

КУДРЯВЦЕВ ИЛЬЯ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОРГАНИЗАЦИИ
ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ
МАШИНОСТРОЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНСТРУМЕНТОВ
ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

Специальность 2.5.22. Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет».

Научный руководитель: **Кутин Андрей Анатольевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Одинокоев Сергей Анатольевич**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», профессор Образовательного центра Института №11 «Новые материалы и производственные технологии»
Хаймович Ирина Николаевна
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор кафедры обработки металлов давлением

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Защита диссертации состоится _____ 2026 г. в _____ на заседании диссертационного совета 24.2.331.18 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва 2-я Бауманская ул., д.7, ауд. 414 ИБМ.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

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

Постникова Е.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В условиях цифровизации машиностроительного производства и перехода к концепции Industry 4.0, особую значимость приобретает задача существенного сокращения сроков вывода новой продукции на рынок, которая может решаться на основе новых подходов к организации процесса подготовки производства. Определенные сложности возникают в сегменте мелкосерийного и единичного производства крупногабаритных изделий, характерного для авиа-, судо- и энергомашиностроения.

Одним из перспективных инструментов решения поставленной задачи является технология виртуальной реальности (VR), позволяющая осуществлять иммерсивную визуализацию, прототипирование и верификацию процессов подготовки производства в натуральном масштабе. Преимуществами применения VR-инструментов являются: возможность раннего выявления коллизий и ошибок проектирования, оптимизация технологических маршрутов и планировки рабочих мест, значительное сокращение времени на обучение и адаптацию персонала, а также сокращение средств при изготовлении дорогостоящих физических макетов.

Однако проблема эффективного внедрения технологии виртуальной реальности в контур подготовки производства связана с отсутствием комплексных, формализованных методик, обеспечивающих сквозную интеграцию VR-инструментов на всех этапах – от анализа технологичности конструкции до отработки операций сборки и обучения персонала. Существующие подходы зачастую носят фрагментарный характер, не учитывают взаимосвязь и взаимовлияние этапов подготовки производства, а также не позволяют количественно оценить вклад VR в сокращение временных и финансовых затрат. Без применения имитационного моделирования сложно прогнозировать, как внедрение VR на этапе разработки схемы сборки повлияет на общую длительность цикла и загрузку ресурсов, что в 30-40% случаев приводит к нерациональному использованию дорогостоящего VR-оборудования и не позволяет реализовать весь потенциал технологии.

Работа вносит определенный вклад в реализацию национального проекта «Средства производства и автоматизации» в плане организации процессов сборки крупногабаритных изделий с применением цифровых технологий.

В этой связи представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на снижение длительности этапов подготовки производства крупногабаритных изделий, посредством моделирования процессов с применением инструментов виртуальной реальности.

Степень разработанности проблемы

В области организации производства значительный вклад внесли труды Пруденского Г.А., Козловского В.Н., Васина С.А., Омельченко И.Н., Бром А.Е., Ставровского М.Е., Кушнарёва Л.И., Червякова Л.М. Их исследования позволили формализовать многие аспекты подготовки производства, однако в них недостаточно отражены возможности интеграции цифровых инструментов, таких как виртуальная реальность.

В направлении имитационного моделирования производственных процессов следует отметить работы Боровкова А.И., Вороненко В.П. и др., которые разработали методы и программные комплексы для динамического моделирования

сложных производственных систем. Эти подходы активно используются для анализа и оптимизации производственных циклов, но, как правило, без учета интерактивного иммерсивного моделирования, предоставляемого VR-технологиями.

В последние годы в мировой научной литературе активно исследуется применение технологий виртуальной и дополненной реальности в промышленности (Mourtzis D., Milgram P., Gattullo M. и др.). Зарубежные работы демонстрируют эффективность VR для задач прототипирования, обучения и проверки собираемости, однако они часто носят прикладной характер и не предлагают методик интеграции VR в регламентированные процессы подготовки производства, особенно для крупногабаритных изделий.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что, несмотря на значительный объем исследований в области организации производства и имитационного моделирования, вопрос системного применения технологий виртуальной реальности в рамках подготовки производства крупногабаритных изделий остается недостаточно изученным. Отсутствуют методики, обеспечивающие сквозную интеграцию VR-инструментов, а также методы количественной оценки их влияния на длительность этапов подготовки производства

Целью диссертационной работы является совершенствование процессов организации подготовки производства крупногабаритных изделий на основе сокращения длительности этапов подготовки производства с использованием технологий виртуальной реальности.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ литературных источников на предмет повышения эффективности процессов подготовки производства с использованием современных средств визуализации процессов.
2. Разработать математическую модель подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием инструмента VR.
3. Разработать инструмент VR для возможности детального изучения объекта производства, организации рабочих мест, составления схем, маршрутных карт и прочих документов с целью повышения эффективности.
4. Разработать методику внедрения процесса подготовки производства с использованием технологии виртуальной реальности на предприятии.

Предмет исследования – взаимосвязь между организацией этапов и длительностью процесса подготовки производства крупногабаритных изделий.

Объект исследования – процесс организации подготовки производства крупногабаритных изделий в машиностроении.

Научная новизна:

1. Установлены взаимосвязи между этапами подготовки производства крупногабаритных изделий, которые позволили математически описать закономерности длительности подготовки производства с организацией этапов и операций сборки крупногабаритных изделий при использовании инструментов виртуальной реальности.
2. Разработана математическая модель оценки длительности подготовки производства крупногабаритных изделий, учитывающая вероятности возникновения ошибок и параметры организации рабочих мест.

3. Разработана имитационная модель процесса организации подготовки производства крупногабаритных изделий машиностроения, учитывающая сокращение затрачиваемого времени и количество ошибок при использовании инструмента VR.

Теоретическая значимость работы:

Разработана математическая модель оценки длительности этапов подготовки производства с учетом вероятностных обратных связей, предложена методика интеграции VR-верификации в имитационное моделирование, а также систематизирована роль VR как инструмента инженерного анализа. Результаты работы дополняют теорию организации производства и расширяют методологический аппарат цифрового моделирования в машиностроении.

Практическая значимость работы:

Разработана методика организации подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием инструмента виртуальной реальности, обеспечивающая существенное сокращение длительности этапов подготовки производства.

Разработан инструмент виртуальной реальности для составления рабочей документации и организации рабочих мест с целью повышения эффективности подготовки производства.

Внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационной работы внедрены на предприятии по производству крупногабаритных конструкций ООО «Астрон Билдингс» и АО «ЗиО-Подольск», что подтверждено соответствующими актами.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось посредством теоретических, численных и экспериментальных исследований. При решении теоретических задач использованы положения теории организации производства, системного анализа, методологии имитационного моделирования и оценки эффективности технологических процессов. Численные исследования и построение имитационной модели выполнены с использованием среды AnyLogic. Экспериментальные исследования проводились с применением следующего оборудования и программного обеспечения: стенд виртуальной реальности на базе VR-шлема, рабочая станция для CAD-моделирования, специализированное ПО для создания интерактивных VR-сцен, а также средства хронометража и сбора данных.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель, формализующая процесс подготовки производства крупногабаритных изделий в виде системы взаимосвязанных этапов с вероятностными обратными связями и устанавливающая аналитические зависимости длительности процесса от ключевых организационно-технологических факторов.

2. Результаты имитационного моделирования, подтверждающие статистически значимое сокращение временных затрат и снижение количества ошибок в процессе подготовки производства при использовании технологий виртуальной реальности по сравнению с традиционным подходом.

3. Методика внедрения инструмента виртуальной реальности в действующий контур подготовки производства, обеспечивающая поэтапную интеграцию

инструмента виртуальной реальности в процессы разработки организационно-технологической документации и планирования сборки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа представляет собой научное обоснование организационно-технологических решений, направленных на совершенствование процесса подготовки производства крупногабаритных изделий за счет интеграции инструментов виртуальной реальности, что позволяет сократить длительность цикла и снизить вероятность ошибок на этапе проектирования. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.22 «Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства» в части п. 16 (Моделирование и оптимизация организационных структур и производственных процессов, вспомогательных и обслуживающих производств. Экспертные системы в организации производственных процессов) и п.25 (Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике).

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов диссертации подтверждена корректностью примененного методологического аппарата, воспроизводимостью результатов численного и имитационного моделирования, данными проведенных экспериментов с VR-инструментом, а также успешным внедрением разработок.

Личный вклад автора включает проведение анализа существующих методов подготовки производства, выявление факторов, определяющих длительность этапов для крупногабаритных изделий, и разработку математической модели, формализующей взаимосвязи между этапами процесса. Автором создан специализированный VR-инструмент для иммерсивной верификации сборки и пространственного анализа, организованы и проведены экспериментальные исследования с его применением. На основе полученных результатов разработана и внедрена в производство методика интеграции технологий виртуальной реальности в процесс организации производства, включая обучение персонала и адаптацию регламентов.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедр цифровых и аддитивных технологий (РТУ МИРЭА) и метрологии и стандартизации Москва, 2023-2026; на международной научно-технической конференции «ОПТОТЕХ», Москва, (РТУ МИРЭА), 2024; на международной научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии», (РТУ МИРЭА), Москва, 2024 года; на IX международном научно-техническом семинаре «Современные технологии сборки», (Московский Политех), Москва, 2025; на IX международной научной конференции, посвященной 135-летию со дня рождения профессора Хрущова М.М. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», (ИМАШ РАН), Москва, 2025.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 9 научных работах, из них 4 в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, рекомендованных по специальности 2.5.22, общим объемом 2,6 п.л./ вклад автора 2,24 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех

глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 122 наименований. Содержит 134 страницы, в том числе 41 иллюстрацию и 23 таблицы.

Исследование выполнено в рамках работы по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта на реализацию крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития № 075-15-2024-527 от 23.04.2024 г.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, показана ее актуальность, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В Главе 1 проведен анализ современных подходов к подготовке производства сборки крупногабаритных изделий, систематизированы проблемы традиционных методов и обоснована необходимость разработки методики интеграции инструментов виртуальной реальности для снижения вероятности возникновения ошибок при разработке технологической документации и сокращения временных затрат на основных этапах данного процесса.

В условиях глобальной конкуренции и перехода к концепции «Индустрии 4.0» критически важными становятся задачи сокращения времени вывода продукции на рынок и снижения издержек при сохранении высокого качества. На основании работ Пруденского Г.А., Козловского В.Н., Васина С.А., Омельченко И.Н., Бром А.Е., Ставровского М.Е., Кушнарева Л.И., Червякова Л.М., Боровкова А.И., Вороненко В.П. и др. можно заключить, что подготовка производства, особенно для сложных и крупногабаритных изделий, является одним из наиболее ресурсоемких и наименее формализованных этапов жизненного цикла продукции, где сохраняется высокая доля ручного труда и принятия решений на основе экспертного опыта.

В исследованиях Савицкого В.В., Решетниковой Е.П., Шашина А.Д. и др. детально проанализированы системные недостатки традиционной подготовки производства: фрагментированность информационных потоков, зависимость от физических прототипов для проверки технологичности, длительные циклы согласований между конструкторскими и технологическими подразделениями. Для крупногабаритных изделий эти проблемы усугубляются, так как пространственные соотношения, эргономика сборки и логистика крупных узлов не могут быть адекватно оценены по двумерной документации, что ведет к переносу значительной части ошибок на этап физической реализации, исправление которых требует существенных затрат.

В работах ведущих международных исследователей и практиков, таких как Mourtzis D., Milgram P., Gattullo M., и др., а также в отчетах по внедрению в компаниях Airbus, Boeing и BMW, продемонстрирован значительный потенциал технологий виртуальной реальности (VR) как инструмента преодоления указанных ограничений. Показано, что VR позволяет создавать иммерсивные цифровые прототипы (Digital Mock-Up) в натуральном масштабе, проводить интерактивную проверку сборки (Virtual Build Verification), анализировать эргономику и планировать рабочие пространства на ранних стадиях проектирования.

Анализ современных отечественных и зарубежных исследований в

области цифровизации производства, включая работы, посвященные цифровым двойникам и имитационному моделированию, выявил, однако, существенный пробел. Несмотря на обширные доказательства эффективности VR в отдельных прикладных задачах (обучение, дизайн), отсутствует комплексная инженерная методика, решающая задачу сквозной интеграции VR-инструментов в регламентированный процесс подготовки производства. В частности, не формализованы:

1. Критерии выбора этапов подготовки производства, для которых внедрение VR дает максимальный экономический и временной эффект.

2. Методы количественной оценки влияния VR на продолжительность и результативность смежных этапов подготовки производства, учитывающие вероятностный характер и обратные связи в процессе.

3. Подходы к синтезу данных, полученных в ходе VR-верификации, с системами имитационного моделирования (например, на базе AnyLogic) для создания адаптивных цифровых моделей цикла подготовки производства и его оптимизации.

