

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МИРЭА – РОССИЙСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук



Научный руководитель:
д.т.н., профессор Кутин А.А.

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение.....	5
Глава 1. Проблема сокращения сроков подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий.....	12
1.1. Анализ особенностей организации подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий.....	12
1.2. Анализ существующих подходов к разработке технологической документации и организации производства крупногабаритных изделий	21
1.3. Обоснование применения технологии виртуальной реальности при организации подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	25
1.3.1. Анализ современных иммерсивных технологий	25
1.3.2. Выбор технологии для решения задачи сокращения сроков подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	34
1.4. Анализ работ в области виртуальной реальности и имитационного моделирования применительно к подготовке производства.....	36
1.5. Проблема применения VR-инструментов при организации подготовки производства изделий машиностроительных производств	40
Выводы по Главе 1	41
Глава 2. Разработка математической модели оценки длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	42
2.1. Исследование влияния организационных параметров на длительность подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	42
2.2. Разработка математической модели оценки длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	50
2.3. Разработка алгоритма функционирования имитационной модели для оценки длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий.....	58

Выводы по Главе 2	63
Глава 3. Экспериментальные исследования влияния VR-инструмента на длительность технологической подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий_	64
3.1. Последовательность проведения экспериментальных исследований по оценке длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий.....	64
3.2. Оценка длительности этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий без применения VR-инструмента.....	68
3.3. Экспериментальные исследования по оценке длительности этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий с применением VR-инструмента.....	70
3.3.1. Разработка программного обеспечения для выполнения экспериментов по оценке длительности выполнения этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	70
3.3.2. Проведение экспериментальных исследований по оценке длительности этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий с применением VR-инструмента	74
3.4. Проведения имитационного моделирования подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	74
3.4.1. Имитационное моделирование подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием VR-инструмента	74
3.4.2. Разработка имитационной модели оценки длительности подготовки производства	76
3.4.3. Анализ результатов имитационного моделирования подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	81
Выводы по Главе 3	83
Глава 4. Разработка методики внедрения и организации подготовки производства с использованием VR-инструмента_.....	85

4.1. Разработка алгоритма методики внедрения и организации подготовки производства с использованием VR-инструмента	85
4.2. Оценка числа рабочих мест инженеров-технологов при организации подготовки производства с применением VR-инструментов	89
4.3. Разработка типовых планировок рабочих мест персонала, осуществляющего подготовку производства с применением VR-инструмента	91
4.3.1. Критерии проектирования рабочих мест.....	92
4.3.2. Типовая планировка рабочего места инженера-технолога.....	94
4.3.3. Типовая планировка рабочего места обучаемого сборщика	97
4.4. Оценка экономической эффективности внедрения VR-инструмента при организации подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий	101
4.5. Внедрение VR-инструмента при организации подготовки производства (сборки) хопперов	115
Выводы по Главе 4	118
Общие выводы и заключение	119
Список литературы	121
Приложение	135

ВВЕДЕНИЕ

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, formalизованных 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., Кушнарера 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 реально-

сти 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:

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.

Разработана математическая модель оценки длительности подготовки производства крупногабаритных изделий, учитывающая вероятности возникновения ошибок и параметры организации рабочих мест.

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:

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.

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.

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 Хрущева 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.

ГЛАВА 1.**ПРОБЛЕМА СОКРАЩЕНИЯ СРОКОВ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА
(СБОРКИ) КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ****1.1. Анализ особенностей организации подготовки производства (сборки)
крупногабаритных изделий**

Понятие «крупногабаритное изделие» в машиностроении не имеет единого нормативного определения, однако в технической литературе и производственной практике под ним понимают продукцию, отдельные составные части или сборочные единицы которой характеризуются значительными линейными размерами (как правило, превышающими 3-5 м в одном или нескольких измерениях), большой массой (от нескольких тонн), а также сложной пространственной конфигурацией, требующей особых условий транспортировки, базирования и сборки [10, 52, 63]. В ряде отраслей существуют нормативные документы, устанавливающие критерии отнесения изделий к крупногабаритным (например, для железнодорожного подвижного состава – ГОСТ 9238-2013 «Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений»). Такие изделия часто изготавливаются в единичном или мелкосерийном производстве, а их технологическая подготовка сопряжена с повышенными трудозатратами и длительностью [31, 48, 64].

Производство крупногабаритных изделий охватывает широкий спектр отраслей промышленности, каждая из которых предъявляет специфические требования к процессам сборки и их технологическому обеспечению [7, 52]. Ниже рассмотрены основные отрасли, в которых крупногабаритная продукция занимает центральное место, с указанием нормативных документов, регламентирующих параметры изделий и процессы их сборки.

В авиастроении к крупногабаритным элементам относятся фюзеляжи, крылья, хвостовые оперения, гондолы двигателей (Рис. 1.1). Даже для узкофюзеляжных самолетов длина фюзеляжа превышает 30-40 м, размах крыла - 30-50 м, масса планера достигает десятков тонн. Для широкофюзеляжных и транспортных са-

молетов эти параметры значительно выше. Нормативной базой служат авиационные правила (АП-25, FAR-25), ГОСТ Р 56187-2014 (системы менеджмента качества организаций авиационной промышленности), а также отраслевые стандарты ОСТ 1.00001-80 и др., устанавливающие требования к точности сборки и методам контроля [20, 46]. Характерной чертой авиастроения является высокая точность сопряжения агрегатов (доли миллиметра) и применение многочисленных крепежных элементов (клепка, болтовые соединения). Сборка ведется в специальных сборочных приспособлениях - стапелях, обеспечивающих заданное положение агрегатов. Подготовка производства в авиастроении отличается исключительной сложностью: технологические процессы разрабатываются с учетом многовариантности поставок комплектующих, необходимости контроля зазоров, использования лазерной трекинговой и измерительной техники [20, 46, 103].

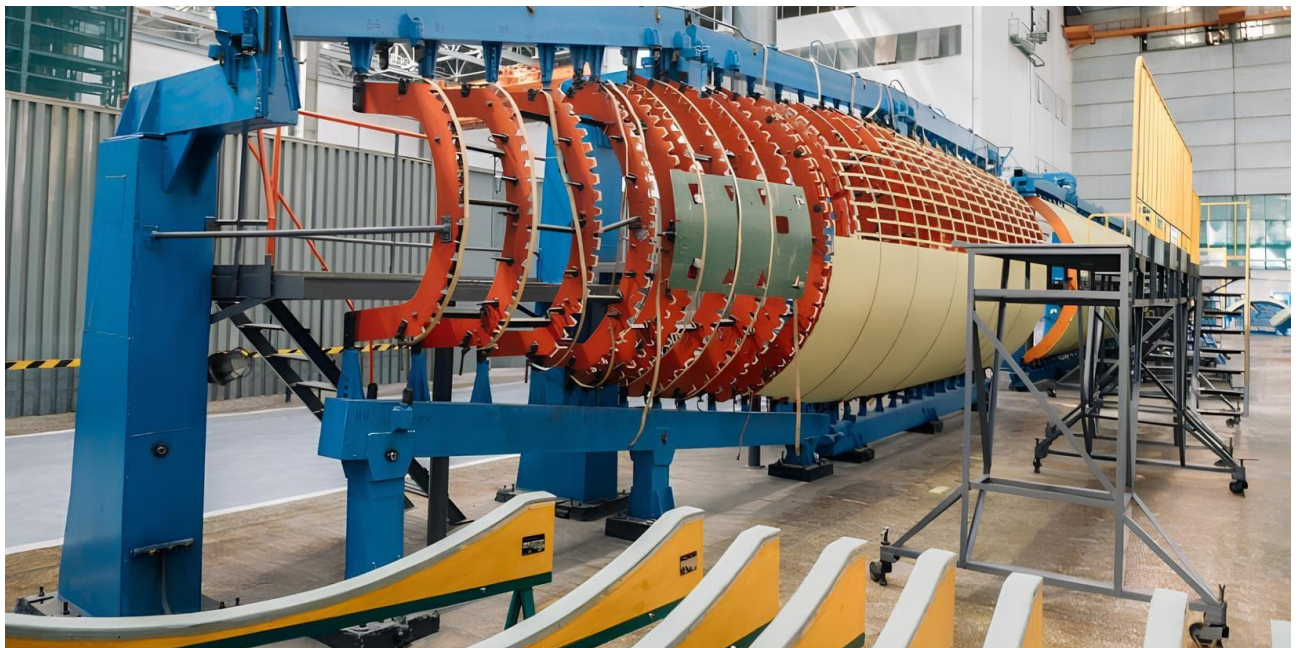


Рис. 1.1. Сборка фюзеляжа самолета ТУ-214

В энергетическом машиностроении крупногабаритными изделиями выступают гидравлические турбины, паровые турбины, генераторы, реакторное оборудование АЭС (Рис. 1.2), ветроэнергетические установки (лопасти длиной до 80...100 м). Диаметр рабочего колеса гидротурбины может превышать 10 м, масса – 300-500 т. Нормативная база включает ГОСТ 24444-87 (турбины гидравлические.

Общие технические условия), ГОСТ Р 54327-2011 (турбины паровые стационарные. Общие технические требования), а также правила Ростехнадзора (НП-001, НП-091) для оборудования АЭС [45, 63]. Сборка турбин и генераторов производится на сборочных ямах или стендах с привлечением тяжелой крановой техники. Подготовка производства в этой отрасли характеризуется повышенными требованиями к протоколированию операций, контролю затяжки резьбовых соединений и термообработки, а также длительностью цикла согласования документации из-за участия надзорных органов (особенно в атомной энергетике) [10].



Рис. 1.2. Монтаж ротора паровой турбины Сургутской ГРЭС-1

В секторе крупного машиностроения, объединяющем производство карьерной и специальной техники (Рис. 1.3), горно-шахтного, строительного-дорожного, сельскохозяйственного и металлургического оборудования, крупногабаритные изделия занимают центральное место [52]. К ним относятся карьерные самосвалы

грузоподъемностью 100...400 т (длина до 15...20 м, высота до 8...10 м), экскаваторы, бульдозеры, автобусы особо большой вместимости, проходческие щиты, драги, большие комбайны, краны, асфальтоукладчики, прокатные станы, конвертеры и другое тяжелое оборудование. Нормативные требования для этой продукции устанавливаются специализированными документами: в автомобильном сегменте – ГОСТ Р 41.36-2004 (Единообразные предписания, касающиеся крупногабаритных транспортных средств) и ГОСТ 31670-2012 (самосвалы карьерные. Общие технические условия); в горном машиностроении – ГОСТ 12.2.107-85 «ССБТ. Машины горно-шахтные. Общие требования безопасности»; в металлургическом машиностроении – ГОСТ 27258-87 «Машины и оборудование металлургические. Общие требования безопасности»; а также отраслевые стандарты и технические условия для конкретных типов изделий [51, 56].

Характерной чертой производства крупногабаритных изделий является широкая номенклатура при малых объемах выпуска. В отличие от массового автомобилестроения или приборостроения, где один типоразмер изделия может выпускаться десятками тысяч единиц, в отраслях, рассмотренных выше, объемы выпуска составляют от единиц до нескольких сотен изделий в год, а часто и вовсе ограничиваются одним-двумя экземплярами [31, 48]. Так, вагоностроительные заводы выпускают различные модели грузовых вагонов (хопперы, полувагоны, цистерны) сериями по 50–200 единиц, но каждая серия может иметь конструктивные отличия под конкретного заказчика. В авиастроении годовой выпуск самолетов одного типа редко превышает 30–50 единиц, а в судостроении и ракетно-космической отрасли нередко случаи единичного производства [64, 101].

Характерной чертой производства крупногабаритных изделий является широкая номенклатура при малых объемах выпуска. В отличие от массового автомобилестроения или приборостроения, где один типоразмер изделия может выпускаться десятками тысяч единиц, в отраслях, рассмотренных выше, объемы выпуска составляют от единиц до нескольких сотен изделий в год, а часто и вовсе ограничиваются одним-двумя экземплярами. Так, вагоностроительные заводы выпускают различные модели грузовых вагонов (хопперы, полувагоны, цистерны) сериями по

50–200 единиц, но каждая серия может иметь конструктивные отличия под конкретного заказчика. В авиастроении годовой выпуск самолетов одного типа редко превышает 30–50 единиц, а в судостроении и ракетно-космической отрасли не редки случаи единичного производства.



Рис. 1.3. Сборка передней подвески БелАЗ

Такая специфика порождает ряд существенных последствий для организации подготовки производства:

Высокая трудоемкость разработки технологической документации. Для каждого нового типоразмера или даже модификации требуется создавать значительный объем технологической документации (маршрутные и операционные карты, схемы сборки, ведомости оснастки), поскольку унифицировать процессы в условиях уникальности изделий удастся лишь частично. По данным [72, 94], затраты на подготовку в мелкосерийном производстве могут составлять до 40–60 % общих затрат на подготовку производства, тогда как в массовом эта доля существенно ниже.

Необходимость гибких перенастраиваемых технологических процессов. Производственные участки должны быть способны быстро перестраиваться с одного

изделия на другое. Это требует применения универсального оборудования, быстроменяемой оснастки, модульных сборочных стендов. Однако для крупногабаритных изделий такие стенды сами являются сложными инженерными объектами, и их переналадка занимает значительное время.

Ограниченные возможности типизации и стандартизации. Хотя существуют типовые технологические процессы (например, для сварки рам вагонов или сборки фюзеляжей), доля оригинальных технологических решений в каждом новом проекте остается высокой. Это подтверждается работами [31, 72], где показано, что коэффициент технологической преемственности в единичном и мелкосерийном производстве редко превышает 0,4-0,5.

Повышенные требования к квалификации разработчиков техпроцессов и сборщиков. При частой смене объектов труда персонал должен обладать широким кругозором и навыками работы с различными типами конструкций, что усложняет процесс обучения и увеличивает время ввода в должность.

Таким образом, большая номенклатура и малые объемы выпуска предопределяют высокую «штучную» трудоемкость подготовки производства, которая становится одним из главных факторов общей длительности цикла «разработка – производство».

В условиях мелкосерийного производства крупногабаритных изделий складывается парадоксальная ситуация: временные затраты на подготовку производства нередко превышают длительность непосредственно изготовления и сборки продукции. Данное явление объясняется несколькими причинами, тесно связанными с конструктивными особенностями крупногабаритных объектов и организацией их производства.

Анализ структуры крупногабаритных изделий показывает, что доля оригинальных сложных деталей в них относительно невелика: основу составляют простые по конструкции элементы (листовые детали, профили, стандартные крепежные изделия), которые могут быть изготовлены сравнительно быстро. В то же время сборочные процессы – сварка, клепка, механическая сборка с подгонкой – занимают значительную долю производственного цикла и требуют тщательной

предварительной проработки. Как отмечается в работах [8, 9, 75], для таких изделий трудоемкость сборки может достигать 50-70 % общей трудоемкости изготовления, при этом разработка технологии сборки оказывается одним из самых продолжительных этапов подготовки производства, особенно при отсутствии аналогов.

Дополнительную сложность вносит необходимость обеспечения высокой точности пространственного сопряжения крупногабаритных узлов (секций судов, фюзеляжей, рам вагонов), что достигается с использованием сложных стапелей и прецизионных средств измерений. Ошибки, допущенные на этапе разработки схем сборки или операционной технологии, как правило, выявляются только при опытной сборке, что вызывает возврат к предыдущим этапам и увеличивает общую длительность подготовки производства. Согласно данным [4, 12], доля итерационных циклов в технологической подготовке может достигать 30-40 % от общего времени.

Следует также учитывать, что подготовка включает не только создание документации, но и обучение кадров. Сборка крупногабаритных изделий сопряжена с повышенной опасностью, необходимостью работы с тяжелым инструментом и грузоподъемной техникой, поэтому обучение операторов, сварщиков, слесарей-сборщиков, а также освоение ими новой документации занимает недели и месяцы. По оценкам, приведенным в [10, 13, 73], затраты времени на обучение и инструктаж в мелкосерийном производстве могут составлять до 15-20 % общей длительности подготовки производства.

Наряду с перечисленными факторами существенное влияние на продолжительность подготовки производства оказывает недостаточная автоматизация технологического проектирования. Несмотря на внедрение CAD/PDM/PLM-систем, многие этапы (разработка маршрутов, операционных карт, проектирование оснастки) остаются слабо автоматизированными и выполняются вручную, что существенно увеличивает сроки. Исследования [6, 14] показывают, что полная автоматизация подготовки производства возможна лишь для ограниченной номенклатуры, а в условиях единичного и мелкосерийного производства коэффициент автоматизации редко превышает 0,3-0,4. Для наглядного представления соотношения

длительности основных этапов подготовки производства и этапов непосредственного изготовления и сборки предлагается диаграмма временного соотношения (Рис. 1.4).

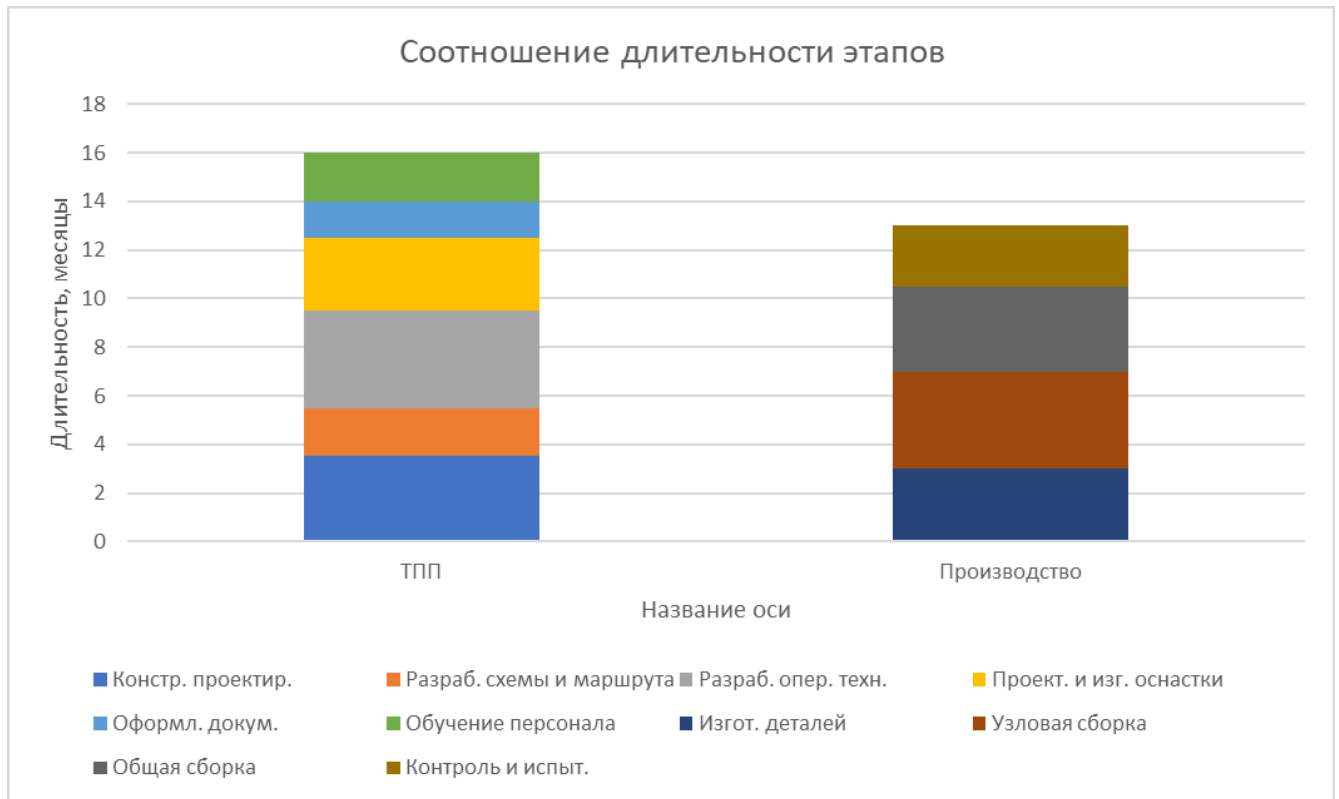


Рис. 1.4. Диаграмма соотношения длительности этапов подготовки производства и изготовления крупногабаритных изделий

По данным, обобщенным из источников [48, 65, 101], для типового крупногабаритного изделия (например, грузового вагона или секции судна) суммарная длительность подготовки производства составляет 55-70 % общей продолжительности цикла «разработка – производство», тогда как собственно изготовление и сборка занимают 30-45 %. Диаграмма наглядно демонстрирует, что этапы разработки операционной технологии и проектирования оснастки, а также обучение персонала, вносят наибольший вклад в общую длительность подготовки производства.

На основе литературных источников была создана обобщенная схема этапов подготовки производства сборки крупногабаритных изделий (Рис. 1.5).



Рис. 1.5. Структурная схема подготовки производства

Анализ структурной схемы подготовки производства также показал, что значительные временные затраты приходятся на этап оформления рабочей документации, в связи с чем внедрение инструмента VR с целью сокращения времени является рациональным решением.

Таким образом, анализ структуры временных затрат подтверждает, что

именно технологическая подготовка, а не собственно производственные процессы, является «узким местом» в общем цикле создания крупногабаритных изделий. Это определяет необходимость поиска эффективных инструментов сокращения сроков подготовки производства, в том числе за счет внедрения инструмента VR, позволяющих интенсифицировать разработку документации, снизить число итераций и ускорить обучение персонала.

1.2. Анализ существующих подходов к разработке технологической документации и организации производства крупногабаритных изделий

Эффективность подготовки производства крупногабаритных изделий в значительной степени определяется качеством и оперативностью разработки технологической документации, а также рациональностью организационных решений. В последние годы опубликован ряд работ, в которых анализируются цифровые инструменты и методы, направленные на совершенствование этих процессов.

Значительный вклад в развитие теории и практики организации подготовки производства внесли труды Пруденского Г.А., Козловского В.Н., Васина С.А., Омельченко И.Н., Бром А.Е., Ставровского М.Е., Кушнарера Л.И., Червякова Л.М. и др. Результаты их исследований позволили формализовать ключевые аспекты производственной логистики, управления качеством и цифровой трансформации предприятий.

Омельченко И.Н., Бром А.Е. и Садыкова А.М. [58] разработали имитационную модель складских процессов в фулфилмент-центре маркетплейса, что стало важным шагом в автоматизации управления материальными потоками при подготовке производства. Авторы предложили методы оценки пропускной способности складских систем и оптимизации размещения запасов, что непосредственно влияет на сокращение времени логистических операций. В совместной работе Омельченко И.Н. и Лазаренко А.Г. [57] сформулированы принципы инженерного проектирования, которые легли в основу системного подхода к организации производственного процесса, обеспечивая согласованность конструкторской и технологической подготовки.

Омельченко И.Н., Бром А.Е. и Сидельников И.Д. [56] предложили критерий эффективности цепей поставок и целевую функцию для оптимизации материально-технического снабжения сложной техники. Данная работа внесла вклад в формализацию задач планирования закупок и распределения ресурсов, что особенно важно для многокомпонентных изделий.

Кушнарев Л.И. и Севостьянова Д.Л. [39] систематизировали методы достижения стабильно высокого качества продукции машиностроения. Авторы обосновали необходимость статистического контроля и управления процессами на этапе подготовки производства, что позволяет снизить количество дефектов до начала серийного выпуска.

Червяков Л.М. с соавторами [96] исследовали концепцию цифрового двойника как инструмента организации производства и управления качеством. Ими показано, как синхронизация виртуальной и физической моделей изделия позволяет сократить итерации при отработке технологических процессов. Третьяков В.А. [55] с соавторами проанализировали экономические аспекты цифровизации и обновления основных фондов, выявив условия эффективного инвестирования в цифровую трансформацию подготовки производства.

Богинский А.И. и Чурсин А.А. [9] рассмотрели применение цифровых моделей для оптимизации производственно-технологических процессов в машиностроении. Авторы обосновали необходимость перехода от традиционных «бумажных» технологий к сквозному цифровому описанию процессов, однако их подход не затрагивает вопросы иммерсивной визуализации и верификации, а также не учитывает специфику крупногабаритных изделий, где пространственная сложность сопряжений требует особых средств анализа.

Поляков Н.А. и Чулкин С.Г. [65] выполнили анализ наиболее значимых информационных технологий для технологической подготовки производства (ТПП) в судостроении. Они сравнили пути развития САПР, их возможности в комплексе с системами поддержки инженерных данных и в составе 3D-платформ. Сформулированы основные задачи, которые должна решать автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП) в условиях внедрения гибких

производственных систем. Вместе с тем авторы не рассматривают интеграцию инструментов виртуальной реальности в процессы верификации сборочных операций и не предлагают методов сокращения итерационных циклов при разработке документации.

В статьях Булавина В.Ф., Булавина Т.Г., Яхричева В.В. и Степанова А.С. [97] детально исследовали внедрение цифровых платформ на средних и малых приборостроительных предприятиях. В первой части обсуждается конструкторский этап: 3D-проектирование, инженерный анализ, создание электронных прототипов узлов. Во второй части рассмотрен технологический этап, где формируется полный пакет технической документации; подробно представлена программа «Вертикаль», обеспечивающая параллельную работу инженеров-технологов в реальном времени. Приведены примеры САМ-приложений для визуализации работы управляющих программ. Однако данные работы ориентированы на приборостроение (относительно компактные изделия) и не учитывают проблемы масштаба, логистики и эргономики, характерные для крупногабаритных изделий. Кроме того, визуализация ограничена экранными средствами CAD/CAM-систем и не использует иммерсивные технологии.

Зяблов О.К., Кочнев Ю.А. и Кочнева И.Б. [24] рассмотрели возможность автоматизации подготовки производства при ремонте судов. Отмечается, что высокая трудоемкость подготовки ремонтной документации (ремонтных ведомостей, актов дефектации, заказов-нарядов) требует больших временных затрат, которые целесообразно снижать. Авторы выделяют дефектацию как один из наиболее трудоемких этапов, детально описывают его внутреннюю структуру и информационные потоки при традиционном подходе и с применением средств автоматизации. Важным выводом является то, что даже частичная автоматизация подготовки организационно-технических документов позволяет сократить время, особенно для объектов со значительным сроком эксплуатации (суда старше 25 лет). Однако предложенные решения не касаются виртуальной верификации сборочных процессов и не могут быть напрямую перенесены на этапы создания новых крупногабаритных изделий, где документация разрабатывается с нуля.

Лушкин А.А., Круглов П.В. и Болотина И.А. [46] исследовали применение гиперграфов ограничений для автоматизации проектирования технологического процесса сборки летательных аппаратов. Авторы констатируют, что, несмотря на автоматизацию большинства этапов разработки ТП, проектирование сборки до сих пор часто выполняется вручную, что является современной и актуальной задачей. Рассмотрена классификация методов автоматизации, проанализированы основные проблемы. На примере сборочной модели устройства для космических конструкций описаны конструктивные ограничения, связи между деталями и особенности сборки. Предложен вариант последовательности сборки. Данная работа важна для настоящего исследования, так как демонстрирует принципиальную возможность формализации сборочных процессов с помощью гиперграфов, но не предлагает их интеграции с иммерсивными средами и не учитывает человеческий фактор (обучение, эргономику).

Решетникова Е.П. и Бочкарев П.Ю. [78] предложили инновационный подход к разработке технологических процессов изготовления изделий в многономенклатурных производственных системах, реализованный в системе автоматизированного планирования ТП (САПлТП). Разработан комплекс контрольно-измерительных процедур (ККИП), направленный на модернизацию механообрабатывающих производств и обеспечение их цифровой трансформации. Авторы уделяют внимание автоматизированному проектированию рациональных единичных ТП в мелко-серийном производстве на основе информации о реальных размерных параметрах заготовок. Однако работа сосредоточена на механообработке, а не на сборочных процессах, и не рассматривает возможности VR для сокращения подготовительно-заключительного времени.

Проведенный анализ литературных источников показывает, что в настоящее время существуют развитые подходы к автоматизации конструкторской и технологической подготовки производства с использованием CAD/CAE/CAM/PDM-систем, включая параллельную работу технологов в среде типа «Вертикаль», а также предложены методы формализации сборочных процессов на основе гиперграфов

ограничений и автоматизации подготовки ремонтной документации. Активно исследуются вопросы цифровой трансформации многономенклатурных производств, создания цифровых моделей для оптимизации производственно-технологических процессов и внедрения информационных технологий в судостроении и приборостроении. Вместе с тем все эти работы ориентированы преимущественно на традиционные экранные средства визуализации и не учитывают специфику крупногабаритных изделий, где пространственная сложность, эргономические ограничения и логистика перемещения узлов в масштабе 1:1 требуют принципиально иных инструментов анализа.

Недостаточно проработанными остаются следующие аспекты: отсутствие сквозной интеграции иммерсивных инструментов виртуальной реальности в процессы разработки, верификации и сопровождения технологической документации; неразработанность методик количественной оценки влияния VR на длительность этапов подготовки производства; неспособность существующих автоматизированных систем обеспечить иммерсивную проверку доступности зон монтажа и логистики до начала производства, а также нерешенность проблемы сокращения итерационных циклов при разработке операционной технологии сборки, когда ошибки по-прежнему выявляются только на этапе опытной сборки. Таким образом, анализ современного состояния исследований подтверждает необходимость разработки методики организации подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием технологии виртуальной реальности, что и составляет цель настоящей диссертационной работы.

