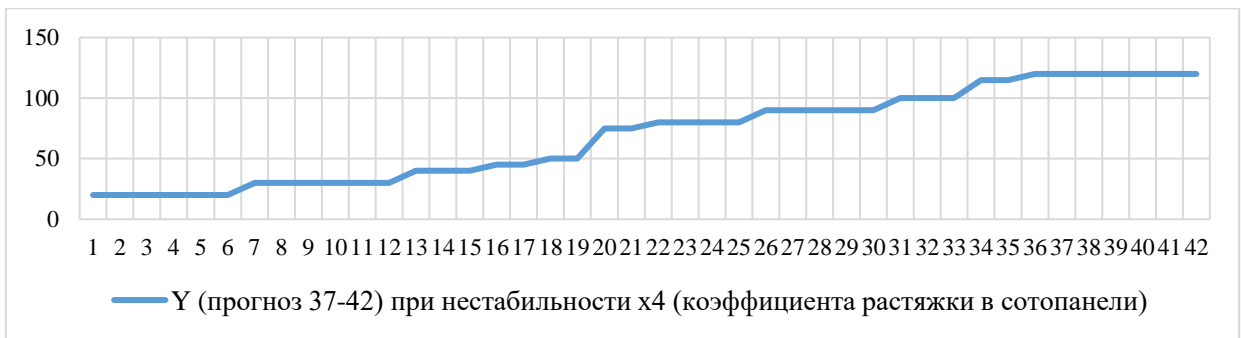
а) сценарий 1 – нестабильность коэффициента нанесения клеевых полос (Kno_1)



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 сотованели (*Кпо4*)

Рисунок 4.2.3 – Прогноз объема готового сотового заполнителя с учетом нестабильности подготовительных операций по 4ем сценариям на 37-42 месяцы (составлено автором)

Нестабильность коэффициента x_2 (сборка сотового пакета) оказывает минимальное влияние на производительность и объемы производства сохраняются на уровне 119,7 м³. Возможно, данный результат требует дополнительной проверки адекватности модели. Модель может неверно учитывать влияние брака или задержек на этапе сборки на последующие, более капиталоемкие этапы (автоклав). На практике некачественная сборка должна приводить к росту брака после автоклава. Вместе с тем, прогноз можно объяснить тем, что сборка пакета не является «узкой» операцией и/или у предприятия есть избыточные мощности или резервные ручные посты для сборки, которые легко компенсируют нестабильность.

Нестабильность коэффициента x_3 (склейка в автоклаве) вызывает значительное сокращение производительности. Производство готового сотового пакета снижается до уровня 68-95 м³. Вероятно, операция склейки в автоклаве с самым длинным циклом является «узким местом». Ее нестабильность (сбои в вакууме, температуре, нарушения графиков) напрямую ограничивает пропускную способность всего производства. Падение на 25-45% является реалистичным и демонстрирует высокие риски, связанные с данной операцией.

Нестабильность коэффициента x_4 (растяжка в сотопанели) не вызывает снижение объемов производства. Процесс растяжки высоко автоматизирован и робастен, его нестабильность не влияет на темп. Операция растяжки не является лимитирующей, так как может выполняться параллельно на нескольких стендах. В модели допущено, что нестабильность влияет только на качество (повтор операций), но не на скорость операции, т.е., даже при «нестабильной» растяжке оборудование физически успевает обработать все поступающие из автоклава панели, хотя часть из них может оказаться бракованной.

Таким образом, прогнозирование, как апробация нейросетевой модели, выявляет технологические узкие места, угрожающие выполнению прогнозных объемов серийного производства сотового заполнителя. Наибольший риск представляет нестабильность на начальном этапе – нанесении клеевых полос (x_1), сбой в котором сбрасывает производительность на уровень начала освоения технологии. Это требует стандартизации регламентов процедуры. Не менее критична стабильность склейки в автоклаве (x_3), являющейся основным технологическим ограничителем всей цепочки. Для минимизации рисков здесь необходимо внедрение системы превентивного обслуживания, создание банка валидированных режимов и проработка вопроса о резервировании мощностей.

В то же время, результаты моделирования по коэффициентам сборки (x_2) и растяжки (x_4) требуют дополнительной верификации. Нулевое влияние их нестабильности на объем выпуска может указывать на неучет в модели ключевых факторов, таких как прямая зависимость между качеством на этих этапах и конечным выходом годных изделий, а также динамика незавершенного производства. Для формирования конечной стратегии управления рисками необходимо провести сценарное моделирование с комбинированной нестабильностью ключевых коэффициентов (x_1 и x_3), что позволит оценить кумулятивный, наиболее реалистичный для сложного производства эффект и выработать комплексные меры защиты от него.

4.3 Решение задачи линейного программирования для оптимизации расхода ресурсов (алюминиевая фольга, клей Вк-25) при максимальном выходе продукта

Данные по организации производства алюминиевого сотового заполнителя в АО ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина» за трехлетний период (36 месяцев) наглядно демонстрируют трансформацию производства из опытной стадии в высокоэффективное серийное производство. Динамика абсолютного и удельного расхода алюминиевой фольги и клея ВК-25 позволяет идентифицировать фазы технологической отладки, переходного периода и выхода на режим оптимальной ресурсоэффективности. Рост объемов выпуска сопровождается стабильным снижением материалоемкости, что свидетельствует об успешном освоении технологии и реализации эффекта масштаба (рисунок 4.3.1).

В течение первых шести месяцев, на этапе первичной отработки технологии при стабильно низком объеме в 20 м³, удельные расходы оставались высокими и нестабильными. Для алюминиевой фольги показатель колебался около 5,25 м²/м³, а для клея – около 2,5 кг/м³. Эта фаза характеризовалась экспериментальными настройками, ручными операциями и, предположительно, значительным технологическим браком, что и обуславливало столь высокую и переменчивую ресурсоемкость. Ситуация начала медленно меняться на переходном этапе (месяцы 7-12), когда объем производства вырос до 30 м³. Здесь впервые проявился эффект от начальной оптимизации: удельный расход фольги снизился до примерно 3,47 м²/м³, а клея – до 1,67 кг/м³.

При росте объема производства до 40 м³ удельный расход фольги снизился до 2,26 м²/м³, а клея – до 1,13 кг/м³, что обусловлено внедрением принципиальных улучшений – переходом на новую, более эффективную оснастку, оптимизацию геометрии ячейки, внедрение точной автоматической дозировки клея и т.д. Далее, при наращивании производства до 90 м³ удельный

расход ресурсов продолжал снижаться, демонстрируя эффект масштаба и отлаживание технологии: показатели достигли 0,86 м²/м³ для фольги и 0,39 кг/м³ для клея.