Таким образом, в современных исследованиях подтверждена актуальность проблемы низкой эффективности традиционной подготовки производства для крупногабаритных изделий и обоснован высокий потенциал технологий виртуальной реальности для ее решения. Однако существующие разработки носят, как правило, точечный характер и не предлагают системного метода интеграции VR в контур подготовки производства как единый, управляемый и измеримый процесс.

Глава 2 посвящена исследованию структуры временных связей в процессе подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, выявлении факторов, влияющих на ее длительность, а также в разработке математической модели оценки длительности выполнения подготовки производства.

На основе анализа литературных источников и производственных данных формализована структура подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, включающая десять ключевых этапов (Рис. 1). Установлено, что критическим фактором, определяющим фактическую длительность подготовки производства, является возникновение обратных связей, требующих возврата и повторного прохождения задания на предыдущих этапах при выявлении ошибок.

Эти связи возникают при выявлении ошибок или недоработок, требующих повторного прохождения предыдущих этапов для их устранения. Анализ этих связей позволяет выявить наиболее критические этапы процесса подготовки производства и факторы, влияющие на появление временных потерь.

На схеме были выделены следующие ключевые обратные связи, каждая из которых имеет конкретное технологическое или организационное обоснование: р3,2 – возврат к технологическому контролю возникает, если при разработке схемы сборки выявляется, что конструкция принципиально не позволяет реализовать логичную или безопасную последовательность сведения компонентов, например, из-за отсутствия монтажных окон или невозможности обеспечения требуемых зазоров на последующих стадиях; р4,2 – возврат к отработке на технологичность происходит, когда при формировании технологического маршрута становится очевидно, что конструкция изделия приводит к неоптимальному (например, слишком дробному или, наоборот, чрезмерно укрупненному)

членению на сборочные этапы, что требует изменений в конструкции для группировки или разукрупнения операций;

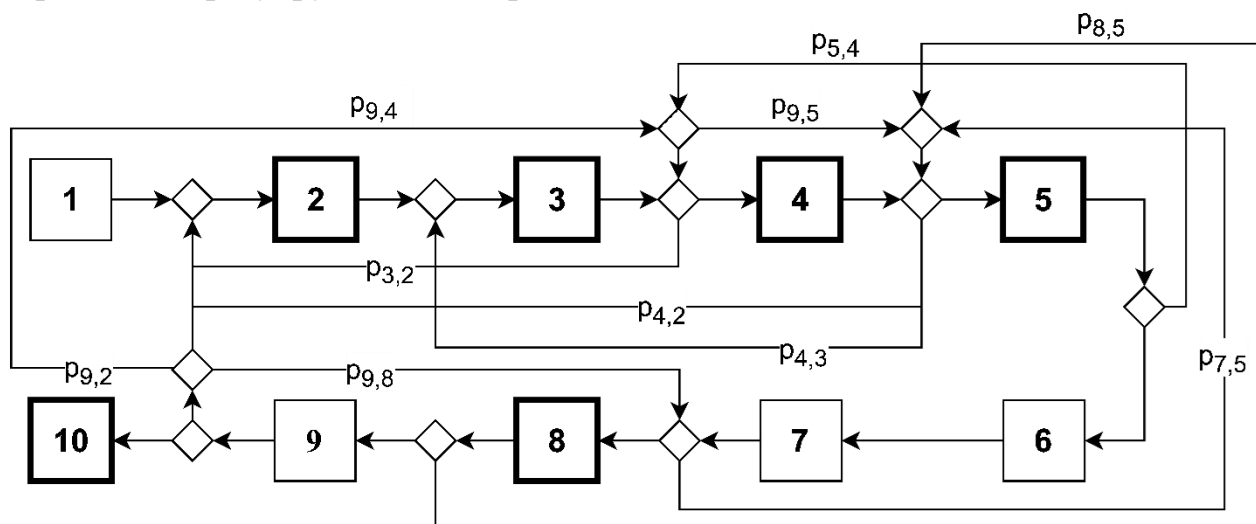


Рис. 1. Этапы подготовки производства сборки крупногабаритных изделий
 1 – разработка КД, 2 – технологический контроль и отработка на технологичность, 3 – разработка схемы сборки, 4 – разработка технологического маршрута сборки, 5 – разработка ТО сборки, 6 – нормирование ТП,
 7 – оформление ТД, 8 – проектирование участков и рабочих мест, 9 – освоение и отладка ТП, 10 – техническое обучение и инструктаж персонала.

р4,3 – возврат к схеме сборки необходим, если установленная маршрутом последовательность этапов вступает в противоречие с иерархической структурой изделия, например, когда маршрут предполагает сборку узла, который, согласно схеме, является частью другого, уже собранного на предыдущем этапе, узла; р5,4 – возврат к маршруту сборки требуется, если при детальном проектировании операций выясняется, что запланированные в маршруте укрупненные этапы нереализуемы как единая операция из-за технологических ограничений (нехватки позиций, необходимости промежуточного контроля) и должны быть пересмотрены; р7,5 – возврат к операционной технологии инициируется в процессе оформления документации, когда становится ясно, что содержание операций не структурировано, не формализуемо или противоречит стандартам оформления, что делает невозможным создание четких и однозначных инструкций для производства; р8,5 – возврат к операционной технологии происходит при организации рабочих мест, когда выявляется, что запроектированные операции не могут быть размещены на одной позиции или требуют нестандартной, непредусмотренной ранее оснастки, что влечет за собой изменение их содержания и состава переходов; р9,8 – возврат к организации рабочих мест случается в ходе отладки, если практика показывает, что планировка участка, размещение оснастки или грузопотоки создают препятствия для безопасного и эффективного монтажа (например, нет зоны для предварительной подготовки крупногабаритного узла); р9,5 – возврат к операционной технологии возникает в процессе отладки, когда конкретная операция, будучи формально корректной, на практике невыполнима или ведет к браку из-за ошибочно выбранного метода, режима или недоучета реальных усилий, деформаций и допусков при работе с крупными деталями; р9,4 – возврат к маршруту сборки необходим на этапе отладки, если выясняется, что

принятая последовательность этапов ведет к существенным производственным простоям (например, из-за ожидания узла, который монтируется на другой позиции) или к повторным перемещениям тяжелых компонентов, что требует реструктуризации маршрута; р_{9,2} – возврат к отработке на технологичность (и далее, к конструктору) – это крайняя мера, которая применяется, если в ходе отладки обнаруживаются неустраняемые в рамках текущих технологических процессов конструктивные недостатки, делающие сборку невозможной (например, «закрытые» объемами сварные швы, нестыковка базовых поверхностей после монтажа).

