

На правах рукописи



Бухтояров Александр Васильевич

**РЕАКТИВНОЕ КАЛЕНДАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ**

2.1.7. Технология и организация строительства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Горбанева Елена Петровна**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Абрамов Иван Львович**
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры «Технология и организация строительного производства»
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Фомин Никита Игоревич
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Промышленное, гражданское строительство и экспертиза недвижимости»
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» (ФГБОУ ВО «НГАСУ (Сибстрин)»**

Защита состоится «26» июня 2026 г. в 12:30 на заседании диссертационного совета 24.2.297.02, созданного на базе Донского государственного технического университета (ДГТУ), по адресу: 344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, корп. 26, ауд. 26-306

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донского государственного технического университета и на сайте <https://donstu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Стельмах Сергей Анатольевич

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В условиях вызовов, с которыми столкнулась Россия в последнее время, реализация строительных проектов, являющихся драйверами прогресса не только экономической, но и социальной сферы, играет значительную роль в национальном развитии. При всей важности строительной отрасли актуальной тенденцией, наблюдающееся как в отечественной, так и в мировой практике, является значительное и постоянно растущее отставание отрасли по темпам роста от лидеров экономики. В этой ситуации абсолютным императивом является форсированное развитие строительной отрасли на базе инновационных подходов и, прежде всего, методов цифровой экономики. Однако, специфика строительной отрасли не позволяет переносить успешные методы и практики управления, таких как сценарные подходы и моделей клеточных автоматов, из других областей экономики и социальной сферы. В частности, на этапах строительства и эксплуатации объекта капитального строительства реализация проектов осуществляется при интенсивном влиянии внешней среды. Оптимизация управления столь сложной, динамичной и подверженной интенсивным стохастическим воздействиям системы, каким является строительный сектор, возможно только на базе алгоритмов проактивного и реактивного планирования интегрированных с инновационными методами, динамически развивающимися в последнее время.

Особенности строительной отрасли, ее особая роль в достижении целей и стратегических задачах развития Российской Федерации, сформулированная в директивных документах Президента и Правительства РФ, определяющая роль цифровизации в форсированном развитии отрасли, определили важность и актуальность комплекса задач диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Классические и инновационные методы календарного планирования и их приложений к практическим задачам весьма интенсивно исследуются теоретически и внедряются в практику строительства отечественными и зарубежными учеными и практиками. Значительный вклад в исследование внесли И.Л. Абрамов, С.А. Болотин, В.Н. Бурков, А.В. Гинзбург, А.А. Гусаков, Л.Г. Дикман, Д.Л. Дикман, П.Г. Грабовый, Л.В. Киевский, Е.А. Король, В.В. Костюченко, А.А. Лапидус, О.Ю. Михальченко, В.Я. Мищенко, В.В. Молодин, П.П. Олейник, Д.В. Топчий, С.Г. Шеина, А.К. Шрейбер, X. Ахюджа, F. Ballestín, J.C. Billaut, D. Briskorn, L. Chen, L.E. Drezet, S. Hartmann, P. Leyman, J.C. Tang, V. Valls, M. Vanhoucke, Z. Wu, J. Xiao, Z. Zhang.

Теоретическая база исследования сформирована на основе трудов российских и зарубежных ученых в области исследования моделей клеточных автоматов и их практических приложений. Базовый метод, предложенный Норбертом Винером, Джоном фон Нейманом и академиком М. Цетлиным, был развит В.А. Аладжиевым. Методы практических применений моделей клеточных автоматов были развиты также в трудах следующих зарубежных ученых: J. Zhang, H. Li, Z. Song.

Влияние стохастических воздействий на технико-экономические процессы и мониторинга динамики сложной системы исследовалось в работах следующих ученых: И.Л. Абрамовым, Е.П. Горбаневой, В.Я. Мищенко, М.А. Преображенским, А.К. Шрейбер.

Несмотря на значительный и постоянно растущий интерес исследователей и практиков к инновационным методам планирования строительного производства многие задачи в этой области не решены. Практическая потребность совершенствования методов планирования производства, реализуемого в условиях ограниченности ресурсов и интенсивных стохастических воздействий, определила цель и задачи данного диссертационного исследования.

Цель работы заключается в совершенствовании метода динамической оптимизации календарного плана строительного производства, реализуемого в условиях интенсивных стохастических воздействий, на основе интеграции сценарного подхода и моделей клеточных автоматов.

Для достижения поставленной цели были решены **следующие задачи**:

1. Анализ и обобщение отечественного и зарубежного опыта применения инновационных методов активного и реактивного календарного планирования в строительной отрасли.

2. Формирование модели организационно-технологических процессов в условиях интенсивных стохастических воздействий различной природы и оптимизация ее параметров.

3. Формирование метода количественного учета технологических взаимосвязей процессов на основе описания базовых структур и правил перехода между последовательными состояниями строящегося объекта.

4. Разработка модели клеточного автомата и ее интеграция с методом сценарного моделирования динамики реализации календарного плана.

5. Разработка алгоритма учета влияния стохастических воздействий на параметры клеточного автомата и расчета динамики и полной длительности выполнения технико-технологических процессов.

6. Разработка алгоритмов определения глубины прогнозирования динамики производительности персонала и оборудования в условиях интенсивных стохастических воздействий и увеличения предсказательной способности сценарного описания динамики реализации календарного плана на основе мониторинга хода выполнения расписания.

7. Разработка метода сценарного моделирования хода реализации календарных планов строительного производства в рамках реактивного планирования.

8. Практическая реализация разработанных алгоритмов и компьютерное моделирование влияния стохастических воздействий различной природы на динамику технико-технологических процессов строительного производства.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы активного и проактивного календарного планирования строительного производства, сценарного прогнозирования динамики сложных систем, клеточных автоматов с

памятью и методы оптимизации управленческих решений, направленных на минимизацию негативных последствий стохастических воздействий.

Объектом исследования является сценарная модель динамики реализации календарного плана строительства, реализуемого в условиях ограниченности ресурсов и внешних интенсивных стохастических воздействий.

Теоретической базой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых, посвященные исследованию следующих алгоритмов и методов и практической реализации полученных результатов:

- активного и реактивного планирования и мониторинга динамики реализации проектов и многокритериальной оптимизации сложных систем;
- сценарного моделирования динамики сложных систем и клеточных автоматов с памятью;
- количественного описания влияния стохастических воздействий на динамику сложных систем
- программной реализации алгоритмов в оболочке базы данных.

Научная новизна исследования заключается в:

- разработке метода интеграции алгоритмов активного/реактивного планирования строительного производства, сценарного моделирования динамики сложных систем и клеточных автоматов с памятью;
- формировании иерархической структуры модели клеточного автомата с памятью, описывающего динамику реализации строительного проекта, и определении оптимальных форматов элементов этой структуры;
- определении метода количественного описания технологических взаимосвязанных процессов и системы равенств, описывающих условия успешной их реализации, анализ которых позволяет оптимизировать методы реализации согласованных процессов проекта;
- формировании метода описания детерминированной части сценарной модели динамики реализации календарных планов строительного производства;
- разработке правил перехода между ячейками клеточного автомата, моделирующих динамику состояний строящегося объекта;
- разработке алгоритма расчета динамики и полной длительности технологических процессов, детерминированная часть которого основана на объективных характеристиках нескладируемых ресурсов с учетом влияния стохастических воздействий на профиль их использования и производительность;
- формировании метода сценарного моделирования динамики реализации календарных планов строительного производства, основанного на анализе профилей нескладируемых ресурсов и позволяющего минимизировать негативные последствия внешних стохастических воздействий;
- разработке алгоритма учета влияния стохастических воздействий на производительность нескладируемых ресурсов и увеличения точности прогноза хода реализации плана строительства на основе динамической корректировки параметров клеточного автомата по результатам мониторинга выполненных работ.

Методология и методы исследования. Диссертационное исследование

осуществлялось на основе критического анализа классических и инновационных методов прогнозирования динамики и оптимального управления сложными системами, испытывающими стохастические воздействия. При разработке темы был использован системный подход с применением классических и современных методов математического и информационного моделирования; аналитические, графические и компьютерные технологии обработки информации.