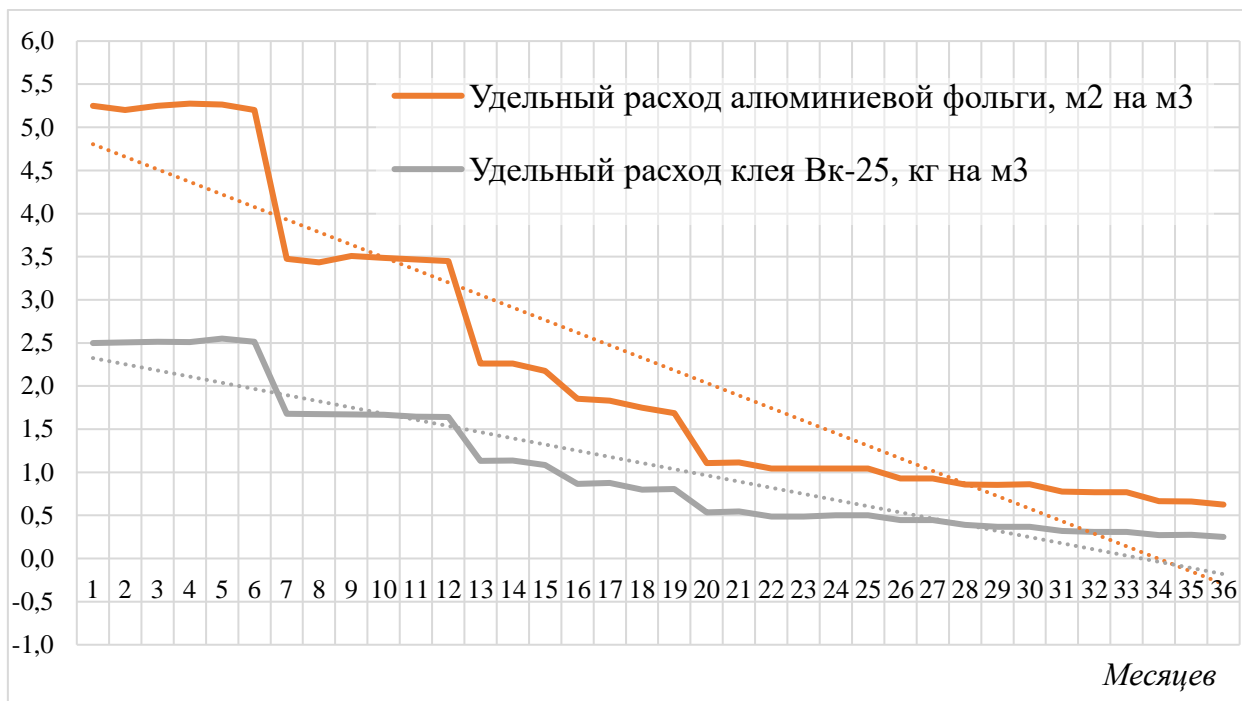


Рисунок 4.3.1 – Изменение материалоемкости сотового заполнителя в период отработки технологии и выхода на серийное производство (составлено автором)

Фаза зрелого серийного производства (месяцы 28-36) характеризуется выходом на плато оптимальной эффективности. При дальнейшем наращивании объемов до 120 м³ удельный расход ресурсов продолжил снижаться, приближаясь к технологическому минимуму. К 36-му месяцу были достигнуты стабильные значения: 0,625 м²/м³ для алюминиевой фольги и 0,250 кг/м³ для клея ВК-25. Эти цифры означают, что за весь период технологической эволюции удалось снизить материалоемкость фольги в 8,4 раза, а клея – в 10 раз. Значительное повышение ресурсоэффективности при шестикратном росте выпуска свидетельствует об освоении технологии, достижении высокой степени управляемости процесса и реализации эффекта масштаба.

Для определения оптимальных объемов расхода ресурсов при максимальном выходе сотового заполнителя решим задачу линейного программирования. Применение метода линейного программирования обеспечивает принципиально системный и математически строгий подход к управлению эффективностью. Целевая функция, направленная на максимизацию объема выпуска готовой продукции (м³), находит свое решение в точке оптимального баланса между всеми факторами. В общем виде целевая функция максимизации производства сотового заполнителя при минимальных ресурсах имеет вид:

$$Y_i = f(X_{1i}, X_{2i}) \rightarrow \max, \quad i = (\overline{1, n}), \quad (4.3.1)$$

где i – период отработки технологии и организации производства.

Исходные данные об объемах производства сотового заполнителя и расходе ресурсов представлены в Приложении 2. Целевая функция задачи линейного программирования имеет вид уравнения множественной линейной регрессии:

$$y = 243,73 - 0,146x_1 - 4,082x_2, \quad y \rightarrow \max \quad (4.3.2)$$

где y – выход готового сотового заполнителя, м³;

x_1 – расход алюминиевой фольги, м²;

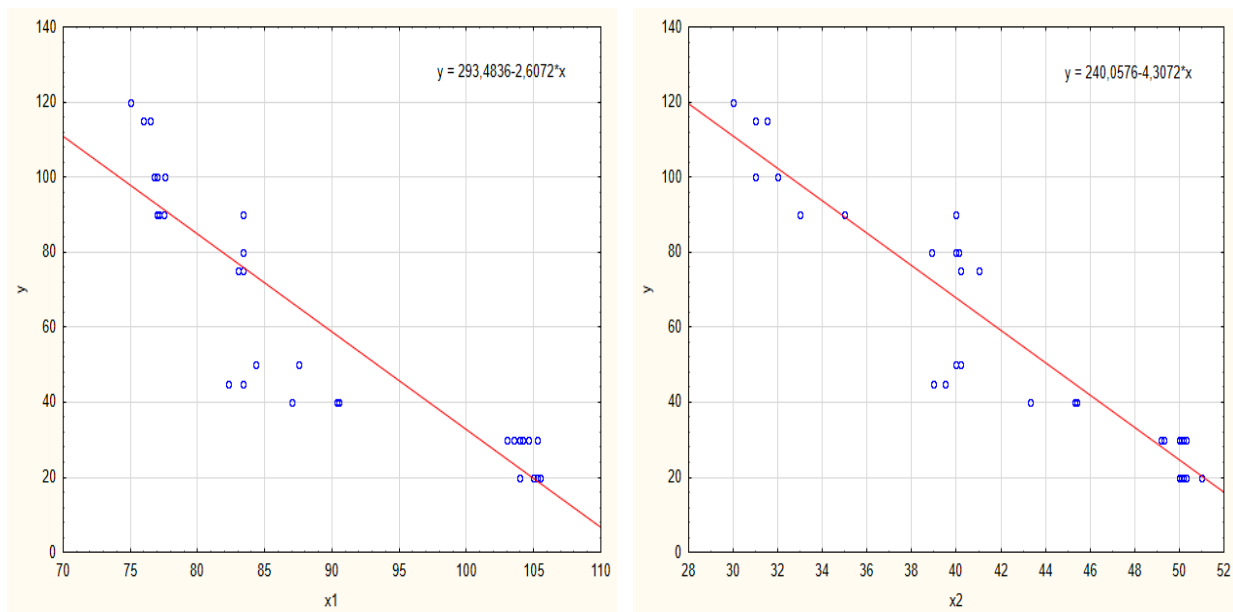
x_2 – расход клея Вк-25, кг.