Таким образом вероятность успешного прохождения всех этапов подготовки производства (P) будет иметь следующий вид:

$$P = \prod_{i=1}^M (1 - p_{i,j}),$$

где M – количество этапов подготовки производства; p_{ij} – вероятности перехода с i -этапа на j -этап, в случае возникновения ошибки.

Маршрутная матрица P будет выглядеть следующим образом:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{3,2} & 0 & 1-p_{3,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{4,2} & p_{4,3} & 0 & 1-(p_{4,2}+p_{4,3}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{5,4} & 0 & 1-p_{5,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{7,5} & 0 & 0 & 1-p_{7,5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{8,5} & 0 & 0 & 0 & 1-p_{8,5} & 0 \\ 0 & p_{9,2} & 0 & p_{9,4} & p_{9,5} & 0 & 0 & p_{9,8} & 0 & 1-(p_{9,2}+p_{9,4}+p_{9,5}+p_{9,8}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где строки соответствуют этапам S_i , а столбцы следующим этапам S_j .

С целью оценки длительности подготовки производства целесообразно разделить указанные этапы на 6 групп:

1. Этапы подготовки производства, выполняемые непосредственным инженером технологами на своих рабочих местах (этапы с 1 по 7) – T_9 .

2. Этап организации производства и рабочих мест (8 этап) в процессе которого определяется последовательность выполнения операций сборки на рабочих местах – T_{pm} .

3. Этап внедрения и отладки технологического процесса (9 этап), в процессе которого постоянное участие инженера-технолога не требуется, и он может быть занят выполнением последующих заданий – T_0 .

4. Этап обучения персонала (10 этап), который также не требует постоянного участия инженера-технолога – $T_{об}$.

5. Этапы подготовки производства, выполняемые повторно в следствии возникновения ошибок и недоработок – $T_{ос}$.

Помимо указанных затрат времени, следует учесть, что в процессе подготовки производства присутствуют перерывы, связанные с режимом работы предприятия (нерабочие смены, выходные и праздничные дни) – $T_{п}$.

Таким образом, длительность подготовки производства можно представить как сумму времен, затрачиваемых на выполнение этапов подготовки производства:

$$T_{\text{пп}} = T_{\text{э}} + T_{\text{ос}} + T_{\text{рм}} + T_{\text{о}} + T_{\text{об}} + T_{\text{п}},$$

где $T_{\text{э}}$ – время выполнения этапов подготовки производства; $T_{\text{ос}}$ – время повторного прохождения этапов подготовки производства (время, затрачиваемое на обратные связи); $T_{\text{рм}}$ – время на организацию операций сборки; $T_{\text{о}}$ – время на отладку технологического процесса на рабочих местах; $T_{\text{об}}$ – время на обучение персонала; $T_{\text{п}}$ – время перерывов, связанного с режимом работы предприятия.

Особенности организации подготовки производства и сборки крупногабаритных изделий можно представить в виде коэффициентов, уменьшающих время выполнения этапов, указанных в выражении: k_1 – коэффициент, учитывающий уменьшение времени подготовки производства за счёт снижения влияния конструктивно-технологической сложности изделия при пространственной проработке; k_2 – коэффициент, учитывающий уменьшение времени подготовки производства при недостаточной квалификации персонала; k_3 – коэффициент, учитывающий уменьшение времени за счёт технического оснащения рабочих мест современными цифровыми инструментами, включая VR.

С учетом представленных коэффициентов, выражение можно записать в следующем виде:

$$T_{\text{ппп}} = K (T_{\text{э}} + T_{\text{ос}} + T_{\text{рм}} + T_{\text{об}} + T_{\text{о}}) + T_{\text{п}},$$

где K – общий коэффициент, уменьшения времени: $K = k_1 k_2 k_3$.

Представив временные составляющие уравнения как сумму времени, затрачиваемого на выполнение операций этапа подготовки производства и времени простоя в очереди, а также учитывая вероятностную природу обратных связей можно получить следующее выражение:

$$T_{\text{пп}} = K \left[\sum_{i=1}^M (t_{qi} + t_i) + \sum_{n=0}^N (p_{i,j})_n \sum_{i=1}^{M'} (t_{qi} + t_i)_n + T_{\text{об}} \right] + T_{\text{п}},$$

$$i = 1, \dots, M, \quad n = 0, \dots, N, \quad 1 \leq j \leq i - 1,$$

В Главе 3 представлена разработка, экспериментальное обоснование и имитационное моделирование методологии применения инструмента виртуальной реальности для повышения эффективности подготовки производства. Было создано специализированное программно-аппаратное решение на базе платформы Unity3D и модуля SteamVR, обеспечивающее интерактивную сборку-разборку цифровых моделей крупногабаритных узлов в натуральном масштабе. Ключевой функционал инструмента включает планирование последовательности операций, визуализацию траекторий перемещения деталей, контроль ориентации и углов отклонения, а также автоматическое выявление коллизий и несовпадений, что позволяет проводить глубокий пространственный анализ и верификацию технологичности на ранних этапах проектирования.

Для создания имитационной модели был разработан алгоритм сбора данных по ключевым параметрам процесса подготовки производства (Рис. 2). На основе алгоритма проводились эксперименты, включающие метод экспертных оценок на основе создания и проведения опроса специалистов, а также

контролируемые эксперименты с применением инструмента VR.