Достоверность результатов исследования определяется

- всесторонним и критическим анализом научных работ по теме диссертации и смежным вопросам и обобщением отечественного и мирового практического опыта планирования и мониторинга хода реализации проектов;
- применением апробированного и актуального научно-методического аппарата, современных информационных технологий;
- репрезентативностью исходных данных, и опытом практического внедрения результатов исследования;
- широкой апробацией результатов диссертационного исследования в ходе дискуссий в рамках конференций и семинаров.

Теоретическая значимость результатов работы состоит в:

- интеграции алгоритмов активного/реактивного планирования строительного производства, сценарного моделирования динамики сложных систем, клеточных автоматов с памятью, мониторинга реализации плана;
- разработке метода сценарного моделирования динамики реализации календарного плана в условиях интенсивных стохастических воздействий;
- разработке метода построения дерева технико-технологических взаимосвязанных процессов и системы равенств, описывающих условия успешной их реализации, анализ которых позволяет описать динамику взаимосвязей и оптимизировать методы реализации всех согласованных процессов проекта;
- разработке методики оптимизации профиля нескладируемых ресурсов, направленной на минимизацию негативных последствий стохастических воздействий на процесс строительного производства;
- разработке алгоритма расчета динамики и длительности выполнения технологических процессов, детерминированная часть которого основана на объективных характеристиках нескладируемых ресурсов, а описание влияния стохастических воздействий на профиль использования и производительность ресурсов учитывает качественное различие дискретных и непрерывных механизмов уменьшения производительности;
- формировании алгоритма описания влияния стохастических воздействий на производительность нескладируемых ресурсов по результатам мониторинга хода реализации календарного плана;
- разработке методов расчета зависимости степени достоверности прогноза динамики производительности персонала и оборудования в условиях интенсивных стохастических воздействий от глубины прогнозирования;
- формировании иерархической структуры клеточного автомата с памятью, описывающего динамику сценариев реализации плана строительства;

– формировании алгоритма увеличения точности сценарного моделирования хода реализации плана на основе динамической корректировки параметров клеточного автомата по результатам мониторинга объема работ.

Практическая значимость диссертации заключается в:

– программной реализации сценарного метода моделирования и динамической корректировки хода реализации календарного плана строительного производства в оболочке реляционной базы данных;

– формировании интерфейса программной реализации, требующего минимальной подготовки персонала, эксплуатирующего комплекс сценарного моделирования, и позволяющего осуществить бесшовный трансферт информации и управленческих решений между участниками реализации проекта;

– определении состава и оптимальных форматов элементов информационной основы клеточного автомата, описывающего динамику вариантов сценариев реализации календарного плана строительства;

– формировании методов оптимизации управленческих решений, направленных на минимизацию негативные последствия внешних стохастических воздействий на ход строительства;

– формировании методики оптимизации управленческих решений, реализуемых при согласованной корректировке динамики реализации процессов в рамках реактивного планирования и обеспечивающих своевременное завершение технологически связанных работ;

– формировании широкого набора инструментов компьютерного анализа проактивных и реактивных календарных планов строительного производства, позволяющего в условиях ограниченности ресурсов выявлять ошибки планирования и текущих управленческих решений;

– возможности использования сформулированных в диссертации алгоритмов, методик и их программных реализаций проектными организациями на этапе проактивного планирования и подрядными организациями на этапе реализации календарного плана строительства.

Основные положения, выносимые на защиту:

– метод интеграции алгоритмов активного/реактивного планирования стройпроизводства, сценарного моделирования динамики сложных систем, клеточных автоматов с памятью, мониторинга динамики реализации;

– метод построения дерева взаимосвязанных процессов и алгоритм количественного описания их технологических связей, позволяющий оптимизировать методы реализации всех согласованных процессов проекта;

– иерархическая структура клеточного автомата с памятью, описывающего динамику вариантов сценариев реализации календарного плана строительства, параметры и оптимальные форматы его элементов;

– методика оптимизации управленческих решений, реализуемых при согласованной корректировке динамики реализации процессов в рамках реактивного планирования, обеспечивающих согласование технологически связанных работ и минимизацию негативных последствий стохастических воздействий на ход строительства и ее программная реализация;

– алгоритм учета влияния стохастических воздействий на характеристики нескладируемых ресурсов, позволяющий по результатам мониторинга хода реализации плана прогнозировать производительность персонала и оборудования, и его программная реализация в математическом пакете высокого уровня;

– алгоритм динамической корректировки параметров клеточного автомата по результатам мониторинга объема работ, позволяющий увеличения точности сценарного моделирования хода реализации плана строительства и горизонт планирования строительного производства, и его программная реализация.

Личный вклад автора заключается в:

– обобщении и критическом анализе результатов исследований отечественных и зарубежных ученых и практиков в области планирования и мониторинга в строительной отрасли и опыта их практического внедрения;

– анализе результатов исследований отечественных и зарубежных ученых, посвященных изучению сценарного моделирования сложных систем и клеточных автоматов, и опыта применения данных методов в различных областях;

– анализе практики отечественного строительного комплекса и определении на этой основе структуры клеточных автоматов, и оптимизации форматов их элементов;

– разработке методов сбора, кодификации, фиксирования информации, получаемой в результате мониторинга хода реализации плана строительства;

– определении оптимальных методов программной реализации сценарного моделирования динамики реализации календарного плана и алгоритма учета влияния стохастических воздействий на производительность ресурсов;

– разработке метода построения дерева технологических связанных процессов и системы равенств, описывающих условия успешной их реализации;

– разработке алгоритма количественного описания технологической связи работ, сборе, анализе и верификации информации для конкретного проекта;

– участии в разработке методики моделирования сценариев реализации проактивного календарного плана стройпроизводства, базирующийся на интеграции классических и инновационных методов и алгоритмов;

– формировании методики увеличения точности сценарного моделирования хода реализации календарного плана строительства и горизонта надежного реактивного планирования строительного производства;

– программной реализации алгоритмов сценарного описания проактивного и реактивного календарного плана и выполнении на этой основе моделирования реального строительного проекта, участии в формулировке выводов и практических рекомендаций и внедрении результатов исследования.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационного исследования внедрены в производственную деятельность АО «СЗ «ДСК», ООО ПИИТС «ЖелДорИзыскания», а также в образовательный процесс ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» при проведении профильных курсов для обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, профиль «Промышленное и гражданское строительство», а также для обучающихся по направлению подготовки 08.05.01 Строи-

тельство уникальных зданий и сооружений, специальности «Строительство высотных и большепролетных зданий и сооружений», «Строительство подземных сооружений».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на международных и всероссийских научно-практических конференциях: Научной конференции «Цифровая трансформация строительной отрасли. Настоящее и будущее» (Воронеж, 2024 г.); X Международной научно-практической конференции «Технологии, организация и управление в строительстве – 2024» (ТОМиС–2024) (Москва, 2024 г.); VIII Национальной научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы девелопмента в рамках комплексного развития территорий и обновления сложившейся застройки» (Москва, 2024 г.); 65-й научно-технической конференции по направлению: технология и организация строительства, организация производства (строительство) (Воронеж, 2025 г.), II Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Донского государственного технического университета (Ростов-на-Дону, 2025 г.).

Публикации по теме диссертационной работы. Основные положения диссертации опубликованы в 9 научных работах, в т.ч. в 4 статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК, в 1 статье, опубликованной в издании, индексируемом в базе Scopus, 1 статье в издании, индексируемом в базе Web of Sciece. Получено свидетельство о государственной регистрации программного комплекса №2025620417.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 174 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 1 таблицу, 38 формул, 321 наименование литературных источников отечественного и зарубежного происхождения.

Содержание диссертации соответствует пунктам 9, 14 паспорта научной специальности 2.1.7. Технология и организация строительства:

9. *Разработка новых и совершенствование существующих методов организационно-технологического проектирования в строительстве с использованием технологий информационного моделирования* на протяжении всего жизненного цикла объекта недвижимости.