Выбор метода линейной регрессии для анализа зависимости расхода ресурсов от объема производства обоснован характером наблюдаемой динамики, которая в области установившегося серийного производства демонстрирует устойчивую линейную тенденцию. После стабилизации процесса абсолютный расход материалов изменяется практически пропорционально росту объемов выпуска. Использование же нелинейной модели для данного участка было бы избыточным и могло бы привести к переобучению, маскирующему основной производственный тренд, присущий отлаженному, управляемому процессу.

Адекватность построенной модели подтверждается высоким значением коэффициента детерминации ($R^2 = 0,88$), статистической значимостью модели

в целом ($p < 0.05$ по F-тесту) и всех ее коэффициентов, а также тем, что анализ остатков не выявил нарушений ключевых предпосылок: остатки распределены нормально, однородны и не автокоррелированы.

Зависимость между выходом готового сотового заполнителя (y) и ресурсами производства (x_1, x_2) показана на диаграммах рассеяния на рисунке 4.3.2.



а)

б)

Рисунок 4.3.2 – Диаграммы рассеяния, характеризующие зависимость между выходом готового сотового заполнителя (y , м³) и ресурсами производства: а) расход алюминиевой фольги (x_1 , м²), б) расход клея Вк-25 (x_2 , кг)

В результате решения задачи оптимизации определяются не только оптимальные объемы расхода фольги и клея, но и оценка увеличения выхода продукции при иных производственных факторах или ограничениях. В качестве ограничений приняты прямые условия по величине x_1 и x_2 , а также неравенства, выраженные как взаимосвязь:

- расхода алюминиевой фольги (x_1 , м²) и доли бракованной продукции (z , %);
- расхода клея Вк-25 (x_2 , кг) и доли бракованной продукции (z , %);

– расхода алюминиевой фольги (x_1 , м²) и объема операции по сборке сотового пакета (w_1 , м³);

– расхода клея Вк-25 (x_2 , кг) и объема операции по нанесению клеевых полос (w_2 , м³).

Взаимосвязь доли бракованной продукции (z , %) и расхода алюминиевой фольги (x_1 , м²) и клея ВК-25 (x_2 , кг) можно объяснить с точки зрения технологического процесса и влияния отклонений в материальных потоках на качество сотового заполнителя. Вероятнее всего, это эффект избыточного расхода («перерасход») может быть косвенным индикатором проблем в настройке оборудования (неоптимальный раскрой) или использования фольги с дефектами, требующей больше материала для получения годного изделия, что может коррелировать с повышенным браком. Избыток клея нарушает технологический режим: приводит к его выдавливанию и загрязнению ячеек, увеличению веса изделия, неравномерности отверждения, короблению структуры и снижению эксплуатационных характеристик.

Кроме того, качество определяется не абсолютными значениями x_1 и x_2 по отдельности, а их оптимальным соотношением. Например, увеличение площади фольги (более плотная структура) может потребовать иного, но не обязательно пропорционального, количества клея для качественной пропитки. Нарушение этого баланса ведет к браку. По данным производства алюминиевого сотового заполнителя за трехлетний период доля брака (z) варьируется от 11,33% до 31,67%.

Модели качества производимой продукции построены путем регрессионного анализа, где зависимая переменная (z) – это доля бракованной продукции, %; независимые переменные – (x_1) расход алюминиевой фольги, м² и (x_2) расход клея Вк-25, кг:

$$z = -24,97 + 0,51x_1, \quad (4.3.3)$$

$$z = -13,68 + 0,82x_2. \quad (4.3.4)$$

Для повышения адекватности и применимости искомого решения дополним еще одно ограничение – взаимосвязь расхода алюминиевой фольги (x_1 , м²) и объема операции по сборке сотового пакета (w_1 , м³), и расхода клея ВК-25 (x_2 , кг) и объема операции по нанесению клеевых полос (w_2 , м³).

Между расходом алюминиевой фольги (x_1) и объемом операции по сборке сотового пакета (w_1) существует прямая и определяющая технологическая взаимосвязь, поскольку параметр w_1 является производной функцией от x_1 . Объем операции сборки w_1 определяется количеством слоев фольги и площадью каждого слоя, т.е. прямо пропорционален общему расходу материала x_1 – чем больше фольги поступает в производство, тем большее количество слоев необходимо уложить, выровнять, совместить и зафиксировать для формирования пакета перед склейкой. Таким образом, x_1 является не только материальной, но и операционной метрикой, определяя масштаб и сложность ключевой сборочной операции, что необходимо учитывать при планировании производственных мощностей и затрат. По данным производства алюминиевого сотового заполнителя за трехлетний период объем операции по сборке сотового пакета (w_1) варьируется в пределах от 35 м³ до 125 м³.

Между расходом клея ВК-25 (x_2) и технологическим объемом операции по его нанесению (w_2) существует прямая функциональная связь. Параметр w_2 количественно представляет собой объем клея, который фактически нанесен на фольгу, и напрямую, через плотность клея ρ (кг/м³), связан с его массовым расходом x_2 . Любое изменение массы израсходованного клея (x_2) является прямым следствием и количественной мерой масштаба выполненной операции нанесения (w_2), что позволяет использовать расход материала как индикатор для нормирования и планирования данной технологической стадии. По данным производства алюминиевого сотового заполнителя за трехлетний

период объем операции по нанесению клеевых полос (w_1) варьируется в пределах от 50 м^3 до 120 м^3 .

Модели подготовительных операций производства сотового заполнителя построены путем регрессионного анализа, где зависимые переменные (w_1) – объем операции по сборке сотового пакета (м^3) и (w_2) – объем операции по нанесению клеевых полос (м^3); независимые переменные – (x_1) расход алюминиевой фольги, м^2 и (x_2) расход клея Вк-25, кг:

$$w_1 = 355,20 - 3,09x_1, \quad (4.3.5)$$

$$w_2 = 247,07 - 3,79x_2. \quad (4.3.6)$$

Система ограничений линейной функции (4.3.2) будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 75 \leq X_1 \leq 105 \\ 30 \leq X_2 \leq 50 \\ 11,33 \leq -24,97 + 0,51x_1 \leq 31,67 \\ 11,33 \leq -13,68 + 0,82x_2 \leq 31,37 \\ 35 \leq 355,20 - 3,09x_1 \leq 125 \\ 50 \leq 247,07 - 3,79x_2 \leq 120. \end{array} \right. \quad (4.3.7)$$

Поиск решения линейной задачи произведен симплекс-методом, сущность которого заключается в убывании линейного функционала до ситуации, пока выполняются условия локальной оптимальности или ограничения линейной функции.