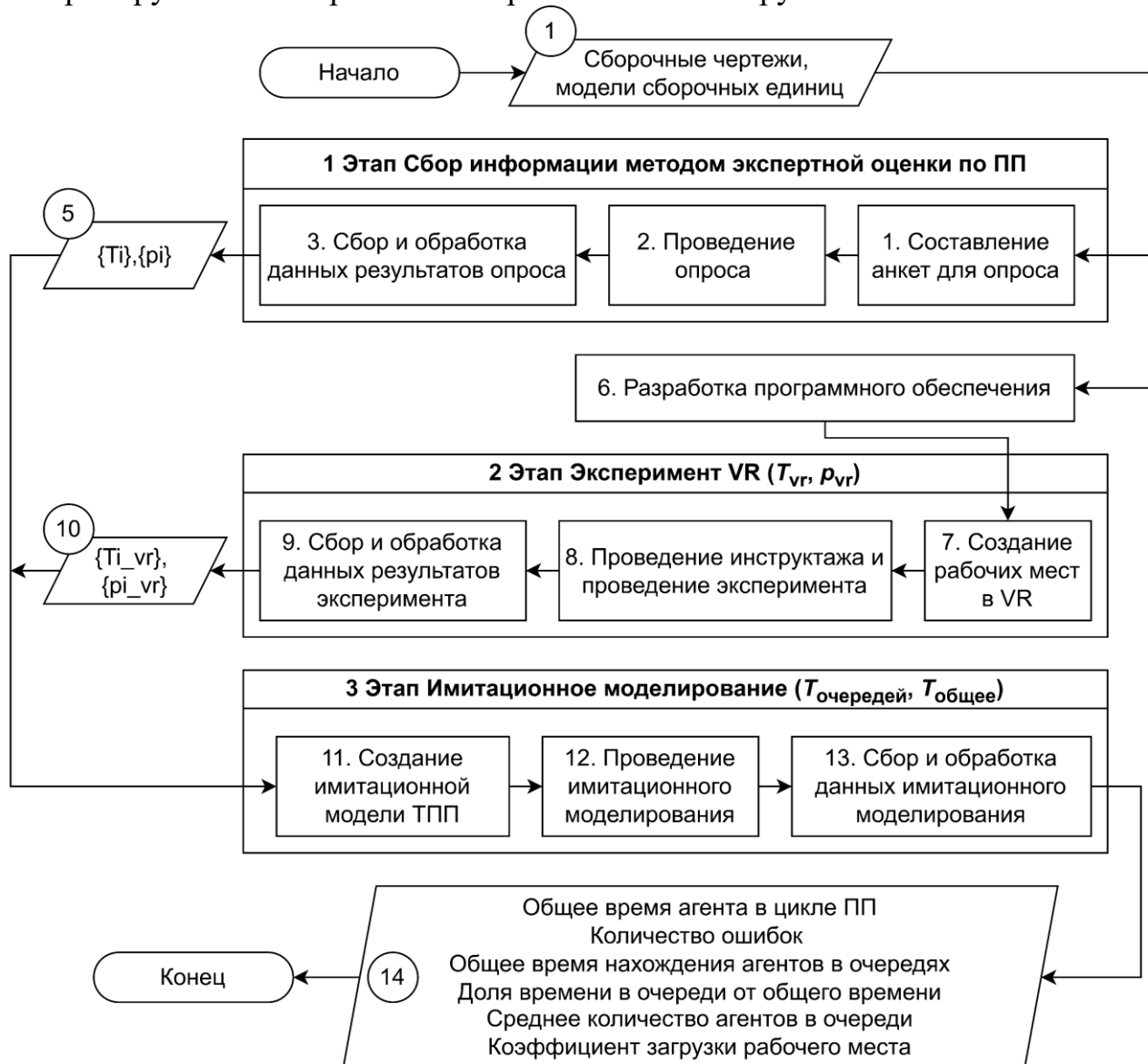


Рис. 2. Алгоритм проведения экспериментов для определения ключевых параметров подготовки производства

Процесс проведения экспериментов был организован в соответствии с представленным алгоритмом. Исследование преследовало цель получить сопоставимые исходные данные о двух подходах к подготовке производства: традиционном и с применением инструментов виртуальной реальности. Для этого работа была разделена на два ключевых направления.

Первое направление было посвящено сбору данных о традиционном процессе подготовки производства. Использовался метод экспертных оценок, в рамках которого проводились структурированные опросы и интервью с инженерами-технологами. Эксперты предоставляли информацию о типовой продолжительности выполнения всех основных этапов подготовки производства, от анализа исходных данных до оформления документации. Особое внимание уделялось сбору статистики о частоте и типах ошибок, выявляемых на каждом этапе, которые впоследствии приводят к необходимости обратных связей и переделок.

Второе направление включало проведение контролируемых экспериментов с использованием виртуальной реальности. Для этого была специально разработана интерактивная VR-программа, в среде которой моделировались задачи

различных этапов подготовки производства. Группа технологов выполняла в этой среде комплекс заданий, аналогичных тем, что рассматривались в опросе экспертов. В ходе экспериментов осуществлялся детальный хронометраж, фиксация всех выявленных коллизий и отклонений, а также сбор обратной связи от участников о процессе работы.

Результаты показали статистически значимое сокращение общего времени разработки технологического маршрута на 14,6% при использовании VR, причем наибольший эффект (сокращение на 17-27%) наблюдался на операциях, связанных с пространственным анализом и проверкой на собираемость. Одновременно было зафиксировано снижение количества содержательных ошибок в предложенных маршрутах на 11%.

На основе полученных данных была разработана имитационная модель в среде AnyLogic (Рис. 3). В качестве агентов на входе модели подаются 20 заданий в виде конструкторской документации на технологическое проектирование изделий различной номенклатуры. В модели не учитываются затраты времени на конструкторскую и организационную подготовку, а производится сравнение времени пребывания задания в рамках подготовки производства с использованием VR-инструмента и без.

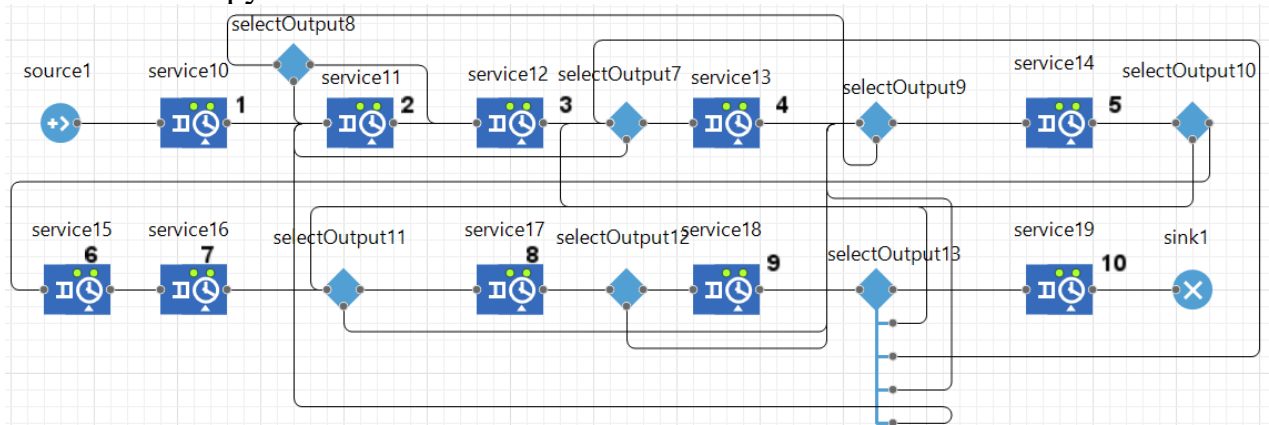


Рис. 3. Схема имитационной модели подготовки производства в среде AnyLogic
 1 – разработка конструкторской документации, 2 – анализ исходных данных и обработка на технологичность, 3 – разработка технологической схемы сборки, 4 – разработка технологического маршрута сборки, 5 – разработка технологических операций, 6 – нормирование технологического процесса, 7 – оформление технологической документации, 8 – организация производства и рабочих мест, 9 – внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, 10 – обучение персонала.