1.3. Обоснование применения технологии виртуальной реальности при организации подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

1.3.1. Анализ современных иммерсивных технологий

В настоящее время в промышленности активно развиваются технологии визуализации и интерактивного взаимодействия с цифровыми моделями, которые принято объединять под общим термином «иммерсивные технологии» [38, 120]. К

их числу относятся виртуальная реальность (Virtual Reality – VR), дополненная реальность (Augmented Reality – AR) и смешанная реальность (Mixed Reality – MR) [13, 116]. Каждая из этих технологий имеет свои особенности, области применения и технические ограничения, что требует обоснованного выбора применительно к задачам подготовки производства сборки крупногабаритных изделий [36, 37].

Для систематизации иммерсивных технологий и обоснования выбора наиболее эффективных решений целесообразно рассматривать их по степени взаимодействия с физическим окружением, выделяя четыре основных уровня, различающихся глубиной замещения реальности, способами пространственного трекинга, характером сенсорной обратной связи и методами интеграции цифровых объектов в перцептивное пространство оператора [117, 121].

Первый уровень – стационарная виртуальная реальность (stationary VR) – предполагает полное сенсорное погружение пользователя в синтезированную среду при жесткой фиксации его положения в физическом пространстве [107]. Техническая реализация базируется на шлемах с высоким разрешением (HMD) с системой трекинга типа outside-in или inside-out, обеспечивающих субмиллиметровое позиционирование головы и контроллеров с шестью степенями свободы (6DoF) [119]. Оператор размещается на специализированной платформе, например виброплатформе, кресле оператора или пневмокаркасе, исключающей значительные перемещения; взаимодействие с виртуальными объектами осуществляется исключительно через контроллеры или перчатки с тактильной отдачей, реализующие хaptические интерфейсы. Визуальная система использует фовеативный рендеринг для снижения вычислительной нагрузки, а аудиальный канал формирует пространственно-корректное звуковое поле. Данный подвид применяется для задач, требующих детальной отработки мануальных операций в ограниченном объеме, таких как сборка приборных панелей или эргономический анализ пультов управления, где перемещение оператора не требуется, а критически важна высокая точность манипуляций с цифровыми аналогами реальных узлов [67] (Рис. 1.6).



Рис. 1.6. Платформы виртуальной реальности

Второй уровень – комнатная виртуальная реальность (room-scale VR) – сохраняет полную изоляцию от физического мира, но существенно расширяет зону свободного перемещения, достигающую 10-15 квадратных метров при использовании многокамерных систем оптического трекинга, в том числе до шести базовых станций Lighthouse или массивов камер inside-out с функцией одновременной локализации и картографирования (SLAM) (Рис 1.7). Пользователь получает возможность естественного перемещения в виртуальном пространстве, что реализуется через масштабирование цифровой сцены под реальные границы зоны, очерченные системами защиты Guardian или Chaperone. Кинестетическая обратная связь дополняется возможностью использования беговых дорожек с изменяемым рельефом (omnidirectional treadmills) и костюмов полного тела (full-body motion capture), обеспечивающих репликацию поз и перемещений. В отличие от стационарного варианта, комнатный масштаб позволяет моделировать процессы, связанные с обходом крупногабаритного изделия, коллективным взаимодействием нескольких операторов в общей калиброванной физической зоне и оценкой логистики перемещения персонала [119, 121].



Рис. 1.7. Реализация концепции комнаты VR с перемещающимися объектами
а – физическое перемещение объектов в комнате, б – визуализация в среде виртуальной реальности.

Третий уровень – смешанная реальность (mixed reality, MR) – характеризуется интеграцией виртуальных объектов в физическое пространство с обеспечением их геометрического и динамического взаимодействия с реальными сущностями[41-43]. Аппаратная платформа MR базируется на оптически прозрачных очках (see-through HMD) с системами глубинного картирования на основе лидаров или времяпролетных (ToF) камер, осуществляющих в реальном времени построение высокоразрешенной трехмерной карты окружения с учетом окклюзионных соотношений и границ физических поверхностей. Ключевое отличие от дополненной реальности заключается в возможности коллизионного моделирования: виртуальные объекты могут быть физически закреплены за реальными деталями, огибать препятствия, изменять свои свойства при контакте с реальными инструментами, а также формировать устойчивые пространственные якоря (spatial anchors) с сохранением взаимного расположения в динамически меняющейся среде. Парадигма MR реализуется как в специализированных устройствах, например Microsoft HoloLens 2 или Magic Leap 2, так и в гибридных системах на базе VR-шлемов с камерами паспру (video see-through), позволяющих динамически переключаться между режимами полного погружения и дополненной реальности с сохранением единого контекста цифровых данных (Рис. 1.8).

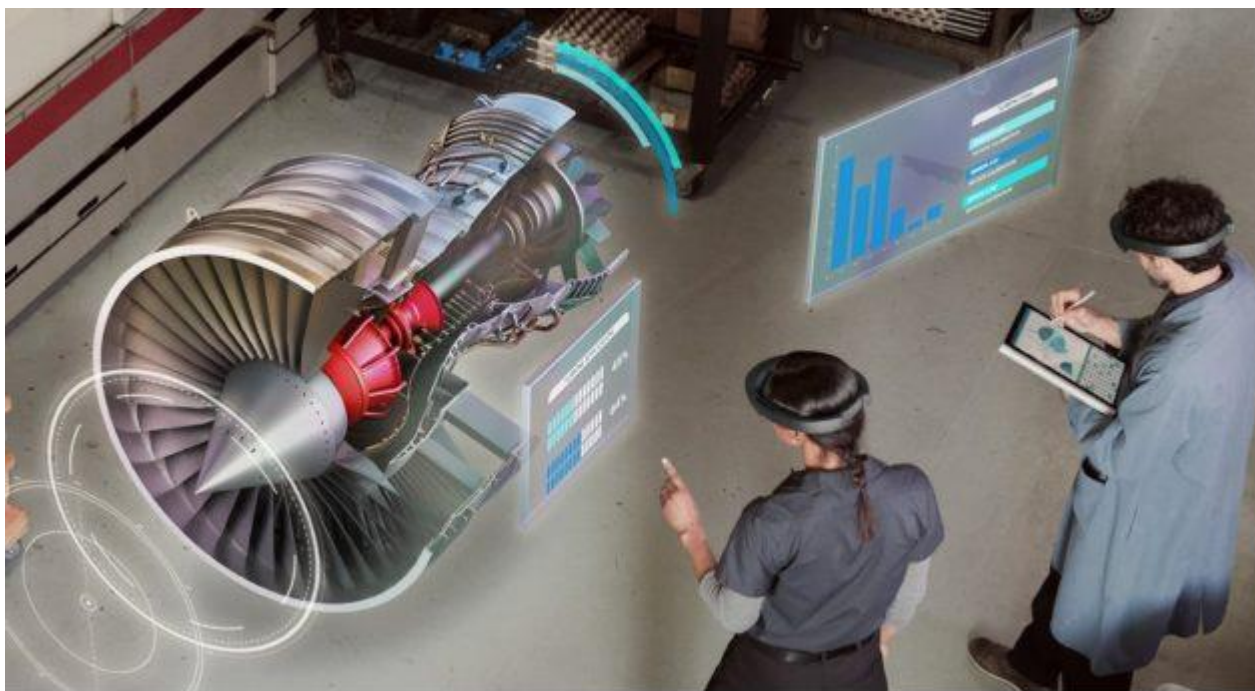


Рис. 1.8. Обучение работе с виртуальным авиационным двигателем

Четвертый уровень – дополненная реальность (augmented reality, AR) – ориентирован на наложение цифровой информации на визуальный образ физического мира без организации глубокого взаимодействия между виртуальными элементами и геометрией окружения [40, 44]. В зависимости от форм-фактора различают мобильную AR, реализуемую на планшетах и смартфонах; проекционную AR, использующую лазерные проекторы для наложения инструкций непосредственно на детали; и носимую AR, представленную очками с волноводными дисплеями, такими как Epson Moverio или RealWear. Трекинг осуществляется либо по маркерам (квазиоптический метод с использованием QR-кодов или ретрорефлективных меток), либо методом безмаркерной реконструкции плоскости на основе данных инерциальных датчиков и монокулярного зрения. В отличие от MR, в AR отсутствует полноценная геометрическая окклюзия и динамическое изменение свойств виртуальных объектов под влиянием реальной среды; цифровые элементы воспринимаются как статический информационный слой. Это ограничивает применение AR для предварительной отработки сборочных процессов, однако делает ее незаменимой для пошагового сопровождения реальных операций, идентификации узлов и удаленного телеприсутствия (Рис. 1.9).



Рис. 1.9. Обслуживание силовых установок на производстве с использованием технологии дополненной реальности

Виртуальная реальность в ее комнатном и стационарном исполнении предполагает полное погружение пользователя в искусственно созданную цифровую среду, изолирующую его от физического окружения. Взаимодействие осуществляется с помощью шлемов, таких как HTC Vive, Valve Index, Varjo XR-3, и контроллеров, позволяющих перемещаться, манипулировать объектами и выполнять сборочные операции в виртуальном пространстве. Преимущества VR для подготовки производства заключаются в возможности моделирования сборочных процессов без создания физических макетов, отработки последовательности операций, оценки эргономики и доступности зон монтажа, а также безопасного обучения персонала. К недостаткам можно отнести относительную изоляцию от реального рабочего пространства и необходимость адаптации пользователей.

Дополненная реальность накладывает цифровую информацию, такую как инструкции, схемы и подсказки, на реальное окружение. Технически это реализуется через очки типа Microsoft HoloLens, планшеты или смартфоны. AR позволяет ра-

ботнику видеть виртуальные метки на реальных деталях, что ускоряет идентификацию узлов и выполнение операций. Однако для сложных пространственных задач, требующих предварительной отработки сборки на стадии проектирования, AR менее эффективна, поскольку она привязана к уже существующему физическому объекту.

Смешанная реальность объединяет элементы VR и AR, позволяя виртуальным объектам взаимодействовать с реальным окружением. Например, цифровая модель узла может быть размещена на реальном сборочном стенде с учетом физических препятствий. MR требует более сложного программно-аппаратного обеспечения и пока не получила столь широкого распространения в промышленности, как VR.

Для целей настоящего исследования – сокращения сроков подготовки производства сборки крупногабаритных изделий за счет повышения качества технологической документации и ускорения обучения – наиболее перспективной представляется технология виртуальной реальности. Это обусловлено следующими факторами: возможность полного замещения физических макетов на этапе разработки технологии сборки; отсутствие привязки к реальному оборудованию, что позволяет проводить отработку процессов до начала производства; высокая степень погружения, необходимая для оценки сложных пространственных взаимодействий при сборке крупногабаритных узлов; наличие отработанных программно-аппаратных решений, уже применяемых в авиастроении, судостроении и автомобилестроении. При этом, исходя из представленной классификации, для решения поставленных задач оптимальным является использование комнатной виртуальной реальности (room-scale VR), обеспечивающей свободное перемещение оператора вокруг моделируемого изделия и позволяющей в полной мере оценить эргономику, логистику и последовательность сборочных операций в масштабе 1:1.

В качестве перспективного направления развития иммерсивных технологий, выходящего за рамки традиционной классификации, рассматриваются системы на основе нейрокомпьютерных интерфейсов (brain-computer interfaces, BCI). На совре-

менном этапе выделяются неинвазивные нейрогарнитуры, регистрирующие электроэнцефалографические паттерны, и экспериментальные инвазивные импланты, обеспечивающие двунаправленный обмен сигналами с кортикальными структурами. Технически такая архитектура предполагает считывание моторных образов для управления цифровыми объектами без посредства контроллеров, а в перспективе – формирование сенсорных ощущений, включая тактильные и проприоцептивные, путем прямой стимуляции соответствующих нейронных популяций. При достижении необходимого уровня надежности и биосовместимости появление полубессознательного режима погружения, при котором пользователь получает иммерсивный опыт без активного участия соматических систем, откроет возможности для сверхбыстрого формирования двигательных навыков, реализующего нейроадаптивное обучение, и для управления удаленными роботизированными комплексами с когнитивной задержкой, близкой к естественной. На данный момент такие решения остаются преимущественно в сфере лабораторных прототипов и требуют решения задач по повышению отношения сигнал/шум, миниатюризации имплантируемых устройств и разработке нормативно-правовой базы для промышленного применения.

В последние годы опубликован ряд работ, демонстрирующих эффективность применения VR в промышленности. В исследовании Boeing показано, что использование VR для отработки сложных сборочных операций позволило сократить время обучения персонала на 40 %, а количество ошибок при первой сборке снизить на 78 %. В автомобилестроении концерн Stellantis добился сокращения времени подготовки оператора конвейера с 10 до 5-6 дней за счет внедрения VR-модулей, что также привело к двукратному снижению дефектов на линии [110, 117].

В судостроении (на примере опыта отечественных верфей, таких как СК «Звезда») VR-симуляторы сборки блоков корпуса позволили сократить время согласования технологических маршрутов с 3-4 недель до 3-5 дней. Исследования, проведенные Университетом штата Айова при поддержке Boeing, подтвердили, что использование иммерсивных инструкций (AR/VR) снижает время выполнения сбо-

рочных операций на 16-25 % по сравнению с традиционной бумажной документацией [113].

В области тяжелого машиностроения компания Somero Enterprises внедрила VR-тренажеры для обучения операторов строительного оборудования, что позволило сократить время ввода в должность на 20-40 % и снизить расходы на топливо и износ техники на 30 %. BMW Group использует иммерсивные технологии на этапе прототипирования, что, по оценкам компании, экономит до одного года в цикле разработки новых моделей за счет ускорения валидации процессов сборки [110].

Таблица 1.

Сравнительный анализ иммерсивных технологий для задач подготовки производства

Критерий	VR	AR	MR
Полнота погружения	Полная, изоляция от внешней среды	Частичная, наложение на реальность	Смешанная, взаимодействие с реальностью
Возможность отработки сборки до создания оснастки	Высокая	Низкая (требует физического объекта)	Средняя (требует частичной привязки)
Эргономический анализ	Высокая (имитация движений сборщика)	Средняя (только на реальном объекте)	Средняя (ограничена возможностями отслеживания)
Обучение персонала	Эффективно (безопасная среда, многократное повторение)	Ограничено (требует наличия оборудования)	Средняя (комбинированный подход)
Сложность внедрения	Средняя (специализированное ПО, подготовка 3D-моделей)	Низкая (планшеты, смартфоны)	Высокая (дорогое оборудование, сложная калибровка)
Стоимость ПО/оборудования	Средняя-высокая	Низкая-средняя	Высокая
Достигнутое сокращение времени подготовки производства (по литературным данным)	20-40 %	10-20 %	15-25 %

С технической стороны, современные исследования в области компьютерных наук (IEEE Access, 2024) доказывают, что алгоритмы гибридных ограничивающих объемов (Sphere-EBV) позволяют добиться высокой точности обнаружения коллизий в сложных виртуальных сценах, что критически важно для корректной отработки сборки крупногабаритных узлов [114]. Для систематизации сравнения различных иммерсивных технологий по критериям, значимым для подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, составлена Таблица 1.

Как следует из таблицы, VR обеспечивает наибольшие преимущества для этапов разработки операционной технологии, эргономической отработки и обучения, что непосредственно соответствует выявленным в п. 1.1 проблемам длительности подготовки производства. AR более применима для оперативной поддержки сборщика на уже запущенном производстве, а MR находится на стадии активного развития и требует значительных инвестиций.

1.3.2. Выбор технологии для решения задачи сокращения сроков подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

На основе данных, полученных из литературных источников, можно сделать вывод, что технологии дополненной реальности (AR) и смешанной реальности (MR, XR) наиболее эффективны на этапах, когда физическое изделие или его компоненты уже существуют. AR позволяет накладывать цифровую информацию (инструкции, схемы, подсказки) непосредственно на реальные объекты, что делает ее удобным инструментом для сопровождения сборочных операций, контроля качества и ремонта уже выпускаемой продукции. Аналогично, MR, обеспечивающая взаимодействие виртуальных объектов с реальной средой, также требует наличия реального пространства и часто – физических прототипов или готовых узлов для корректной калибровки и работы. Таким образом, применение AR и MR целесообразно на стадиях опытной эксплуатации, отладки или серийного производства, когда изделие уже материализовано.

В отличие от них, технология виртуальной реальности (VR) не требует наличия реальных объектов. Взаимодействие осуществляется полностью с трехмерными цифровыми моделями, которые создаются и доступны уже на этапе конструкторской подготовки производства (CAD-модели). Это позволяет перенести отработку технологичности сборки, эргономический анализ, выявление коллизий и обучение персонала на самые ранние стадии жизненного цикла изделия – задолго до изготовления оснастки и опытных образцов. Для крупногабаритных изделий, где создание физических макетов крайне дорого и длительно, такое свойство VR приобретает решающее значение.

Учитывая проблемы, выявленные в п. 1.1 (значительная длительность подготовки производства, большое количество итераций из-за ошибок, выявляемых только на этапе сборки, высокие затраты времени на обучение персонала), именно VR позволяет исключить или минимизировать создание физических макетов, сокращая цикл разработки; проводить многократную виртуальную отработку сборочных операций без привязки к реальному оборудованию; выявлять пространственные и эргономические ошибки на этапе проектирования, снижая число возвратов; а также организовать безопасное и эффективное обучение персонала на цифровых двойниках изделия. Сопоставление иммерсивных технологий по критерию «наличие физического объекта» и «этап применения» представлено в Таблице 2.

Таблица 2.

Применимость иммерсивных технологий на этапах подготовки производства

Технология	Требование к физическому объекту	Основные этапы применения в подготовки производства
VR	Не требуется	Конструкторская подготовка, разработка операционной технологии, эргономический анализ, обучение
AR	Требуется (реальные детали/узлы)	Сопровождение сборки на производстве, контроль, ремонт
MR	Требуется (реальная среда, часто с объектом)	Опытная отладка, совмещение виртуальных данных с реальным оборудованием

1.4. Анализ работ в области виртуальной реальности и имитационного моделирования применительно к подготовке производства

Вигер И. [13] в обзорной статье рассмотрел основные направления применения VR в промышленности: виртуальное прототипирование, эргономический анализ, обучение персонала и удаленное управление оборудованием. Автор подчеркивает, что VR позволяет сократить количество физических макетов и выявить коллизии на ранних стадиях, однако отмечает отсутствие типовых методик интеграции VR в регламентированные процессы технологической подготовки производства. Особо выделяется проблема «шлюза» между CAD-моделями и VR-средами, требующая дополнительных конвертеров и потери данных.

Кабанов А.А. и Амосов М.В. [28] исследовали применение иммерсивных технологий при создании и эксплуатации аэрокосмической техники, включая крупногабаритные агрегаты (фюзеляжи, крылья, двигатели). Авторы демонстрируют, что VR позволяет проводить стыковку узлов в масштабе 1:1, оценивать доступность зон монтажа и отрабатывать последовательность сборочных операций без физического макета. Вместе с тем работа носит постановочный характер и не предлагает формализованных моделей для количественной оценки сокращения длительности подготовки производства.

Soori M., Arezoo B. и Dastres R. [119] в своем обзоре рассмотрели концепцию виртуального производства как элемента цифровых двойников. Отмечается, что интеграция VR с имитационным моделированием (дискретно-событийным и мультиагентным) позволяет прогнозировать загрузку оборудования, выявлять «узкие места» и оптимизировать производственные графики еще до начала физического выпуска. Однако авторы указывают, что для крупногабаритной продукции с высокой долей ручной сборки такие гибридные подходы практически не разработаны.

Al-Jundi H.A. и Tanbour E.Y. [107] представили систему планирования производства на основе высокодетализированной виртуальной реальности, позволяющую оператору выполнять сборочные операции в виртуальной среде с тактильной обратной связью. Экспериментально подтверждено сокращение времени сборки на

32% и снижение числа ошибок на 56% по сравнению с традиционными инструкциями. Однако система тестировалась на относительно простых изделиях и не масштабировалась на крупногабаритные конструкции с большим числом сборочных единиц.

В направлении имитационного моделирования производственных процессов значимые результаты получены Боровковым А.И., Вороненко В.П., Долговым В.А. и др. Ими разработаны методы и программные комплексы для динамического моделирования сложных производственных систем, которые активно применяются для анализа и оптимизации производственных циклов.

Боровков А.И. с соавторами [98] предложили концепцию цифровых двойников для предприятий оборонно-промышленного комплекса, распространив ее на все этапы жизненного цикла изделий. Их достижение заключается в создании методологии сквозного имитационного моделирования, объединяющей проектирование, производство и эксплуатацию. Это позволило сократить сроки отработки технологических процессов за счет виртуального прототипирования без физических макетов. Авторы показали, как цифровые двойники интегрируются с CAE/CAM-системами для прогнозирования поведения изделия в реальных условиях.

Вороненко В.П. и Долгов В.А. [14] разработали информационную модель базового производственно-технологического решения. Их вклад состоит в создании адаптивного подхода к имитационному моделированию: модель позволяет динамически перенастраивать технологический процесс под текущее состояние производственной системы (загрузку оборудования, наличие заготовок и т.д.). Это особенно ценно для многономенклатурных производств, где требуется быстрое перепланирование операций. Авторы реализовали алгоритмы, сокращающие время калибровки модели при изменении внешних условий.

Григорьев С.Н., Долгов В.А. и Леонов А.А. [18] предложили метод имитационного моделирования производственных процессов с использованием логик планового и ситуационного резервирования рабочих мест. Работа важна для учета вероятностных отказов и переналадок в мелкосерийном производстве. Однако ав-

торы не рассматривают возможность интеграции имитационной модели с VR-верификацией сборочных операций, что ограничивает применение их подхода для этапов технологической подготовки, предшествующих запуску в производство.

Любомудров С.А. с соавторами [64] исследовали повышение эффективности технологической подготовки на основе имитационного моделирования. Показано, что имитационные модели позволяют оценить длительность этапов разработки документации, проектирования оснастки и обучения персонала с учетом стохастического характера ошибок и возвратов. Тем не менее, в моделях не учитывается возможность ускорения этих этапов за счет применения VR-инструментов, а сами имитационные эксперименты проводятся без привязки к реальным данным, получаемым в иммерсивных средах.

Жаров М.В. [19] провел сравнительный анализ инструментов имитационного моделирования применительно к машиностроительным производствам. Отмечается, что среда AnyLogic является наиболее гибкой для моделирования дискретно-событийных и агентных процессов, что делает ее предпочтительной для построения имитационных моделей технологической подготовки. Однако автор не рассматривает возможности сопряжения AnyLogic с VR-системами для визуализации и верификации моделируемых процессов в реальном масштабе.

Хрусталева И.Н., Любомудров С.А. и Романов П.И. [94] разработали имитационную модель технологической подготовки производства цеха механической обработки, учитывающую загрузку технологов, сроки разработки документации и итерационные циклы согласования. Работа демонстрирует принципиальную возможность количественной оценки длительности этапов ТПП, однако модель ориентирована на механообработку, а не на сборочные процессы, и не включает VR-компоненту.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время сформировались два достаточно развитых, но слабо связанных между собой направления исследований. Первое направление – применение виртуальной реальности в промышленности – демонстрирует высокий потенциал для иммерсивной верификации сборочных опе-

раций, эргономического анализа и обучения персонала. Работы Вигера [13], Кабанова и Амосова [28], а также зарубежные обзоры Soori и др. [119] и экспериментальная система Al-Jundi и Tanbour [107] подтверждают, что VR позволяет сократить количество ошибок, уменьшить зависимость от физических макетов и ускорить освоение технологии сборки. Вместе с тем практически все эти исследования носят прикладной характер, не предлагают формализованных методик интеграции VR в регламентированные процессы технологической подготовки производства и не дают количественных моделей для прогнозирования сокращения длительности этапов с учетом вероятностных обратных связей (итераций, возвратов на доработку). Второе направление – имитационное моделирование производственных процессов – представлено работами Григорьева с соавторами [18], Любомудрова [64], Жарова [19], Хрустальной [94] и другими. Эти исследования позволяют количественно оценить длительность этапов подготовки производства, загрузку ресурсов и влияние организационных параметров, однако их модели, как правило, не учитывают специфику иммерсивных VR-инструментов и не используют данные, получаемые в ходе виртуальных экспериментов.

Таким образом, остается нерешенной задача интеграции двух подходов: имитационное моделирование могло бы обеспечить количественную оценку эффекта от внедрения VR, а VR, в свою очередь, – предоставить достоверные исходные данные о сокращении времени на выполнение отдельных операций и снижении вероятности ошибок. Отсутствие гибридных методик, связывающих имитационные модели с иммерсивной верификацией, является существенным пробелом, который не позволяет предприятиям объективно оценить целесообразность инвестиций в VR-оборудование и спрогнозировать реальное сокращение цикла подготовки производства крупногабаритных изделий. Настоящая диссертационная работа направлена на восполнение этого пробела путем разработки математической модели, учитывающей вероятностные обратные связи, и методики интеграции VR-инструментов в имитационное моделирование.

1.5. Проблема применения VR-инструментов при организации подготовки производства изделий машиностроительных производств

Несмотря на достижения в области применения технологий виртуальной реальности (VR) для решения отдельных конструкторских и технологических задач на производстве, до настоящего времени отсутствует комплексный подход к их использованию на этапах подготовки производства сборки крупногабаритных изделий. В существующих исследованиях не были в должной мере решены следующие задачи, определяющие проблемное поле диссертационной работы:

1. Не определены ключевые этапы подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, на которых применение инструментов виртуальной реальности позволяет существенно сократить временные затраты при анализе первичной информации из документации, оценке технологичности конструкции, апробации технических операций сборки, создании документации, а также при проектировании рабочих мест технологов и сборщиков.

2. Отсутствует методика сбора данных о длительности этапов подготовки производства крупногабаритных изделий, в том числе отсутствует программное обеспечение для проведения экспериментов с использованием инструмента виртуальной реальности, направленные на оценку и сравнение эффективности организации подготовки производства для данной категории изделий.

3. Не разработана методика проведения имитационного моделирования, позволяющий выявить ключевые параметры, необходимые для эффективной организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий в условиях применения VR-технологий.

4. Не разработана методика внедрения в производственный процесс предложенного способа разработки подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, что сдерживает трансфер результатов научных исследований в реальный сектор экономики.

Проведенный анализ проблем организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий и обзор современных иммерсивных технологий позво-

ляют сделать вывод об актуальности работы, направленной на использование систем виртуальной реальности (VR) для сокращения сроков подготовки производства, с целью интеграции процесса отработки технологии сборки непосредственно в цифровую среду на самых ранних этапах без необходимости создания физических образцов.

Выводы по Главе 1

1. Проведенный анализ современного состояния вопроса организации подготовки производства крупногабаритных изделий показал актуальность проблемы в плане необходимости существенного сокращения длительности этапов подготовки производства.

2. 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.

3. Проведенный анализ показал, 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 крупногабаритных изделий.

ГЛАВА 2.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА (СБОРКИ) КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

2.1. Исследование влияния организационных параметров на длительность подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

С целью выявления этапов подготовки производства, для которых целесообразно применение инструмента виртуальной реальности и выявления обратных связей в результате возникновения ошибок проведен анализ структурной схемы (Рис. 2.1) и литературных источников [48, 62, 65, 74, 101].

Выбор производился по следующим критериям:

- необходимость дополнительной визуализации объектов сборки;
- возможность чтения и создания электронной технической документации;
- возможность проектирования рабочей области в условиях обеспечения максимальной эргономики;
- возможность обеспечения контролируемого обучения рабочего персонала.

Такие этапы как анализ исходных данных, отработка на технологичность, разработка технологической схемы сборки, разработка технологического маршрута сборки, разработка технологических операций, организация производства и рабочих мест, а также этап обучения персонала обладают наибольшим потенциалом для сокращения времени подготовки производства при внедрении технологии виртуальной реальности.

На этапе изучения конструкторской документации и исходных данных виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет создания иммерсивной информационной среды, в которой конструкторская документация и трехмерная модель изделия интегрированы в единое визуальное пространство. Возможность одновременного представления неограниченного количества виртуальных экранов с различными типами данных (чертежи,

спецификации, 3D-сцены) снижает когнитивную нагрузку и повышает эффективность восприятия пространственно-сложной информации на начальных этапах проектирования.



Рис. 2.1. Основные этапы подготовки производства сборки крупногабаритных изделий

На этапе отработки на технологичность виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет комплексного иммерсивного анализа производственной реализуемости изделия. Интеграция полно-размерной 3D-модели с конструкторской документацией и спецификациями в общем виртуальном пространстве, поддерживающая одновременное отображение неограниченного числа дополнительных экранов (чертежи, карты контроля, ведомости оснастки), позволяет технологу оперативно оценивать собираемость конструкции, включая выявление коллизий и проверку доступности инструмента в труднодоступных зонах. Погружение в масштабируемую среду дает возможность не только верифицировать точность и надежность прогнозируемых сопряжений до начала физического производства, но и на основе полученных данных сформировать обоснованный план дальнейших технологических этапов, минимизируя риски последующих ошибок.

На этапе разработки технологической схемы сборки виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет пространственного моделирования последовательности соединения элементов и выбора рациональных схем базирования. Интерактивная работа с масштабируемой 3D-моделью, совмещенной в поле зрения с чертежами и картами базирования на виртуальных экранах, позволяет технологу в динамике оценить, как установка одних деталей влияет на доступность мест соединения последующих. Возможность оперативно менять ориентацию собираемого узла в пространстве и фиксировать оптимальные положения для каждого перехода обеспечивает обоснованный выбор базовых поверхностей и исключает ошибки, связанные с потерей доступа к зонам сварки или крепежа на ранних стадиях проектирования технологического процесса.