На основании решения задачи линейного программирования определены оптимальные значения расхода ключевых ресурсов, обеспечивающие максимально возможный выход годного сотового заполнителя при заданных технологических и производственных ограничениях (таблица 4.3.1). В результате решения задачи найдено:

- оптимальное значение расхода алюминиевой фольги $x_1 = 75,05 \text{ м}^2$;
- оптимальное значение расхода клея Вк-25 $x_2 = 33,53 \text{ кг}$;

– при объеме производства сотового заполнителя $y = 95,92 \text{ м}^3$.

Таблица 4.3.1 – Результаты задачи линейного программирования для определения оптимальных объемов расхода ресурсов при максимальном выходе сотового заполнителя

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

Модель демонстрирует, что для достижения целевого объема производства в $95,92 \text{ м}^3$ необходимо использовать $75,05 \text{ м}^2$ алюминиевой фольги и $33,53 \text{ кг}$ клея Вк-25. Полученные значения не являются произвольными, а представляют собой точку баланса, в которой ресурсы расходуются наиболее эффективно с учетом всех использованных ограничений.

Расчетные объемы технологических операций, составляющие $123,45 \text{ м}^3$ для сборки сотового пакета (w1) и $120,00 \text{ м}^3$ для нанесения клеевых полос (w2), количественно подтверждают сбалансированность производственного плана. Эти значения находятся в прямой функциональной зависимости от найденных оптимальных расходов материалов. Важным результатом является прогнозируемая средняя доля бракованной продукции на уровне $13,64\%$. Данный показатель, будучи учтенным в модели, отражает технологические потери, неизбежные в реальном процессе, и его значение указывает на то, что

решение является не теоретически максимальным, а практически достижимым оптимумом.

Таким образом, представленное решение задачи линейного программирования формирует научно обоснованную и технологически сбалансированную производственную программу. Оно позволяет не только выйти на расчетный объем выпуска в 95,92 м³, но и эффективно распределить материальные ресурсы (фольгу и клей), загрузить трудовые операции (нанесение клея и сборку сотового пакета) и оценить технологические потери. Данный оптимизированный план может служить основой для оперативного управления производством, планирования закупок и оценки эффективности выпуска сотового наполнителя.

Выводы по четвертой главе

Практическая реализация научно-технических решений по организации серийного производства алюминиевого сотового наполнителя на базе ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» позволила получить следующие результаты:

1. Предложена последовательность работ по оптимизации критического пути цикла производства сотовых наполнителей в ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», состоящего из десяти последовательных этапов, где ключевыми инструментами сокращения длительности производственных процедур с позиции системной динамики являются методы быстрореагирующего и бережливого производства POLCA, всеобщий уход за оборудованием (TPM), создание карты потока создания ценности, стандартизация процессов, 5S как реорганизация схем хранения запасов, комплектующих и инструмента. Результатом предложенных решений является уменьшение длительности производственного цикла в целом на 261,9 ч/ч или 28,5%, наращивание объемов производства сотового наполнителя с 20 до 120 м³ в течение 36 месяцев.

2. 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: коэффициент нанесения клеевых полос, коэффициент сборки сотового пакета, коэффициент склейки в автоклаве, коэффициент растяжки в сотовой панели.

3. 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 отработываемых подготовительных операций с объемом выпуска готового сотового заполнителя.

4. Проведено прогнозирование объема выпуска готового сотового заполнителя по трем сценариям отработки технологии производства при условии нестабильности коэффициентов подготовительных операций для выявления «узких мест» технологической цепи. 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 сотовой панели не вызывает снижение объемов производства. Для минимизации рисков необходимо внедрение системы превентивного обслуживания, создание банка валидированных режимов и резервирование мощностей.

5. 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. 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 прогнозируемая средняя доля бракованной продукции в период отработки технологии на уровне 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 заключается 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, адаптированной под специфику НПП. В модель Stage-Gate 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдюхина, Т. М. Сравнительный анализ методов определения массы рессоры спортивно-пилотажного самолета, выполненного из титана и полимерного композиционного материала / Т. М. Авдюхина, Т. С. Дружинин // Справочник. Инженерный журнал. – 2020. – № 12(285). – С. 14-19. – DOI 10.14489/hb.2020.12.pp.014-019.
2. Авторское свидетельство № 1448586 А1 СССР, МПК В64С 3/26, В32В 3/12. Трехслойная панель с сотовым наполнителем и способ ее изготовления : № 4075116/23 : заявл. 06.06.1986 : опубл. 20.01.2006 / Б. П. Налетов, В. И. Постнов, И. И. Гатаулин.
3. Авторское свидетельство № 281167 А1 СССР, МПК В64F 5/00. Способ сборки трехслойной панели с сотовым наполнителем : № 1246355/40-23 : заявл. 31.05.1968 : опубл. 03.09.1970 / А. Ф. Баруллин, Ф. Н. Башаров, Р. И. Макеев, Н. И. Фирсов.
4. Адно, Ю. Л. Мировая черная металлургия: кризис на пороге нового десятилетия / Ю. Л. Адно // Черные металлы. – 2020. – № 7. – С. 51-58.
5. Айрапетова, А. Г. Теоретические основы формирования инновационно-ресурсного подхода в управлении предприятием / А. Г. Айрапетова // Проблемы управления деятельностью инновационно-активных предприятий : Сборник научных трудов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2013. – С. 24-36.
6. Айрапетова, А. Г. Формирование ресурсосберегающей политики (Теория и методология) : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : диссертация на соискание ученой степени доктора экон. наук / Айрапетова Ануш Генриховна. – Санкт-Петербург, 2002. – 321 с.
7. Андреева, С. А. Повышение эффективности деятельности предприятий ракетно-космической промышленности / С. А. Андреева, С. И.

Огнева, Д. Е. Титов, М. А. Рагозина // Естественные и технические науки. – 2022. – № 4(167). – С. 139-140.

8. Апаков, А.А. Оптимизация быстрореагирующего производства (QRM) через цифровые инновации: интеграция QRM с ИИ и анализом больших данных / А.А. Апаков, Б.П. Павлов // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2024. – Т. 9. – № 3(41). – С. 22-30.