На Рис. 4 представлена блок-схема алгоритма функционирования имитационной модели, разработанный на основании зависимостей и данный алгоритм позволяет собрать статистику по движениям агентов (заявок на выполнение подготовки производства) с учетом потерь времени на возникновения обратных связей (ошибок) и доработку заявок.

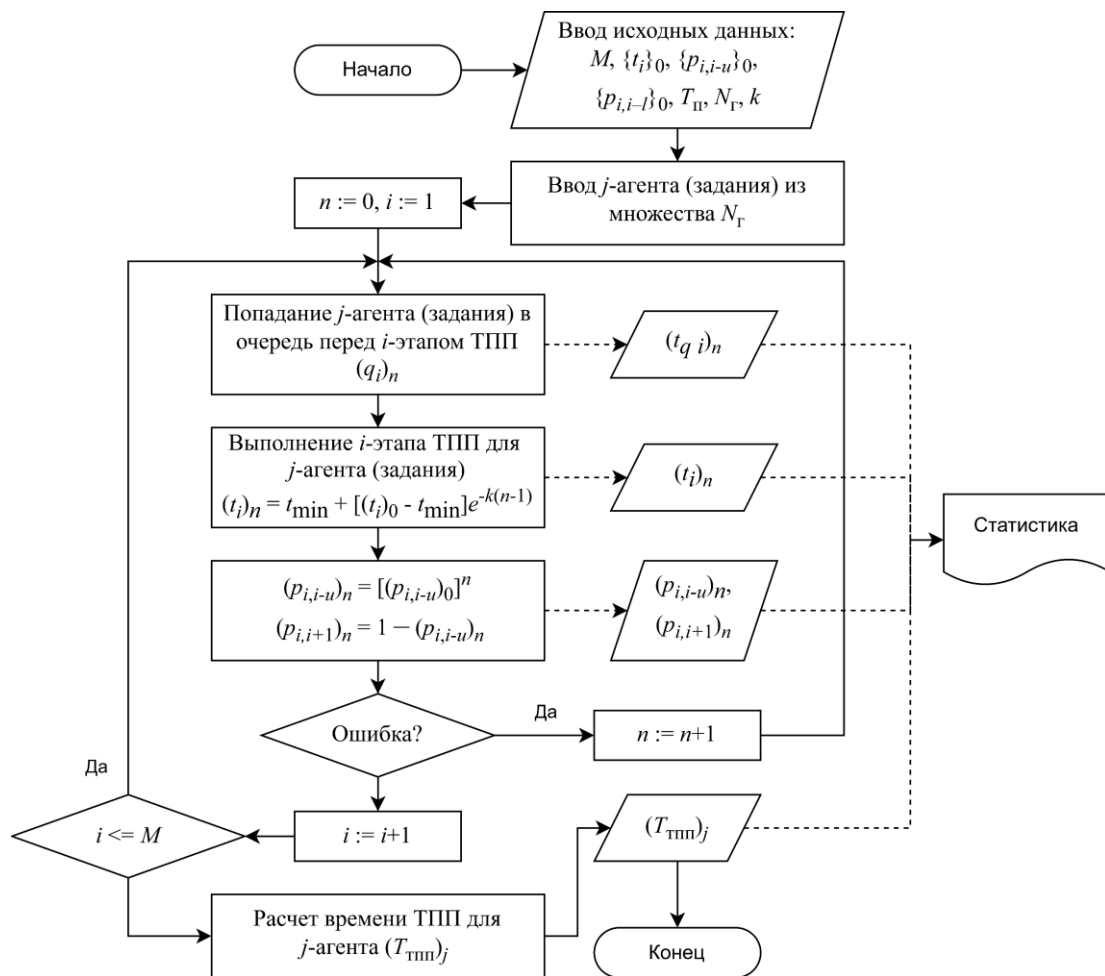


Рис. 4. Алгоритм функционирования имитационной модели

По результатам имитационного моделирования были получены данные по времени пребывания агента (заявки) на этапах подготовки производства (Рис. 5) и общего времени нахождения агента (заявки) в очередях для двух вариантов организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий: 1) без применения VR-технологии; 2) с применением VR-технологии.

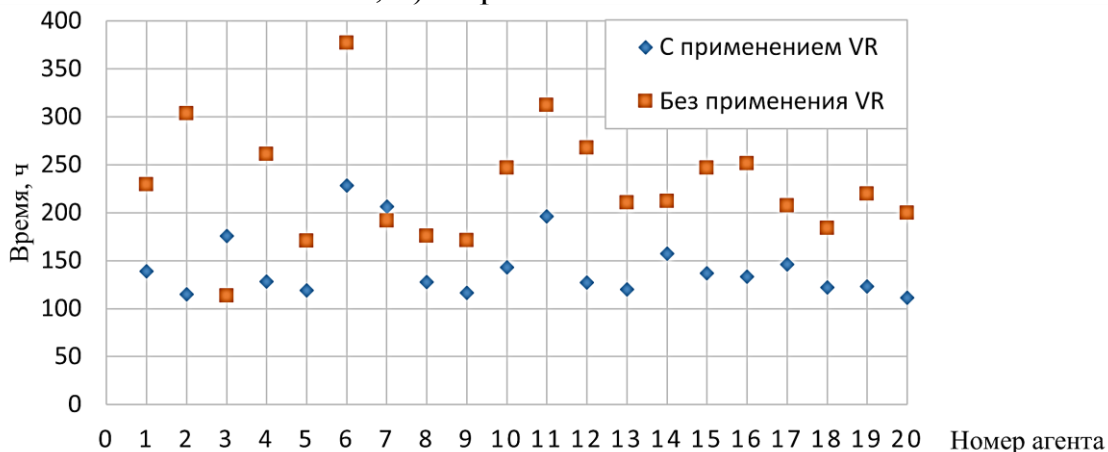


Рис.5. График времени, затрачиваемого агентами на прохождение модели

Из анализа полученных графиков видно: среднее время нахождения агента в системе при использовании VR сокращается на 41 час, что составляет 19% от времени, затрачиваемого на подготовку производства без инструмента VR (Рис. 5), а количество ошибок при прохождении системы уменьшилось на 39%; среднее количество агентов в очереди сократилось на 20%; среднее время агента в очереди снизилось на 6,5 часов, что составило порядка 40% от затрат времени

в очереди агентов, обрабатывающихся без использования VR; доля времени агентов в модели сократилась при использовании VR с 11% от общего времени обработки в модели до 9% по сравнению с заданиями, проходящими обработку без использования VR.