На этапе разработки технологического маршрута сборки виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет пространственной оптимизации межоперационных перемещений и распределения переходов по оборудованию. Интеграция объемной модели производственной среды с маршрутными картами и ведомостями оснастки, выведенными на виртуальные экраны, позволяет технологу одновременно оценивать загрузку участков, траектории движения сборочных единиц и логистические потоки между рабочими позициями. Возможность интерактивно корректировать последовательность обработки прямо в 3D-макете цеха с учетом реальных габаритов оборудования и зон обслуживания обеспечивает быстрое выявление узких мест и сокращение холостых перемещений, что напрямую влияет на длительность производственного цикла.

На этапе разработки технологических операций виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет интерактивного моделирования действий исполнителя и эргономической проработки каждого перехода. Погружение технолога в масштабируемую 3D-сцену с одновременным отображением операционных карт, карт эскизов и спецификаций оснастки на

виртуальных экранах позволяет в динамике оценить последовательность микро-операций, траектории движений рук и зоны визуального контроля. Возможность имитационного воспроизведения сборочных процессов с учетом пространственных ограничений и условий доступа к зонам соединения обеспечивает выявление нерациональных рабочих поз, уточнение номенклатуры необходимого инструмента и формирование достоверной базы для последующего технического нормирования трудозатрат еще до этапа натурных испытаний.

На этапе организации производства и рабочих мест виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет объемного моделирования компоновки оборудования и эргономического анализа производственных зон. Интеграция масштабируемой 3D-модели цеха с планировочными решениями, схемами грузопотоков и нормативами размещения, выведенными на виртуальные экраны, позволяет одновременно оценивать рациональность расстановки технологического оборудования, достаточность зон обслуживания и соответствие эргономическим требованиям. Возможность интерактивной перекomпоновки элементов производственной среды в масштабе 1:1 обеспечивает оперативную верификацию проектных решений, выявление потенциально опасных зон и оптимизацию маршрутов перемещения персонала до начала реального размещения оборудования.

На этапе обучения персонала виртуальная реальность помогает существенно сократить время обработки исходных данных за счет трансформации технической документации в интерактивную обучающую среду, обеспечивающую формирование устойчивых профессиональных компетенций в условиях, максимально приближенных к реальным. Иммерсивное погружение в масштабируемую 3D-модель производственного участка с одновременным отображением технологических карт, инструкций и схем на виртуальных экранах позволяет обучаемому детально осваивать приемы сборки, многократно воспроизводя сложные операции с визуализацией траектории перемещения инструмента, последовательность затяжки крепежа, а также опасных зон. Поддержка режима коллективного взаимодействия дает воз-

возможность отрабатывать совместные действия в операциях, требующих участия нескольких работников, с координацией их перемещений и синхронизацией усилий. Принципиальная безопасность виртуальной среды позволяет моделировать работу с потенциально опасными материалами, инструментами и оборудованием без риска для здоровья, а также наглядно демонстрировать последствия нарушений техники безопасности. Встроенные системы контроля фиксируют ошибки в режиме реального времени и обеспечивают контекстную визуализацию подсказок и корректирующих указаний непосредственно в поле зрения обучаемого. Такой подход исключает необходимость расходования материалов и простоя оборудования в период подготовки кадров, обеспечивая объективизированную оценку готовности персонала к самостоятельной работе.

На Рисунке Рис. 2.2 показана схема основных этапов подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с учетом обратных связей, которые были выявлены при анализе литературных источников и производственного опыта.

Исходя из представленной схемы этапов подготовки производства, ключевым фактором, определяющим фактическую длительность подготовки производства, является не только последовательное выполнение работ, но и неизбежное возникновение обратных связей. Эти связи возникают при выявлении ошибок или недоработок, требующих повторного прохождения предыдущих этапов для их устранения.

Анализ этих связей позволяет выявить наиболее критические точки процесса и источники временных потерь.

На схеме были выделены ключевые обратные связи, каждая из которых имеет конкретное технологическое или организационное обоснование.

Ключевые обратные связи, каждая из которых имеет конкретное технологическое или организационное обоснование:

- 1. 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.

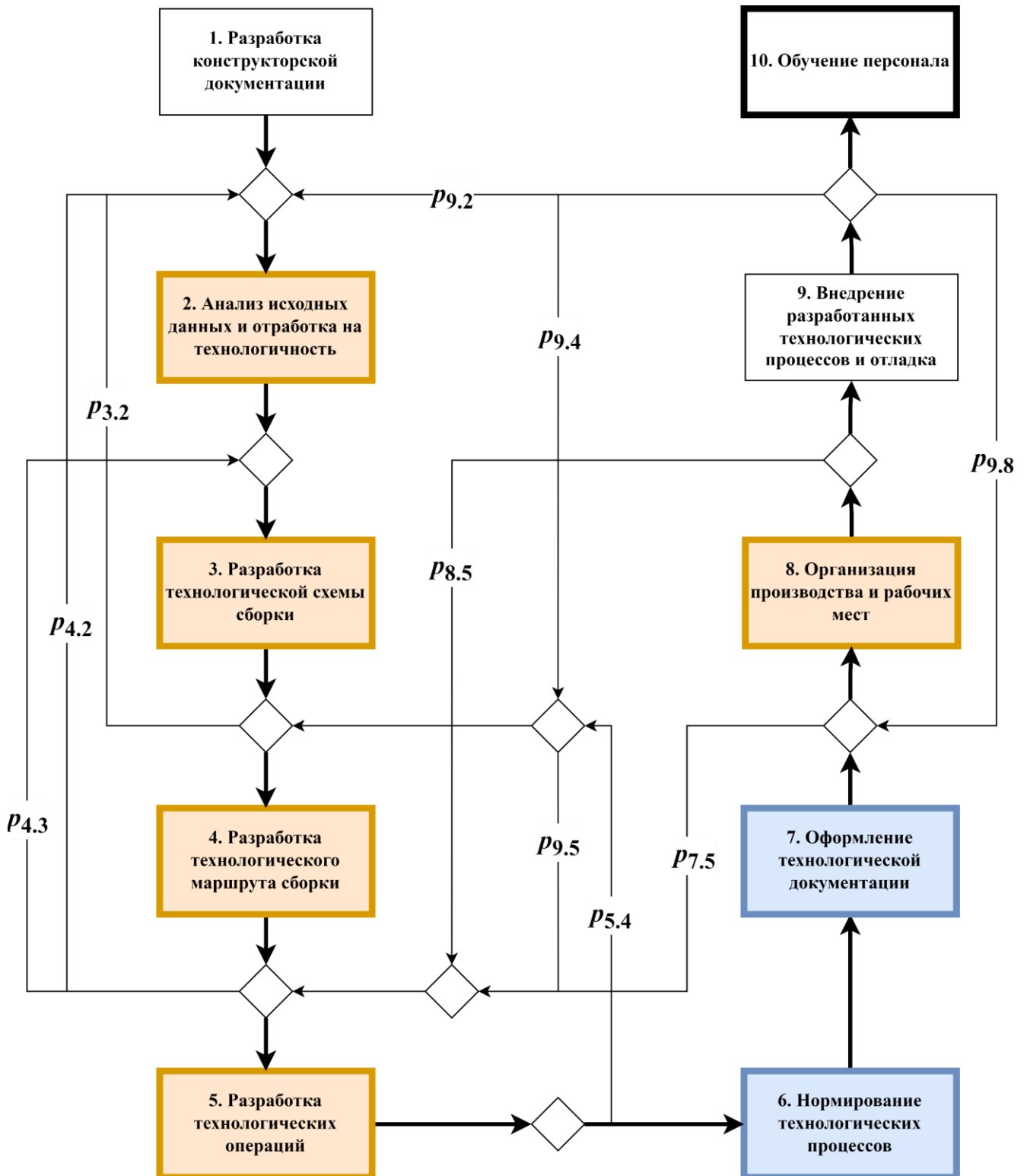


Рис. 2.2. Этапы подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с указанием обратных связей

2. **p4,2:** 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.

3. **p4,3:** 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.

4. **p5,4:** 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.

5. **p7,5:** возврат к операционной технологии инициируется в процессе оформления документации, когда становится ясно, что содержание операций неструктурировано, не формализуемо или противоречит стандартам оформления, что делает невозможным создание четких и однозначных инструкций для производства.

6. **p8,5:** возврат к операционной технологии происходит при проектировании 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.

7. **p9,8:** возврат к проектированию 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).

8. **p9,5:** 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.

9. **p9,4:** 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.

10. **p9,2:** 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:

$$P = \prod_{i=1}^M (1 - p_{i,j}), \quad (2.1)$$

где M – количество этапов подготовки производства;

$p_{i,j}$ – вероятности перехода с i -этапа на j -этап, в случае возникновения ошибки.

Маршрутная матрица P будет выглядеть следующим образом:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{3,2} & 0 & 1-p_{3,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{4,2} & p_{4,3} & 0 & 1-(p_{4,2} + p_{4,3}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{5,4} & 0 & 1-p_{5,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{7,5} & 0 & 0 & 1-p_{7,5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{8,5} & 0 & 0 & 0 & 1-p_{8,5} & 0 \\ 0 & p_{9,2} & 0 & p_{9,4} & p_{9,5} & 0 & 0 & p_{9,8} & 0 & 1-(p_{9,2} + p_{9,4} + p_{9,5} + p_{9,8}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

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

Разработанная модель (схема связей этапов) подготовки производства сборки

крупногабаритных изделий позволяет учитывать возникновение обратных связей, которые были выявлены исходя из анализа литературных источников и производственного опыта (метод экспертных оценок), что позволяет приступить к разработке математической модели оценки длительности подготовки производства.

2.2. Разработка математической модели оценки длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

С целью оценки длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий необходимо разработать математическую модель, учитывающую длительность этапов подготовки производства, вероятность возникновения ошибок после выполнения i -го этапа подготовки производства, длительность повторных проходов этапов подготовки производства, а также затраты времени на ожидание заявок в очередях перед выполнением этапов.

Исходя из представленной схемы (см. Рис. 2.2), можно объединить в группы основные этапы влияющие на длительность подготовки производства:

1. Этапы подготовки производства, выполняемые непосредственного инженерами технологами на своих рабочих местах (этапы с 1 по 7) – $T_{\text{э}}$.

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

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 – $T_{\text{о}}$.

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

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

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

Таким образом, длительность подготовки производства можно представить как сумму времен, затрачиваемых на выполнение этапов подготовки производства, повторное прохождение этапов подготовки производства для исправления ошибок и время перерывов, связанного с режимом работы предприятия:

$$T_{\text{пп}} = T_{\text{э}} + T_{\text{ос}} + T_{\text{рм}} + T_{\text{о}} + T_{\text{об}} + T_{\text{п}}, \quad (2.3)$$

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.

С целью достижения критерия минимальной длительности подготовки производства ($T_{\text{пп}} \rightarrow \min$) необходимо определить факторы, оказывающие наибольшее влияние на потери времени при подготовке производства сборки крупногабаритных изделий. Для этого, следует рассмотреть указанные в выражении (2.3) структурные элементы затрат времени с целью выявления параметров организации подготовки производства, управляя которыми возможно достичь наибольшего сокращения затрат времени при минимальных материалах затратах. Помимо этого, в разрабатываемой математической модели следует учесть особенности организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий.

Особенности организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий можно представить в виде коэффициентов, увеличивающих время выполнения этапов, указанных в выражении (2.4):

k_1 – коэффициент, учитывающий уменьшение времени подготовки производства за счёт снижения влияния конструктивно-технологической сложности изделия при пространственной проработке. При использовании VR-технологий инженер-технолог получает возможность в масштабе 1:1 визуально оценить собираемость

конструкции, проверить достижимость зон монтажа, траектории перемещения крупногабаритных узлов и зазоры ещё на этапе проектирования. Это сокращает время, затрачиваемое на анализ чертежей, выявление потенциальных коллизий и повторные итерации. Значение: $k_1 \leq 1$; без VR $k_1 = 1$.

k_2 – коэффициент, учитывающий уменьшение времени подготовки производства при недостаточной квалификации персонала. Виртуальная среда позволяет проводить предварительное обучение и инструктаж технологов и сборщиков без задействования реального изделия и оснастки. Снижается вероятность ошибок, вызванных человеческим фактором, и время на их исправление. Кроме того, встроенные в VR-систему базы знаний и автоматизированные проверки технологических решений частично нивелируют разницу в опыте сотрудников. Значение: $k_2 \leq 1$; без VR $k_2 = 1$.

k_3 – коэффициент, учитывающий уменьшение времени за счёт технического оснащения рабочих мест современными цифровыми инструментами, включая VR. Помимо VR-оборудования, сюда входит интеграция с PLM-, CAD-, CAPP-системами, обеспечивающая сквозную цифровую передачу данных и автоматизацию рутинных операций (генерация схем, маршрутов, операционных эскизов). Виртуальная среда становится центральным звеном, объединяющим все этапы подготовки производства в единое информационное пространство, что исключает потери времени на преобразование форматов и ручной перенос данных. Значение: $k_3 \leq 1$; без цифрового оснащения и VR $k_3 = 1$. Отсутствие современных систем автоматизированного проектирования (САПР) изделий и технологических процессов, позволяющих учитывать ошибки, при разработке конструкторской и технологической документации на этапе проектирования, приводит к увеличению времени выполнения этапов подготовки производства и увеличению вероятности возникновения ошибок. Особую роль системы автоматизированного проектирования занимают при визуализации процессов сборки и разборки сложных изделий, например, при отработке конструкции изделия на технологичность.

С учетом представленных коэффициентов, выражение (2.4) можно записать в следующем виде:

$$T_{\text{пп}} = K(T_{\text{э}} + T_{\text{ос}} + T_{\text{рм}} + T_{\text{об}} + T_{\text{о}}) + T_{\text{п}}, \quad (2.4)$$

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

С целью уменьшения длительности подготовки производства, необходимо стремиться у уменьшению затрат времени на этапы, заключенные в скобках (см. выражение (2.4)), а также на уменьшение влияния коэффициента K .

Следующим этапом разработки математической модели оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий является раскрытие составляющих элементов в выражении (2.4).

Время выполнения этапов подготовки производства ($T_{\text{э}}$) представляет собой сумму времен выполнения i -х этапов подготовки производства и времени на ожидание обработки задания инженерами-технологами, которое возникает в том случае, если инженер-технолог занят выполнением предыдущей заявки.

В общем виде время выполнения этапов подготовки производства ($T_{\text{э}}$) можно записать следующим образом:

$$T_{\text{э}} = \sum_{i=1}^M (t_{qi} + t_i), \quad (2.5)$$

где t_{qi} – время нахождения задания в очереди перед выполнением i -этапа подготовки производства;

t_i – время выполнения i -этапа подготовки производства;

M – число этапов подготовки производства.

Если инженер-технолог не занят, то $t_{qi} = 0$.

Время, затрачиваемое на повторное прохождение этапов, то есть на образование обратных связей ($T_{\text{ос}}$), в первую очередь, зависит от вероятности успешного прохождения задания на следующий этап ($i+1$ -этап) или от вероятности возникновения ошибки на i -м этапе. При этом, должно учитываться, что при каждом прохождении i -этапа изменяется время его выполнения, а также вероятность успешного прохождения этого этапа.

Таким образом, время, затрачиваемое на повторное прохождение этапов одной заявкой, можно представить в следующем выражении:

$$T_{\text{ос}} = \sum_{n=0}^N (p_{i,j})_n \sum_{i=1}^{M'} (t_{qi} + t_i)_n, \quad (2.6)$$

где $p_{i,j}$ – вероятность возникновения ошибки на i -этапе и возврат на i -этап при n -повторном прохождении i -этапа;
 $(t_{qi} + t_i)_n$ – время нахождения задания в очереди перед выполнением i -этапа и время выполнения i -этапа при n -повторении i -этапа;
 n – порядковый номер прохождения задания через i -этап (номер итерации);
 N – число повторных прохождений i -этапа;
 M' – число этапов подготовки производства, через которые задание проходит повторно.

Введение индекса i - n необходимо для учета того, что при повторном прохождении i -этапа изменяется вероятность возникновения ошибки, а также изменяется время выполнения данного этапа.

Таким образом, выражение (2.4) с учетом выражений (2.5) и (2.6) можно записать следующим образом:

$$T_{\text{пп}} = K \left[\sum_{i=1}^M (t_{qi} + t_i) + \sum_{n=0}^N (p_{i,j})_n \sum_{i=1}^{M'} (t_{qi} + t_i)_n + T_{\text{об}} \right] + T_{\text{п}}, \quad (2.7)$$

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

Исходя из того, что после i -этапа могут возникнуть несколько обратных связей (см. Рис. 2.2), вероятность возникновения ошибки на i -этапе определяется из выражения:

$$p_{i,j} = 1 - (p_i + \sum (p_{i,k})), \quad (2.8)$$

где p_i – вероятность успешного прохождения задания на следующий этап подготовки производства;

$\Sigma(p_{i,k})$ – сумма вероятностей возникновения ошибок, ведущих к этапам отличным от j -этапа.

Вероятности $p_{i,k}$ имеют место в случае, когда после прохождения i -этапа обнаруживаются ошибки и недоработки, которые могут быть устранены на разных этапах, отличных от j -этапа.

С целью выявления организационных параметров, оказывающих основное влияние на увеличение длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий был выполнен анализ зависимостей (2.4) и (2.7), и составлена система функциональных связей (см. (2.9)).

Как видно из представленных взаимосвязей организационных параметров подготовки производства сборки крупногабаритных изделий (2.9) наибольшие потери времени на выполнение и повторное прохождение этапов подготовки производства зависят от квалификации инженеров-технологов (K_2) и использования современных PLM-систем (K_3).

Коэффициент K_1 не зависит от организации подготовки производства и входит в группу исходных данных.

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{i,i+1} = f(k_1, k_2, k_3, N), \\ t_{qi} = f(t_i, N, (p_{i,j}), N_r), \\ t_i = f(k_1, k_2, k_3, N, (p_{i,j})), \\ (p_{i,j})_n = f(k_1, k_2, k_3, N), \\ (t_{qi} + t_i)_n = f(k_1, k_2, k_3, N, (p_{i,j})_n, N_r), \\ T_{pm} = f(k_1, k_3), \\ T_{об} = f(k_1, k_3), \\ T_o = f(k_1, k_3). \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Особенностью сборки крупногабаритных изделий является значительные потери времени на выполнение ненужных перемещений крупногабаритных деталей,

входящих в сборочную единицу, в следствии недостаточной проработки последовательности выполнения операций сборки (T_{pm}).

Целесообразно применение PLM-систем, в первую очередь CAD- и CAPP-систем, а также VR-технологий, которые позволяют наглядно представить как саму сборочную единицу, так и последовательность выполнения сборочных операций, в том числе и перемещения крупногабаритных деталей, что в свою очередь позволит уменьшить влияние недостаточной квалификации инженеров-технологов (K_2) и сложность сборочных единиц (K_3).

Применение VR-инструмента на первых 8 этапах и на 10 этапе подготовки производства сборки крупногабаритных изделий позволит сократить вероятность возникновения ошибок (p_{ij}) за счет наглядного масштабного представления и возможности выполнения манипуляций со сборочной единицей в VR-пространстве.

Процесс отладки технологического процесса (T_o) и обучения сборщиков ($T_{об}$) с применением наглядного представления сборочных единиц и процесса выполнения операций сборки с применением VR-инструмента, наряду с маркировкой деталей и их элементов, позволит уменьшить время выполнения сборочных операций за счет сокращения ненужных перемещений крупногабаритных деталей.

Для определения степени влияния указанных параметров на длительность подготовки производства при «традиционном» подходе и с применением VR-инструмента, необходимо проведение имитационного моделирования по схеме, показанной на Рисунке Рис. 2.2.

Для создания имитационной модели необходимо преобразовать выражение (2.7) таким образом, чтобы избавиться от индексов n , для чего требуется установить законы изменения вероятности возникновения ошибок (p_{ij}) и времени выполнения этапов подготовки производства (t_i).

Предположим, что в среднем, при каждом n -повторении i -этапа вероятность совершить ошибку (недоработку) будет уменьшаться, что можно выразить законом уменьшения вероятности следующего вида:

$$(p_{i,j})_n = (p_{i,j})_0^N, \quad (2.10)$$

где $(p_{i,j})_0$ – начальное значение вероятности возникновения ошибки.

Например, если начальное значение $p_0 = 0,7$, то график изменения вероятности будет иметь вид, показанный на Рисунке Рис. 2.3.

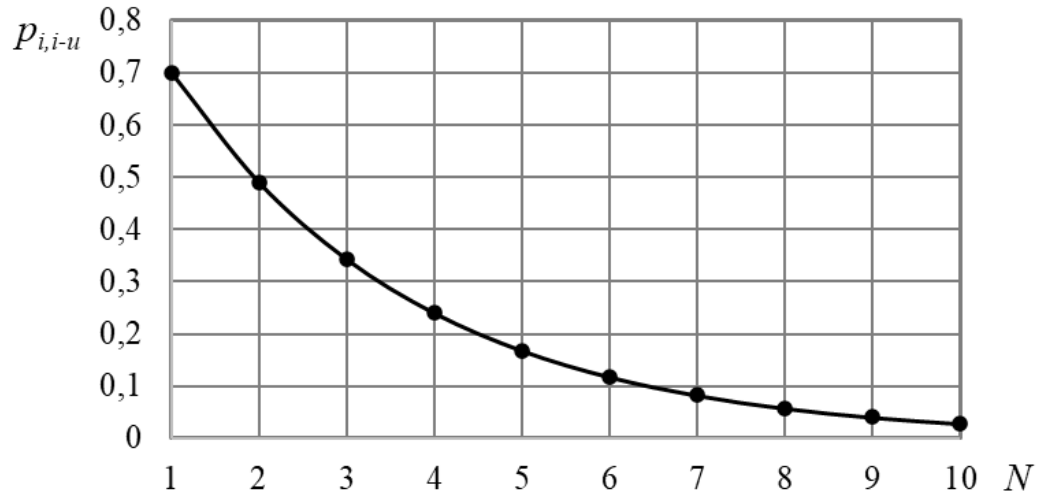


Рис. 2.3. Изменение вероятности возникновения ошибки с увеличением количества проходов

Время выполнения n -повторного i -этапа может быть различным, однако, предположим, что в среднем – доработка и исправления ошибок будет занимать меньше времени, чем было потрачено изначально (t_i).

Для возможности учитывания уменьшения времени может быть применена модель экспоненциального закона (простая модель обучения):

$$(t_i)_n = t_{\min} + [(t_i)_0 - t_{\min}] e^{-k(n-1)}, \quad (2.11)$$

где $t_{\min}$ – минимальное время выполнения этапа подготовки производства;

$(t_i)_0$ – время выполнение этапа при первом обслуживании задания;

k – коэффициент обучения, $k > 0$.

Коэффициент k показывает интенсивность достижения минимального времени выполнения этапа подготовки производства и имеет непосредственную связь с коэффициентом, учитывающим квалификацию инженеров-технологов (K_2).

На Рисунке Рис. 2.4 приведены графики зависимости $(t_i)_n$ от n при трех значениях коэффициента k . При этом: $t_{\min} = 30$ мин; $(t_i)_0 = 70$ мин.

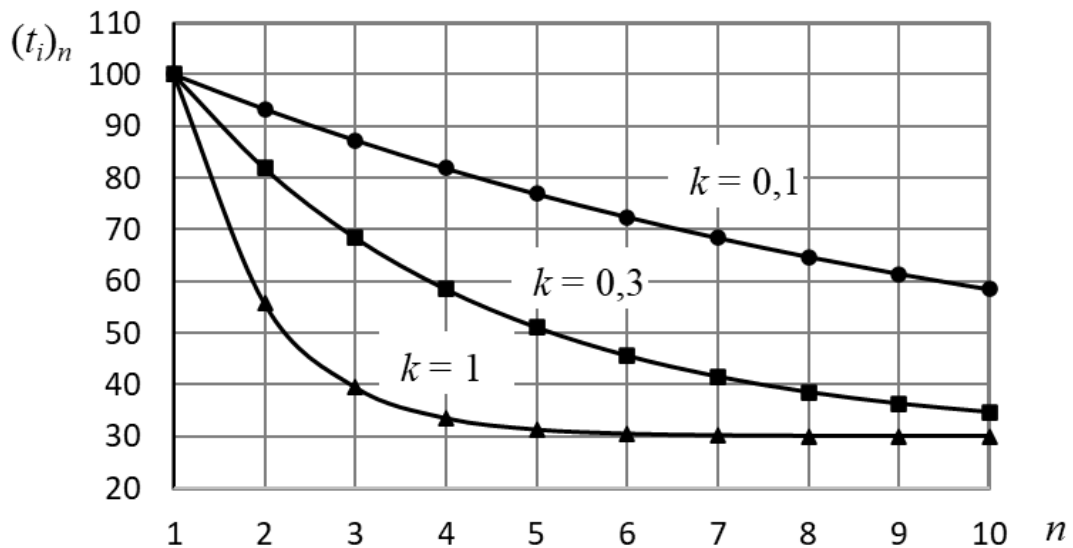


Рис. 2.4. Изменение времени выполнения этапа подготовки производства в зависимости от количества итераций (исправления ошибок и доработок)

Разработанная математическая модель оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий позволяет учитывать организационные параметры, оказывающие основное влияние на длительность подготовки производства.

Однако, аналитический расчет является трудоемким вследствие возникновения обратных связей и повторного прохождения этапов подготовки производства, в связи с чем предлагается использовать имитационное моделирование процесса подготовки производства на основании зависимостей (2.7), (2.10) и (2.11).

2.3. Разработка алгоритма функционирования имитационной модели для оценки длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

С целью оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий машиностроительных производств, необходимо разработать алгоритм функционирования имитационной модели, который позволит оценить и сравнить длительность подготовки производства без и с использованием VR-

инструмента.

В качестве основных данных для создания алгоритма использовалась аналитическая математическая модель подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с использованием VR-инструмента, согласно зависимостям (2.7), (2.10) и (2.11).

Основные требования к разрабатываемому алгоритму функционирования имитационной модели:

1. Имитационная модель должна быть универсальной и применяться для различных входных данных. Это позволяет использовать разрабатываемую имитационную модель для оценки длительности подготовки производства различных изделий с целью проведения последующего экономического обоснования внедрения VR-инструмента.

2. Имитационная модель должна быть способна оценить длительность подготовки производства различного количества заявок, то есть не зависеть от их конечного числа. Например, при оценке длительности подготовки производства крупногабаритных изделий как правило учитывается несколько штук или десятков заявок, а изделий средних габаритов намного больше.

3. Имитационная модель должна быть способна оценивать длительности подготовки производства для различных заявок на различных промежутках времени. Например, экономический эффект может быть определен за год эксплуатации или несколько лет.

4. Алгоритм имитационной модели должен учитывать вероятности возникновения ошибок, а также закон повышения вероятности успешного прохождения i -этапа подготовки производства при повторном прохождении, согласно зависимости (2.10).

5. Алгоритм имитационной модели должен учитывать закон изменения (уменьшения) времени выполнения этапов при повторном прохождении, согласно зависимости (2.11).

6. Алгоритм имитационной модели должен собирать статистику по каждому агенту (заданию на подготовки производства) и представлять данные в виде таблиц

и графиков для визуального анализа.

Алгоритм функционирования имитационной модели подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, в виде блок-схемы представлена на Рисунке Рис. 2.5.

На вход программы имитационного моделирования подаются основные данные, полученные в ходе проведения экспериментов с использованием средств виртуальной реальности, а также результаты опросов экспертов-технологов. Также задаются базовые значения для таких параметров как количество заявок-заданий, годовой фонд времени, количество рабочих мест и другие.

За определенный временной период на вход в модель подается за раз одна заявка-задание в виде агента, формируются переменные, собирающие информацию о времени, в течение которого агент находится на промежуточном переходе между двумя этапами, а также времени, которое агент находится внутри каждого блока-этапа в цепочке алгоритма программы.

Разработанная методика состоит из следующих основных блоков (см. Рис. 2.5):

1. Ввод исходных данных. Исходными данными для функционирования имитационной модели являются: число этапов подготовки производства (M); время выполнение этапа при первом обслуживании задания ($(t_i)_0$); начальное значение вероятности возникновения ошибки ($(p_{ij})_0$); начальное значение вероятности возникновения ошибок и повторного прохождения этапов подготовки производства, начиная с l -этапа ($(p_{i,i-l})_0$); время перерывов, связанного с режимом работы предприятия (T_n); годовой объем выпуска изделий или число заявок в год (N_r); коэффициент обучения (k).

2. Ввод j -агента (задания на подготовки производства) из множества N_r . В начале работы модели вводится первый агент и далее по порядку с заданным интервалом времени или законом распределения времени прибытия агентов.

3. Присваиваются значения новому j -агенту: число повторных проходов ($n := 0$) и номер первого этапа подготовки производства ($i := 1$).

4. Попадание j -агента в очередь $((q_i)_n)$ перед i -этапом подготовки производства. На данном этапе проводится сбор данных по времени нахождения агента в очереди $((t_{qi})_n)$. Через индекс n учитывается количество попаданий в одну и ту же очередь в случае повторного прохождения данного этапа.