9. Ахмадиев, Г. М. Научно-производственное обоснование модели «Иннокам» в Республике Татарстан / Г. М. Ахмадиев, Р. М. Падемирова // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. – 2017. – № 3(76). – С. 119-127.

10. Бабушкин, В. М. Разработка и апробация учебно-имитационной игры как инструмента формирования компетенций бережливого производства / В. М. Бабушкин, Р. А. Галямов, Г. Ф. Мингалеев, Р. И. Салимов // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2025. – Т. 81, № 3. – С. 38-42.

11. Барсегян, Н. В. Методическое обеспечение оценки эффективности сопутствующих процессов в промышленности / Н. В. Барсегян, С. С. Кудрявцева, Р. А. Халиулин // Компетентность. – 2026. – № 1. – С. 32-37.

12. Басманов, Д.А. Моделирование процесса обработки полуприцепов на контейнерном терминале в среде имитационного моделирования Anylogic. / Д.А.Басманов, Д.Ю.Гришкова. // Логистические системы в глобальной экономике. – 2022. – № 12. – С. 47-50.

13. Беляева, И. А. Аспекты обеспечения качества электромобилей, связанные с реализацией инструментов сквозного проектирования / И. А. Беляева, В. Н. Козловский, О. Д. Ибрагимов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 1(117). – С. 15-19.

14. Бойко, А.А. Имитационное моделирование: виды и области применения / А.А. Бойко, С.А. Евдокимова, Т.П. Новикова // Новые аспекты

моделирования систем и процессов. Материалы Международной научно-практической конференции. – Воронеж, 2023. – С. 18-26.

15. Бром, А.Е. Разработка концепции и методологических основ создания организационной системы логистической поддержки жизненного цикла наукоемкой продукции : специальность 05.02.22 Организация производства (по отраслям) : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Бром Алла Ефимовна. – Москва, 2009. – 314 с.

16. Бурдин, С.С. Организационно-экономический механизм управления жизненным циклом наукоемкой продукции предприятий авиастроения : специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : диссертация на соискание ученой степени кандидата экон. наук / Бурдин Станислав Станиславович. – Москва, 2021. – 181 с.

17. Буш, А. В. Алгоритм проектирования крупногабаритной оснастки для изделий аэрокосмического назначения / Буш А.В. [и др.] // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. – 2023. – № 2(107). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/14994>.

18. Вашлаев, А.Д. Организационно-экономический механизм развития кадрового потенциала наукоемких промышленных предприятий: специальность 5.2.3 «Региональная и отраслевая экономика»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экон. наук / Вашлаев Андрей Дмитриевич. – Москва, 2023. – 201 с.

19. Ведмидь, П. А. о новой концепции MESA умного производства / П. А. Ведмидь // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 12. – С. 20-22. – DOI 10.25728/avtprom.2022.12.04.

20. Войт, А. В. Научно-производственные объединения: специфика эффектов интеграции / А. В. Войт // Вестник университета. – 2016. – № 5. – С. 10-16.

21. Галиева, Г.И. Внедрение быстро реагирующего производства QRM в России // Г.И. Галиева / LV международные научные чтения (памяти А.А. Ухтомского). Москва, 2019. – С. 42-46.

22. Горохова, Д.С. Методика прогнозирования требуемого уровня производительности и качества штампованных автокомпонентов / Д.С. Горохова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 8. – С. 123-127.

23. ГОСТ Р 15.000-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Основные положения».

24. ГОСТ Р 15.011-2024 «Система разработки и постановки продукции на производство. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».

25. ГОСТ Р 15.101-2021 «Система разработки и постановки продукции на производство. Порядок выполнения научно-исследовательских работ».

26. ГОСТ Р 56639-2015 «Технологическое проектирование промышленных предприятий. Общие требования».

27. ГОСТ Р 56716-2015 «Проектный менеджмент. Техника сетевого планирования. Общие положения и терминология».

28. ГОСТ Р 56864-2016 «Система управления полным жизненным циклом изделий высокотехнологичных отраслей промышленности. Требования к организации работ по разработке электронных конструкторских документов, представляемых заказчику на этапе эскизного проекта и технического проекта. Общие положения».

29. ГОСТ Р 56874-2016 «Система управления полным жизненным циклом изделий высокотехнологичных отраслей промышленности. Требования к организации работ по разработке электронных конструкторских документов на этапе разработки рабочей конструкторской документации для изготовления опытных образцов. Общие положения».

30. ГОСТ Р 57194.1-2016 «Трансфер технологий. Общие положения».

31. ГОСТ Р 15.301-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения».

32. Громова, Е.А. Модель «Активного производства» как результат симбиоза современных производственных парадигм / Е.А. Громова // Вестник Алтайской академии экономики и права. – 2020. – № 12-2. – С. 273-278.

33. Дрозд, О. В. Сетецентрическая модель и архитектура единого информационного пространства «Проектирование на заказ» сложных технических изделий / О. В. Дрозд // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2023. – № 2(143). – С. 74-89. – DOI 10.18698/0236-3933-2023-2-74-89.

34. Егоров, А. А. "Индустрия 4.0", гиперавтоматизация и PLC - умное производство будущего. Часть 2 проблемы выбора программируемых контроллеров для автоматизации современных высокотехнологичных производств / А. А. Егоров // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2021. – № 2(139). – С. 22-33.

35. Егоров, И. М. Научно-производственное предприятие как форма интеграции науки и производства: специфика деятельности в условиях санкций / И. М. Егоров, А. Н. Пророков // Сборник научных трудов. – Москва: Государственный университет просвещения, 2024. – С. 75-82.

36. Жмаева, И. В. Организационно-экономический механизм сбалансированного планирования наукоемкого производства в условиях открытых инноваций: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Жмаева Ирина Витальевна. – Москва, 2011. – 30 с.

37. Зиятдинов, Н.Н. Разработка расчетного модуля мембранного процесса разделения для универсальных моделирующих программ химико-технологических процессов / А. В. Малыгин, И. И. Емельянов, Р. В. Семин [и др.] // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 9. – С. 13-16.

38. Иванченко, Т. О. Научно-методические основы реорганизации наукоемкого производства: специальность 05.02.22 «Организация

производства (по отраслям)» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванченко Татьяна Олеговна. – Москва, 2012. – 118 с.

39. Ицкович, Э. Л. Проведение работ по автоматизации производства: роль инжиниринга в автоматизации технологического производства / Э. Л. Ицкович // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 8. – С. 3-7.

40. Калко, А. А. Особенности методического подхода к внедрению цифровой технологии Smart-Stage-Gate на наукоемких предприятиях / А. А. Калко // Научные исследования и разработки. Российский журнал управления проектами. – 2025. – Т. 14, № 3. – С. 3-9. – DOI 10.12737/2587-6279-2025-14-3-3-9.