14. *Повышение эффективности организации строительства в условиях воздействия природных и техногенных факторов* и возникновения чрезвычайных ситуаций.

II ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы; определены цели, задачи, объект, предмет исследования, применяемые методы; сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов; сформулированы положения, выносимые на защиту и личный вклад автора.

В первой главе «Методы оптимизации календарного плана строительного производства» с целью определения задач исследования проанализированы место календарного планирования в оптимизации строительных проектов; результаты исследований методов планирования и мониторинга строительного производства; результаты исследований инновационных методов описания и оптимизации сложных систем. На основании выполненного анализа были сделаны следующие выводы: в условиях интенсивных стохастических воздействий в рамках существующих подходов, уменьшающих горизонт надежного планирования до значений, не удовлетворяющим требованиям практики, необходима разработка методов динамической корректировки расписания с учетом изменения параметров ресурсов и сбоев хода реализации работ по проекту. Эти методы могут основываться на сценарном анализе и прогнозе хода реализации календарного плана в рамках моделей клеточных автоматов. Поэтому постановка и решение задачи составления устойчивого к стохастическим воздействиям расписаний в сфере стройпроизводства является одним из перспективных направлений исследований, что и определило цель и задачи данной диссертации.

Во второй главе «Влияние стохастических воздействий на динамику технико-технологических процессов на этапе реализации календарного плана строительного производства» разработана методика формирования альтернативных сценариев реализации календарного плана, базирующаяся на векторах, компонентами которых являются характеристики нескладируемых ресурсов, и матрицах, элементами которых являются мощности ресурсов и фронты технологически связанных процессов.

Проактивный план может быть построен на базе векторов процессов ($P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$) и нескладируемых ресурсов ($R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$), связи которых определяются матрицами мощностей и фронтов работ. Эти объекты не зависят от конкретного проекта, а определяются технологией производства и свойствами нескладируемых ресурсов. Для описания детерминированной динамики реализации конкретного проекта необходимо задать также и вектора профиля нескладируемых ресурсов ($n = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}$) и объемов реализуемых в проекте процессов ($V = \{v_1, v_2, \dots, v_k\}$). Успешная реализация проекта определяется следующей системой равенств:

$$\sum_{i_{\min}}^{i_{\max}} \sum_{\alpha=1}^{A_{i,j}} w_{j,\alpha} \cdot n_{i,\alpha} = v_j; \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

Здесь $A_{i,j}$ описывает номенклатуру ресурсов, $i_{\min}$, $i_{\max}$ - номера начального и конечного промежутков планирования. Графически отдельное уравнение системы (1) для базового плана отражено на рисунке 1, а двух сценариев реализации процесса в условиях стохастических воздействий на рисунках 2 и 3. На рисунках по оси ординат отложены объемы реализованных частей процесса. Высоты прямоугольников с заливкой отражают мощность отдельного ресурса $w_{j,a}$. Количество прямоугольников определяет профиль ресурса $n_{i,a}$, а площадь пропорциональна полному объему процесса v_j . На рисунке 1 ресурс используется практически равномерно. Стохастические воздействия могут уменьшить равномерность активности ресурса и привести к необходимости использования

менее эффективных ресурсов (рисунки 2, 3). На рисунке 2 видны промежутки, в которых подключен непрофильный ресурс (графически – прямоугольник с более плотной заливкой), производительность которого меньше чем у основного. На рисунке 3 представлен сценарий реализации плана в условиях интенсивных стохастических воздействий. В последний период были использованы шесть единиц непрофильного ресурса, что позволило реализовать процесс в плановые сроки, хотя и с увеличением затрат.

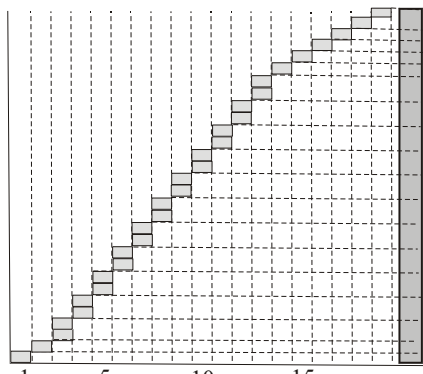


Рисунок 1 - Графический образ успешной реализации отдельного процесса

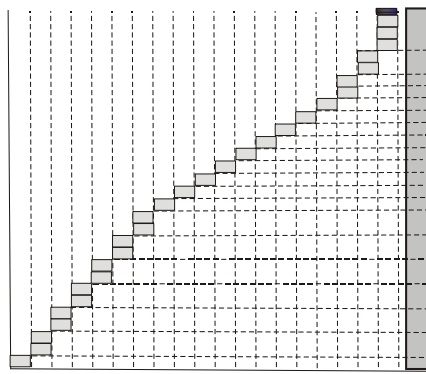


Рисунок 2 - Сценарий в условиях умеренных стохастических воздействий

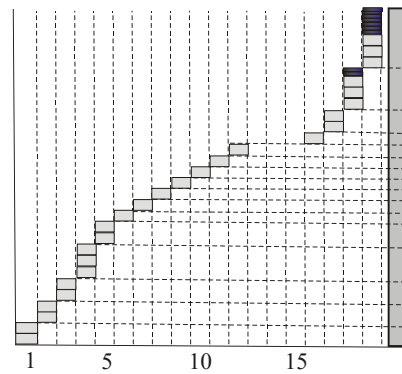


Рисунок 3 - Сценарий в условиях интенсивных стохастических воздействий

Количество складироваемых ресурсов определяет возможность выполнения процессов, а технологические связи определяют также и динамику. Описание связей процессов требует определения цепочек упорядоченных связанных процессов. Альтернативные методы упорядочения изображены на рисунках 4 и 5. Процессы разбиты на N слоев так, что процессы-доноры слоя порождают фронты работ для процессов-акцепторов, локализованных в последующих слоях.

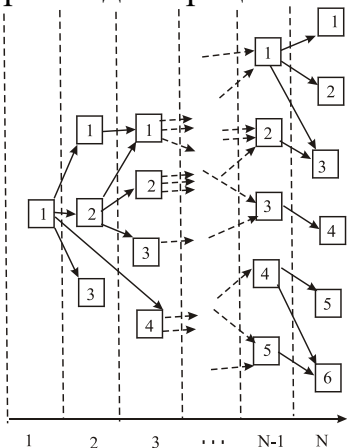


Рисунок 4 - Методом прямого распространения

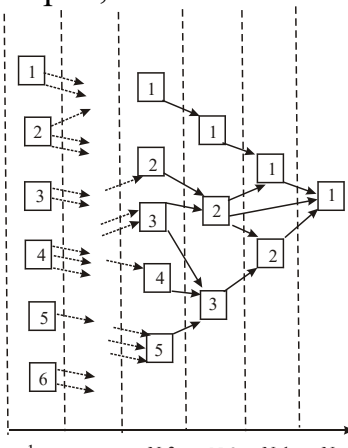


Рисунок 5 - Методом обратного распространения

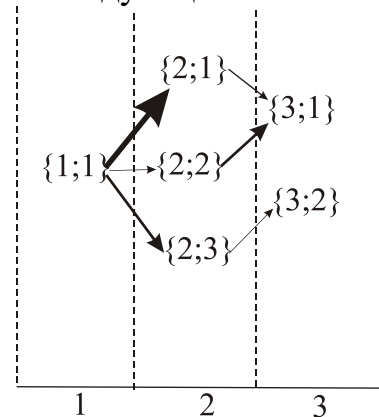


Рисунок 6 - Элементы матрицы коэффициентов связи.

На рисунке 6 процесс $\{1;1\}$ порождает фронты работ для всех процессов второго слоя $\{2;1\}$, $\{2;2\}$, $\{2;3\}$ и одного процесса третьего слоя – $\{3;1\}$. Алгоритм прямого распространения (рисунок 4) стартует с базового процесса-донора $\{1;1\}$. Возможен и алгоритм обратного распространения (рисунок 5), в котором на начальном этапе определяется конечная цель технологической цепочки $\{N;1\}$ и далее определяются наборы предшествующих процессов.