В Главе 4 представлена практическая реализация разработанного подхода, включающая методику внедрения и производственную апробацию. Методика внедрения VR-инструмента в процессы подготовки производства представляет собой алгоритм (Рис. 6) ключевыми шагами которого являются: интеграция VR-моделирования в регламенты проверки технологичности и сборки, создание библиотеки моделей типовых узлов, а также обязательное обучение персонала – технологов и сборщиков – работе в среде виртуальной реальности. Этот процесс обеспечивает встраивание нового инструмента в процесс подготовки производства, минимизируя операционные риски.

В рамках апробации на предприятии была создана цифровая модель сборочного узла хоппера, в среде VR отработаны операции монтажа крупногабаритных элементов, проверены зоны доступа для сборщиков и инструмента, а также выявлены и устранены скрытые коллизии траекторий перемещения. Технологи и конструкторы совместно проводили виртуальную верификацию, что позволило сократить количество итераций согласования и существенно доработать технологическую документацию до начала сборки.

В рамках разработанной методики, первоочередной задачей является формирование аппаратно-программной инфраструктуры, обеспечивающей бесперебойное взаимодействие между системами автоматизированного проектирования и системы VR. Этот этап включает подбор оборудования и организацию рабочих мест. Особое внимание уделяется настройке процессов обмена данными, позволяющих осуществлять импорт цифровых моделей в виртуальную среду без потери ассоциативных связей и конструктивных параметров.

Последующим этапом является разработка методического обеспечения, включающего создание цифровых моделей ключевых компонентов продукции и формализацию процедур верификации. Для каждого узла формируются сценарии проверки, направленные на выявление потенциальных ошибок сборки, коллизий и анализа технологичности конструкции. Параллельно осуществляется подготовка персонала через обучение работе с VR системами, где особый акцент делается на отработке навыков идентификации возможных отклонений от требований технологической документации.

Завершающим этапом методики является интеграция VR-инструмента в процесс подготовки производства.

Практическая проверка разработанной методики проводилась в условиях действующего производства, ориентированного на выпуск крупногабаритных сварных конструкций для вагоностроения. Внедрение методики позволило перейти от выявления дефектов на этапе сборки к их системному устранению на стадии подготовки производства, что тем самым позволило сократить длительность подготовки производства на 15%. Наиболее частыми ошибками являлись неправильное позиционирование элементов несущей каркаса и листовой обшивки, а также отклонения в последовательности установки сборочной оснастки.

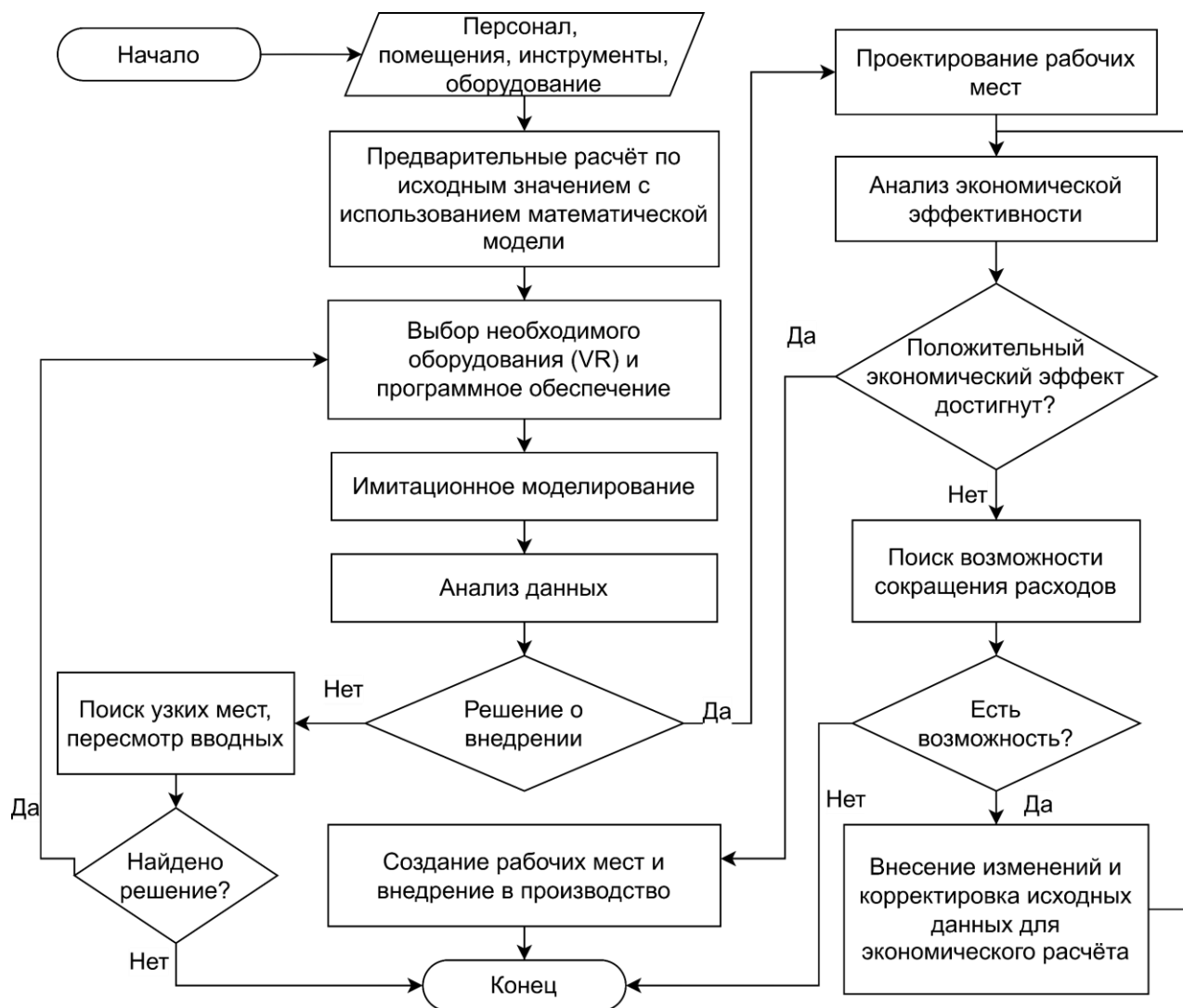


Рис. 6. Алгоритм внедрения VR-инструмента в процесс подготовки производства

Помимо этого, благодаря корректному позиционированию компонентов было достигнуто равномерное прилегание деталей по всему контуру сварных соединений, что является критически важным условием для формирования швов с заданными прочностными характеристиками.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. В диссертационной работе решена научно-техническая задача сокращения длительности подготовки производства крупногабаритных изделий посредством имитационного моделирования с использованием технологий виртуальной реальности, имеющая существенное значение для организации цифрового машиностроительного производства.