5. Выполнение i -этапа подготовки производства для j -агента (задания). Время выполнения этапа рассчитывается по зависимости (2.11) с учетом n и $t_{\min}$.

6. Определяется вероятность возникновения ошибки $(p_{i,j})$ по зависимости (2.10) с учетом n . Определяется вероятность успешного прохождения задания на следующий $(i+1)$ этап подготовки производства $((p_{i,i+1})_n)$ по зависимости:

$$(p_{i,i+1})_n = 1 - (p_{i,j})_n. \quad (2.12)$$

7. Условие: возникла ли ошибка после прохождения i -этапа подготовки производства?

8. Если условие в блоке 7 неверно, то есть ошибки не возникло, то агент переходит к следующему $(i+1)$ этапу подготовки производства. Присваивается номер следующего этапа: $i := i + 1$.

9. Условие: $i \leq M$? То есть, номер следующего этапа больше, чем число этапов подготовки производства?

10. Если условие в блоке 9 неверно, то проводится расчет общего времени нахождения агента (заявки) в подготовки производства $((T_{\text{пп}})_j)$. При этом агент выводится из модели.

11. Если условие в блоке 7 верно, то агент должен вернуться на предыдущий этап подготовки производства и ему присваивается индекс повторного прохождения $n := n + 1$.

12. Если условие в блоке 9 верно, то агент отправляется на следующий этап подготовки производства.

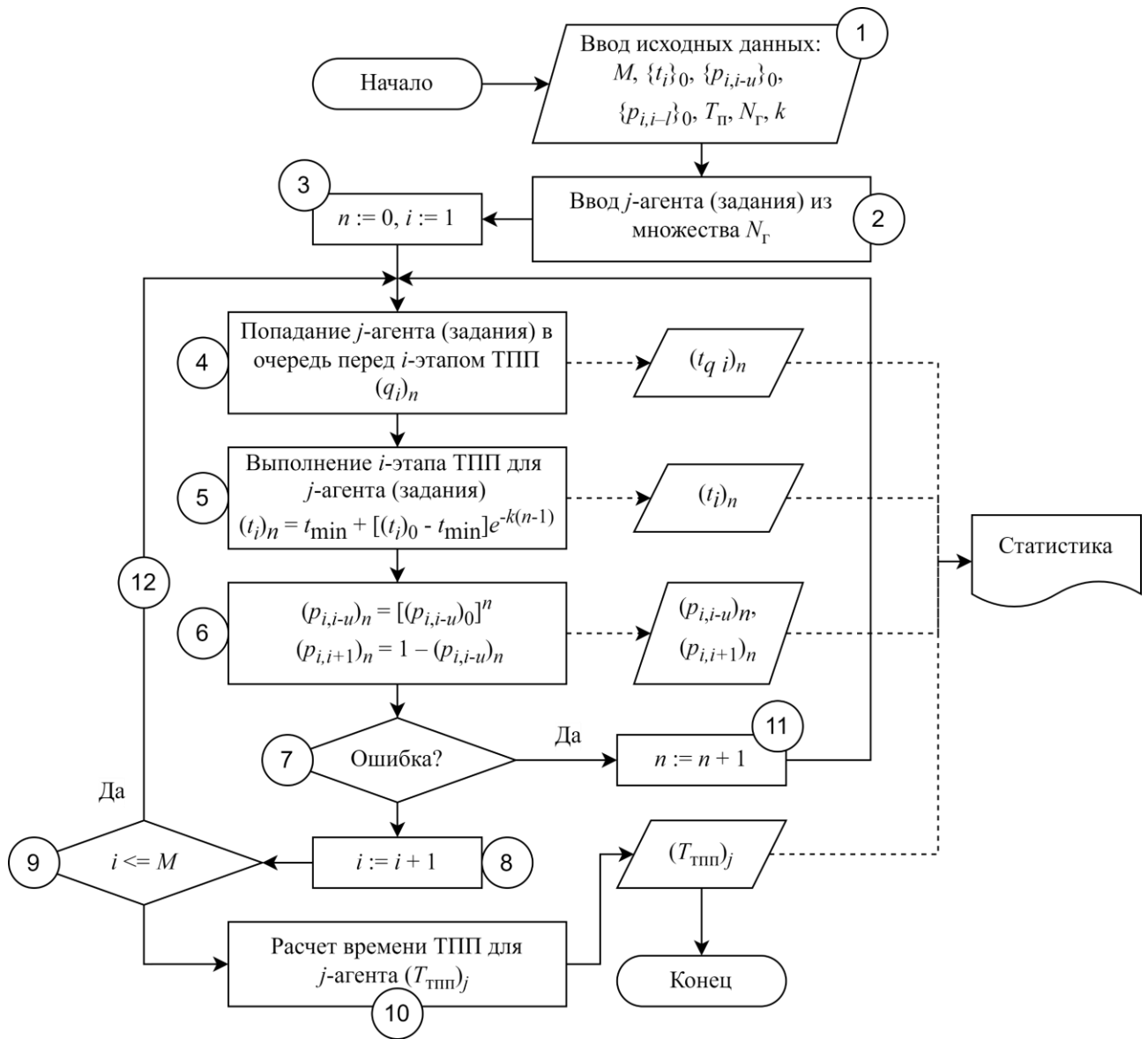


Рис. 2.5. Алгоритм функционирования имитационной модели оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий

По мере прохождения агентом-заданием всех этапов, собираются статистические данные по изменению вероятности возникновения ошибок, количества этих ошибок, изменению времени внутри каждого этапа и производятся расчеты временных показателей.

Таким образом, определив законы изменения вероятностей возникновения ошибок и изменения времени выполнения этапов подготовки производства, был разработан алгоритм функционирования имитационной модели (Рисунок Рис. 2.5), задачей, которого является сбор статистических данных (штриховые линии) для оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий.

Выводы по Главе 2

1. Была сформирована структурная схема основных этапов организации подготовки производства и определено ключевое влияние технологии виртуальной реальности на основные процессы этапов ТПП.

2. 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.

3. Выявлены основные факторы и произведен учет их влияния на формирование общего времени, затрачиваемого на организацию подготовки производства крупногабаритных изделий.

4. Сформированы основные причины изменения вероятностей возникновения ошибок и изменения времени при организации подготовки производства крупногабаритных изделий.

ГЛАВА 3.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ VR-ИНСТРУМЕНТА НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА (СБОРКИ) КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ

3.1. Последовательность проведения экспериментальных исследований по оценке длительности подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

Разработанная во второй главе математическая модель оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий и алгоритм функционирования имитационной модели (Рис. 2.5) формализуют процесс подготовки производства как многоэтапную стохастическую систему с обратными связями. Однако для практического использования этих моделей необходимо задать количественные значения следующих параметров:

1. Средняя длительность выполнения каждого из представленных этапов подготовки производства при традиционном подходе.
2. Аналогичные показатели при использовании разработанного VR-инструмента.
3. Вероятности возникновения ошибок и соответствующих обратных связей между этапами (Рис. 2.2).
4. Коэффициенты обучения (k), характеризующие сокращение времени выполнения этапа при повторных прохождении.

Получение этих данных только аналитическим или расчетным путем невозможно из-за высокой степени неопределенности и зависимости от конкретных условий производства, квалификации персонала и сложности изделий. Поэтому в работе используется комплексная экспериментальная методика, объединяющая два независимых способа получения данных:

1. Структурированный опрос экспертов-технологов – для оценки параметров традиционного процесса подготовки производства.

2. Контролируемые эксперименты с использованием разработанного VR-инструмента – для оценки параметров процесса подготовки производства с применением технологий виртуальной реальности.

Полученные в ходе экспериментов данные систематизируются и затем используются в качестве входных параметров имитационной модели. Такой подход обеспечивает достоверность имитационной модели, а также позволяет количественно оценить эффективность внедрения VR-инструмента.

Для обеспечения воспроизводимости и прозрачности результатов была разработана последовательность экспериментальных исследований, представленная на Рисунке Рис. 3.1.

Алгоритм включает следующие основные этапы:

1. Формирование исходных данных для экспериментов – определяется номенклатура крупногабаритных изделий (изделия вагоностроительной, самолетостроительной, машиностроительной и энергетической отраслей). Подготавливаются комплекты конструкторской документации (3D-модели, чертежи, спецификации). Разрабатываются критерии оценки качества разработанной технологии сборки (количество ошибок, полнота маршрута, эргономичность).

2. Формирование анкет для опросов экспертов, включающие в себя данные по объектам сборки (3D-модели, чертежи, спецификации), лист вопросов для указания временных показателей для разработки каждого этапа подготовки производства, с учетом различных факторов производства (наличие оснастки, инструментов, оборудования, квалификация рабочих, размеры изделий и т.п.).

3. Проведение опроса среди участников имеющих соответствующий опыт работ по разработке подготовки производства сборки крупногабаритных изделий. Во время заполнения анкет эксперты выставляют свои оценки в виде временных и вероятностных значений параметров для каждого этапа подготовки производства сборки крупногабаритных изделий.

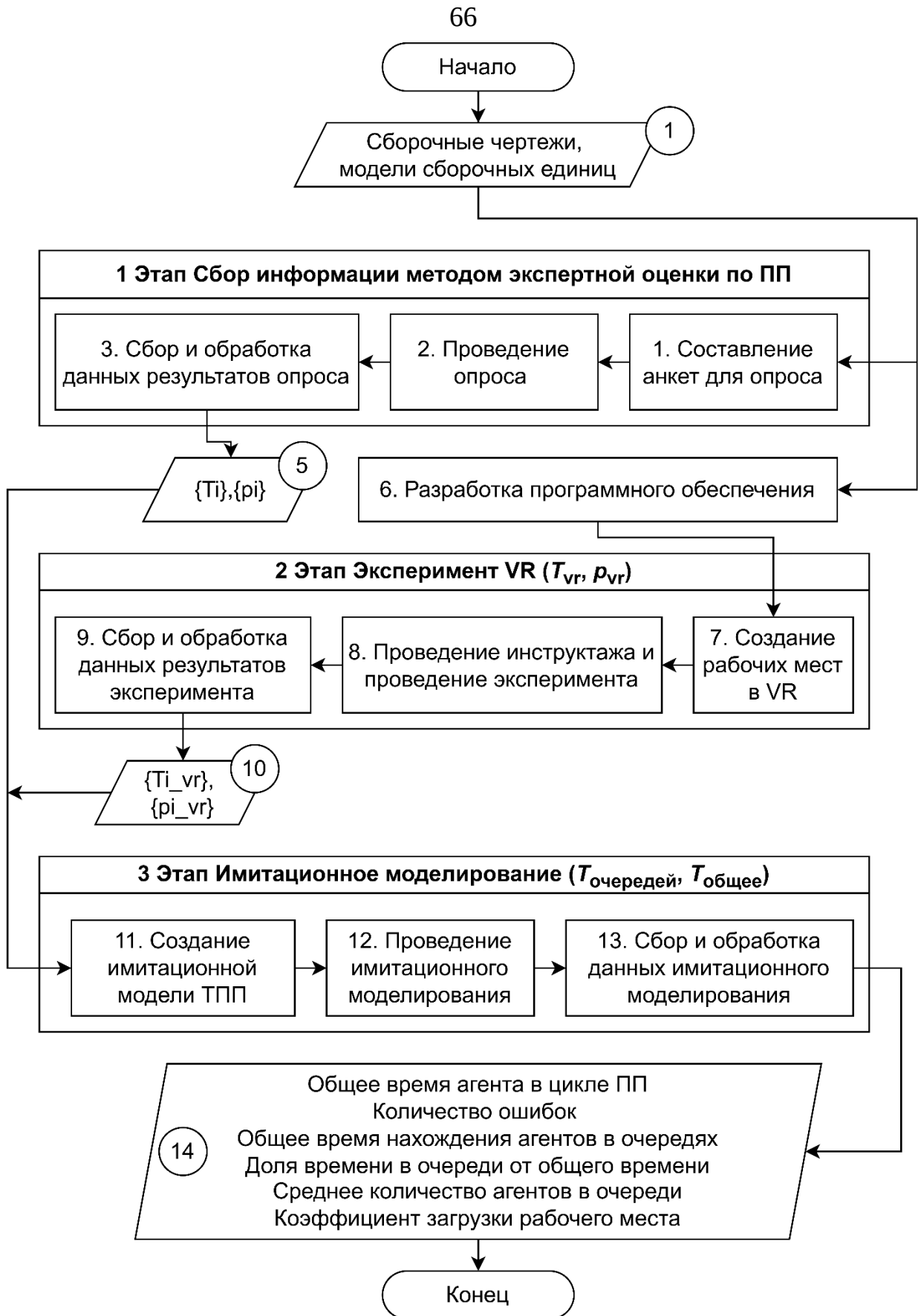


Рис. 3.1. Алгоритм проведения экспериментов с целью определения выходных параметров имитационного моделирования

4. Сбор и анализ данных по результатам опроса экспертов подразумевает формирование таблиц временных и вероятностных значений для каждого этапа подготовки производства сборки крупногабаритных изделий, полученных путем изучения анкет участников опроса.

5. На основании полученных методом экспертных оценок данных формируются значения длительности каждого этапа подготовки производства и вероятности возникновения ошибок при разработке технической документации, которые являются входными данными для имитационного моделирования организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий традиционным методом без использования VR-инструмента.

6. Перед началом эксперимента с использованием VR-инструмента необходимо разработать ПО, позволяющее проводить подготовки производства в условиях виртуальной реальности, обеспечивающей загрузку и расположение моделей в пространстве; загрузку, редактирование, запись конструкторской и технической документации, для внутреннего использования.

7. Создание рабочих мест, включающую в себя подготовку VR оборудования, установку программного обеспечения, загрузку необходимой документации и 3D-моделей.

8. На следующем этапе группе проводится инструктаж, в котором объясняется порядок выполнения работы по разработке подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с использованием инструмента виртуальной реальности, объясняется на какие факторы следует обратить внимание и каким образом подсчитывается и оценивается результат.

9. Далее проводятся замеры длительности и количество ошибок, совершенных во время выполнения задания. Данные заносятся в таблицы, проводится анализ и выявляются ключевые закономерности, производится оценка вероятностей возникновения ошибок.

10. Результаты вычислений вносятся в таблицу для дальнейшего использования в качестве исходных данных для имитационного моделирования разработки

этапов подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с использованием инструмента виртуальной реальности.

11. На этапе создания имитационной модели реализуется алгоритм функционирования имитационной модели оценки длительности подготовки производства сборки крупногабаритных изделий (Рис. 2.5). В программе AnyLogic создаются логические звенья, соответствующие этапам подготовки производства сборки крупногабаритных изделий из инструментов программного обеспечения.

12. Имитационная модель запускается несколько раз для сравнения и вывода временных показателей при традиционном подходе к организации подготовки производства и при использовании VR-инструмента.

13. Данные, полученные в ходе имитационного моделирования, записываются в специальные массивы. К ним относятся такие показатели как время выполнения задания, время простоя в очередях, количество ошибок и прочие.

14. По данным, записанным в массивы, создаются графики зависимостей временных показателей, основываясь на которые делается вывод об эффективности внедрения VR-инструмента в процесс создания рабочей документации в ходе подготовки производства сборки крупногабаритных изделий.

По завершению всех этапов представленного алгоритма набирается достаточное количество данных для принятия решения о внедрении инструмента VR в дальнейший цикл разработки документации для подготовки производства сборки крупногабаритных изделий.

3.2. Оценка длительности этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий без применения VR-инструмента

Для верификации данных экспериментов и учета факторов было проведено анкетирование опытных технологов, начальников бюро подготовки производства и конструкторов. Эксперты оценили типичные, минимальные и максимальные длительности этапов, вероятности рискованных событий и влияние ресурсных ограничений (Таблица 3.).

**Временные показатели этапов подготовки производства, полученные
методом экспертной оценки**

Этап \ Номер п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Анализ исходных данных и обработка на технологичность, часы	8,33	11,2	14,28	9,81	13,8	9,9	8,26	10,26	7,49	7,7
Разработка технологической схемы сборки, часы	8,56	5,9	9,36	7,2	8,8	8,96	8,72	5,95	5,85	9,28
Разработка технологического маршрута, часы сборки, часы	25,44	28,32	19,72	13,68	26,4	25,44	19,08	15,82	21,42	18,87
Разработка технологических операций, часы	31,9	48	44,46	41,44	28,86	31,2	41,4	39,6	28,35	29,97
Нормирование технологического процесса, часы	3,15	4,56	4,52	3,6	4,44	4,76	3,3	4,56	3,48	3,15
Оформление технологической документации, часы	14,3	12	9,9	18,88	9,63	15,4	16,65	18,4	9,28	16,95
Организация производства и рабочих мест, часы	17,55	11,77	18,56	16,35	16,35	10,08	14,04	14,3	9,36	18,24
Внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, часы	58,14	50,4	33,9	54,06	32,7	39,55	59,67	38,08	51,98	31,61
Обучение персонала, часы	10,2	9,04	8,34	4,28	5,9	5,7	7,84	4,52	6,36	5,25
Этап \ Номер п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Анализ исходных данных и обработка на технологичность, часы	14,4	11,7	10,9	11,9	6,54	12,54	7,98	9,72	11,24	7,77
Разработка технологической схемы сборки, часы	8,88	5,45	5,25	5,75	9,28	6,36	6,96	5,75	8,64	6,01
Разработка технологического маршрута, часы сборки, часы	26,16	23	24,2	27,12	13,08	18,88	28,56	16,66	23,54	25,2
Разработка технологических операций, часы	41,04	39,24	26,75	37,76	45,63	28,25	36,89	35,97	42,55	28,89
Нормирование технологического процесса, часы	4,68	3,33	3,15	3,27	3,27	4,48	4,76	3,15	3,39	4,76
Оформление технологической документации, часы	10,8	16,24	13,78	15,6	14,3	9,6	14,7	16,1	15,96	16,8
Организация производства и рабочих мест, часы	14,28	17,6	16,24	14,04	14,95	15,4	11,9	18,72	18,56	11,9
Внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, часы	54,29	27,1	47,15	29,7	61,2	43,68	44,84	61,6	55,46	25,2
Обучение персонала, часы	5,35	8,8	6,72	6,78	8,4	6,84	4,72	6,84	7,49	7,35

Собранные данные были статистически обработаны. Для каждого типа этапа были определены средние значения величин длительности прохождения каждого этапа подготовки производства. На основе анализа временных связей были формализованы логические правила взаимодействия этапов и вероятности возникновения сбоев.

3.3. Экспериментальные исследования по оценке длительности этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий с применением VR-инструмента

Для количественной оценки длительности этапов подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с использованием инструмента виртуальной реальности необходимо разработать программное обеспечение, содержащее набор инструментов, позволяющий проводить различные операции с технологической документацией, трехмерными цифровыми моделями и использовать средства измерения для контроля процессов сборки крупногабаритных изделий в ходе сборки.

3.3.1. Разработка программного обеспечения для выполнения экспериментов по оценке длительности выполнения этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

Создание программного продукта для разработки подготовки производства сборки крупногабаритных изделий подразумевает использование программного обеспечения с достаточным набором инструментов для создания виртуальной среды и взаимодействия с трехмерными цифровыми моделями, а также для работы с внешними документами. С этой целью оптимально использование среды разработки Unity (Рис. 3.2) от компании Unity Technologie, также специальных надстроек для управления и контроля элементов виртуальной средой SteamVR.

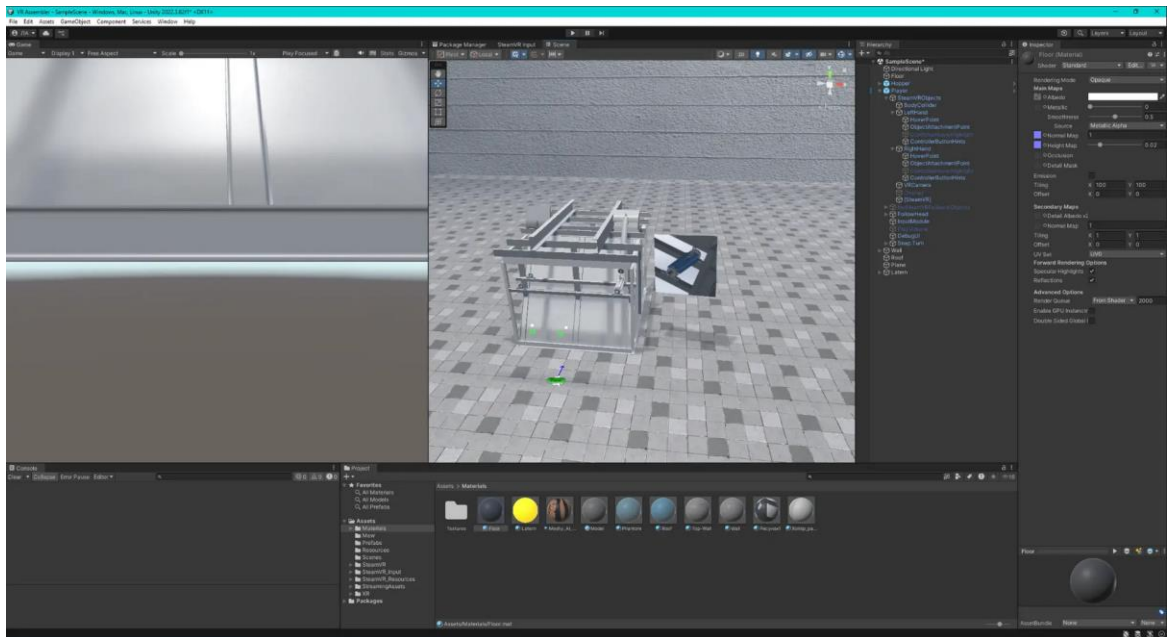


Рис. 3.2. Рабочий интерфейс среды разработки Unity

После выбора среды разработки необходимо обеспечить возможность загрузки элементов создаваемых изделий и предметов обстановки для создания рабочих мест. Для этого разрабатывается и внедряется программный алгоритм работы с меню трехмерных моделей (Рис. 3.3) в результате, которого становится возможным не только размещение собираемого изделия, но и создание рабочих мест инженеров-технологов и рабочих-сборщиков (Рис. 3.4).

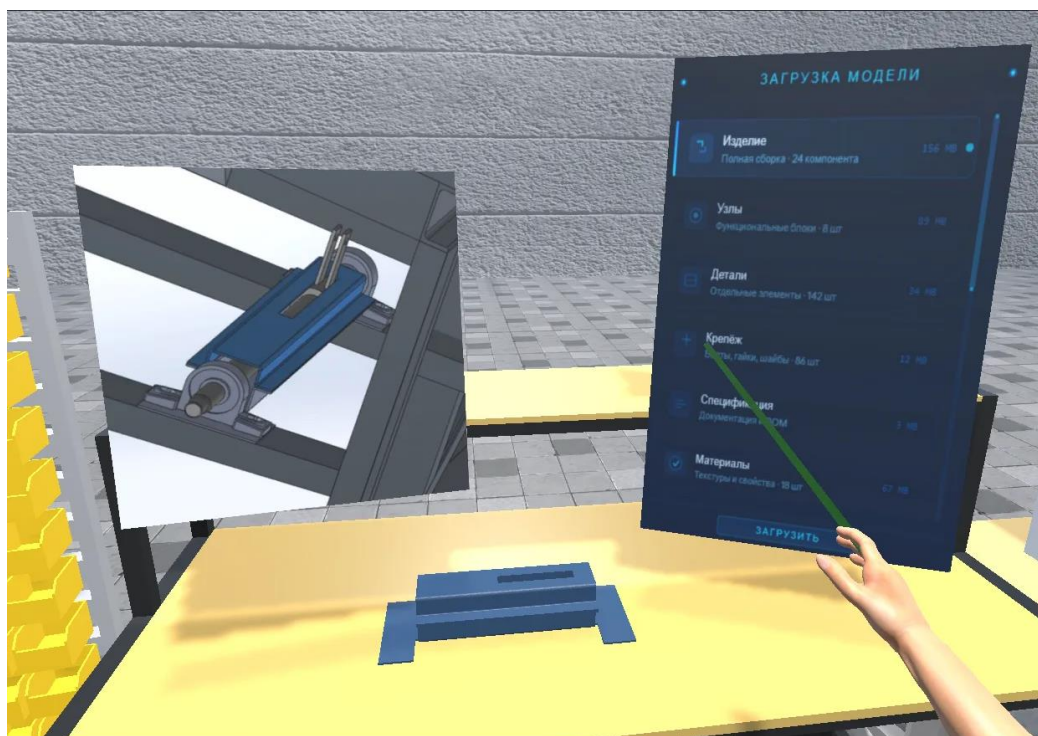


Рис. 3.3. Меню загрузки моделей

Следующим шагом идет настройка меню вывода на экран информации об объектах собираемого изделия (Рис. 3.5) для получения точных сведений назначения изделия, условиях работы, требований к основным соединениям (Рис. 3.6) и т.д. Для этой цели создается элемент canvas с выводом изображения из сопровождающих документов.

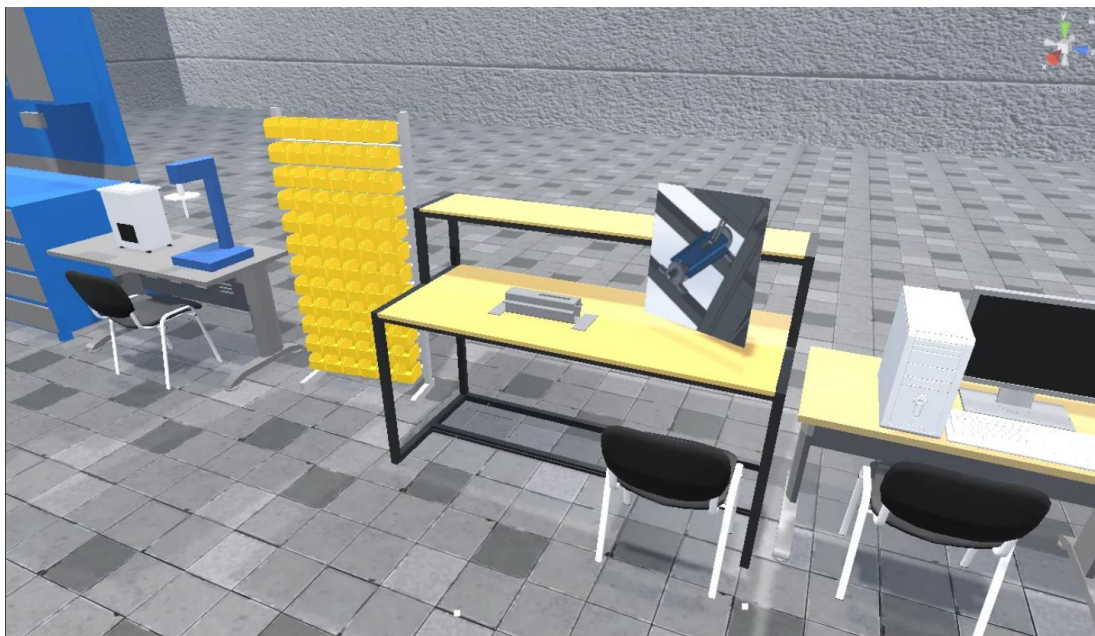


Рис. 3.4. Загруженные трехмерные модели в программном обеспечении

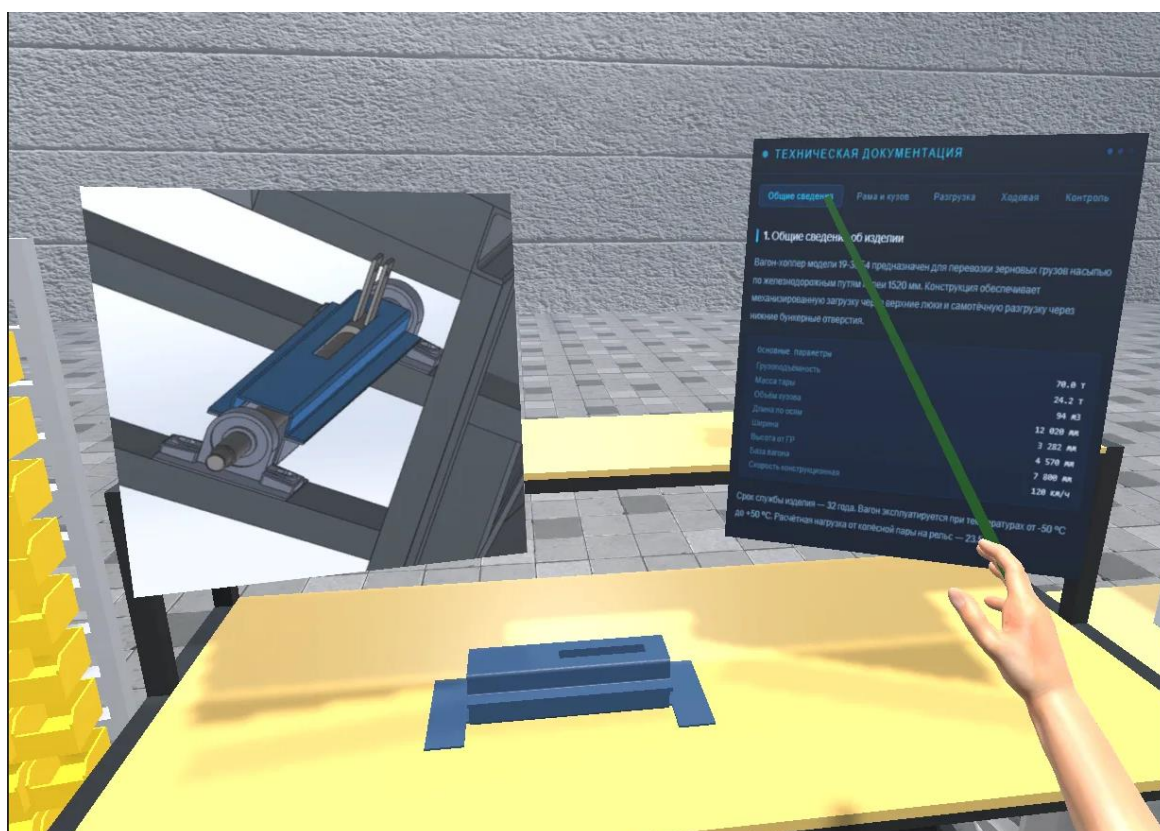


Рис. 3.5. Меню вывода на экран информации об объекте

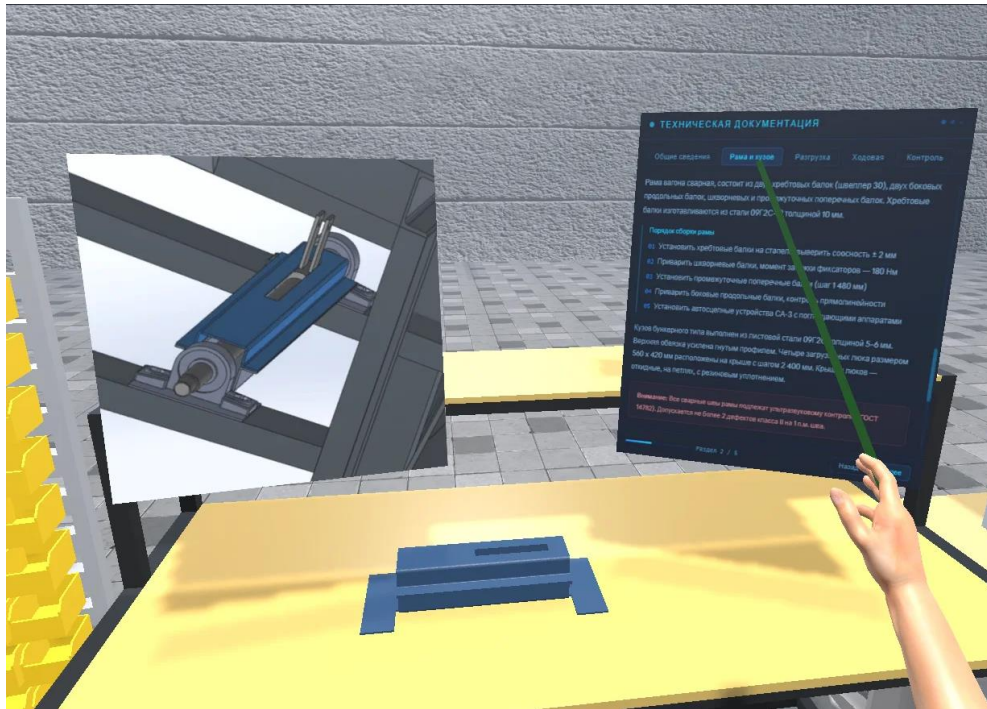


Рис. 3.6. Меню вывода конструкторских требований при сборке объекта

С целью создания и редактирования технической документации используется инструмент canvas с возможностью записи на жесткий диск информации из программы. Таким образом реализуется возможность документации таких элементов подготовки производства как схема сборки, маршрут сборки, технологические операции сборки (Рис. 3.7).