Дерево процессов позволяет лишь качественно описать ход реализации проекта. Количественное описание сценариев реализации плана требует задания матрицы связи процессов, элементы которой для каждой технологически связанной пары определяются следующей формулой:

$$d_{\{N_D, i_D\}, \{N_A, i_A\}} = F_{\{N_A, i_A\}} / v_{\{N_D, i_D\}} \cdot \quad (2)$$

Здесь $v_{\{N_D, i_D\}}$ - объем процесса-донора, $F_{\{N_A, i_A\}}$ - порождаемый фронт процесса-акцептора. Графически технологические взаимосвязи с учетом значений коэффициентов $d_{\{ND, iD\}, \{NA, iA\}}$ отражены на рисунке 6, на котором толщина стрелок пропорциональна значениям коэффициентов. Также видна технологическая взаимосвязь процесса $\{1; 1\}$ со всеми процессами последующих слоев. В противоположность этому процесс $\{2; 3\}$ определяет фронт работ лишь для одного последующего процесса, однако цепочка $\{1; 1\} \rightarrow \{2; 3\} \rightarrow \{3; 2\}$ является единственной технологической последовательностью, порождающей фронт работы $\{3; 2\}$. Отклонения от графика на любом этапе этой последовательности не может быть компенсировано за счет использования альтернативных нескладуемых ресурсов, вследствие чего данная ветвь дерева должна привлечь большое внимание, даже если она не находится на критическом пути. Фронт работ в $(i+1)$ -ый промежуток планирования определяется формулой:

$$F_{\{N_A, i_A\}} = F_{\{0,0\}} + \sum_{\{N_D, i_D\}} v_{\{N_D, i_D\}} \cdot d_{\{N_D, i_D\}, \{N_A, i_A\}}, \quad (3)$$

где $F_{\{0,0\}}$ есть исходный фронт процесса. Технологическая возможность реализации объема $v_j(i)$ -ого процесса в $(i+1)$ -ый промежуток планирования определяется следующей системой неравенств

$$v_j(i+1) \leq F_j(i); \quad i+1 \leq i_{\max} \quad (4)$$

для всех запланированных в $(i+1)$ -ый промежуток процессов.

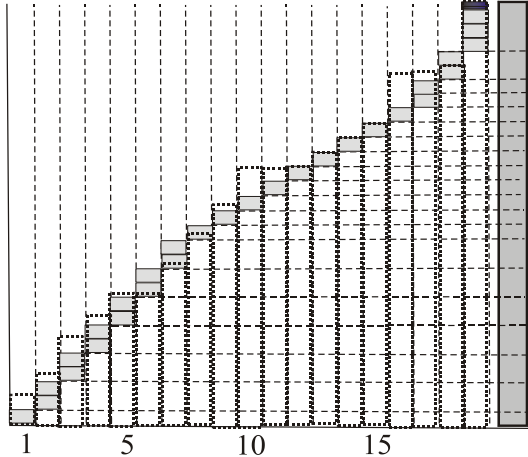


Рисунок 7 - Влияние технологических взаимосвязей на динамику реализации реактивного календарного плана

Условие (4) иллюстрирует рисунок 7, обозначения которого совпадают с рисунками 2 и 3. Высоты прямоугольников с точечными границами пропорциональны фронту процесса $F_{\{NA, iA\}}$. Анализ выполнения условий (1) и (4) свидетельствует о необходимости корректировки проактивного календарного плана.

Здесь наглядно видны следующие периоды:

- 1) начальный возможности реализации процесса - (1 - 5);
- 2) технологической невозможности плановой реализации процесса вследствие недостаточности фронта - (6 - 8);
- 3) опережающего создания фронта - (9 - 11);
- 4) полного освоения фронта - (12 - 15);
- 5) технологической нестабильности - (16 - 20).

Прямоугольник в правой части рисунка пунктирными линиями разделен на части, графически отражающие динамику накопления объема реализованного процесса, а его высота пропорциональна полному объему процесса.

В третьей главе «Проактивно-реактивное планирование строительного производства в условиях внешних стохастических воздействий» получена методика расчета динамики и полной длительности выполнения процессов, детерминированная часть которой основана на характеристиках нескладываемых ресурсов, а описание влияния стохастических воздействий на их профиль и производительность учитывает качественное различие дискретных и непрерывных стохастических механизмов увеличения длительности процессов.

В условиях стохастических воздействий область практического применения как базирующихся на априорном демпфировании критических путей на основе экспертных решений, так и инновационных методов планирования стройпроизводства ограничивается значительной субъективной составляющей оценок и необходимостью анализа больших объемов информации. Преодолеть недостатки имеющихся методов позволяет алгоритм, основанный на разделении дискретных и непрерывных стохастических воздействий.

Объем работы, выполненный при использовании N_j ресурсов производительностью c_j , которая определяется как характеристиками ресурса, так и внешними стохастическими воздействиями описывается формулой:

$$R_j = t \sum_{j=1}^J N_j c_j . \quad (5)$$

Здесь t есть длительность элементарного интервала планирования. Количество ресурсов определяется плановым профилем и подвержено стохастическим воздействиям. Время реализации отдельного процесса, являющегося составной частью полного строительного проекта, определяется формулой $T=t*J$ при выполнении условия $R_j > R_{tot}$, где R_{tot} - полный объем работы по проекту.

Количественное описание стохастических воздействий на число ресурсов, определенное на множестве целых чисел, и их производительность, принимающая действительные значения, требует использования различных методов моделирования. Вероятность реализации значения дискретной переменной N_j полностью определяется парциальными вероятностями p_n отдельных составляющих профиля использования ресурсов, вследствие чего значения N_j описываются формулой $N_j = \sum_{k=1}^{K_j} \theta_k$, где индекс k нумерует отдельные ресурсы, K_j описывает профиль их использования, θ_k - ступенчатая функция принимает два значения: равное единице с вероятностью p_n при реализации k -го ресурса и равное нулю с вероятностью $1-p_n$ при деактивации рассматриваемого ресурса.

Результаты компьютерного моделирования в математическом пакете MAPL V стохастических реализаций динамики использования ресурса в течение 20 смен приведены на рисунках 8 и 9. Как видно из рисунка 8, среднее значение близко к априорному математическому ожиданию и наблюдается значительная доля полной реализации ресурса. В противоположность этому единичное значение профиля ресурсов ни одного раза не реализовалось за 20 смен моделирования. Такие результаты свидетельствуют о необходимости пересмотра исходной вероятностной гипотезы. Такое резкое изменение поведения системы

может свидетельствовать, например, об активации дополнительных (например, погодных или эпидемиологических) стохастических механизмов.

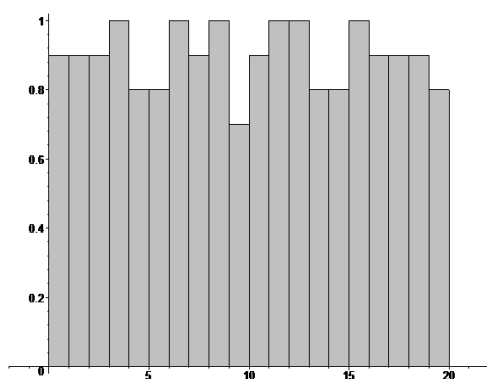


Рисунок 8 - $p_n=0,9$

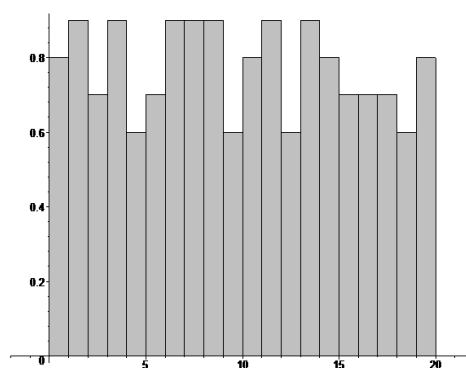


Рисунок 9 - $p_n=0,6$

Относительная ошибка прогнозирования при росте горизонта планирования не накапливается, что иллюстрируют рисунки 10 и 11, на которых приведено ее распределение по сменам. Относительная ошибка прогнозирования в модели фиксированной вероятности даже при значительной вероятности отказа ресурса не превышает значения 5%.