2. На базе разработанной схемы этапов и их взаимосвязей создана математическая модель для оценки длительности подготовки производства. Модель имеет вероятностно-статистическую природу и формализует процесс как маршрут с условными переходами между этапами. Ключевыми параметрами модели являются вероятности возникновения ошибок и соответствующих обратных связей (возвратов на предыдущие этапы для доработок), а также коэффициенты, учитывающие влияние сложности изделия, квалификации персонала и уровня технологического оснащения.

3. Для практической реализации математической модели и оценки

временных затрат при различных сценариях был разработан вычислительный алгоритм и на его основе построена имитационная модель в среде AnyLogic. Модель реализует логику вероятностных переходов, учитывает образование очередей на этапах и фиксирует ключевые метрики: общее время цикла, количество итераций (обратных связей) и время простоя заданий. Этот инструмент позволил проводить виртуальные эксперименты по сравнительному анализу эффективности традиционного процесса и процесса, модернизированного с применением VR-технологий.

4. Для верификации гипотезы о положительном влиянии VR проведен комплекс экспериментальных исследований, включавший сбор экспертных оценок и серию контролируемых экспериментов с использованием разработанного VR-инструмента. Результаты экспериментов показали статистически значимое улучшение ключевых показателей: время разработки технологического маршрута сборки сократилось на 14,6%, а количество содержательных ошибок в предлагаемых решениях снизилось на 11% по сравнению с традиционным методом, основанным на работе с 2D-документацией и CAD-моделями на экране.

5. Разработана методика внедрения инструментов виртуальной реальности в действующий процесс подготовки производства. Методика представляет собой пошаговый алгоритм, включающий этапы предпроектного анализа (аудит процессов, выбор пилотного изделия), интеграции VR-верификации в регламенты, создания библиотеки цифровых моделей типовых узлов, обучения персонала (технологов и сборщиков) и настройки обмена данными между CAD-системами и VR-средой.

6. Разработанный научно-методический комплекс (модель, инструмент VR, методика внедрения) успешно апробирован в условиях реального машиностроительного производства – при подготовке производства крупногабаритных конструкций. Внедрение подтвердило практическую эффективность: использование VR для виртуальной верификации сборки позволило выявить и устранить на этапе проектирования коллизии траекторий перемещения, оптимизировать планировку рабочих мест и сократить количество итераций согласования между конструкторскими и технологическими службами.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Повышение эффективности технологической подготовки производства машиностроительных изделий с использованием технологий виртуальной реальности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 3-2(125). С. 382-388. (0,44 п.л./0,4 п.л.).

2. Кудрявцев И.В., Кутин А.А., Кислова А.В. Имитационное моделирование технологических процессов сборки крупногабаритных изделий с применением виртуальной реальности // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2026. – Т. 29, № 1. С. 27-34.(0,5 п.л./0,45 п.л.).

3. Кудрявцев И.В., Кутин А.А., Лутьянов А.В. Повышение качества крупногабаритных изделий при внедрении VR-инструмента в процессы технологической подготовки производства // Стандарты и качество. 2026. №4. С.50-54.(0,31 п.л./0,28 п.л.).

4. Кудрявцев И.В., Лим А.А., Кутин А.А. Повышение эффективности

процессов подготовки и обучения сборочного персонала при использовании иммерсивных систем // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2026. Т. 28, №2. С.127-132 (0,44 п.л./0,3 п.л.).

Научные статьи в других журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

5. Лим А.А., Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Разработка инструмента смешанной реальности для реализации процесса сопряжения поверхностей деталей при сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2024. № 7. С. 294-298. (0,3 п.л./0,2 п.л.).

Научные статьи в других журналах, не входящих в перечень рецензируемых изданий ВАК Минобрнауки России

6. Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Применение инструмента VR в качестве средства визуализации сборки крупногабаритных изделий на машиностроительном производстве // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2024): Международная научно-техническая конференция (02–08 декабря 2024). Москва: МИРЭА - Российский технологический университет. 2024. С. 424-427. (0,2 п.л./ 0,18 п.л.).

7. Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Использование систем виртуальной реальности для повышения качества изготовления изделий на машиностроительном производстве // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024): Международная научно-технической конференция (12–16 апреля 2024) Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. С. 205-208. (0,2 п.л./0,18 п.л.).

8. Лим, А.А., Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Повышение эффективности процесса ввода в эксплуатацию оборудования за счет организации рабочего пространства с применением технологий виртуальной реальности // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: IX Международная научная конференция, посвященная 135-летию со дня рождения профессора Хрущева Михаила Михайловича (11–13 ноября 2025) Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, 2025. С. 196-197. (0,12 п.л./0,1 п.л.).

9. Лим, А. А., Кудрявцев И.В. Повышение эффективности сборочных процессов с применением инструмента виртуальной и дополненной реальности // Современные технологии сборки: IX Международный научно-технический семинар (16–17 октября 2025) Москва: Московский политехнический университет, 2025. С. 78-86. (0,3 п.л./0,15 п.л.)

Результаты интеллектуальной деятельности

10. Программа иммерсивного обучения и сопровождения сборочного процесса в машиностроении «Oracle» : свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2026617859 Российская Федерация / И.В. Кудрявцев, А.А. Лим, А.А. Кутин ; правообладатели И.В. Кудрявцев, А.А. Лим, А.А. Кутин. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20.03.2026 ; опубл. 20.03.2026, ОБПБТ. – 2026. – № 3.

11. Программа организации технологической подготовки производства и сборки крупногабаритных изделий «Атлант» : свидетельство о гос. регистрации прогр. для ЭВМ № 2026619244 Российская Федерация / И.В. Кудрявцев, А.А. Лим, А.С. Краско ; правообладатели И.В. Кудрявцев, А.А. Лим, А.С. Краско. – Зарегистрировано 01.04.2026 ; опубл. 01.04.2026, Бюл. № 4. – 2026. – № 4.