41. Каталог национальных стандартов. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/standarts/catalognational>.

42. Кислицына, А. Е. Формирование стратегии коммерциализации инноваций в сфере наукоемкого производства: специальность 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством» : диссертация на соискание ученой степени кандидата экон. наук / Кислицына Анастасия Евгеньевна. – Москва, 2013. – 184 с.

43. Кобин, П. Н. Жизненный цикл инновационной продукции черной металлургии на этапе освоения производства / П. Н. Кобин // Экономика и управление: проблемы, решения. – 2022. – Т. 2, № 3(123). – С. 173-181. – DOI 10.36871/ek.ur.p.r.2022.03.02.019.

44. Козловский, В. Н. Методика оценки качества новых автомобилей в действующем производстве / Н. С. Тондель, В. Н. Козловский, И. А. Беляева, М. Д. Марков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 1(123). – С. 112-118.

45. Козловский, В. Н. Разработка метода прогнозной оценки конкурентоспособности продукции автопроизводителя через управление уровнем качества этой продукции / А. С. Клентак, В. Н. Козловский, А. Р. Денискина, Д. В. Айдаров // СТИН. – 2025. – № 12. – С. 35-39.

46. Колос, А. В. Новые конструкционные композиционные материалы и технологии в гражданском самолетостроении / А. В. Колос // Научно-исследовательские публикации. – 2024. – № 4. – С. 49-51.

47. Корогодова, И. В. Производство, техническая диагностика и ремонт самолета / И. В. Корогодова. Том Часть 1. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2022. – 119 с.

48. Краснов, Ю. А. Автоматизация поддержки управленческих решений при организации наукоемкого производства на основе гибкой обратной связи: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Краснов Юрий Алексеевич. – Москва, 2013. – 26 с.

49. Кудрявцева, С. С. Методика оценки факторов эффективности организации сопутствующих процессов"проектирование и инжиниринг"нефтехимических производств / С. С. Кудрявцева, Р. А. Халиулин // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 4(85). – С. 91-94.

50. Кузнецова, Н. М. Иерархические уровни конфиденциальности информационных ресурсов промышленного предприятия в зависимости от этапов жизненного цикла производства / Н. М. Кузнецова, Т. В. Карлова, А. Ю. Бекмешов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. – 2024. – № 4(26). – С. 59-65. – DOI 10.30987/2658-6436-2024-4-59-65.

51. Кушнарев, Л. И. Качество продукции - основа конкурентоспособности российского машиностроения / Л. И. Кушнарев, С. Л. Кушнарев // Технический сервис машин. – 2023. – № 2(151). – С. 48-55.

52. Лифшиц, А.С. Количественная диагностика жизненного цикла промышленного предприятия / А.С Лифшиц., Р.С. Ибрагимова // Теоретическая экономика. – 2023. – № 1(97). – С. 52-62.

53. Магрицкий, А. С. 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.

54. Малышева, Т. В. Использование автоматизированных информационных систем в управлении экологической устойчивостью обрабатывающих производств / Т. В. Малышева // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2019. – № 2. – С. 148-153.

55. Малышева, Т. В. Нейросетевое прогнозирование перехода предприятий с цифровым администрированием на отечественные операционные системы Linux / Т. В. Малышева, Д. В. Чиж // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 1. – С. 105-108.

56. Малышева, Т. В. Управление цепями поставок эколого-ориентированных наукоемких нефтехимических производств / Т. В. Малышева, А. И. Шинкевич // Тенденции развития логистики и управления цепями поставок в условиях цифровой экономики: материалы II международной научно-практической конференции. – Казань, 2021. – С. 157-164.

57. Малышева, Т.В. Ресурсосберегающие производственные системы. Управление информационными потоками / Т.В. Малышева // Компетентность. – 2020. – № 4. – С. 24-27.

58. Мамурова, Д. Э. Управление инновационной деятельностью хозяйствующих субъектов в промышленности / под ред. д.э.н., проф. М.А. Икрамова. – Фергана, «AL-FERGANUS». 2022. – 312 с.

59. Марков, Д. А. Бережливое и быстро реагирующее производство / Д. А. Марков, Н. А. Маркова, В. Л. Попов. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2018. – 325 с.

60. Модернизация сетцентрической концепции в обогащительном производстве / П. А. Лончих, А. В. Федотова, Е. Ю. Головина [и др.] // Вестник

Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 152-162. – DOI 10.18503/1995-2732-2024-22-4-152-162.

61. Морозова. А.В. Управление качеством отбора молодых специалистов для наукоемкого производства на основе нейросетевой квалиметрико-компетентностной типизации инженерно-технических кадров: специальность 05.02.23 «Стандартизация и управление качеством продукции»: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Морозова Анна Валентиновна. – Брянск, 2012. – 628 с.

62. Муллабаев, Б. Б. Роль вертикально интегрированных предприятий в экономике / Б. Б. Муллабаев, Э. Вохидов, Д. Каримов // Theoretical & Applied Science. – 2019. – № 1(69). – С. 85-90.

63. Никитин, С. А. Нормативная база подготовки производства новой продукции / С. А. Никитин, С. А. Алешин // Известия Тульского государственного университета – 2011. – № 1-1. – С. 81-86.

64. Николаев, В. А. Сравнительный анализ государственно-частного партнерства в оборонно-промышленном комплексе стран Запада и России / В. А. Николаев, В. В. Фаустов // Аудит. – 2021. – № 9. – С. 24-27.

65. Нургалиев, Р. К. Применение инструментов моделирования в рамках функционирования «умного» нефтехимического производства / Р. К. Нургалиев, А. И. Шинкевич // Computational Nanotechnology. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 46-58. – DOI 10.33693/2313-223X-2021-8-1-46-58.

66. О Концепции опережающего инновационного развития и глобального технологического превосходства ГК «Ростех» / С. В. Чемезов, Н. А. Волобуев, Ю. Н. Коптев, А. И. Каширин // Инновации. – 2023. – № 1(291). – С. 3-16.

67. Оболенская, Е. А. Цифровизация конструкторской документации в управлении жизненным циклом изделия в авиастроении / Е. А. Оболенская, С. А. Одинокоев // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 5(86). – С. 117-123.

68. Оптимизация процесса входного контроля: ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина / М. Ю. Русин, Д. В. Харитонов, Д. А. Анашкин [и др.] // Методы менеджмента качества. – 2021. – № 5. – С. 36-42.

69. Пархимович, В. А. Конструкция самолета / В. А. Пархимович, В. Г. Ципенко. – Москва : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2023. – 128 с.