Рис. 3.7. Заполнение меню маршрута сборки

3.3.2. Проведение экспериментальных исследований по оценке длительности этапов подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий с применением VR-инструмента

Участники эксперимента выполняли роли технологов в лабораторной среде, оснащенной необходимыми ПО и оборудованием. Были разработаны учебно-производственные кейсы разной сложности. В ходе экспериментов варьировались:

Качество входных данных (чертежи с наличием и отсутствием ошибок);

Номенклатура изделий (отличия в форме, размерах, количестве узлов);

Фиксировались точные временные метки начала и окончания этапов, простои, время устранения ошибок и длительность. Данные о нормировании и внедрении разработанных технологических процессах собирались методом экспертной оценки специалистом с учетом специфики внедрения VR-процессов.

По окончании экспериментов была сформирована таблица данных о временных показателях подготовки производства с использованием среды виртуальной реальности (Таблица 4).

3.4. Проведения имитационного моделирования подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

3.4.1. Имитационное моделирование подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием VR-инструмента

С целью получения количественных значений факторов, связанных с организацией подготовки производства крупногабаритных объектов с использованием средств виртуальной реальности, возникает необходимость выполнения имитационного моделирования.

Для проведения имитационного моделирования был составлен алгоритм порядка выполнения основных операций моделирования (Рис. 2.5), сформированы таблицы входных данных (Таблицы 3 и 4), прописаны основные программные сценарии поведения агентов, подготовлено специализированное программное обеспечение.

**Временные показатели этапов подготовки производства, полученные в
результате экспериментов, проводимых с использованием
VR-инструмента**

Этап \ Номер п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Анализ исходных данных и обработка на технологичность, часы	8,92	10,51	10,5	10,85	8,24	5,5	10,46	9,77	6,48	10,9
Разработка технологической схемы сборки, часы	6,46	5,54	5,68	4,23	6,94	6,15	7,87	7,33	4,69	5,96
Разработка технологического маршрута, часы сборки, часы	21,74	11,72	14,51	14,53	11,83	15,93	21,53	21,53	20,23	18,49
Разработка технологических операций, часы	27,49	32,62	29,87	39,39	27,45	26,89	36,83	37,97	35,1	27,59
Нормирование технологического процесса, часы	3,26	2,3	3,88	3,62	2,77	2,5	2,29	3,58	3,92	2,62
Оформление технологической документации, часы	8,14	14,56	8,98	14,74	10,2	8,39	10,42	9,35	13,67	7,96
Организация производства и рабочих мест, часы	8,61	8,99	9,72	11,18	10,7	10,32	15,09	10,98	14,06	14,98
Внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, часы	43,81	41,76	23,61	45,18	42,45	42,15	53,8	39,53	31,5	32,1
Обучение персонала, часы	3,42	4,44	4,61	3,49	4,1	6,05	5,82	6,26	5,17	3,8
Этап \ Номер п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Анализ исходных данных и обработка на технологичность, часы	8,53	5,49	6,22	10,53	10,03	6,17	7,59	11,13	9,36	6,96
Разработка технологической схемы сборки, часы	7,81	7,04	7,46	4,18	4,23	7,49	7,7	7,05	5,97	5,07
Разработка технологического маршрута, часы сборки, часы	12,6	12,32	20,19	18,72	14,59	21,37	19,96	16,51	14,76	17,33
Разработка технологических операций, часы	38,94	26,72	26,75	31,7	24,93	27,35	38,47	33,42	25,29	24,63
Нормирование технологического процесса, часы	2,11	2,91	3,59	2,39	3,47	2,25	2,3	2,92	2,39	2,7
Оформление технологической документации, часы	12,7	14,48	12,33	8,43	13,56	10,19	9,82	11,39	13,82	9,19

Таблица 4 (окончание)

Организация производства и рабочих мест, часы	12,59	7,41	12,75	7,41	15,74	7,99	7,75	14,26	8,88	11,97
Внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, часы	43,3	53,9	41,04	49,61	43,23	51,5	48,81	28,6	48,1	46,5
Обучение персонала, часы	5,13	5,84	4,01	3,15	5,96	5,97	4,86	7,84	6,47	3,1

3.4.2. Разработка имитационной модели оценки длительности подготовки производства

На основе представленного алгоритма была разработана имитационная модель в среде AnyLogic (Рис. 3.8). 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.

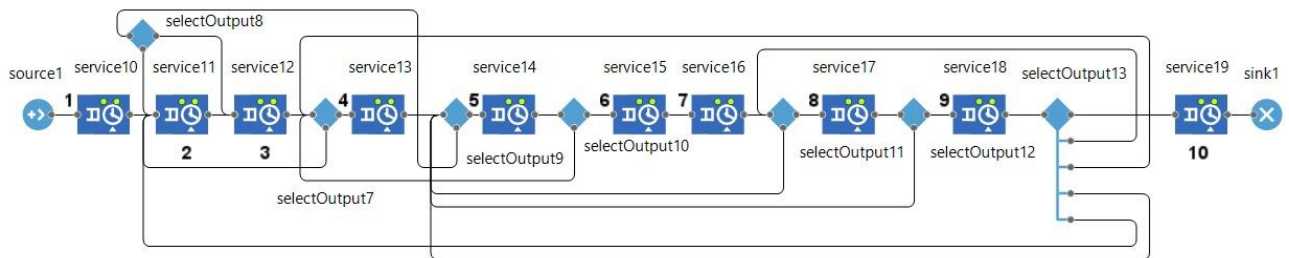


Рис. 3.8. Схема имитационной модели подготовки производства в среде AnyLogic

На схеме представлены следующие обозначения этапов подготовки производства:

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.

Для создания данной модели были задействованы следующие элементы моделирования в среде AnyLogic:

1. Блоки source (Рис. 3.9) на которые задаются основные временные параметры, присваиваемые агентам-заданиям в заданном порядке из подгружаемого файла таблицы в формате .xlsx, а также максимальное количество заявок и частота подачи новых.

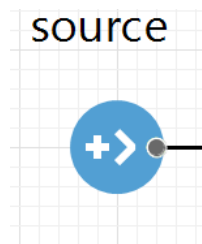


Рис. 3.9. Блок формирования агентов-заявок в системе имитационного моделирования

2. Элемент события event (Рис. 3.10), который останавливает процесс симуляции по достижению контрольной временной отметки, заданной величиной фонда времени.

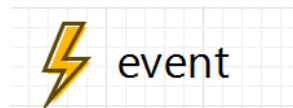


Рис. 3.10. Элемент события с заданным условием выполнения

3. Переменные величины количества агентов-заданий, персонала, информации о задержках в очередях, номеров агентов, а также фонда времени, задаваемые также с помощью соответствующих значений из файла таблицы (Рис. 3.11).

Количество агентов	 Q
Количество персонала	 Per
Фонд времени	 F

Рис. 3.11. Элементы содержащие значения переменных величин

4. Файл внешних данных excelFile (Рис. 3.12) содержащий в себе ключевые значения переменных, заданные в виде таблицы данных в формате .xlsx;

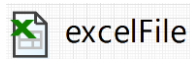


Рис. 3.12. Блок взаимодействия с внешними данными формата .xlsx

5. Блоки sink (Рис. 3.13), позволяющие собирать информацию по завершению прохождением агентов-заданий всех блоков этапов подготовки производства, содержит в себе следующие формулы и методы, необходимые для построения графиков и анализа информации:

```
agent.General_time = time() - agent.time;
General_time.add(agent.i, agent.General_time);
General_error.add(agent.i, agent.error);
General_queue_time.add(agent.i, agent.General_queue_time);
Proportion.add(agent.i, agent.General_queue_time/agent.General_time);
```

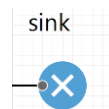


Рис. 3.13. Блок удаления агентов, успешно завершивших прохождение всех этапов подготовки производства

6. Блоки service (Рис. 3.14), являющиеся аналогами основных этапов подготовки производства изделий на предприятии, включают в себя данные о времени, которое затрачивает агент-задание при прохождении конкретного этапа. Включает в себя следующие методы:

на входе в блок:

```
agent.queue_time = time();
q_queue = q_queue + 1;
Middle_queue.add(time(), q_queue);
```

на выходе из блока:

```
agent.General_queue_time = agent.General_queue_time + time() - agent.queue_time;
q_queue = q_queue - 1;
Middle_queue.add(time(), q_queue);
```



Рис. 3.14. Элемент захвата и удержания ресурсов в системе имитационного моделирования

7. Блоки информации о персонале производственного предприятия Personal (Рис. 3.15), включающие в себя данные о кадрах, задействованных непосредственно в цепочке этапов процесса подготовки производства.

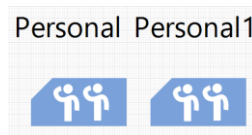


Рис. 3.15. Блоки ресурсов персонала в имитационной модели

8. Блоки условий selectOutput, отвечающие за обратные связи между различными этапами подготовки производства в связи с различными обстоятельствами (наличие ошибок в задании, возникающих на предыдущих этапах разработки, внесение изменений в связи с оптимизацией технологических процессов изготовления изделия, изменения рабочих условий и другие). В имитационной модели представлены варианты с двумя возможными вариантами распределения (Рисунок Рис. 3.16) и множественным выбором распределения (Рис. 3.17.).

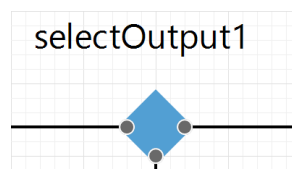


Рис. 3.16. Элемент условия с выбором одного из двух вариантов

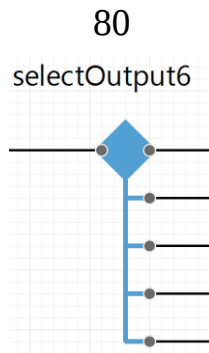


Рис. 3.17. Элемент условия с множественным выбором следования агента

9. Блоки сбора данных о времени, затрачиваемом на прохождение всех этапов подготовки производства, необходимы для построения графиков зависимостей по результатам имитационного моделирования (Рис. 3.18).

В свою каждый агент-задание сохраняет в себе набор данных о времени прохождения этапов, условиях активации обратных связей, коэффициентах отработки заданий в разных условиях, количестве отработанных циклов, времени простоя в очереди, общее затрачиваемое время на прохождение всей цепочки этапов подготовки производства и другие значения, необходимые для полного анализа и синтеза графических данных в виде переменных.

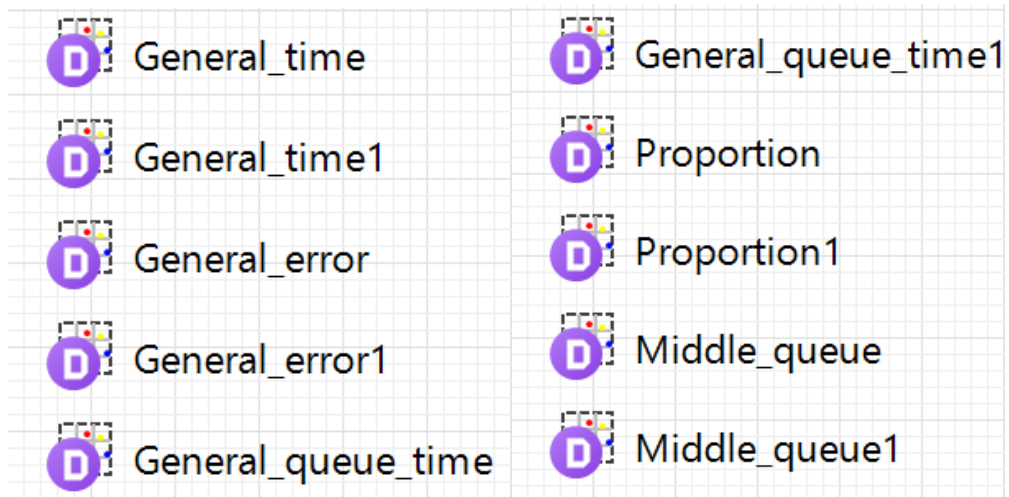


Рис. 3.18. Элементы сбора данных по результатам имитационного моделирования

Модель прошла этапы верификации (проверка корректности логики) и валидации (проверка адекватности реальному процессу) с привлечением экспертов.

3.4.3. Анализ результатов имитационного моделирования подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

По результатам работы модели были построены графики, на которых представлено распределение агентов в системе в зависимости от времени их нахождения в цикле подготовки производства (Рис. 3.19).

Среднее время нахождения агента в системе при использовании VR сокращается на 41 час, что составляет 19% от времени, затрачиваемого на подготовки производства без инструмента VR, а количество ошибок при прохождении системы уменьшилось на 39%.

Среднее количество агентов в очереди сократилось на 20% (Рис. 3.20).

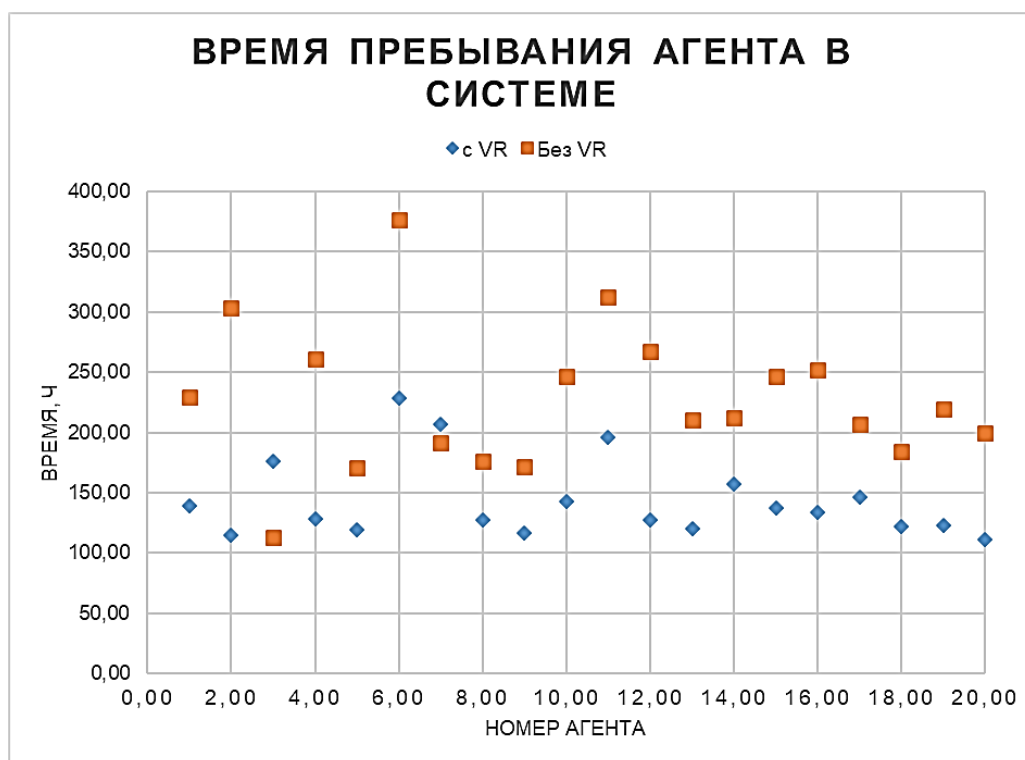


Рис. 3.19. График времени, затрачиваемого агентами на прохождение модели

Среднее время агента в очереди снизилось на 6,5 часов, что составило порядка 40% от затрат времени в очереди агентов, обрабатывающихся без использования VR (Рис. 3.21).

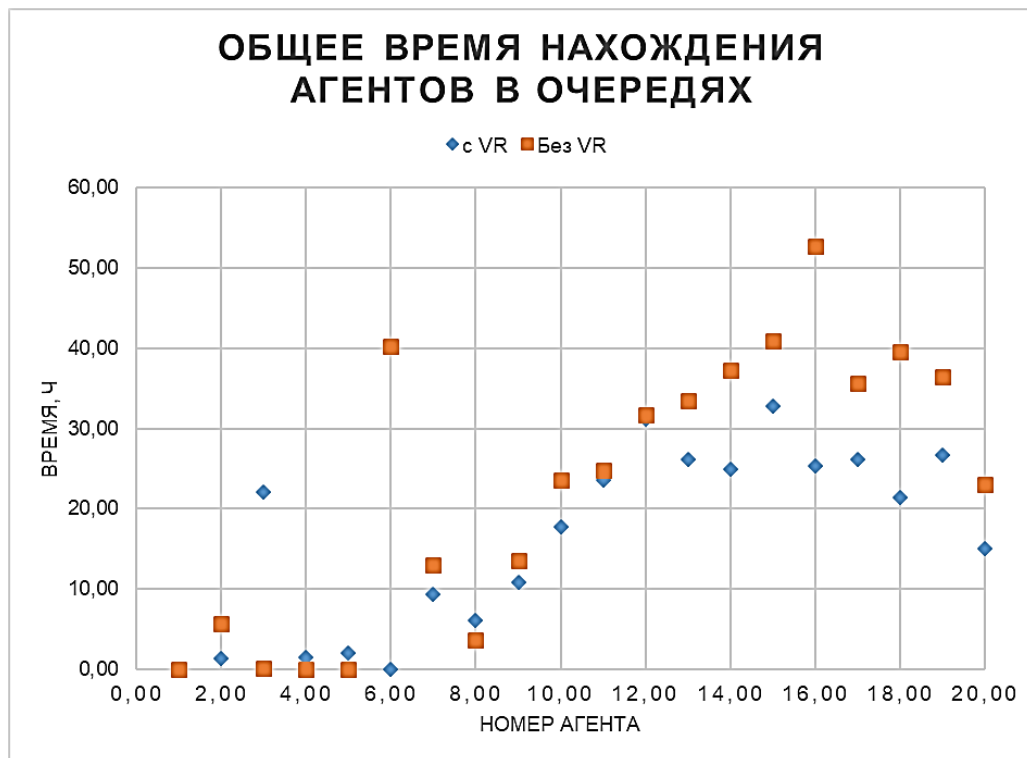


Рис. 3.20. График времени, затрачиваемого агентами в очереди, при отработке системы

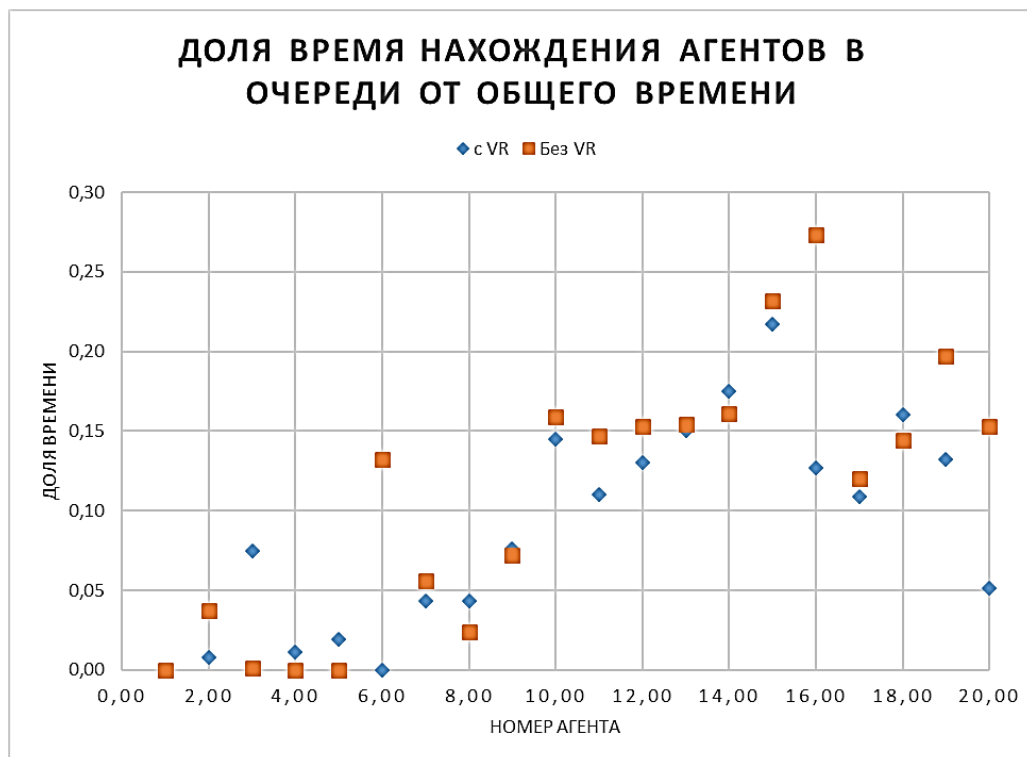


Рис. 3.21. График отношения времени, затрачиваемого агентом на отстаивании в очередях к времени, затрачиваемому на прохождение всей модели

Вместе с этим, 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.

Интеграция имитационного моделирования и VR-инструмента при подготовке производства крупногабаритных изделий позволяет существенно повысить эффективность процесса проектирования. Предложенная методика комбинирования данных контролируемых экспериментов и экспертных оценок позволяет создать имитационную модель, отражающую сложную динамику временных связей между этапами подготовки производства.

Анализ данных показал сокращение общего времени выполнения задания на 19%, снижение количества ошибок на 39% и уменьшение времени ожидания в очередях на 40%. Представленные результаты свидетельствуют о существенном ускорении прохождения этапов подготовки производства и оптимизации использования ресурсов.

Таким образом, внедрение VR-технологий оказывает значительное воздействие на оптимизацию процессов подготовки производства, позволяя не только сократить продолжительность цикла подготовки, но и повысить качество процессов за счет минимизации ошибок и простоев. Это делает VR перспективным инструментом для повышения эффективности организации производства, улучшения качества процесса подготовки производства и ускорения вывода продукции на рынок.

Выводы по Главе 3

1. Разработана и реализована программа экспериментальных исследований, включающая экспертный опрос и контролируемые эксперименты с VR-инструментом. Определены критерии отбора и требования к проведению экспериментов.

2. В результате экспертного опроса получены количественные оценки длительности этапов подготовки производства при традиционном подходе, а также вероятности возникновения обратных связей (Таблица 3).

3. Разработан специализированный VR-инструмент на базе Unity и SteamVR,

обеспечивающий загрузку CAD-моделей, работу с документацией на виртуальных экранах, анализ собираемости и логирование экспериментальных данных. В ходе экспериментов получены временные показатели этапов подготовки производства при использовании VR (Таблица 4).

4. Экспериментально подтверждено сокращение времени выполнения этапов подготовки производства на 15–32% и снижение количества ошибок на 39% при использовании VR-инструмента по сравнению с традиционным подходом.

5. На основе полученных экспериментальных данных построена имитационная модель в среде AnyLogic, которая показала сокращение общего времени цикла подготовки производства на 19%, времени ожидания в очередях – на 40%. Результаты моделирования верифицированы и валидированы с привлечением экспертов.

6. Предложенная методика сбора данных и имитационного моделирования может быть применена для любых типов крупногабаритных изделий (вагоны, судовые секции, авиационные агрегаты) при условии адаптации входных параметров.

ГЛАВА 4.**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВНЕДРЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ
ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
VR-ИНСТРУМЕНТА****4.1. Разработка алгоритма методики внедрения и организации подготовки
производства с использованием VR-инструмента**

С целью внедрения в организацию производственного процесса, в частности разработки подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с использованием VR-инструмента необходимо определить ключевые показатели, от которых будет зависеть насколько эффективным окажется данное внедрение. Для этого необходимо разделить данный процесс на этапы, включающие в себя следующие шаги (Рис. 4.1):

1. Определение имеющихся на предприятии основных средств, ключевой персонал, инструментарий и прочие принадлежности, обеспечивающие работоспособность технологического отдела при разработке подготовки производства.
2. Произвести предварительный расчет временных показателей по представленной формуле из математической модели (2.7).
3. Выбрать необходимое оборудование для реализации инструмента виртуальной реальности, а также обеспечить работоспособность программного обеспечения.
4. Произвести имитационное моделирование со значениями, полученным из расчетов по математической модели.
5. На основе данных по имитационному моделированию сделать заключение о возможности применения инструмента VR в процесс подготовки производства.
6. При отсутствии необходимых средств есть возможность пересмотра входных данных для установления узких мест и решения вопросов с ними связанных (количества рабочих мест, фонда рабочего времени, стоимость оборудование и другие).

7. При успешной оценке эффективности предложенного способа организации разработки подготовки производства сборки крупногабаритных изделий следующим шагом является проектирование рабочих мест.

8. Затем проводится финальная оценка экономической эффективности представленного способа организации процесса разработки подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием инструмента VR.

9. В случае негативной оценки эффективности внедрения VR-инструмента в организацию процесса разработки подготовки производства сборки крупногабаритных изделий производится пересмотр средств и поиск возможностей сокращение расходов.

10. При нахождении лишних издержек производится повторный перерасчет экономической эффективности.

11. При положительной оценке экономической эффективности следующим этапом становится создание рабочих мест, обучение персонала, апробация подхода и окончательное внедрение в производство.

С целью ускорения внедрения VR-инструмента в процессы организации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий возможно совместить процессы подбора оборудования, разработки программного обеспечения и обучения персонала (Рис. 4.2).

Разработанная методика описывает процесс интеграции иммерсивных технологий верификации в существующий порядок подготовки производства. Основной задачей является создание устойчивой связи между цифровой средой VR и традиционными процессами разработки технологической документации, где ключевым критерием эффективности выступает повышение качества выпускаемой продукции через снижение количества ошибок на этапе проектирования.

Первоочередной задачей является формирование аппаратно-программной инфраструктуры, обеспечивающей бесперебойное взаимодействие между системами автоматизированного проектирования и иммерсивными стендами верификации. Этот этап включает подбор оборудования с учетом требований к эргономике и техническим характеристикам, развертывание рабочих мест и их калибровку для

обеспечения метрологической точности проводимых операций. Особое внимание уделяется настройке процессов обмена данными, позволяющих осуществлять импорт цифровых моделей в виртуальную среду без потери ассоциативных связей и конструктивных параметров.