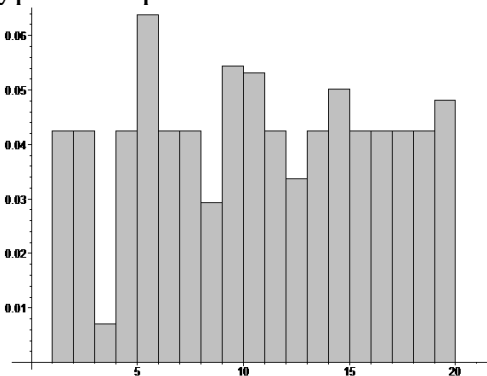


Рисунок 10 - $p_n=0,9$

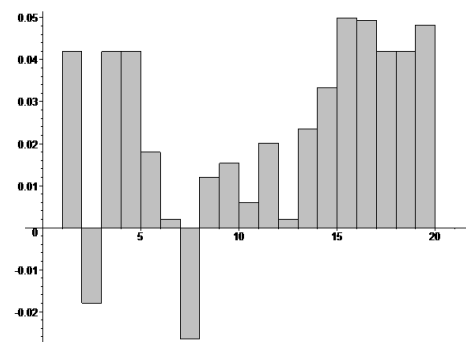


Рисунок 11 - $p_n=0,6$

Однако, глубина прогноза лимитируется абсолютной ошибкой. Во многих практических случаях горизонт планирования ограничивается также и тем, что модель фиксированной вероятности не адекватна реальной ситуации. Пример результатов мониторинга, свидетельствующие о качественном изменении стохастического воздействия, приведены на рисунке 12, на котором виден качественно разный вклад стохастических факторов в первой и второй половинах интервала мониторинга.

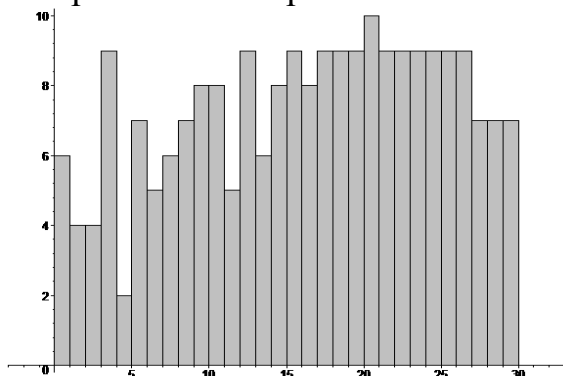


Рисунок 12 - Профиль использования ресурса за 30 смен при изменяющейся вероятности

В период 1–15 смены вероятность активности ресурса равна 0.47, а в период 16 – 30 смены она в два раза больше и равна 0.81. С практической точки зрения такая перестройка соответствует качественному изменению механизмов стохастических воздействий. Например, к такому эффекту может привести стабилизация погоды или выход из режима эпидемии. Кроме профиля ресурсов стохастическому влиянию подвергается также и их

производительность c_j , принимающая непрерывный ряд значений, что требует построения плотности вероятности распределения. Представим эту функцию в виде $f_j = c_l^{plan} f_{0,j}$, где для вероятности планового значения производительности введено обозначение c_l^{plan} . Область допустимых значений функции $f_{0,j}$ совпадает с интервалом (0;1). Нижняя граница интервала соответствует реализации стохастического воздействия полностью блокирующего активность ресурса. Функция $f_{0,j}$ должна быть монотонно растущей. Простейшей функцией, обладающей сформулированными свойствами, является функция вида

$$f_{0,j}(c_j) = (c_j^a + c_{0,j}) / (1 + c_{0,j}). \quad (6)$$

Увеличение показателя степени a соответствует монотонному падению вклада стохастических факторов, приводящих к значительному уменьшению производительности ресурса, что с практической точки зрения описывает ресурсы, которые даже под интенсивным влиянием внешних неблагоприятных воздействий сохраняют высокую эффективность. Малые значения a описывают ресурсы, характеризующиеся значительной вероятностью снижения производительности даже под действием неблагоприятных факторов малой интенсивности, что наглядно видно на рисунке 13.

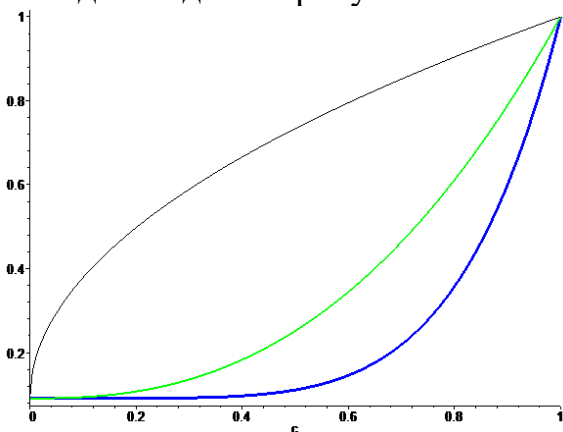


Рисунок 13 - Зависимость $f_{0,j}$ от c_l^{plan} для $a=0.5$ (верхняя кривая); $a=2.5$ (средняя кривая); $a=5.5$ (нижняя кривая).

Результаты компьютерного моделирования динамики реализации календарных планов строительства свидетельствуют о том, что совместное действие дискретных и непрерывных механизмов приводит к реализации синергетического эффекта, что является проявлением общих закономерностей динамики сложных систем. Параметр $c_0=0.1$. При $a=5.5$ вероятность понижения производительности на четверть менее 27%, а понижение в два раза имеет вероятность менее 9%.

В противоположность этому, при $a=0.5$ падение производительности в два раза происходит с вероятностью более 73%, а падение выработки в три раза происходит более, чем в половине случаев.

Горизонт планирования ограничивается как сложностью системы, так и интенсивностью стохастических воздействий. Даже при малой вероятности искажения профиля ресурсов рост вероятности снижения производительности быстро уменьшает горизонт планирования. В условиях интенсивных стохастических воздействий вследствие ограничений на горизонт планирования оптимальным является подход, основанный на интеграции методов априорного планирования, динамического мониторинга результатов реализации проекта и корректировки сценария динамики реализации. Такой подход требует формирования алгоритмов моделирования альтернативных сценариев.

Метод сценарного моделирования, основанный на использовании алгоритмов клеточных автоматов, разработан в третьей главе диссертации. Иерархическое построение клеток автомата, описывающего сценарии реализации календарного плана, требует задания следующих базовых векторов: наименований процессов ($P=\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$) и нескладируемых ресурсов (в дальнейшем - НР) ($R=\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$). Далее на основе базового вектора P_t строится матрица D_t , ненулевые элементы которой $d_{k_1,k_2}=k_1, k_2=1,2,\dots,k; k_1 \neq k_2$ отражают технологическую последовательность процессов и количественно описывают соотношения объемов процессов-доноров и фронта работ для процессов-акцепторов.

На основе базовых структур строятся двумерная матрица W_t , элементы которой w_{ij} ($i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,m$) равны выработке j -го ресурса при выполнении i -той операции за промежуток планирования T и матрица C_t , элементы которой c_{ij} ($i=1,2,\dots,k; j=1,2,\dots,m$) равны удельным затратам на единицу объема операции j -го ресурса при выполнении i -той работы. Вектора P_t , R_t и матрицы D_t , W_t , C_t не связаны с конкретным проектом, а отражают общие свойства процессов строительного производства и нескладируемых ресурсов.