70. Патент № 2824157 С1 Российская Федерация, МПК В21D 47/00. Способ изготовления многослойной сотовой панели : № 2023121495 : заявл. 17.08.2023 : опубл. 06.08.2024 / В. Е. Чичурин, В. Н. Наговицин, А. Ю. Похабов [и др.] ; заявитель Акционерное общество «Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва».

71. Патент на полезную модель № 231179 U1 Российская Федерация, МПК В32В 5/00. Сотовый наполнитель многослойной панели : заявл. 26.09.2024 : опубл. 14.01.2025 / В. И. Халиулин, В. Н. Демидович, А. А. Малышева, П. А. Петров ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ».

72. Патент на полезную модель № 238389 U1 Российская Федерация, МПК В32В 3/12. Сотовый наполнитель многослойной панели : заявл. 23.05.2025 : опубл. 28.10.2025 / В. И. Халиулин, В. Н. Демидович ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ».

73. Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 303 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие авиационной промышленности» (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2022 г. № 2114).

74. Пястолов, С. М. Конвенциональный подход к решению задач мобилизации наукоемких производств / С. М. Пястолов // Научные исследования. – 2022. – № 2. – С. 108-129. – DOI 10.31249/scis/2022.02.07.

75. Ручьев, А.Г. Модели и методики мониторинга реализации этапов жизненного цикла продукции наукоемкого приборостроения: специальность 05.02.22 «Организация производства (по отраслям)»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Морозова Анна Валентиновна. – Санкт-Петербург, 2021. – 240 с.

76. Соловов, А. В. Конструкция самолетов: фундаментальные основы и классика типовых решений : Учебное пособие / А. В. Соловов, А. А. Меньшикова. – 1-е изд.. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 385 с.

77. Сури, Р. Время – деньги: конкурентное преимущество быстрореагирующего производства. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2017. 326 с.

78. Сухомлинов, А. И. Интеграция цифровых двойников в промышленные предприятия / А. И. Сухомлинов // Информационные системы и технологии. – 2021. – № 6(128). – С. 56-64.

79. Трясцина, Н. Ю. Оценка организационно-технического уровня производства / Н. Ю. Трясцина, Д. А. Гусарова, О. И. Михайлова // Эпоха науки. – 2019. – № 20. – С. 455-458.

80. Тушавин, В.А. Методология управления качеством процессов информационного обеспечения наукоемкого производства : специальность 05.02.23 «Стандартизация и управление качеством продукции» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Тушавин Владимир Александрович. – Санкт-Петербург, 2020. – 325 с.

81. Федоренко, В. В. Сбалансированная система показателей и ключевые показатели эффективности деятельности научно-производственного подразделения промышленного предприятия / В. В. Федоренко // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2010. – № 2. – С. 46-50.

82. Хакимуллин, М. И. Модель оптимизации ресурсоэффективности мезоэкономических производственных систем / Н. Ю. Фомин, Ю. Н. Хакимуллин, М. И. Фарахов // Компетентность. – 2024. – № 3. – С. 32-36.

83. Чабаненко, А. Стандартизация наукоемкой продукции / А. Чабаненко // Стандарты и качество. – 2015. – № 1.

84. Шинкевич, А. И. Диагностика зависимости основного производства от производственной инфраструктуры на основе ансамблевого метода машинного обучения / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева // Общество: политика, экономика, право. – 2023. – № 8(121). – С. 114-120. – DOI 10.24158/per.2023.8.14.

85. Шинкевич, А. И. Исследование тенденций развития процессов разработки и внедрения технологических инноваций в оборонной промышленности / А. И. Шинкевич, Т. В. Малышева, Д. В. Харитонов // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2023. – № 3. – С. 80-85. – DOI 10.56584/1560-8816-2023-3-80-85.

86. Шинкевич, А. И. Проектирование цифрового двойника системы организации производства / А. И. Шинкевич, М. Е. Надеждина, В. Ф. Сопин // Стандарты и качество. – 2024. – № 4. – С. 94-99.

87. Шинкевич, А. И. Формирование показателей производственной системы АО «Кварт» для модели машинного обучения / А. И. Шинкевич, М. Е. Надеждина, В. М. Бабушкин // Справочник. Инженерный журнал. – 2024. – № 12(333). – С. 52-57.

88. Шинкевич, А.И. Мониторинг процессов энергосбережения в производственных системах на основе математической статистики / А.И. Шинкевич, Т.В. Малышева, Л.Н. Иванова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 4(102). – С. 57-64.

89. Шинкевич, М. В. Моделирование деятельности вспомогательных производств и их специфика в отраслях промышленности / А. В. Якушенков, М. В. Шинкевич // Математические методы в технологиях и технике. – 2025. – № 8. – С. 37-41.

90. 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.

91. 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.

92. Шогенов, В. А. Моделирование процессов серийного производства импортозамещающих сотовых наполнителей / В. А. Шогенов // Компетентность. – 2025. – № 6. – С. 46-49.

93. 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.

94. Шогенов, В. А. Организация производства отечественных сотовых наполнителей 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.

95. Шогенов, В. А. Патент № 2766282 Российская Федерация. Способ сборки пакета сотового наполнителя : № 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.

96. 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.

97. 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.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. Anderson, J. D. Some reflections on the history of fluid dynamics // Annual Review of Fluid Mechanics. – 2020. – Vol. 52. – P. 1-12. – DOI: 10.1146/annurev-fluid-010518-040613.

102. Balashova, E.S. Breakthrough Effect of Combining Resource Management Models / E.S. Balashova, E.A. Gromova // International Review of Management and Marketing. – 2017. – № 7(1). – P. 337-341.

103. Clark, K. B., Wheelwright, S. C. Organizing and leading "heavyweight" development teams // *California Management Review*. – 1992. – Vol. 34, № 3. – P. 9-28. – DOI: 10.2307/41167421.
104. Fine, C. H. Clockspeed-based strategies for supply chain design // *Production and Operations Management*. – 2000. – Vol. 9, No. 3. – P. 213-221. – DOI: 10.1111/j.1937-5956.2000.tb00134.x.
105. George, M. L. *Lean Six Sigma for Service: How to Use Lean Speed and Six Sigma Quality to Improve Services and Transactions* // McGraw-Hill. – 2003. – Chapter 2: Integrating Lean and Six Sigma. – P. 21-45.
106. Hale, R. D., Gray, J. S. Multifunctional structures for advanced spacecraft: A review and forecast of future technology needs // NASA/TP–2020-5002724. – Hampton, VA: NASA Langley Research Center, 2020. – 65 p. – Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205002724>.
107. Hall, T. A Survey of Machine Learning Methods for Time Series Prediction / T. Hall, K. Rasheed// *Appl. Sci.* – 2025. – No. 15. – P. 5957. – DOI 10.3390/app15115957.
108. Hamprecht, G. Ganzheitliche Produktionssysteme: Der Weg zur Wettbewerbsfähigkeit // *wt Werkstattstechnik online*. – 2005. – Jg. 95, H. 9. – P. 647-652.
109. Hirano, H. The 5S System: A Tool for Improving the Workshop // *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'93)*. – Mons, Belgium, 1993. – Vol. 2. – P. 572-581.
110. Karatsu, H. What We Need to Learn from Japanese Industry // *Proceedings of the International Conference on Quality Control, Tokyo 1978*. – Tokyo : Union of Japanese Scientists and Engineers (JUSE), 1979. – P. 17-24.
111. Khan, N. An analysis of the application of agile manufacturing in medium scale manufacturing industry / N. Khan // *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*. – 2020. – Vol. 5, No. 2. – P. 355-362.