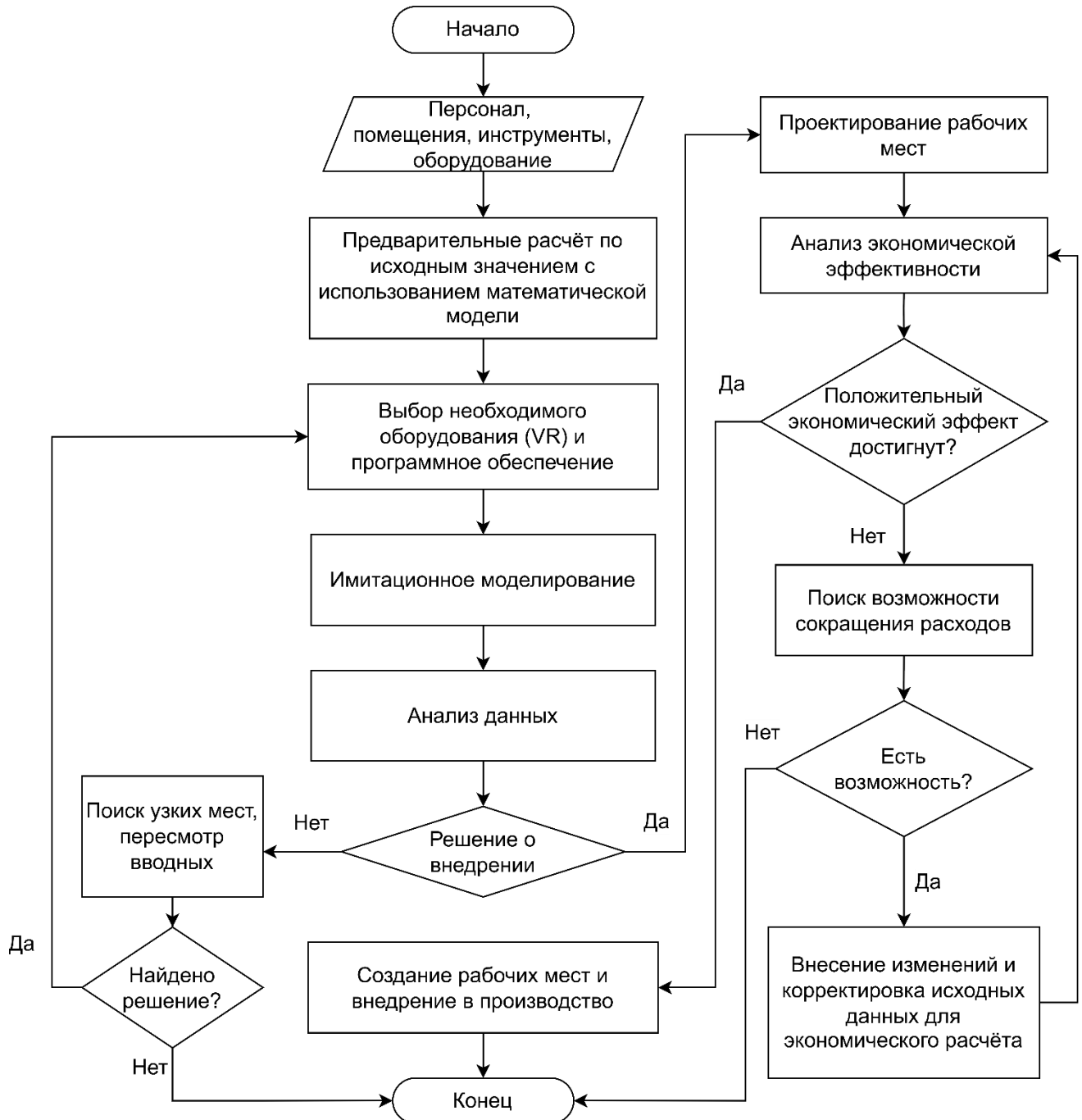


Рис. 4.1. Алгоритм внедрения VR-инструмента в процессы подготовки производства

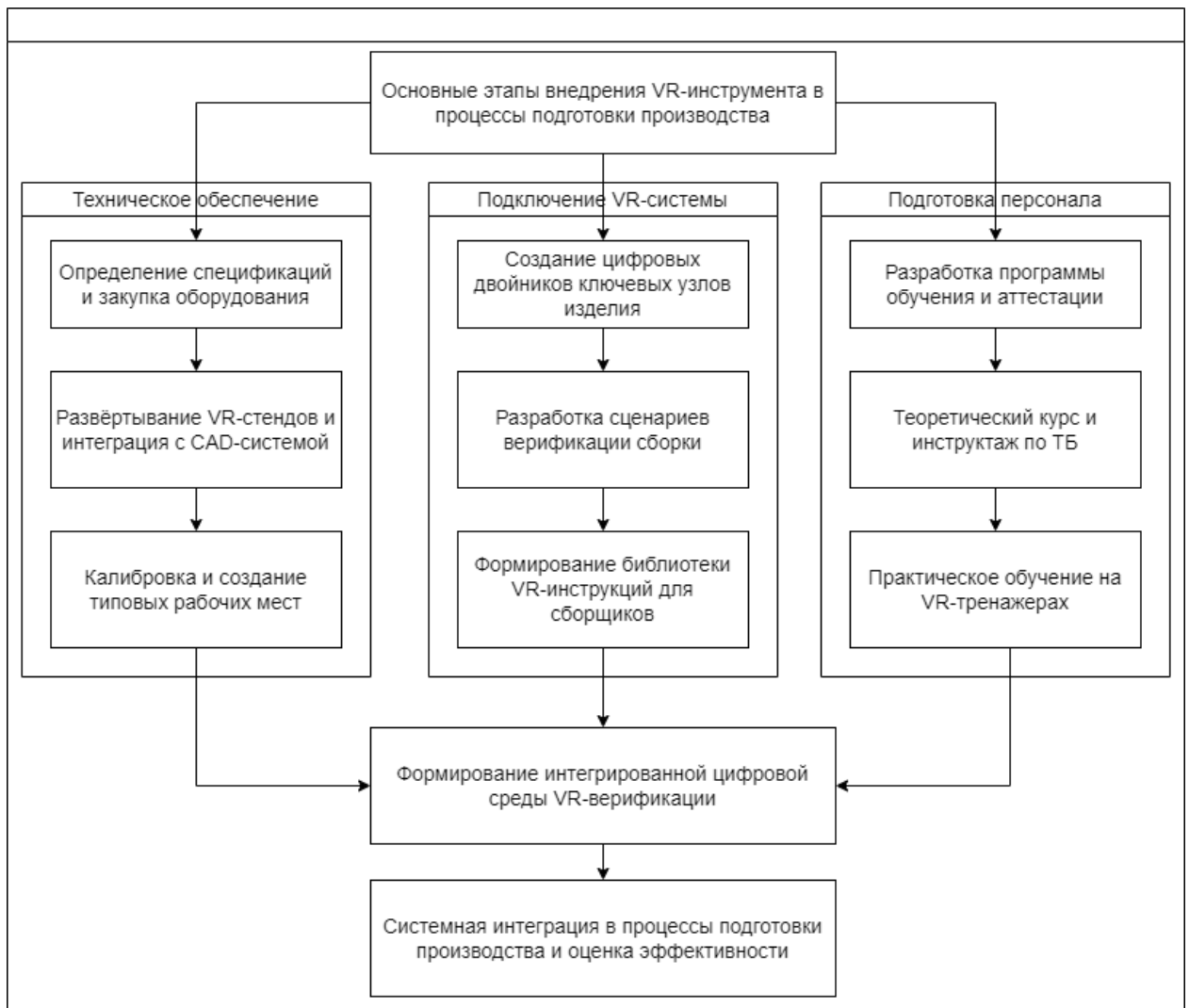


Рис. 4.2. Алгоритм процесса ввода в эксплуатацию VR- инструмента

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

Завершающей стадией методики является интеграция VR-верификации в утвержденные процессы подготовки, где ее применение становится обязательным элементом для вновь разрабатываемых и модифицируемых процессов. Система мо-

ниторинга фиксирует ключевые показатели, непосредственно влияющие на качество конечной продукции: количество выявленных на ранних стадиях ошибок, сокращение количества доработок оснастки и снижение уровня брака при запуске в серийное производство.

Дальнейшее развитие системы предполагает регулярную актуализацию программного обеспечения и пополнение библиотеки цифровых моделей, что обеспечивает соответствие инструментария меняющимся производственным задачам. Совершенствование методик верификации осуществляется на основе анализа накопленных данных о выявленных дефектах, создавая замкнутый цикл повышения точности технологических процессов и, как следствие, качества готовых изделий.

4.2. Оценка числа рабочих мест инженеров-технологов при организации подготовки производства с применением VR-инструментов

Имитационное моделирование подготовки производства позволяет получить значения коэффициентов загрузки рабочих места инженеров-технологов и, таким образом, оценить их требуемое количество.

Для оценки необходимого количества рабочих мест возможно произвести расчет по следующей формуле:

$$PM_i = \frac{t_i \cdot N_{\Gamma}}{\Phi_p}, \quad (4.1)$$

где PM_i – расчетное число рабочих мест инженеров-технологов для выполнения i -этапа подготовки производства сборки крупногабаритных изделий;

t_i – среднее время выполнения i -этапа подготовки производства для всех агентов (заявок), полученное в процессе имитационного моделирования, ч.;

N_{Γ} – число заявок в год, проходящих через i -этап подготовки производства, шт.;

Φ_p – фонд рабочего времени, ч.

При этом, следует учитывать, что добиться равномерной загрузки рабочих места при расчете по формуле (4.1) крайне сложно и необходимо рассматривать загрузку рабочих места в целом по всем этапам подготовки производства. Это вызывает сложность при принятии организационных решений, связанную с неопределенностью в выполнении последовательности этапов оптимальной организации работы.

Критерием оптимизации числа рабочих мест будет такая организация, которая обеспечит их минимальное значение и максимальный коэффициент загрузки каждого рабочего места:

$$\begin{cases} \text{PM}_i \rightarrow \max, \\ \text{PM}_\Pi \rightarrow \min, \end{cases} \quad (4.2)$$

где PM_Π – принятое общее число рабочих мест инженеров-технологов.

Для обеспечения оптимальных принимаемых организационных решений был разработан алгоритм (Рис. 4.3), позволяющий равномерно распределить места среди инженеров-технологов с обеспечением максимальной доступности при разработке рабочей документации подготовки производства сборки крупногабаритных изделий с использованием VR-инструмента.

Содержание блоков алгоритма:

1. Ввод исходных данных. Исходными данными являются число заявок в год, проходящих через i -этап подготовки производства (N_i) и фонд рабочего времени (Φ_p).
2. Выполнение имитационного моделирования подготовки производства, согласно п. 2.3.
3. Расчет среднего значения времени выполнения i -этапа подготовки производства для всех агентов (заявок), полученное в процессе имитационного моделирования (t_i).
4. Расчет значений числа рабочих мест инженеров-технологов для выполнения i -этапа подготовки производства сборки крупногабаритных изделий (PM_i) для

каждого этапа подготовки производства.

5. Распределение рабочих мест между инженерами-технологами с целью обеспечения критериев оптимизации (4.2).

6. Повторное имитационное моделирование подготовки производства с учетом нового распределения инженеров-технологов (ресурсов) по рабочим местам. Выходе получаем значение длительности подготовки производства ($T_{\text{пп}}$) для всех агентов (заявок) и реальное число агентов, которые прошли все этапы подготовки производства за период моделирования ($N_{\text{г реал}}$).

7. Условие: « $N_{\text{г реал}} \leq N_{\text{г}}$?».

8. Если условие в блоке 7 верно, то не все агенты успевают пройти все этапы подготовки производства и необходимо изменить распределение инженеров-технологов (ресурсов) по рабочим местам. В этом случае необходимо изменить это распределение. Вернувшись в блок 5.

9. Если условие в блоке 7 неверно, то все агенты успевают пройти все этапы подготовки производства и значит критерии оптимизации (4.2) достигнуты. Приступают к организации рабочих мест и разработке планировок.

4.3. Разработка типовых планировок рабочих мест персонала, осуществляющего подготовку производства с применением VR-инструмента

Эффективность применения VR-инструмента в процессах подготовки производства крупногабаритных изделий в значительной степени определяется правильной организацией рабочих мест персонала. Проектирование рабочих мест должно основываться на комплексе нормативно-правовых требований, включая санитарно-эпидемиологические правила, эргономические стандарты и отраслевые нормы безопасности. В настоящем подразделе представлены типовые планировки для двух категорий персонала:

1. Инженер-технолог, осуществляющий разработку технологической документации, верификацию процессов сборки и анализ технологичности в среде VR.

2. Обучаемый сборщик, проходящий подготовку на VR-тренажере для освоения операций сборки крупногабаритных изделий.

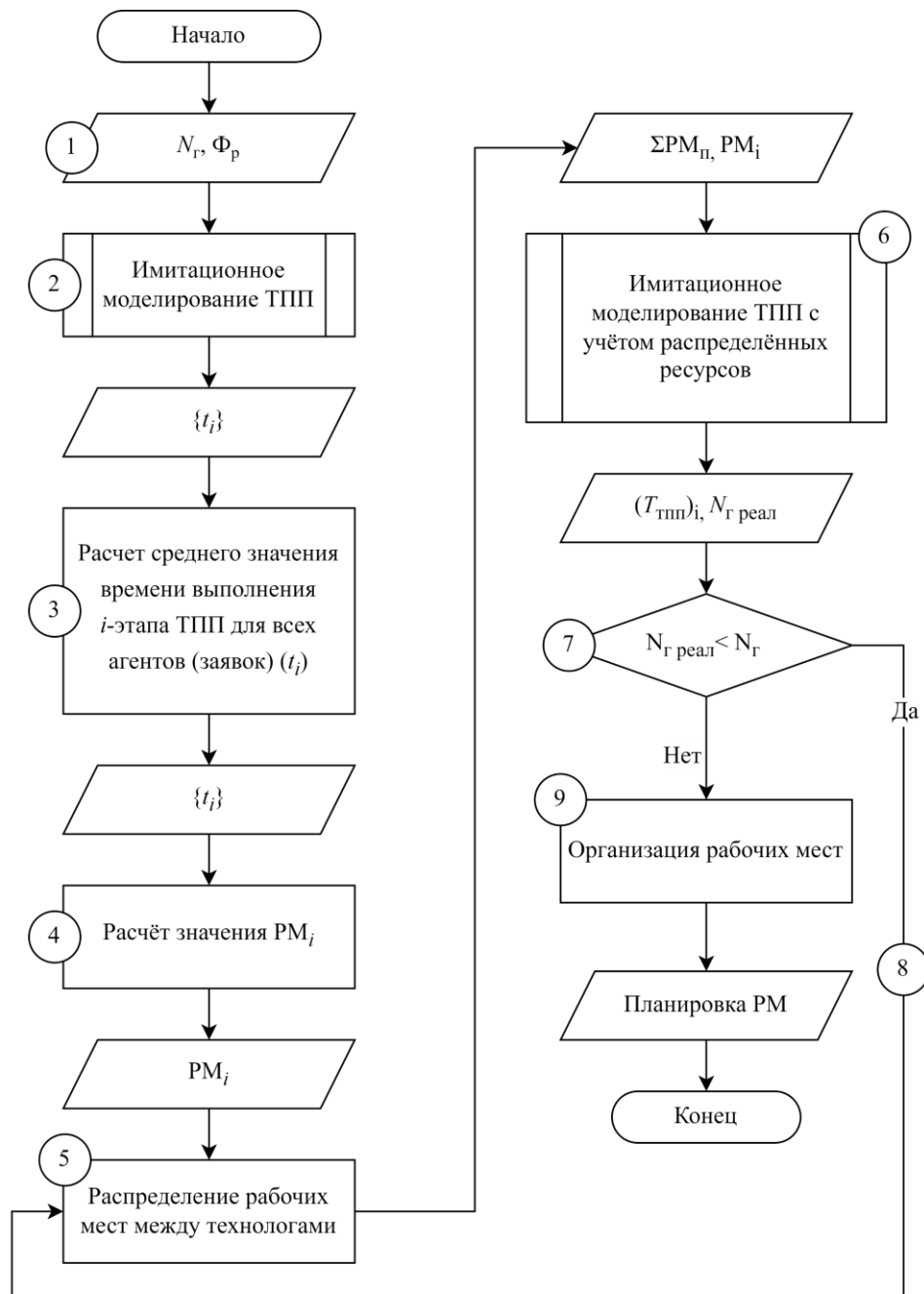


Рис. 4.3. Алгоритм распределения рабочих мест среди технологов на производстве крупногабаритных изделий

4.3.1. Критерии проектирования рабочих мест

При разработке планировок учитывались следующие нормативные документы и литературные источники:

1. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» (далее – СанПиН) и СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и

требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания», устанавливающие требования к помещениям, микроклимату, освещению, организации рабочих мест с ПЭВМ и режимам труда. Согласно данным документам, площадь на одно рабочее место пользователя с ВДТ на базе плоских дискретных экранов должна составлять не менее 4,5 м²; рабочее место должно оборудоваться подставкой для ног с регулировкой по высоте и углу наклона; экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм; высота рабочей поверхности стола регулируется в пределах 680-800 мм (при отсутствии регулировки – 725 мм); конструкция рабочего стула (кресла) должна быть подъемно-поворотной с независимой регулировкой высоты, углов наклона сиденья и спинки.

2. ГОСТ Р 50923-96 «Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения», который распространяется на индивидуальное рабочее место оператора, снабженное средствами отображения информации, и устанавливает, что рабочее место должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

3. ГОСТ Р ЕН 614-1-2003 «Безопасность оборудования. Эргономические принципы конструирования. Часть 1. Термины, определения и общие принципы», определяющий эргономические принципы конструирования рабочего оборудования с учетом антропометрии, биомеханики, умственных способностей оператора и взаимодействия с физическими рабочими условиями.

4. ISO 9241-820:2024 «Ergonomics of human-system interaction – Part 820: Ergonomic guidance on interactions in immersive environments, including augmented reality and virtual reality», содержащий эргономические рекомендации для разработки и использования систем с иммерсивными средами (VR, AR, MR). Данный стандарт идентифицирует проблемы на уровне «человек – система» и предоставляет руководство по их решению, включая аспекты визуального, физиологического и когнитивного комфорта пользователя в иммерсивных средах.

5. Рекомендации по организации безопасного VR-класса (обзорная публикация), включающие требования к минимальной площади зоны перемещения (не менее 2×2 м на одного пользователя), организацию виртуальных границ (Guardian/Chaperone) с запасом 70-80 см от стен, прокладку кабелей в кабель-каналах, наличие станций зарядки и средств санитарной обработки гарнитур, а также установление максимальной продолжительности непрерывной VR-сессии не более 20 минут.

На основе перечисленных нормативных требований были разработаны две типовые планировки, представленные на Рисунках Рис. 4.4 и Рис. 4.5.

4.3.2. Типовая планировка рабочего места инженера-технолога

Рабочее место инженера-технолога, осуществляющего подготовки производства с применением VR-инструмента, организовано как двухзонное:

Зона традиционной работы с документацией – оборудована стандартным компьютерным столом с ПЭВМ, двумя мониторами, клавиатурой, мышью и МФУ для работы с 2D-чертежами, текстовыми документами и CAD-моделями в плоском отображении.

VR-зона – представляет собой свободное пространство для работы в шлеме виртуальной реальности с возможностью перемещения в комнатном масштабе (room-scale).

Планировка рабочего места инженера-технолога приведена на Рисунке Рис. 4.4.

Основные характеристики и требования к зонам:

Традиционная рабочая зона:

1. Площадь: не менее 6 м^2 (с учетом требований к размещению ПЭВМ с двумя мониторами).
2. Рабочий стол: ширина 1400 мм, глубина 800 мм, высота 725 мм (регулируемая). Стол должен иметь вырез для локтей и обеспечивать размещение системного блока в подстолье.
3. Рабочий стул: эргономическое кресло с регулируемыми подлокотниками,

поясничным упором, подголовником и газлифтом.

4. Мониторы: два монитора диагональю не менее 24», установленные на кронштейнах или подставках на расстоянии 600-700 мм от глаз пользователя. Основной монитор располагается прямо перед пользователем, дополнительный – справа под углом до 30°.

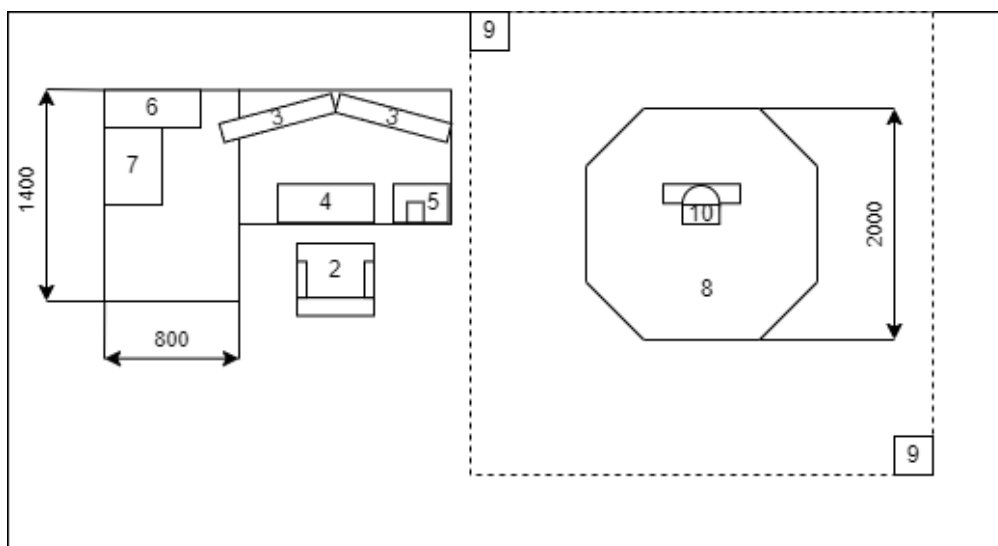


Рис. 4.4. Планировка рабочего места инженера-технолога

1 – рабочий стол; 2 – рабочий стул; 3 – монитор; 4 – клавиатура;
5 – компьютерная мышь; 6 – системный блок; 7 – МФУ; 8 – платформа для VR;
9 – базовые станции; 10 – шлем VR.

5. Освещение: комбинированное (общее + местное). На рабочем столе предусмотрена светодиодная лампа с регулируемой яркостью и направлением света.

VR-зона:

1. Размеры зоны: не менее 3×3 м (для обеспечения свободного перемещения в комнатном масштабе room-scale).

2. Базовые станции лазерного трекинга: две станции SteamVR Tracking 2.0, установленные на штативах или кронштейнах в противоположных углах зоны на высоте 2-2,5 м.

3. Кабели: силовой кабель VR-шлема (при использовании проводной версии) и кабели базовых станций проложены в кабель-каналах вдоль стен или под плинтусом. Удлинитель оснащен кнопкой аварийного отключения.

4. Система границ: в VR-среде активирована система Chaperone/Guardian, визуализирующая границы безопасной зоны. Рекомендуемый запас между виртуальной границей и физическими стенами – не менее 70 см.

5. Напольное покрытие: нескользящее, амортизирующее (ковролин или спортивный ПВХ).

6. Вентиляция: в VR-зоне предусмотрена дополнительная приточная вентиляция или напольный вентилятор для снижения тепловой нагрузки на пользователя во время работы в шлеме.

7. Хранение гарнитуры: на рабочем столе установлена подставка-док для VR-шлема и контроллеров с функцией зарядки.

Общие требования к помещению:

Микроклимат: температура воздуха в холодный период 22-24°C, в теплый период 23-25°C; относительная влажность 40-60%; скорость движения воздуха 0,1-0,2 м/с.

Освещенность: на рабочем столе – 300-500 лк; в VR-зоне допускается затемнение для улучшения качества трекинга (освещенность не более 50 лк).

Электробезопасность: все розетки заземлены, питание VR-оборудования осуществляется через ИБП с фильтром сетевых помех.

Спецификация оборудования для рабочего места инженера-технолога представлена в таблице (Таблица 5).

Таблица 5.

Спецификация оборудования рабочего места инженера-технолога

№	Наименование	Модель / Характеристики	Кол-во, шт.
1	ПЭВМ (рабочая станция)		1
1.1	Процессор	Intel Core i9-13900K / AMD Ryzen 9 7950X	1
1.2	Оперативная память	64 ГБ DDR5-6000	1
1.3	Видеокарта	NVIDIA GeForce RTX 4090 (24 ГБ)	1
1.4	Накопитель SSD	2 ТБ NVMe M.2 (чтение 7000 МБ/с)	1
1.5	Накопитель HDD	4 ТБ SATA III	1
1.6	Блок питания	1000 Вт, 80 Plus Gold	1

Таблица 5 (окончание)

1.7	ОС	Windows 11 Pro	1
2	Периферия		
2.1	Монитор основной	27», 4K, IPS, 144 Гц	1
2.2	Монитор дополнительный	24», Full HD, IPS	1
2.3	Клавиатура	Механическая, с подсветкой	1
2.4	Мышь	Оптическая, программируемая	1
2.5	МФУ	Лазерный, А4, печать/скан/копия	1
3	VR-оборудование		
3.1	Шлем виртуальной реальности	HTC Vive Pro 2 / Valve Index	1
3.2	Контроллеры	2 шт. (6DoF)	2
3.3	Базовые станции	SteamVR Tracking 2.0 (2-й версии)	2
3.4	Станция зарядки	Док-станция для шлема и контроллеров	1
4	Мебель		
4.1	Рабочий стол	Эргономичный, 1400×800×725 мм	1
4.2	Рабочее кресло	Эргономическое, с регулировками	1
4.3	Подставка для ног	Регулируемая по высоте и углу	1
4.4	Штативы для базовых станций	Высота 2-2,5 м	2
4.5	Тумба для документов	400×500×600 мм	1
5	Программное обеспечение		
5.1	САПР	Siemens NX / КОМПАС-3D	1
5.2	Среда VR-разработки	Unity с пакетом SteamVR Plugin	1
5.3	ПО для имитационного моделирования	AnyLogic Professional	1
5.4	PDM/PLM-система	Teamcenter / ЛОЦМАН:PLM	1

4.3.3. Типовая планировка рабочего места обучаемого сборщика

Рабочее место обучаемого сборщика организовано как специализированный VR-тренажер для отработки практических навыков сборки крупногабаритных изделий. Планировка ориентирована на максимальную безопасность и эффективность обучения.

Основные характеристики и требования:

Размеры зоны VR-тренажера: не менее 3×4 м (12 м²). Для обеспечения безопасности нескольких одновременно обучающихся рекомендуется размещать тренажеры в отдельных кабинах, изолированных перегородками высотой 1,5-2,0 м. Расстояние между соседними VR-зонами – не менее 1,5 м.

Зона безопасности: система Guardian с запасом не менее 80 см от виртуальной границы до физических стен и оборудования. Пол в зоне движения – нескользящий, с амортизирующим покрытием толщиной не менее 10 мм.

Рабочее место инструктора: расположено за пределами зон движения обучаемых, оснащено ПЭВМ с дублирующим монитором для контроля действий обучаемого в реальном времени.

Стойка для гарнитуры: размещается на границе VR-зоны на высоте 120-140 см для удобства надевания и снятия шлема.

Система вентиляции: в каждой VR-зоне предусмотрен индивидуальный напольный вентилятор или настенная приточная вентиляция для снижения теплового дискомфорта.

Режим труда: максимальная продолжительность непрерывной VR-сессии – 20 минут; после сессии обязателен перерыв 10 минут с гимнастикой для глаз и разминкой шейно-плечевого отдела.

Санитарная обработка: после каждого обучаемого проводится обработка шлема и контроллеров антисептическими салфетками; предусмотрены одноразовые гигиенические накладки на шлем.

Планировка рабочего места обучаемого сборщика приведена на Рисунке Рис. 4.5.

По результатам анализа и проектирования рабочих мест были разработаны две типовые планировки рабочих мест персонала, задействованного в подготовки производства с применением VR-инструмента: рабочее место инженера-технолога (двухзонное, совмещающее традиционную работу с ПЭВМ и работу в VR-среде) и рабочее место обучаемого сборщика (специализированный VR-тренажер с зоной room-scale).

При проектировании планировок учтены требования следующих нормативных документов: СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и СанПиН 1.2.3685-21 (санитарно-гигиенические требования), ГОСТ Р 50923-96 и ГОСТ Р ЕН 614-1-2003 (эргономические требования), ISO 9241-820:2024 (эргономика иммерсивных сред), а также практические рекомендации по организации безопасных VR-классов.