Все сформированные выше вектора и матрицы описывают статические характеристики проекта и подрядных организаций, изменение которых возможно только в рамках стратегического планирования и требует, как правило, значительных материальных и временных затрат. Динамика реализации календарного плана строительства определяется профилем НР, для каждого промежутка планирования определяемой вектором ($n_t=\{n_1, n_2, \dots, n_\mu\}$), где n_j - количество j -го ресурса, используемого в рассматриваемый промежуток планирования, μ - общее число реально доступных ресурсов, t - номер промежутка планирования. Определение профилей НР по всем промежуткам планирования составляет ядро текущих управленческих решений, позволяющих оптимизировать сценарий реализации календарного плана в условиях стохастических воздействий. Ограничения, накладываемые на параметры ресурсного маневра, направленного на минимизацию негативных последствий стохастических воздействий, определяются максимальным доступным количеством ресурсов каждого вида в t -ый промежуток, количественно описываемый вектором ($N_t=\{N_1, N_2, \dots, N_\mu\}$).

Сформулируем параметры рассматриваемой системы и алгоритм клеточного автомата. Для рассматриваемой системы состояния определяется векторами объемов выполненных работ ($W_t=\{W_1, W_2, \dots, W_\mu\}$) и фронтов работ ($F_t=\{F_1, F_2, \dots, F_\mu\}$) на момент окончания t -ого промежутка. Управляющее воздействие совпадает с вектором профиля ресурсов n_t . Стохастическое воздействие определяется по результатам мониторинга объемов ($V_t=\{V_1, V_2, \dots, V_\mu\}$) и фронтов ($f_t=\{f_1, f_2, \dots, f_\mu\}$). Плановое значение выполненного в t -ый промежуток объема i -ой операции и увеличения фронта выражается формулами:

$$\Delta w_i(t) = \sum_j w_{i,j} \cdot n_j(t); \quad \Delta F_i(t) = \sum_j \Delta p_{i,j}(t) \cdot d_{j,l}. \quad (7)$$

Плановое значение увеличения фронта i -ой работы-акцептора следующим образом выражается через объемы всех технологически связанных с ней работ-доноров, выполненных за t -ый промежуток. В соответствии с формулами (7)

связь между компонентами векторов объемов и фронтов работ в последовательные промежутки имеет вид

$$w_i(t+1) = w_i(t) + \Delta w_i(t); \quad F_i(t+1) = F_i(t) + \Delta F_i(t). \quad (8)$$

В отсутствие внешних стохастических воздействий при задании начальных значений объемов ($W_0 = \{W_1, W_2, \dots, W_\mu\}$) и фронтов ($F_0 = \{F_1, F_2, \dots, F_\mu\}$) работ уравнения (7) полностью определяют правила перехода между клеточного автомата с памятью. С практической точки зрения, сформулированный КА при заданном управляющем воздействии ($n_t = \{n_1, n_2, \dots, n_\mu\}$) описывает плановую динамику реализации календарных планов строительства. Варьируя профиль НР в рамках ограничений, определяемых доступным количеством ресурсов ($N_t = \{N_1, N_2, \dots, N_\mu\}$), можно получить и проанализировать набор сценариев реализации строительного проекта. Стохастические воздействия приводят к отклонению динамики реализации проекта от плановой. При неизменных правилах перехода между клетками автомата (формулы (8)), плотность вероятности производительности следующим образом выражается через плановое значение производительности $w_{i,j}^{plan}$:

$$f_{i,j} = \frac{w_{i,j}^a + w_{0,i,j}}{w_{0,i,j} \cdot w_{i,l}^{plan} + (w_{i,l}^{plan})^{a+1} / (a+1)}. \quad (9)$$

Область определения плотности вероятности совпадает с интервалом $[0; w_{i,j}^{plan}]$, что отражает деструктивное влияние стохастических воздействий, снижающих реальную производительность по сравнению с плановыми значениями, вследствие чего величина $w_{i,j}^{plan}$ является точной верхней границей области определения. Плотность вероятности монотонно растет с увеличением фактической производительности, что отражает факт рациональности планирования. Параметр $w_{0,i,j}$ описывает возможность реализации нулевой производительности при наличии их на строительной площадке. С практической точки зрения такая ситуация реализуется, в частности, при отсутствии складированных ресурсов, является следствием погодных факторов или перебоев в энергоснабжении. При увеличении показателя a растет относительный вклад высокой, близкой к плановому значению, производительности, что с практической точки зрения соответствует слабому вкладу стохастических факторов (рисунок 14).

Влияние стохастических воздействий описывается соотношением математического ожидания и стандартного отклонения (рисунок 15). При малых a реализуется полная стохастизация производительности. В противоположном пределе $a \rightarrow \infty$ вклад стохастических факторов растет при увеличении значений параметра $b_{i,j} = (f_{i,j})_{min} \cdot w_{i,j}^{plan}$, что с практической точки зрения соответствует либо росту вероятности нулевой производительности либо увеличению планового значения $w_{i,j}^{plan}$. Правила перехода (8) с учетом влияния стохастических факторов на производительность полностью определяют сценарии реализации плана строительства.

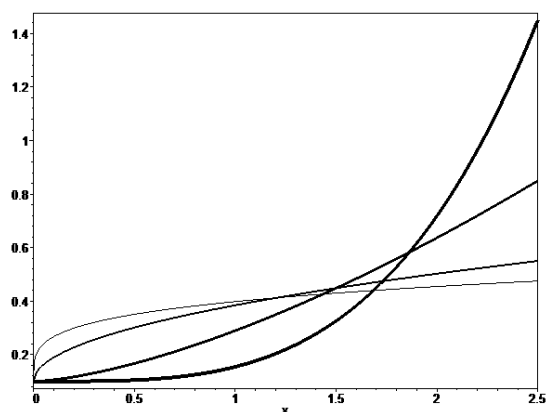


Рисунок 14 - Зависимость плотности вероятности f_{ij} от мощности ресурса при $a=0.25$; 0.5; 1.5; 3.5 (кривые по мере увеличения толщины линии)

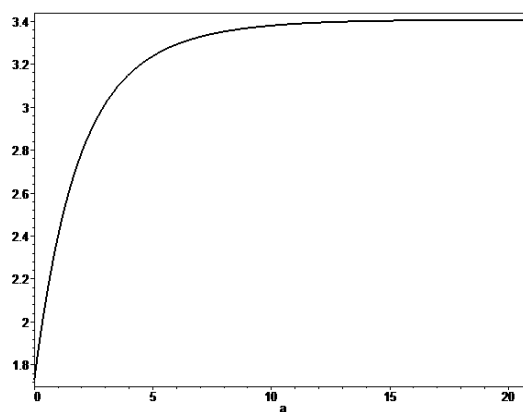


Рисунок 15 - Зависимость отношения математического ожидания к величине стандартного отклонения от a при значении параметров $w_{ij}^{plan}=2.5$ и $(f_{ij})_{min}=0.1$

В главе 4 «Сценарный метод прогнозирования и динамической корректировки календарного плана строительства в условиях стохастических воздействий» доказано, что глубина прогноза динамики реализации календарного плана в рамках сценарного метода на базе клеточных автоматов ограничивается влиянием стохастических факторов на его параметры. Увеличить глубину надежного прогноза и сформулировать на этой основе управленческие и технические решения, позволяющие минимизировать негативные последствия стохастических воздействий, позволит динамическая корректировка параметров автомата по результатам мониторинга выполнения календарного плана. Разработка и программная реализация комплекса алгоритмов, позволяющих осуществить такой подход, выполнена в данной главе диссертационной работы. Блок-схема комплекса изображена на рисунках 16 и 17.