112. Liker, J. K. The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development // Academy of Management Perspectives. – 2006. – Vol. 20, No. 2. – P. 5-20. – ISSN 1558-9080. – DOI: 10.5465/amp.2006.20591002.
113. Liker, J. K., Morgan, J. M. The Toyota Way in Services: The Case of Lean Product Development // Academy of Management Perspectives. – 2006. – Vol. 20, No. 2. – P. 5-20. – DOI: 10.5465/amp.2006.20591002.
114. Meyer, M. H., Lehnerd, A. P. The power of product platforms // The power of product platforms : building value and cost leadership. – New York : The Free Press, 1997. – Chap. 1. – P. 1-22.
115. Porter, M. E., Shih, W. Restoring American Competitiveness // Harvard Business Review. – 2009. – Vol. 87, Nos. 7/8. – P. 66-81.
116. Sharp, J. Working towards agile manufacturing in the UK industry / J. Sharp, Z. Irani, S. Desai // International Journal of Production Economics. – 1999. – № 62. – P. 155-169.
117. Shinkevich, A. The production systems green development: Waste logistics and data-driven waste management / A. Shinkevich, I. Ershova, T. Malysheva // Journal of Infrastructure, Policy and Development. – 2024. – Vol. 8, No. 12. – P. 9031. – DOI 10.24294/jipd.v8i12.9031.
118. Smith, P. G., Reinertsen, D. G. Shortening the product development cycle // Research-Technology Management. – 1992. – Vol. 35, № 3. – P. 44-49. – ISSN 0895-6308. – DOI: 10.1080/08956308.1992.11670794.
119. Soutis, C., Sellis, D., Mileiko, S. T. (Eds.). Innovation in aeronautics: Part III - Advanced materials and manufacturing [Special issue] // The Aeronautical Journal. – 2021. – Vol. 125, No. 1283. – P. 1-200. – DOI: 10.1017/aer.2020.130.
120. Spear, S. J. Learning to Lead at Toyota // Harvard Business Review. – 2004. – Vol. 82, No. 5. – P. 78-86.
121. Thieman, K. D., Biedermann, W., Reinhart, G. Human-robot collaboration in aircraft assembly: A digital twin approach for task planning and simulation // Journal of Manufacturing Systems. – 2023. – Vol. 68. – P. 300-312. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.04.004.

122. Thompson, S. D., Allen, B. D. Leveraging the digital thread for adaptive aircraft assembly // SAE Technical Paper 2023-01-7012. – Warrendale, PA: SAE International, 2023. – 10 p.

123. Vickers, J., Shah, S., Carter, W. G. Additive manufacturing at NASA: In-space and planetary surface applications // Progress in Aerospace Sciences. – 2023. – Vol. 142.

124. Womack, J. P., Jones, D. T. Beyond Toyota: How to root out waste and pursue perfection // Harvard Business Review. – 1996. – Vol. 74, № 5. – P. 140-158.

125. Zaeh, M. F., Moeller, C. A framework for data-driven digital twins for smart manufacturing // Procedia CIRP. – 2021. – Vol. 104. – P. 702-707.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Патент на изобретение «Способ сборки пакета сотового заполнителя»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2766282

СПОСОБ СБОРКИ ПАКЕТА СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

Патентообладатель(ли): *Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (Минпромторг России), (RU)*

Автор(ы): *Свиридов Анатолий Григорьевич, Выморков Николай Владимирович, Степанов Николай Викторович, Шогенов Вадим Алексеевич, Богачев Андрей Анатольевич, Моторин Дмитрий Витальевич, (RU)*

Заявка № 2021400001

Приоритет изобретения 29 января 2021 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 февраля 2022 г.

Срок действия патента истекает 29 января 2041 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Исходные данные задачи линейного программирования для оптимизации
расхода ресурсов (алюминиевая фольга, клей Вк-25)

	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
Выход готового сотового пакета, м3	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30
Расход алюминиевой фольги, кг	105,0	104,0	105,0	105,5	105,3	104,0	104,2	103,0	105,3	104,6	104,0	103,5
Расход клея Вк-25, кг	50,0	50,1	50,3	50,2	51,0	50,3	50,3	50,2	50,1	50,0	49,3	49,2
Доля бракованной продукции, %	31,67	30,81	30,10	29,42	28,56	27,93	27,21	27,75	26,89	26,14	25,40	24,65
	<i>13</i>	<i>14</i>	<i>15</i>	<i>16</i>	<i>17</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>20</i>	<i>21</i>	<i>22</i>	<i>23</i>	<i>24</i>
Выход готового сотового пакета, м3	40	40	40	45	45	50	50	75	75	80	80	80
Расход алюминиевой фольги, кг	90,4	90,5	87,0	83,4	82,3	87,5	84,3	83,0	83,4	83,4	83,4	83,4
Расход клея Вк-25, кг	45,3	45,4	43,3	39,0	39,5	40,0	40,2	40,2	41,0	38,9	38,9	40,1
Доля бракованной продукции, %	23,18	22,45	22,80	21,98	21,20	20,55	19,91	19,23	18,62	17,94	17,33	16,68
	<i>25</i>	<i>26</i>	<i>27</i>	<i>28</i>	<i>29</i>	<i>30</i>	<i>31</i>	<i>32</i>	<i>33</i>	<i>34</i>	<i>35</i>	<i>36</i>
Выход готового сотового пакета, м3	80	90	90	90	90	90	100	100	100	115	115	120
Расход алюминиевой фольги, кг	83,4	83,4	83,4	77,1	77,0	77,5	77,6	76,8	77,0	76,5	76,0	75,0
Расход клея Вк-25, кг	40,0	40,0	40,0	35,0	33,0	33,0	32,0	31,0	31,0	31,0	31,5	30,0
Доля бракованной продукции, %	16,07	16,92	16,11	15,42	14,79	14,15	13,64	13,11	12,58	12,11	11,69	11,33