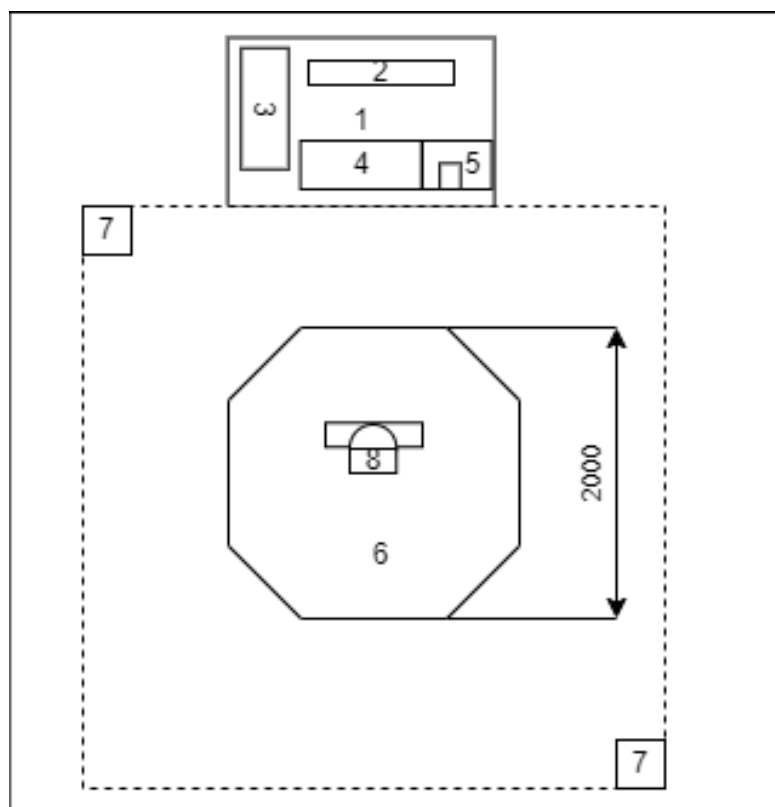


Рис. 4.5. Планировка зоны обучения рабочих-сборщиков

- 1 – рабочий стол; 2 – монитор; 3 – системный блок; 4 – клавиатура;
5 – компьютерная мышь; 6 – платформа для VR; 7 – базовые станции;
8 – шлем VR.

Спецификация оборудования для рабочего места обучаемого сборщика представлена в таблице (Таблица 6).

Определены ключевые параметры организации рабочих мест: площадь зоны традиционной работы – не менее 6 м²; площадь VR-зоны – не менее 9 м² для room-scale; расстояние от глаз до экрана монитора – 600-700 мм; высота рабочей поверхности стола – 680-800 мм; запас между виртуальной границей и физическими стенами – 70-80 см; максимальная продолжительность непрерывной VR-сессии – 20 минут.

**Спецификация оборудования рабочего места обучаемого сборщика
(на одного обучаемого)**

№	Наименование	Модель / Характеристики	Кол-во, шт.
1	ПЭВМ (рабочая станция)		1
1.1	Процессор	Intel Core i7-13700K / AMD Ryzen 7 7800X3D	1
1.2	Оперативная память	32 ГБ DDR5-5200	1
1.3	Видеокарта	NVIDIA GeForce RTX 4080 (16 ГБ)	1
1.4	Накопитель SSD	1 ТБ NVMe M.2	1
1.5	Блок питания	850 Вт, 80 Plus Gold	1
1.6	ОС	Windows 11 Pro	1
2	VR-оборудование		
2.1	Шлем виртуальной реальности	HTC Vive Pro 2 / Meta Quest Pro (с РС-линком)	1
2.2	Контроллеры	2 шт. (6DoF)	2
2.3	Базовые станции	SteamVR Tracking 2.0 (2-й версии)	2
2.4	Станция зарядки	Док-станция на 2 слота для контроллеров	1
2.5	Гигиенические накладки	Одноразовые, 50 шт./уп.	по факту
3	Мебель		
3.1	Стойка для гарнитуры	Настенная / напольная	1
3.2	Стул для инструктора	Эргономический	1
3.3	Штативы для базовых станций	Высота 2-2,5 м	2
4	Программное обеспечение		
4.1	VR-тренажер сборки	Специализированное ПО (Unity + SteamVR)	1
4.2	Система контроля обучения	Журнал прохождения упражнений	1
5	Рабочее место инструктора		
5.1	ПЭВМ инструктора	Intel Core i5 / 16 ГБ RAM	1
5.2	Монитор инструктора	27", Full HD	1
5.3	ПО для мониторинга	TeamViewer / VNC	1

Составлены спецификации оборудования для каждого типа рабочего места, включающие требования к ПЭВМ (процессор Intel Core i9/i7, ОЗУ 64/32 ГБ, видеокарта RTX 4090/4080), VR-оборудованию (HTC Vive Pro 2, базовые станции SteamVR Tracking 2.0), периферии, мебели и программному обеспечению (CAD-системы, Unity, AnyLogic, PDM/PLM).

Предложенные планировки могут быть адаптированы под конкретные производственные условия путем изменения количества рабочих мест (масштабирования), выбора альтернативных моделей VR-оборудования (с учетом требований к

разрешению, частоте обновления и углу обзора) и корректировки компоновки в зависимости от доступной площади помещений.

4.4. Оценка экономической эффективности внедрения VR-инструмента при организации подготовки производства (сборки) крупногабаритных изделий

Для анализа возможности внедрения VR-инструмента при создании технологической документации с учетом требуемых параметров качества и производительности проведена оценка эффективности предлагаемого решения. Экономический расчет выполнен в 1С и Office Excel 2021 и результаты представлены в Таблицах 7-23.

Затраты на предложение и внедрение VR-инструмента по нормативам с учетом степени сложности его конструкции, которая зависит от числа конструктивных элементов (КЭ) $n_{КЭ}$ в конструктивной компоновке

$$K_n = f(n_{КЭ}). \quad (4.3)$$

Затраты из всех покупных и изготавливаемых конструктивных элементов VR-инструмента:

$$K_n = \sum_p C_p + \sum_r (C_{mr} \cdot m_r + C_{ur} \cdot \tau_r), \quad (4.4)$$

где p – номер покупного КЭ;

C_p – стоимость p -го покупного КЭ, руб;

r – номер изготавливаемого КЭ;

C_{mr} и m_r – стоимость единицы массы материала и масса r – го изготавливаемого КЭ;

C_{ur} и τ_r – нормированная стоимость 1 минуты и трудоемкость изготовления r -го КЭ, мин.

Годовой экономический эффект от реализации подготовки производства с внедрением VR-инструмента с улучшенными качественными характеристиками

определяется с помощью критериев, используемых в анализе инвестиционной деятельности.

Таблица 7.

Технико-экономическое сравнение вариантов подготовки производства, руб.

№ п/п	Показатели	Вариант 1 Традиционная подготовки производства	Вариант 2 подготовки производства с применением VR-инструмента
1	Оценка изделия на технологичность	115,3	115,3
2	Разработка схемы сборки	224,5	320,5
3	Проектирование маршрута сборки	359,6	426,2
4	Сборка узла	1241, 3	1526, 3
5	Нормирование	504,3	740
6	Оформление технологической документации	700,8	650,9
7	Отладка производства	1732,4	2258,9
8	Обучение персонала	5625,9	10215,8
Всего		5625,9	16253,9

При оценке эффективности инвестиционных вложений затраты на VR-инструмент (5 шт.) принимаем равными 2 550 000 руб. Требуемый уровень доходности проекта принимается 20%, так как ставка дисконтирования равна ставке рефинансирования ЦБ 15%.

В соответствии с экономической тенденцией повышения прибыли, сделаем прогноз, что инвестиция (IC) будет генерировать в течение n лет, годовые доходы в размере $P_1, P_2 \dots P_n$. Общая накопленная величина дисконтированных доходов (PV) и чистый приведенный эффект (NPV) соответственно рассчитываются по формулам:

$$PV = \sum_k \frac{P_k}{(1+r)^k}, \quad (4.5)$$

$$NPV = \sum_k \frac{P_k}{(1+r)^k} - IC. \quad (4.6)$$

Если: $NPV > 0$, то проект следует принять; $NPV < 0$, то проект следует отвергнуть; $NPV = 0$, то проект ни прибыльный, ни убыточный.

Расчет потока платежей от производственной деятельности без учета инфляции при внедрении в подготовку производства VR-инструмента, предполагает не разовую инвестицию, а последовательное инвестирование финансовых ресурсов в течение m лет, в этом случае формула для расчета NPV модифицируется следующим образом:

$$NPV = \sum_{k=1}^n \frac{P_k}{(1+r)^k} - \sum_{j=1}^m \frac{IC_j}{(1+i)^j}. \quad (4.7)$$

Таблица 8.

Расчет потока платежей от производственной деятельности без учета инфляции при внедрении в подготовки производства VR-инструмента, тыс. руб.

Период, полгода	Стоимость реализованной продукции	Операционные затраты на изготовление продукции	Амортизация	Налогооблагаемая прибыль	Налог на прибыль	Поток платежей от производств. деятельности
1	2550,00	1697,74	156,00	525,15	105,03	505,02
2	2550,00	1697,74	156,00	525,15	105,03	505,20
3	2550,00	1460,10	156,00	990,90	198,18	892,72
4	2550,00	1460,10	156,00	990,90	198,18	892,72
5	2550,00	1150,10	156,00	1213,90	225,78	915,12
6	2550,00	1150,10	156,00	1213,90	225,78	915,12
Итого	15300,00	8615,87	936,00	7096,90	1057,98	4625,90

Расчет с помощью приведенных формул достаточно трудоемок, поэтому для облегчения расчётов, основанных на дисконтированных оценках, были использованы специальные статистические таблицы, реализованные в программе 1С.

Таблица 9.

Расчет потока платежей от производственной деятельности без учета инфляции при внедрении в подготовки производства VR-инструмента, руб.

Период полгода	Стоимость реализованной продукции	Операционные затраты на изготовление продукции	Амортизация	Налогооблагаемая прибыль	Налог на прибыль	Поток платежей от производств. деятельности
1	2550000,00	1 395 750,00	0,00	454 250,00	113562,5	363 400,00
2	2550000,00	1 395 750,00	0,00	454 250,00	113562,5	363 400,00
3	2550000,00	1 381 750,00	0,00	468 250,00	117062,5	374 600,00
4	2550000,00	1 381 750,00	0,00	468 250,00	117062,5	374 600,00
5	2550000,00	1 161 050,00	0,00	688 950,00	172237,5	551 160,00
6	2550000,00	1 161 050,00	0,00	688 950,00	172237,5	551 160,00
Итого	15 300 000,00	7 877 100,00	0,00	5 478 900,00	805 725,00	4 383 120,00

Таблица 10.

Расчет потока платежей от инвестиционной деятельности без учета инфляции при внедрении в подготовки производства VR-инструмента, руб.

Период полгода	Стоимость реализованной продукции	Среднегодовой уровень оборотного капитала	Изменение среднегодового уровня оборотного капитала	Движение оборотного капитала	Поток платежей при изменении основного и оборотного капитала
0	0,00	0,00	0,00	420 000,00	420 000,00
1	2550000,00	74 000,00	37 000,00	0,00	37 000,00
2	2550000,00	74 000,00	0,00	0,00	0,00
3	2550000,00	74 000,00	0,00	0,00	0,00
4	2550000,00	74 000,00	0,00	0,00	0,00
5	2550000,00	74 000,00	0,00	0,00	0,00
Итого	12 750 000,00		37 000,00	0,00	37 000,00

Расчет итоговых потоков платежей без учета инфляции, руб.

Период полугода	Подготовки производства с VR-инструментом			Базовый вариант подготовки производства			Поток платежей, характеризующий проект
	Поток платежей при изменении основного и оборотного капитала	Поток платежей от производств. деятельности	Итоговый поток платежей	Поток платежей при изменении основного и оборотного	Поток платежей от производств. деятельности	Итоговый поток платежей	
0	420 000,00	0,00	-420 000,00	0,00	0,00	0,00	-420 000,00
1	37 000,00	514 520,00	477 520,00	0,00	363 400,00	363 400,00	114 120,00
2	0,00	514 520,00	514 520,00	0,00	363 400,00	363 400,00	151 120,00
3	0,00	892 720,00	892 720,00	0,00	374 600,00	374 600,00	518 120,00
4	0,00	892 720,00	892 720,00	0,00	374 600,00	374 600,00	518 120,00
5	0,00	915 120,00	915 120,00	0,00	551 160,00	551 160,00	363 960,00
Итого	457 000,00	3 729 600,00	3692 600,00	0,00	2027160	2027160	1665440

Расчет потока платежей от производственной деятельности с учетом инфляции при внедрении в подготовки производства VR-инструмента, руб.

Период полугода	Стоимость реализованной продукции	Операционные затраты на изготовление продукции	Амортизация	Налогооблагаемая прибыль	Налог на прибыль	Поток платежей от производств. деятельности
1	2035000,00	1356135,00	104000,00	574865,00	114973,00	563892,00
2	2238500,00	1491748,50	104000,00	642751,50	128550,30	618201,20
3	2462350,00	1011693,10	104000,00	1346656,90	269331,38	1181325,52
4	2708585,00	1112862,41	104000,00	1491722,59	298344,52	1297378,07
5	2979443,50	1179054,37	104000,00	1696389,13	339277,83	1461111,30
6	3277387,85	1296959,81	104000,00	1876428,04	375285,61	1605142,43
Итого	23272032,28	10356036,54	832000,00	12083995,75	2416799,15	10499196,60

Таблица 13.

**Расчет потока платежей от производственной деятельности учетом
инфляции при базовом варианте подготовки производства, руб.**

Период полгода	Стоимость реализован- ной продук- ции	Операцион- ные затраты на изготов- ление про- дукции	Аморти- зация	Налогообла- гаемая при- быль	Налог на прибыль	Поток пла- тежей от произ- водств. дея- тельности
1	2 035 000,00	1 535 325,00	0,00	499 675,00	99 935,00	399 740,00
2	2 238 500,00	1 688 857,50	0,00	549 642,50	109 928,50	439 714,00
3	2 462 350,00	1 839 109,25	0,00	623 240,75	124 648,15	498 592,60
4	2 708 585,00	2 023 020,18	0,00	685 564,83	137 112,97	548 451,86
5	2 979 443,50	1 869 882,64	0,00	1 109 560,86	221 912,17	887 648,69
6	3 277 387,85	2 056 870,90	0,00	1 220 516,95	244 103,39	976 413,56
Итого	23 272 032,28	13 967 710,33	0,00	9 304 321,96	1 860 864,39	7 443 457,57

Таблица 14.

**Расчет потока платежей от инвестиционной деятельности с учетом
инфляции при внедрении в подготовки производства VR-инструмента, руб.**

Период полгода	Стоимость реа- лизированной продукции	Среднегодо- вой уровень оборотного капитала	Изменение среднегодо- вого уровня оборотного капитала	Движение основного капитала	Поток платежей при изменении основ- ного и оборотного капитала
0	0,00	0,00	0,00	420 000,00	420 000,00
1	2 035 000,00	81 400,00	40 700,00	0,00	40 700,00
2	2 238 500,00	89 540,00	8 140,00	0,00	8 140,00
3	2 462 350,00	98 494,00	8 954,00	0,00	8 954,00
4	2 708 585,00	108 343,40	9 849,40	0,00	9 849,40
5	2 979 443,50	119 177,74	10 834,34	0,00	10 834,34
Итого	12423878,5	496 955,14	78 477,74	0	78477,74

Расчет потока платежей от инвестиционной деятельности с учетом инфляции при базовом варианте разработки подготовки производства, руб.

Период полугода	Стоимость реализованной продукции	Среднегодовой уровень оборотного капитала	Изменение среднегодового уровня оборотного капитала	Движение основного капитала	Поток платежей при изменении основного и оборотного капитала
1	2 035 000,00	122 100,00	0,00	0,00	0,00
2	2 238 500,00	134 310,00	12 210,00	0,00	12 210,00
3	2 462 350,00	147 741,00	13 431,00	0,00	13 431,00
4	2 708 585,00	162 515,10	14 774,10	0,00	14 774,10
5	2 979 443,50	178 766,61	16 251,51	0,00	16 251,51
6	3 277 387,85	196 643,27	17 876,66	0,00	17 876,66
Итого	15 701 266,35	942 075,98	74 543,27	0,00	74 543,27

Таблица 16.

Расчет итоговых потоков платежей с учетом инфляции, руб.

Период полугода	подготовки производства с VR-инструментом			Базовый вариант подготовки производства			Поток платежей, характеризующий проект
	Поток платежей при изменении основного и оборотного капитала	Поток платежей от производств. деятельности	Итоговый поток платежей	Поток платежей при изменении основного и оборотного капитала	Поток платежей от производств. деятельности	Итоговый поток платежей	
0	420 000,00	0,00	-420 000,00	0,00	0,00	0,00	-420 000,00
1	40 700,00	563 892,00	523 192,00	0,00	399 740,00	399 740,00	123 452,00
2	8 140,00	618 201,20	610 061,20	12 210,00	439 714,00	427 504,00	182 557,20
3	8 954,00	1 181 325,52	1 172 371,52	13 431,00	498 592,60	485 161,60	687 209,92
4	9 849,40	1 297 378,07	1 287 528,67	14 774,10	548 451,86	533 677,76	753 850,91
5	10 834,34	1 461 111,30	1 450 276,96	16 251,51	887 648,69	871 397,18	578 879,78
Итого	498 477,74	5121908,09	4623430	56666,61	2774147	2717481	1905950

Для определения норм доходности проекта был применён метод определения внутренней нормы рентабельности проекта (internal rate of return, *IRR*), т.е. такой ставки дисконта, при которой значение чистого приведенного дохода равно нулю.

$$IRR = r, \text{ при котором } NPV = f(r) = 0.$$

Таблица 17.

**Расчет дисконтированных потоков платежей при базовом варианте
разработки подготовки производства, руб.**

Период полгода	Поток платежей	Кумул. поток платежей	Коэффициент дисконтиро- вания, $(1+i)^{-t}$	Дисконтиро- ванный поток платежей	Дисконтиро- ванный кумул. поток платежей
0	0,00	0,00	1,0000	0,00	0,00
1	363 400,00	363 400,00	0,8696	316 000,00	316 000,00
2	363 400,00	726 800,00	0,7561	274 782,61	590 782,61
3	374 600,00	1 101 400,00	0,6575	246 305,58	837 088,19
4	374 600,00	1 476 000,00	0,5718	214 178,77	1 051 266,96
5	551 160,00	2 027 160,00	0,4972	274 023,93	1 325 290,88
Итого	2 027 160,00		<i>NPV</i> =	12 325 290,31	

Таблица 18.

**Расчет дисконтированных потоков платежей при внедрении в подготовки
производства VR-инструмента, руб.**

Период полгода	Поток плате- жей (обыч- ный)	Кумул. поток платежей	Коэффици- ент дискон- тирования, $(1+i)^{-t}$	Дисконтирован- ный поток плате- жей	Дисконтирован- ный кумул. по- ток платежей
0	-420 000,00	-420 000,00	1,0000	-420 000,00	-420 000,00
1	477 520,00	57 520,00	0,8696	415 234,78	-4 765,22
2	514 520,00	572 040,00	0,7561	389 051,04	384 285,82
3	892 720,00	1 464 760,00	0,6575	586 977,89	971 263,71
4	892 720,00	2 357 480,00	0,5718	510 415,56	1 481 679,27
5	915 120,00	3 272 600,00	0,4972	454 976,37	1 936 655,64
Итого	3 272 600,00		<i>NPV</i> =	1 936 655,18	

Смысл расчета этого коэффициента при анализе эффективности планируе-
мых инвестиций заключается в следующем: *IRR* показывает максимально допусти-

мый относительный уровень расходов, которые могут быть ассоциированы с данным проектом. При этом IRR должен быть сопоставлен с уровнем авансированного капитала: если: $IRR > CC$, то проект следует принять; $IRR < CC$, то проект следует отвергнуть; $IRR = CC$, то проект ни прибыльный, ни убыточный.

Таблица 19.

Расчет дисконтированных потоков платежей для приростного потока при внедрении в подготовки производства VR-инструмента, руб.

Период полгода	Поток платежей, характеризующий проект	Кумул. поток платежей	Коэффициент дисконтирования, $(1+i)^{-t}$	Дисконтированный поток платежей	Дисконтированный кумул. поток платежей
0	-420 000,00	-420 000,00	1,0000	-420 000,00	-420 000,00
1	114 120,00	-305 880,00	0,8696	99 234,78	-320 765,22
2	151 120,00	-154 760,00	0,7561	114 268,43	-206 496,79
3	518 120,00	363 360,00	0,6575	340 672,31	134 175,52
4	518 120,00	881 480,00	0,5718	296 236,79	430 412,32
5	363 960,00	1 245 440,00	0,4972	180 952,44	611 364,76
Итого	1 245 440,00		$NPV =$	611 364,75	

Практическое применение метода IRR достаточно трудоёмко и целесообразно применить метод последовательных итераций с использованием табулированных значений дисконтирующих множителей. Для этого с помощью таблиц выбираются два значения коэффициента дисконтирования $r_1 < r_2$ таким образом, чтобы в интервале (r_1, r_2) функция $NPV = f(r)$ меняла свое значение с "+" на "-" или с "-" на "+". Далее применяют формулу:

$$IRR = r_1 + \frac{f(r_1)}{f(r_1) - f(r_2)} \cdot (r_2 - r_1), \quad (4.8)$$

где r_1 – значение табулированного коэффициента дисконтирования, при котором $f(r_1) > 0$ или $f(r_1) < 0$;

r_2 – значение табулированного коэффициента дисконтирования, при котором $f(r_2) < 0$ или $f(r_2) > 0$.

Индекс рентабельности (PI) который является относительным показателем, рассчитывается по формуле:

$$PI = \frac{\sum_k \frac{P_k}{(1+r)^k}}{IC}. \quad (4.9)$$

Если:

$PI > 1$, то проект следует принять;

$PI < 1$, то проект следует отвергнуть;

$PI = 1$, то проект ни прибыльный, ни убыточный.

Таблица 20.

**Расчет критериев эффективности внедрения в подготовки производства
VR-инструмента, показателей окупаемости и рентабельности**

№ п/ п	Показатель	Значение
1.	Чистая приведенная стоимость (NPV), руб	1 936 655,18
2.	Внутренняя норма прибыли (IRR), %	115,88%
3.	Модифицированная внутренняя норма доходности ($MIRR$), %	51,28%
4.	Рентабельность, %	85,56%
5.	Статический срок окупаемости, лет	1,06
6.	Динамический срок окупаемости, лет	2,05

Несмотря на то, что была установлена эффективность внедрения VR-инструмента в процесс подготовки производства, с точки зрения снижения трудоемкости, себестоимости и оценки инвестиционных вложений, что является необходимым, но не достаточным условием оценки эффективности проекта, было предложено оценить проект через определение показателей качества на основе экспертных оценок и расчета интегральных показателей.

Для оценки конкурентоспособности использовались матричные методики оценки показателей качества. Анализ проводили с использованием интегральных

показателей.

1. Рассчитываем коэффициент весомости показателей качества (M_i) по формуле:

$$M_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_{ij}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad (4.10)$$

где x_{ij} — оценка i -го свойства j -м экспертом;

m — количество экспертов;

n — количество свойств.

$$M_1 = \frac{9+8+7+9+8}{248} = 0,165; \quad M_2 = \frac{8+9+7+7+9}{248} = 0,161;$$

$$M_3 = \frac{3+4+4+3+5}{248} = 0,077; \quad M_4 = \frac{4+5+3+3+5}{248} = 0,077;$$

$$M_5 = \frac{9+8+8+6+7}{248} = 0,153; \quad M_6 = \frac{3+4+3+5+5}{248} = 0,081;$$

$$M_7 = \frac{5+5+4+4+3}{248} = 0,085; \quad M_8 = \frac{4+3+3+4+3}{248} = 0,069;$$

$$M_9 = \frac{8+7+6+6+6}{248} = 0,133.$$

Полученные результаты коэффициентов весомости заносим в Таблицу 21.

2. Рассчитываем коэффициент значимости экспертных оценок по формуле:

$$K' = \frac{\bar{M}}{M}, \quad (4.11)$$

$$\text{где } \bar{M} = \frac{1}{5} \cdot \left(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij} \right) = \frac{248}{5} \cdot 9 = 5.5$$

$$K'_1 = \frac{5,5}{0,165} = 33,33; \quad K'_2 = \frac{5,5}{0,161} = 34,16; \quad K'_3 = \frac{5,5}{0,077} = 71,42;$$

$$K'_4 = \frac{5,5}{0,077} = 71,42; \quad K'_5 = \frac{5,5}{0,153} = 35,95; \quad K'_6 = \frac{5,5}{0,081} = 67,90; \quad K'_7 = \frac{5,5}{0,085} = 64,71;$$

$$K'_8 = \frac{5,5}{0,069} = 79,71; \quad K'_9 = \frac{5,5}{0,133} = 41,35.$$

Таблица 21.

Расчет коэффициентов весомости

№ п/п	Оценки экспертов (баллы)					Коэффициент значимости (весомости)
	1	2	3	4	5	
1.	9	8	7	6	8	0,165
2.	8	9	7	7	9	0,161
3.	3	4	4	3	5	0,077
4.	4	5	3	3	4	0,077
5.	9	8	8	6	7	0,153
6.	3	4	3	5	5	0,081
7.	5	5	4	4	3	0,085
8.	4	3	3	4	3	0,069
9.	8	7	6	6	6	0,133

3. Расчет уровня конкурентоспособности исследуемых образцов (Q_i) по дифференциальному методу осуществляется по формуле:

$$Q_i = \frac{\Pi_i}{\Pi_{i_0}}, \quad (4.12)$$

где Π_i – значение показателя оцениваемой продукции;

Π_{i_0} – базовое значение показателя продукции.

Рассчитаем уровень показателей качества по базовому варианту подготовки производства.

$$Q_1 = \frac{3}{15} = 0,2 ; \quad Q_2 = \frac{3}{10} = 0,3 ; \quad Q_3 = \frac{1}{1} = 1 ; \quad Q_4 = \frac{1}{1} = 1 ; \quad Q_5 = \frac{2}{6} = 0,33 ;$$

$$Q_6 = \frac{1}{1} = 1; Q_7 = \frac{1}{1} = 1; Q_8 = \frac{1}{1} = 1; Q_9 = \frac{1}{1,7} = 0,59.$$

Рассчитаем уровень показателей качества подготовки производства с применением VR-инструмента

$$Q_1 = \frac{15}{3} = 5; Q_2 = \frac{10}{3} = 3,33; Q_3 = \frac{1}{1} = 1; Q_4 = \frac{1}{1} = 1; Q_5 = \frac{6}{2} = 3; Q_6 = \frac{1}{1} = 1;$$

$$Q_7 = \frac{1}{1} = 1; Q_8 = \frac{1}{1} = 1; Q_9 = \frac{1,7}{1} = 1,7.$$

Таблица 22.

Расчет уровня показателей качества

№ п/п	Подготовки производства базового проекта	Подготовки производства с применением VR-инструмента	Уровень показателей качества
1.	3	15	5
2.	3	10	3,33
3.	1	1	1
4.	1	1	1
5.	2	6	3
6.	1	1	1
7.	1	1	1
8.	1	1	1
9.	1	1,7	1,7

4. Расчет комплексного группового показателя конкурентоспособности (K_i) можно произвести по формуле:

$$K_i = M_i \cdot Q_i, \quad (4.13)$$

где M_i – коэффициент весомости i -го показателя.

Рассчитаем комплексный групповой показатель качества базового варианта подготовки производства.

$$K_1 = 0,165 \cdot 0,2 = 0,033; K_2 = 0,161 \cdot 0,3 = 0,048; K_3 = 0,077 \cdot 1 = 0,077;$$

$$K_4 = 0,077 \cdot 1 = 0,077; K_5 = 0,153 \cdot 0,33 = 0,05; K_6 = 0,081 \cdot 1 = 0,081;$$

$$K_7 = 0,085 \cdot 1 = 0,085; K_8 = 0,069 \cdot 1 = 0,069; K_9 = 0,133 \cdot 0,59 = 0,078.$$

Рассчитаем комплексный групповой показатель качества подготовки производства с применением VR-инструмента.

$$K_1 = 0,165 \cdot 5 = 0,825; K_2 = 0,161 \cdot 3,33 = 0,536; K_3 = 0,077 \cdot 1 = 0,077;$$

$$K_4 = 0,077 \cdot 1 = 0,077; K_5 = 0,153 \cdot 3 = 0,459; K_6 = 0,081 \cdot 1 = 0,081;$$

$$K_7 = 0,085 \cdot 1 = 0,085; K_8 = 0,069 \cdot 1 = 0,069; K_9 = 0,133 \cdot 1,7 = 0,226.$$

5. Формула расчета комплексного обобщенного показателя качества (Коб) имеет следующий вид:

$$K_{об} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot Q_i. \quad (4.14)$$

Комплексный обобщенный показатель качества подготовки производства базового варианта:

$$K_{об} = 0,033 + 0,048 + 0,077 + 0,05 + 0,091 + 0,069 + 0,089 = 0,892.$$

Комплексный обобщенный показатель конкурентоспособности подготовки производства с применением VR-инструмента:

$$K_{об} = 0,825 + 0,638 + 0,077 + 0,459 + 0,9 + 0,072 + 0,0358 = 3,126.$$

6. Формула расчета интегрального показателя конкурентоспособности (Ки) имеет следующий вид:

$$K_u = \frac{K_{об}}{C}, \quad (4.15)$$

где C – цена изготавливаемой детали, тыс. руб.

Интегральный показатель качества базового варианта подготовки производства:

$$K_u = \frac{0,598}{14} = 0,041. \quad (4.16)$$

Интегральный показатель качества подготовки производства с применением VR-инструмента (Таблица 23):

$$K_u = \frac{2,435}{26} = 0,092. \quad (4.17)$$

Таблица 23.