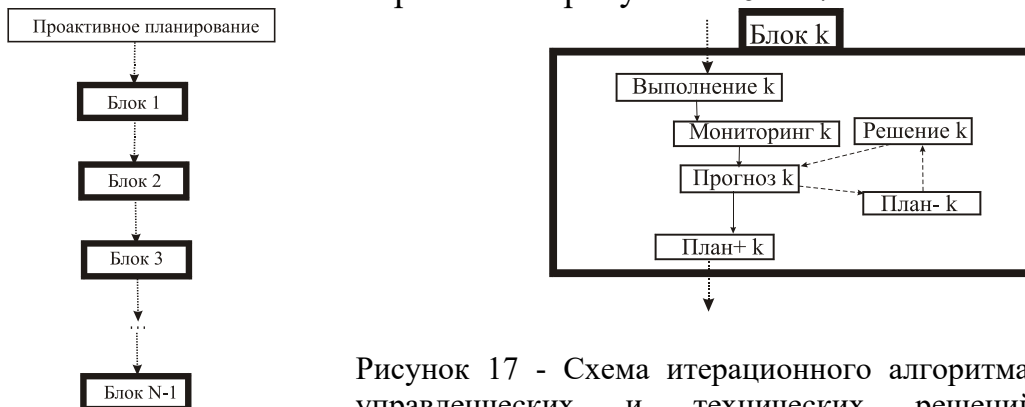


Рисунок 16 - Схема сценарного моделирования реализации плана

Рисунок 17 - Схема итерационного алгоритма оптимизации управленческих и технических решений. Параметр $k=1,2,3,\dots,N$ нумерует промежутки планирования, блоки «План+» и «План-» отражают соответствие и несоответствие прогноза плановым показателям)

На начальном этапе в рамках проактивного планирования в соответствии с методикой, сформулированной в главе 1, осуществляется проверка возможности реализации проекта в рамках ресурсных ограничений, в соответствии с методикой, сформулированной в главе 2, строится дерево взаимосвязанных технологических процессов и в соответствии с методикой, представленной в главе 3, определяются параметры клеточного автомата.

На втором этапе для нескольких профилей нескладируемых ресурсов осуществляется моделирование сценариев реализации календарного плана, проверка технической возможности реализации и выбор наилучшего проактивного сценария. Далее выполняются N-1 последовательных шагов итерационного алгоритма, каждый из которых отражен на рисунке 17.

На начальном шаге реализуется комплекс процессов, предусмотренных календарным планом (проактивным при $k=1$ и реактивным при $k>1$). По окончании промежутка планирования осуществляется мониторинг состояния системы и методом клеточных автоматов формируется прогноз динамики реализации плана. Если стохастические воздействия слабо исказили плановую динамику, этот прогноз совпадает с проактивным (состояние - «План+»). При значительном отклонении прогноза состояния системы от оптимального (графически соответствует блоку «План-») формируется управленческое решение, минимизирующее это отклонение, и рассчитывается прогноз скорректированной динамики. Последние три действия повторяются до достижения состояния «План+», после чего алгоритм увеличивает значение k на единицу и переходит к реализации процессов на следующем промежутке планирования.

Программная реализация комплекса алгоритмов прогнозирования и динамической корректировки сценариев по результатам мониторинга хода выполнения календарного плана выполнена в оболочке системы управления базами данных Access. Состав программного комплекса приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав программного комплекса

Таблицы	Формы	Запросы	Отчеты
Процесс	Процесс	Выработка по сменам	Выработка по сменам
Ресурс элементарный	Ресурс элементарный	Нужно ресурс сумма	Нужно ресурс сумма
Ресурс комплексный	Ресурс комплексный	Открытие фронта	Открытие фронта
Работа-ресурс	Работа-ресурс	Нужно ресурс	Нужно ресурс
Фронт	Фронт	Нужно ресурс смена	Ресурс неэффективно
Процесс-объем	Процесс-объем	Фронт созданный	Ресурс остаток
Смена	Смена	Фронт накопление	Фронт задел
План	План	Открытие фронта	Фронт остаток
	Ресурс подчиненный	Выработка накопл.	Фронт открытие
	План по сменам	Фронт динамика	Фронт и реализация
	Старт	Фронт реализация	Нужно ресурс сумма
		Выработка динамика	Затраты динамика
			Затраты накопление
			Выработка-план
			Выработка накопл.

Широкий функционал программного комплекса позволяет в рамках проактивного профиля нескладируемых ресурсов прогнозировать динамику реализации календарного плана и на этой основе выявлять дефицитные и неэффективно используемые ресурсы и последовательности связанных процессов, лимитирующие ход работ. Такой прогноз позволяет оптимизировать сценарии ре-

ализации календарного плана и в рамках реактивного планирования формировать обоснованные управленческие решения.

Пример реализации программного комплекса использует данные проекта 33-х этажного жилого дома со встроенными коммерческими помещениями, расположенного на территории жилого комплекса «Квартал мечты» в г. Воронеже. На рисунках 18 и 19 приведены примеры интерфейса программного комплекса для выполнения работ по устройству монолитной плиты перекрытия.

Процесс	Объем	Начальный фронт
Заливка бетона	199,3	0
Монтаж бетоновода (вертикально)	3	3
Монтаж бетоновода (горизонтально)	36,8	0
Подача арматуры (до 2т)	32	32
Подача лесов в пакетах (до 2т)	11	11
Подача опалубки в пакетах (до 2т)	52	52
Поливка бетонной поверхности	1044,9	0
Разборка бетоновода (вертикально)	3	0
Разборка бетоновода (горизонтально)	36,8	0
Разборка мелкощитовой опалубки	1044,9	0
Установка и вязка арматуры	32,29	0
Устройство лесов (опалубка)	2789	0
Устройство щитовой опалубки	1044,9	0

Рисунок 18 - Форма «Объем процесса»

Смена	Работа	Фронт	Выработка	Баланс
1	Установка и вязка арматуры	0,000	0,000	0,000
1	Монтаж бетоновода (вертикально)	3,000	0,000	3,000
1	Заливка бетона	0,000	0,000	0,000
1	Устройство лесов (опалубка)	0,000	410,240	-410,240
1	Разборка мелкощитовой опалубки	0,000	0,000	0,000
1	Разборка бетоновода (горизонтально)	0,000	0,000	0,000
1	Разборка бетоновода (вертикально)	0,000	0,000	0,000
1	Поливка бетонной поверхности	0,000	0,000	0,000
1	Подача опалубки в пакетах (до 2т)	52,000	14,632	37,368
1	Подача лесов в пакетах (до 2т)	11,000	10,984	0,016
1	Подача арматуры (до 2т)	32,000	0,000	32,000
1	Монтаж бетоновода (горизонтально)	0,000	0,000	0,000
1	Устройство щитовой опалубки	0,000	0,000	0,000
2	Подача арматуры (до 2т)	46,632	0,000	46,632
2	Разборка бетоновода (горизонтально)	0,000	0,000	0,000
2	Заливка бетона	0,000	0,000	0,000

Рисунок 19 -Отчет «Фронт и выработка»

В результате внедрения разработанных методов и алгоритмов, в сравнении с классическими методами планирования, был получен следующий эффект: сценарный алгоритм позволил увеличить точность прогнозирования отклонений от проактивного плана на 25-30%; благодаря более устойчивому к стохастическим воздействиям плану и рациональному резервированию ресурсов снизилась вероятность увеличения бюджета на 20-25%; найдены и исключены ошибки первоначального календарного плана, что позволило уточнить прогнозирование профиля ресурсов до 5%; с помощью динамического обновления параметров увеличился горизонт надежного планирования в 2-3 раза.

III ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью исследования в диссертации получены следующие **основные результаты**:

1. На основе анализа методов планирования строительного производства и опыта практического использования их результатов показано, что стохастические воздействия приводят к невозможности реализации априорного плана, вследствие чего необходим переход к режиму реактивного планирования, динамически устраняющего нарушения в реализации базового плана. Наиболее эффективным методом корректировки хода реализации календарного плана является динамическое изменение профиля нескладированных ресурсов.

2. Разработанная модель описания организационно-технологических процессов, основанная на разделении стохастических воздействий на дискретные (влияние на доступность ресурсов) и непрерывные (влияние на производительность), позволяет впервые количественно описывать динамику фронтов работ и

формализовать условия успешной реализации проекта, что ранее было невозможно при традиционном вероятностном подходе без разделения механизмов воздействий.

3. Предложенный метод количественного описания технологических взаимосвязей через дерево процессов и матрицу коэффициентов связи «донор–акцептор» дает возможность структурировать и численно оценивать технологическую последовательность строительного производства, следовательно, может служить основой для автоматизированного построения моделей сложных проектов.