Оценка уровня подготовки производства вариантов проектирования

№ п/п	Изделие	Комплексный обобщенный показатель ($K_{об}$)	Интегральный показатель (K_u)
1.	Базовый вариант подготовки производства	0,892	0,041
2.	Подготовка производства с применением VR-инструмента	3,126	0,092

Расчет интегрального показателя уровня качества показал, что применение VR-инструмента позволяет повысить качество и уровень подготовки производства по сравнению с базовым вариантом подготовки производства. Различие в затратах не сильно влияет на оценку качественных показателей, несмотря на то что капитальные затраты на закупку, внедрение и использование VR-инструмента относительно высоки, но показатели подготовки производства с применением VR-инструмента, предложенного в работе, в 2,3 раза более эффективны.

Таким образом, основой для повышения качества подготовки производства является грамотное распределение дополнительных расходов на закупку, внедрение и использование VR-инструмента.

4.5. Внедрение VR-инструмента при организации подготовки производства (сборки) хопперов

Практическая проверка разработанной методики проводилась в условиях действующего производства, ориентированного на выпуск крупногабаритных сварных конструкций для вагоностроения. Основной акцент был сделан на оценке влияния иммерсивной верификации на качество технологической документации и, как следствие, на ключевые эксплуатационные характеристики продукции.

Внедрение методики позволило перейти от выявления дефектов на этапе фи-

зической сборки к их системному устранению на стадии проектирования технологического процесса. Контроль качества зафиксировал устранение критических несоответствий, в первую очередь – ошибок позиционирования элементов несущей рамы и листовой обшивки кузова, а также отклонений в последовательности установки сборочной оснастки.

Данные изменения оказали непосредственное влияние на производственный цикл. 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. Одновременно с этим было обеспечено строгое соблюдение геометрических параметров корпуса вагонетки, исключающее возникновение остаточных напряжений и деформаций после сварки (Рис. 4.6).

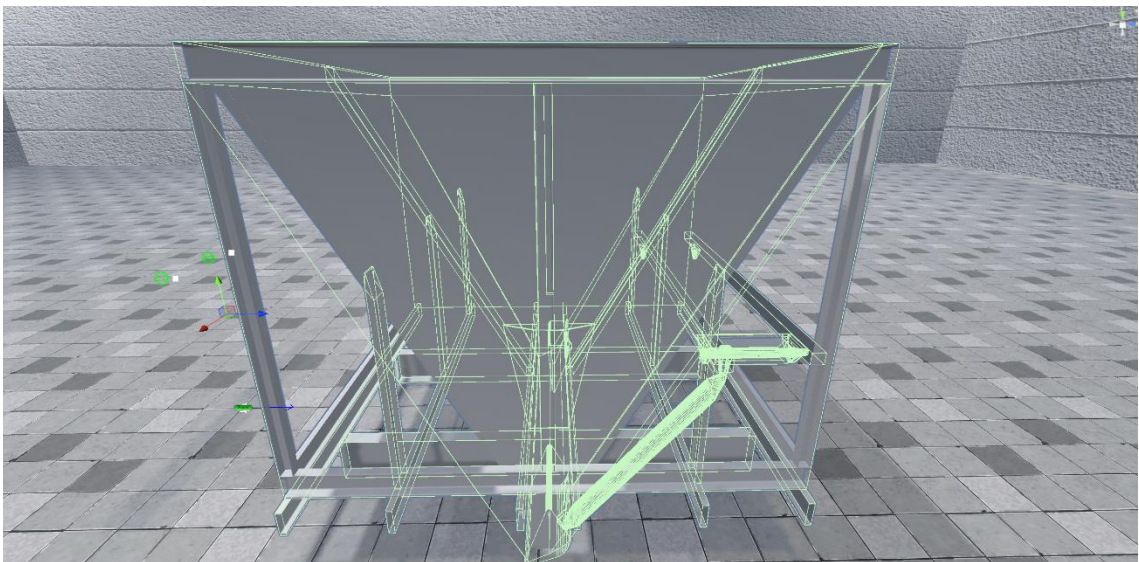


Рис. 4.6. Структурное представление корпуса хоппера в среде VR

Комплексное воздействие этих факторов проявилось в улучшении интегральных показателей качества готовой продукции. Статистический анализ данных приемо-сдаточных испытаний подтвердил повышение статической прочности конструкции и герметичности бункера, что напрямую влияет на долговечность и надежность изделия в условиях эксплуатационных нагрузок.

Таким образом, апробация подтвердила, что разработанная методика высту-

пает эффективным инструментом обеспечения технологической точности, позволяя не только минимизировать количество доработок на производственной стадии, но и целенаправленно влиять на критические потребительские свойства конечной продукции.

Проведенное исследование и его практическая апробация на реальном производственном объекте позволяют сделать вывод о высокой эффективности предложенной методики интеграции иммерсивных технологий верификации в процессы подготовки производства. Основным положительный эффект достигается за счет перехода от реактивного выявления ошибок на этапе физической сборки к их системному устранению на стадии проектирования технологического процесса.

Для условий мелкосерийного и специализированного вагоностроения, где каждая единица продукции обладает уникальными характеристиками, а стоимость ошибки технологической подготовки крайне высока, разработанный подход демонстрирует значительный потенциал для повышения качества продукции. Снижение количества технологических ошибок на 40%, достигнутое в ходе апробации, охватывает различные аспекты производственного процесса - от проектирования технологических операций до определения последовательности сборки и использования оснастки.

Практическая реализация методики подтвердила ее комплексное воздействие на производственные показатели. Сокращение времени на согласование технологических процессов между подразделениями на 18% свидетельствует о повышении не только качества технологической документации, но и общей операционной эффективности. Интегрированная среда верификации обеспечила единое пространство для совместной работы конструкторов и технологов, способствуя минимизации межфункциональных барьеров и улучшению координации между этапами разработки.

Таким образом, применение разработанной методики следует рассматривать как перспективное направление цифровой трансформации процессов подготовки в машиностроении, позволяющее достигать устойчивого конкурентного преимущества через повышение точности проектирования, сокращение производственных

издержек и обеспечение стабильно высокого качества конечной продукции. Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на расширение функциональных возможностей системы и адаптацию методики для других типов производств.

Выводы по Главе 4

1. Проведенное исследование и его практическая апробация на реальном производственном объекте позволяют сделать вывод о высокой эффективности предложенной методики интеграции иммерсивных технологий верификации в процессы технологической подготовки производства. Основным положительный эффект достигается за счет перехода от реактивного выявления ошибок на этапе физической сборки к их системному устранению на стадии проектирования технологического процесса.

2. Внедрение методики подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием VR-инструмента подтверждает эффективность предложенного решения, при этом сокращение времени подготовки производства по сравнению с базовым процессом составило 24,1%.

3. Проведен технико-экономический анализ сравнения вариантов подготовки производства разработки изделия «вагон-хоппер» традиционным методом и с использованием VR-инструмента, который подтвердил целесообразность предложенного способа организации производства. Экономический эффект оценивался через инвестиционные вложения и составил 1 936 655,18 руб.

ОБЩИЕ ВЫВОоды И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдулкеримов И.Д., Попова О.И., Попова М.И. Основы технологии машиностроения. Воронеж: ЭБС АСВ, 2020. 134 с.
2. Аверченков А.В., Колошкина И.Е., Шептунов С.А. Формирование компетенций специалистов в наукоемких технологиях подготовки производства // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2019. №6 (96). С. 22-30.
3. Автоматизация управления параметрами качества поверхностного слоя и эксплуатационными свойствами деталей машин при обработке резанием / А.Г. Суслов [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2019. № 8(98). С. 28-36.
4. Аддитивные технологии для печати механизмов с резьбовыми соединениями / Е. В. Васильева [и др.] // Инновационные идеи в машиностроении: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 322-325.
5. Албагачиев А.Ю., Краско А.С., Радайкин Д.А. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 2. С. 62-74.
6. Александров И.А. Принципы автоматизации технологической подготовки производства путем нейросетевого моделирования // Инженерный вестник Дона. 2019. № 5 (56). С. 22.
7. Артюшенко В.М., Аббасов А.Э. Использование методов визуализации с применением 3D-образов для технологических процессов сборки и отработки сложных технических устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. №4(48). С. 38-43.
8. Балла О.М. Технологическая подготовка производства. Инструментальные блоки и вспомогательный инструмент для многоцелевых станков с ЧПУ // СПб.: Лань, 2026. 176 с.

9. Богинский А.И., Чурсин А.А. Цифровые модели для оптимизации производственно-технологических процессов // Вестник машиностроения. 2020. № 2. С. 63-67.
10. Божко А.Н. Автоматизированный структурный анализ и синтез проектных решений в технической подготовке сборочного производства сложных изделий: дис. ... докт. техн. наук. Москва, 2018. 410 с.
11. Бурлаченко О.В., Оганесян О.В. Цифровая технология выбора и трансформации информации для управления и поддержки жизненного цикла изделия // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 3 (756). С. 3-13.
12. Вагапов Т.Р., Муравьев В.В. Интеграция технологической подготовки производства в автоматизированные системы проектирования // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26. № 4. С. 50-58.
13. Вигер И. Виртуальная реальность в промышленности // Control Engineering Россия. 2016. № 5(65). С. 68-71.
14. Вороненко В.П., Долгов В.А. Информационная модель базового производственно- технологического решения для адаптации технологического процесса к текущему состоянию системы предприятия // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 3(15). С. 173-177.
15. Герман С.В. Повышение эффективности сборки заготовок и формообразования составных изделий пластическим деформированием и улучшение конструкций оборудования: дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2018. 125 с.
16. Говорков А.С., Подрез Н.В. Аспекты моделирования производственных процессов в рамках системы предприятия // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. № 4. С. 30-37.
17. Горячкина А.Ю., Корягина О.М. Создание цифровых двойников при технологической подготовке производства // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2025. Т. 23. № 10 (266). С. 39-47.
18. Григорьев С.Н., Долгов В.А., Леонов А.А. Имитационное моделирование производственных процессов с применением логик планового и ситуационного

резервирования рабочих мест // Автоматизация. Современные технологии. 2021. № 1. С. 3-10.

19. Жаров М.В. Обзор программных средств имитационного моделирования для исследования технологий и производств машиностроения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2021. Т. 23, № 4. С. 85-92.

20. Зайцева Н.И. Математическое моделирование отклонений поверхностей деталей и анализ качества сборки в авиастроении: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2021. 105 с.

21. Звягин Л.С. Интеллектуальные информационно-измерительные системы на основе цифровых двойников для предиктивного обслуживания промышленного оборудования // Computational nanotechnology. 2025. Т. 12. № 4. С. 51-60.

22. Зубарев Ю.М. Расчет и проектирование приспособлений в машиностроении. СПб.: Лань, 2026. 308 с.

23. Зуев, Н. А. Современные представления об оптимизации состава машинно-тракторного парка (МТП) сельскохозяйственных предприятий / Н. А. Зуев, Б. Д. Докин // Состояние и инновации технического сервиса машин и оборудования : материалы VIII региональной научно-практической конференции студентов и аспирантов, посвященной 80-летию НГАУ-НСХИ, Новосибирск, 10–11 ноября 2016 года / Новосибирский государственный аграрный университет. Новосибирск: Золотой колос, 2016. С. 16-19.

24. Зяблов О.К., Кочнев Ю.А., Кочнева И.Б. Концепция автоматизированной подготовки ремонтной документации // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1(50). С. 69-74.

25. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства / А.В. Беловол [и др.]. Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. Т. 1. 401 с.

26. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / Григорьев С.Н. [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 3(142). С. 84-99.

27. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С.Н. Григорьев [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 3(142). С. 84-99.
28. Кабанов А.А., Амосов М.В. VR/AR в изучении, создании и эксплуатации аэрокосмической техники: из макромира в микромир, от наблюдения к действиям // Труды МАИ. 2023. №128. С. 128-134.
29. Казанцев М.А., Капулин Д.В., Романов Н.В. Разработка и внедрение системы интеграции конструкторско-технологической подготовки производства с системой планирования производства // Вестник СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 2025. Т. 79. № 1. С. 53-63.
30. Каракозова И.В., Лисицын И.М., Болдышев К.В. Методы проектирования рабочих операций в условиях внедрения цифровых технологий в строительстве // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19, № 8. С. 1373-1389.
31. Кордюков А.В., Савченков М.И., Чернова А.А. Адаптация алгоритма работы системы автоматизированного проектирования технологического процесса для выполнения технологической подготовки в условиях мелкосерийного и единичного производства // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2023. Т. 26. № 3. С. 26-32.
32. Король Е.А., Доможилов В.Ю., Шелопаева Ю.Е. Систематизация организационно-технологических мероприятий по охране труда в организационно-технологической подготовке ремонтно-строительного производства // Вестник МГСУ. 2022. Т. 10. № 2. С. 36-40.
33. Корюхин В.Л., Шиляев С.А., Щенятский А.В. Исследование и разработка рекомендаций по совершенствованию технологии изготовления и подготовки к эксплуатации твердосплавного режущего инструмента // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2024. Т. 27. № 4. С. 90-100.
34. Котляров В.П., Маслаков А.П., Толстолес А.А. Цифровое моделирование технологии производства металлообрабатывающих механических цехов // Труды Института системного программирования РАН. 2019. Т. 31. №3. С. 85-98.

35. Краснов А.А., Рыбаков А.В., Евдокимов С.А. «Управление технологической подготовкой производства деталей, изготавливаемых на оборудовании с ЧПУ в условиях мелкосерийного производства» // Вестник МГТУ «Станкин». 2015. №1 (32). С. 69-73.
36. Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Использование систем виртуальной реальности для повышения качества изготовления изделий на машиностроительном производстве // Перспективные материалы и технологии. М.: МИРЭА, 2024. С. 205-208.
37. 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.
38. Кузнецов В.А., Руссу Ю.Г., Куприяновский В.П. Об использовании виртуальной и дополненной реальности // International Journal of Open Information Technologies. 2019. №4. С. 75-84.
39. Кушнарев Л.И., Севостьянова Д.Л. К стабильно высокому качеству продукции машиностроения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 2. С. 32-36.
40. Лим А.А., Зуев Н.С., Баранова Н.С. Дополненная реальность в технологиях сборки // Оптические технологии, материалы и системы: Сборник докладов конференции. М.: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. С. 342-344.
41. 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.
42. Лим А.А., Кутин А.А. Гиперграфовый подход к моделированию сборочных процессов: синтез с нодовыми системами и имплементация в среде смешанной реальности // Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 2(73). С. 80-89.

43. Лим А.А., Кутин А.А. Перспективы применения технологий смешанной реальности в сборочных процессах на примере очков HoloLens 2 // Компьютерное проектирование в электронике. Минск: БГУИР, 2024. С. 123-125.

44. Лим А.А., Кутин А.А., Пирогов В.В. Разработка инструмента дополненной реальности для визуальной поддержки сборочных процессов в машиностроении // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2023. № 10. С. 435-440.

45. Лоскутов И.А. Разработка имитационной модели производственного процесса изготовления специального оборудования энергомашиностроительного комплекса: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2024. 208 с.

46. Лушкин А.А., Круглов П.В., Болотина И.А. Совершенствование методического обеспечения для проектирования технологического процесса узловой сборки летательных аппаратов на основе применения гиперграфов ограничений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 11 (764). С. 45-52.

47. Малыханов А.А., Черненко В.Е. От имитационной модели к цифровому двойнику: анализ опыта выполнения коммерческих проектов // 9-я Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. Екатеринбург: УрГ-ПУ, 2019. С. 37-46.

48. Маркова Е.В., Сидоркин А.В. Технологическая подготовка производства: учебное пособие. М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 168 с.

49. Медведев С.Н., Аксенов К.А. Анализ применимости имитационного и мультиагентного моделирования в задачах планирования машиностроительного производства // Современные проблемы науки и образования. 2012. №5. С. 101.

50. Методика оптимизации производственных процессов службы технического обслуживания и ремонта оборудования на предприятиях ОПК / А.В. Олейник [и др.] // Экономика и управление в машиностроении. 2010. № 6. С. 47-52.

51. Мингалеев Г.Ф., Белоглазов В.Б., Трутнев В.В. Повышение эффективности конструкторско-технологической подготовки производства формированием опционального состава автомобиля // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2014. №3. С. 251-255.

52. Мультиагентная система распределения производственных ресурсов в тяжелом машиностроении / М.В. Андреев [и др.] // Программные продукты и системы. 2010. №3. С. 100-104.
53. Наугольнова И.А. Выявление факторов производства, влияющих на качество выпускаемой продукции // Евразийский союз ученых. 2015. № 4-2(13). С. 101-103.
54. Нуралиев Ф.А.О., Иванов И.А. Цифровые технологии в литейном производстве // Литейное производство. 2020. № 8. С. 20-22.
55. Об инвестировании в цифровизацию и обновление основных фондов предприятий обрабатывающей промышленности РФ в условиях санкций / С.М. Артемов [и др.] // Экономика и предпринимательство. 2023. № 1(150). С. 148-152.
56. Омельченко И.Н., Бром А.Е., Сидельников И.Д. Критерий эффективности цепей поставок и построение целевой функции в задачах оптимизации материально-технического снабжения для сложной техники // Организатор производства. 2017. Т. 25, № 4. С. 83-91.
57. Омельченко И.Н., Лазаренко А.Г. Принципы инженерного проектирования // Вестник машиностроения. 2019. № 12. С. 79-82.
58. Омельченко И.Н., Бром А.Е., Садыкова А.М. Разработка имитационной модели складских процессов в фулфилмент центре маркетплейса // Проблемы теории и практики управления. 2019. № 6. С. 89-97.
59. Оптимизация материальных потоков на механообрабатывающих участках в многономенклатурном производстве с учетом взаимозаменяемости оборудования / Кутин А.А. [и др.] // СТИН. 2019. № 7. С. 36-38.
60. Основы технологии машиностроения / В.В. Клепиков [и др.]. М.: ИНФРА-М, 2026. 295 с
61. Основы технологии машиностроения и формализованный синтез технологических процессов / М.: ТНТ, 2011. 496 с.

62. Перспективы технологической подготовки в условиях современного производства / Д.В. Крайнев [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 1 (272). С. 16-19.
63. Петров Н.В. Теоретические основы технологии сборки и монтажа сборочно-монтажных единиц по методам разовой сборки и взаимозаменяемости: дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2018. 289 с.
64. Повышение эффективности технологической подготовки единичного и мелкосерийного производства на основе имитационного моделирования / С.А. Любомудров [и др.] // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 669-677.
65. Поляков Н.А., Чулкин С.Г. Информационные технологии в подготовке судостроительного производства // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. № S1. С. 317-318.
66. Помпеев К.П. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства / К.П. Помпеев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 1. С. 7-15.
67. Преображенская Е.В., Лим А.А. Цифровые технологии в производстве. Создание виртуальной лаборатории: учебно-методическое пособие. М.: РТУ МИРЭА, 2023. 72 с.
68. Применение VR инструментов в машиностроении. VR Concept. URL: <https://vrconcept.net/> (дата обращения 15.06.2025).
69. Радаев А.Е., Кобзев В.В., Федотова А.О. Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2018. Т. 11, № 2. С. 19-31.
70. Рванцов Ю.А. Сравнительный анализ систем имитационного моделирования деловых процессов по критерию функциональной полноты // Вестник ДГТУ. 2011. Т. 11, №1 (52). С. 69-72.
71. Ревина И.В., Бояркин Г.Н. Имитационное моделирование производственного процесса изготовления деталей // Омский научный вестник. 2018. № 6. С. 230-234.

72. Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю. Инновационный подход к разработке технологических процессов изготовления изделий в многономенклатурном производстве // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 2 (56). С. 35-46.
73. Росатом начал применять VR-технологии при обучении стропальщиков URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2024/03/12/143945> (дата обращения 21.08.2025).
74. Савицкий В.В. О необходимости совершенствования документооборота в технологической подготовке металлообрабатывающего производства // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2024. № 1(148). С. 86-109.
75. Салаев Р.А., Федоров А.А., Салаева А.В. Имитационное моделирование процессов агрегатно-сборочного производства // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. №1 (71). С. 50-53.
76. Самойлова Л.Н., Юрьева Г.Ю., Гирн А.В. Технологические процессы в машиностроении. Лабораторный практикум. СПб.: Лань, 2017. 156 с.
77. Селиванов С.Г., Шайхулова А.Ф., Поезжалова С.Н. Инновационное проектирование цифрового производства в машиностроении. М.: Инфра-Инженерия, 2022. 264 с.
78. Семенычев Ф. Бережливое производство для руководителей // М.: Ridero, 2021. 95 с.
79. Сергеев С.В., Луценко А.В., Веретенников С.А. Использование сетевых матричных структур для конструкторско-технологической подготовки производства // Сварочное производство. 2021. № 5. С. 56-60.
80. Скоробогатов А.С. Разработка плана мероприятий по обеспечению качества конструкторско-технологической подготовки и сопровождения производства на предприятиях машиностроения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. 2020. № 2. С. 195-207.

81. Современные подходы к построению цифровых двойников продуктов, процессов и систем, включая производственно-логистические системы машиностроительных предприятий / В.А. Долгов [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 2. С. 88-96.

82. Создание автоматизированных рабочих мест на основе формализованной методики проектирования технологических процессов машиностроительных предприятий / Г.С. Жетесова [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1(50). С. 214-223.

83. Справочник технолога-машиностроителя / В.И. Аверченков [и др.] / Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Машиностроение, 2023. Т.1. 1574 с.

84. Старостина В.А., Воробьев В.В., Юрковская Г.И. Внедрение AR-технологии на машиностроительных предприятиях // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2019. Т. 2. С. 773-775.

85. Структурно-функциональное представление платформы онтологического моделирования процесса технологической подготовки производства / Г. Рад. [и др.] // Автоматизация в промышленности. 2023. № 5. С. 44-48.

86. Суровцева О.А. Улучшение технологической подготовки производства при помощи САПР ТП // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 5-3. С. 124-126.

87. Трехмерная компьютерная модель как информационная база конструкторско-технологических работ в условиях инжиниринга / А.В. Олейник [и др.] // Технология машиностроения. 2010. № 2. С. 31-35

88. Таратынов О.В., Клепиков В.В., Базров Б.М. Технология машиностроения. Основы проектирования на ЭВМ. Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2026. 610 с.

89. Татьяна А.И., Тютюнник Д.А., Барышев А.В. Комплексная цифровизация технологических процессов горного производства // Горный журнал. 2021. № 6. С. 33-37.

90. Технология машиностроения / А.Г. Схиртладзе [и др.]. М.: Инфра-М, 2017. 525 с.

91. Типнер Л.М., Калинина Н.Е. Имитационное моделирование как инструмент энергосбережения на машиностроительном предприятии // Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право. 2024. Т. 34. №5. С. 826-832.
92. Файзуллаев Х., Турсунбаев Б., Турсунбаев Т. Новый теоретический и инновационный подход к оценке производительности сложных машинных механизмов // German International Journal of Modern Science. 2025. № 96. С. 32-40.
93. Хаймович И.Н., Фролов М.А. Разработка модели технологического решения при автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства // Успехи современного естествознания. 2014. № 8. С. 138-140.
94. Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Романов П.И. Имитационная модель технологической подготовки производства цеха механической обработки // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. №2. С. 215-222.
95. Цифровизация - важнейший инструмент совершенствования металлургических технологий / А.В. Мунтин [и др.] // Металлург. 2022. № 9. С. 31-43.
96. Цифровой двойник как инструмент организации производства и управления качеством продукции / Л. М. Червяков [и др.] // Русский инженер. 2025. № 4(89). С. 21-26.
97. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Ч. I. Конструкторский этап / В.Ф. Булавин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 242-249.
98. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК / А. И. Боровков [и др.] // Вестник Восточно-Сибирской Открытой Академии. 2019. № 32. С. 2.
99. Черепяхин, А. А., Кузнецов, В. А. Технологические процессы в машиностроении. СПб.: Лань, 2025. 218 с.
100. Черкасов К.Ю., Хаймович И.Н. Разработка информационных систем в конструкторско-технологической подготовке производства // Вестник Международного института рынка. 2024. № 1. С. 126-132.

101. Чигиринский Ю.Л. Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства // Научные технологии в машиностроении. 2020. №8. С. 29-35
102. Чигиринский Ю.Л., Крайнев Д.В., Фролов Е.М. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание // Научные технологии в машиностроении. 2022. №8. С. 39-48.
103. Чижов М.И. Подход к автоматизации конструкторско-технологической подготовки авиационного производства // Сборник трудов конференции. 2015. С. 394-397.
104. Шайхутдинова И.И., Гайнцева Е.С. Применение информационных технологий в литейном производстве // Литейное производство. 2024. № 1. С. 31-36.
105. Шафигуллина А.Г. Применение инновационных технологий в прикладной механике // Тенденции развития науки и образования. 2023. № 97-11. С. 207-209.
106. Шашин А.Д. Методика определения запуска первоочередных заказов в многономенклатурном механообрабатывающем производстве с учетом времени технологической подготовки производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2020. № 1 (52). С. 33-37.
107. Al-Jundi H.A., Tanbour E.Y. Design and evaluation of a high-fidelity virtual reality manufacturing planning system // Virtual Reality. 2023. 27. P. 677-697.
108. Aspects of Preparation and Planning of Batch Launch of Design Documentation into Production for Technically Complex Products / Permyakov A. [et al.] // Lecture Notes in Net-works and Systems. 2025. 1480. P. 359-366.
109. Atabaev F.B., Iskandarova M.I., Mironyuk N.A. Optimization of Supply Chain Performance through Simulation Modeling: A Discrete Event Simulation Approach // Logistics and Supply Chain Management. 2026. 17. P. 799-815.
110. BMW Group uses virtual reality to design future production workstations / BMW Group PressClub Global. 2018. Режим доступа: <https://www.press.bmw-group.com/global/video/detail/PF0006542/> (дата обращения: 12.02.2026)

111. Chellakhi A., El Beid S. Modeling and Simulation of Standalone Solar Photovoltaic Systems // Synthesis Lectures on Renewable Energy Technologies. 2025. P. 49-92.
112. Fiorentino M., Uva A.E., Gattullo M., et al. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions // Computers in Industry. 2014. 65 (2). P. 270-278.
113. Gattullo M., Evangelista A., Uva A.E., et al. What, How, and Why are Visual Assets Used in Industrial Augmented Reality? A Systematic Review and Classification in Maintenance, Assembly, and Training (From 1997 to 2019) // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2020. 28. P. 1443-1456.
114. Giabbanelli P., David I. Artificial Intelligence in Modeling and Simulation // Simulation Foundations, Methods and Applications. 2026. 15. P. 260.
115. Lee E.A. The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models // Sensors. 2015. 3(15). P. 4837-4869.
116. Milgram P., Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays // IEEE TRANSACTIONS on Information and Systems. 1994. E77-D (12). P. 1321-1329.
117. Nee A.Y.C., Ong S.K. Virtual and augmented reality applications in manufacturing // IFAC Proceedings Volumes. 2013. 9 (46). P. 15-26.
118. Ponomareva S.V., Kamenskih D.N. Simulation of a Production Manipulator for Automating the Technological Process of Processing Dimensional Shafts // Automation and Control in Engineering. 2024. Vol. 53. P. 830-837.
119. RoomShift: Room-scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-moving Swarm Robots / Ryo Suzuki [et al.] // In Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2020. P. 1-11.
120. Soori M., Arezoo B., Dastres R. Virtual manufacturing in Industry 4.0: A review // Data Science and Management. 2024. 1(7). P. 47-63.
121. Wang X., Ong S.K., Nee A.Y.C. A comprehensive survey of augmented reality assembly research // Advances in Manufacturing. 2016. Vol. 4, No. 1. P. 1-22.

122. Huang S., Wang B., Li X. Industry 5.0 and Society 5.0 – Comparison, complementation and co-evolution // Journal of Manufacturing Systems. 2022. 64. P. 424-428.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Astron | Здания для Бизнеса

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ КУДРЯВЦЕВА ИЛЬИ ВЛАДИСЛАВОВИЧА**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Кудрявцева Ильи Владиславовича «Моделирование процессов организации подготовки производства крупногабаритных изделий машиностроения на основе инструментов виртуальной реальности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в ООО «Астрон Билдингс» при контроле крупногабаритных конструкций.

Внедрение разработанного в диссертации метода организации технологической подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием инструмента виртуальной реальности обеспечило сокращение времени подготовки проектов и обучения персонала.

Генеральный директор
ООО «Астрон Билдингс»


М.А. Буххаймер
27.03.2026 г.



**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ЗАВОД «ЗИО-ПОДОЛЬСК»
(АО «ЗиО-Подольск»)**

АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ

13.04.2026г.

№ 1235

г. Подольск

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ
КУДРЯВЦЕВА И.В.**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Кудрявцева Ильи Владиславовича «Моделирование процессов организации подготовки производства крупногабаритных изделий машиностроения на основе инструментов виртуальной реальности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, приняты для использования в текущей деятельности Отдела главного технолога АО «ЗиО-Подольск» в качестве научно-методического материала для обоснования организационно-технических решений.

Внедрение разработанного в диссертации метода организации подготовки производства крупногабаритных изделий с использованием инструмента виртуальной реальности обеспечивает сокращение времени при подготовке производства крупногабаритных изделий и организации процесса сборки на рабочих местах.

Главный технолог



В.Е. Ощепков

Прокопов Дмитрий Александрович
(495) 747-10-25 (69-33)