4. Разработанный алгоритм формирования и анализа альтернативных сценариев реализации календарного плана, базирующийся на векторах нескладываемых ресурсов и матрицах мощностей и фронтов работ, позволяет получать множество реалистичных сценариев в условиях ресурсных ограничений и интенсивных воздействий. Демонстрация адекватности модели клеточного автомата с памятью подтверждает, что сценарный подход корректен и может использоваться для прогнозирования.

5. Созданная модель клеточного автомата с памятью, основанная на иерархической связи структур, позволяет оптимизировать компромисс между детализацией моделирования и его вычислительной эффективностью. Сформулированные правила переходов дают возможность одновременно учитывать плановую динамику и результаты стохастических воздействий, следовательно, модель пригодна для генерации и анализа реактивных сценариев в реальном масштабе времени.

6. Разработанный метод проактивного планирования, базирующийся на векторах процессов и ресурсов и матрицах мощностей и фронтов, позволяет количественно описать детерминированную динамику проекта до возникновения возмущений. Это дает возможность отделить плановую траекторию от стохастических отклонений и служит базой для последующего реактивного управления.

7. Сформированный метод сценарного моделирования на основе клеточных автоматов, в котором характеристики клеток задаются векторами процессов и матрицей технологической последовательности, позволяет непосредственно увязывать объёмы процессов-доноров с фронтами работ процессов-акцепторов. Следовательно, метод пригоден для моделирования строительного производства с жесткими технологическими связями.

8. Предложенный алгоритм количественного описания стохастических воздействий на интенсивность использования ресурсов подтверждает, что совместное действие дискретных и непрерывных механизмов порождает синергетический эффект, качественно отличающийся от действия каждого из них в отдельности. Из этого следует, что горизонт надежного реактивного планирования ограничен не только сложностью системы, но и интенсивностью стохастических воздействий, причём эти факторы усиливают друг друга.

9. Разработанный алгоритм описания динамики и длительности выполнения процессов, разделяющий детерминированную и стохастическую часть, поз-

воляет обоснованно выбирать вид функции распределения для снижения производительности, что дает возможность практически определять параметры распределения по реальным данным и повышает достоверность моделирования.

10. Выполненное в оболочке математического пакета высокого уровня компьютерное моделирование в широком интервале параметров стохастических воздействий позволило установить количественные зависимости точности прогнозирования от параметров воздействий. Следствием является доказанная возможность увеличения как точности прогнозирования хода календарного плана, так и глубины прогнозирования по сравнению с традиционными методами.

11. Программная реализация алгоритмов сценарного моделирования в оболочке системы управления базами данных, обладающая дружественным интерфейсом и широким функционалом анализа, позволяет практически применять разработанные методы в реальной управленческой деятельности. Наличие функционала анализа результатов управленческих воздействий дает возможность оценивать эффективность принимаемых решений до их реализации.

Выводы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Предложенные в диссертационном исследовании методики и алгоритмы рекомендуется использовать:

В деятельности проектных и подрядных организаций в рамках проактивного планирования:

- для многокритериальной оптимизации календарного плана;
- для прогнозирования вероятностей стохастических воздействий и оптимизации демпфирования их последствий;
- для выявления связанных процессов, лимитирующие динамику реализации планов, дефицитных и нерационально используемых ресурсов;

В деятельности подрядных организаций в рамках реактивного планирования:

- для оптимизации управленческих решений, направленных на минимизацию негативных последствий влияния стохастических воздействий;
- для динамической оптимизации резервов нескладируемых ресурсов;
- для увеличения надежности и горизонта реактивного планирования;

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие **практические рекомендации**:

– на практике необходим переход к режиму динамической корректировки априорного плана на базе сценарного моделирования хода его реализации. Оптимальным методом корректировки с учетом ресурсных ограничений является динамическое изменение профиля нескладируемых ресурсов;

– эффективным методом реализации сценарных моделей является инновационный метод, основанный на применении моделей клеточных автоматов, позволяющий формировать устойчивый к стохастическим воздействиям план, что делает возможным решение широкого круга практических задач;

– стохастические воздействия приводят к необходимости априорного демпфирования базового плана, значительно снижающего эффективность про-

екта; увеличить глубину прогноза и сформулировать управленческие и технические решения, позволяющие минимизировать негативные последствия стохастических воздействий, позволит динамическая корректировка параметров автомата по результатам мониторинга хода выполнения плана;

– возможность внедрения программной реализации сценарного метода моделирования динамики определяется выбором оболочки системы управления базами данных, имеющей лицензионные бесплатные версии и опцию разделением статической структура реляционной базы и динамического массива данных;

– практикоориентированный функционал программного комплекса позволяет решать широкий круг задач многокритериальной оптимизации сценариев реализации плана и оптимизации управленческих решений, направленных на уменьшение негативных воздействий на процесс строительного производства.

IV СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

4.1 Публикации в изданиях, включенных ВАК в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. **Бухтояров, А.В.** Динамика технико-технологических процессов в строительстве в условиях стохастических воздействий / В.Я. Мищенко, Е.П. Горбанева, М.А. Преображенский, А.В. Бухтояров // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2023. – № 4(72). – С. 93-106.

2. **Бухтояров, А.В.** Оптимизация методов реализации строительных проектов при календарном планировании / Е.П. Горбанева, А.В. Бухтояров // Недвижимость: экономика, управление. – 2024. – № S3. – С. 152-157.

3. **Бухтояров, А.В.** Проактивно-реактивное планирование строительного производства в условиях внешних стохастических воздействий / А.В. Бухтояров, Е.П. Горбанева, М.А. Преображенский // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. - № 3. – С. 153-161.

4. **Бухтояров, А. В.** Сценарный метод прогнозирования и динамической корректировки календарного плана строительства в условиях стохастических воздействий / В.Я. Мищенко, Е.П. Горбанева, А.В. Бухтояров // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 3(795). – С. 87-101.

4.2. Публикации в изданиях, входящих в наукометрическую базу Web of Science:

5. **Bukhtoyarov, A. V.** Dynamics of Technical and Technological Processes in Construction under Conditions Of Stochastic Impacts / V.Ya. Mishchenko, Ye.P. Gorbaneva, M.A. Preobrazhensky, A.V. Bukhtoyarov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2024. – No. 2(62). – P. 70-82.

4.3 Публикации в изданиях, входящих в наукометрическую базу Scopus:

6. **Bukhtoyarov, A. V.** Theory of Experiment Planning in the Construction of Energy-Efficient Facilities // K. Sevryukova, A. Bukhtoyarov, E. Gorbaneva, V. Mishchenko // AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2560. -050010.

4.4 Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

7. **Бухтояров, А. В.** Оптимизация параметров организационно-технологических процессов в строительном производстве объектов жилой недвижимости / В.Я. Мищенко, Е.П. Горбанева, В.Ю. Лопатин, А.В. Бухтояров // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 67-75.

8. **Бухтояров, А. В.** Инновации в строительной отрасли: новые технологии и материалы / Е. П. Горбанева, А. Д. Зуев, А. А. Оберемко, А. В. Бухтояров // Строительство и недвижимость. – 2023. – № 2(13). – С. 108-116.

9. **Бухтояров, А.В.** Программная реализация методики моделирования и анализа набора сценариев календарного планирования / Е.П. Горбанева, А.В. Бухтояров // Приоритетные направления развития науки и образования в условиях формирования технологического суверенитета: Сборник трудов II Международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию Донского государственного технического университета, Ростов-на-Дону, 15–16 октября 2025 года. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2025. – С. 343-349.

4.5 Официально зарегистрированные программы для ЭВМ

Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025620417 Российская Федерация. «Программный комплекс реализации сценарного метода прогнозирования при календарном планировании строительного производства»: заявл. 23.12.2024; опубл. 23.01.2025 / **А.В. Бухтояров**, М.А. Преображенский, Е.П. Горбанева, В.Я. Мищенко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».