

КОТОВСКАЯ МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**РАЗВИТИЕ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ
ПОТОЧНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ МЕТОДА
КРИТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ И СТАТИСТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность: **05.23.08** – Технология и организация строительства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель:

Болотин Сергей Алексеевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Величкин Виктор Захарович,
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Инженерно-строительный институт, кафедра «Строительство уникальных зданий и сооружений», профессор;

Козин Петр Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ФГКВОУ ВПО «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского», кафедра «Специальные сооружения ракетно-космических комплексов», профессор, г.Санкт-Петербург

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Защита состоится 16 февраля 2016 года в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.223.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г.Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета, ауд. 219.

Тел./факс: (812) 316-58-72; e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Конюшков Владимир Викторович

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Строительная отрасль имеет особое значение в народном хозяйстве страны, т.к. определяет, как общий экономический прогресс, так и степень комфортности проживания населения, что обеспечивает его заинтересованность в эффективной производительной работе.

Строительство характеризуется повышенной потребностью в трудовых затратах и продолжительными сроками реализации проектов, что предопределяет сильную зависимость их результатов от своевременности завершения работ. Проблема несвоевременности окончания работ в условиях, когда проекты реализуются с целью получения максимальной прибыли, имеет повышенную значимость, т.к. фактическое отставание от графика способно привести к банкротству компании. Так в Санкт-Петербурге в августе 2013 г. насчитывалось порядка 18 объектов-долгостроев, и часть застройщиков на сегодняшний день полностью разорена, закрыта либо реорганизована. Подобные ситуации возникают вследствие того, что задержка сдачи объекта влечет за собой необходимость выплаты пеней и штрафов дольщикам, кредиторам, инвесторам. Поэтому решение данной проблемы является актуальной задачей.

Установлено, что несвоевременность строительства провоцируется несколькими рискованными событиями, которые можно объединить в одну группу «рисков несвоевременного выполнения работ». В современных условиях проявились и новые факторы риска, связанные с применяемыми для расчета трудовых затрат нормативными базами, например, с использованием в профессиональных кругах устаревших норм ЕНиР.

Снижение риска несвоевременности можно осуществить не только за счет учёта особенностей различных показателей трудовых затрат, но и путем изменения подхода к календарному планированию посредством совершенствования классических методов и применения новых. Большие перспективы в данном направлении имеет конвергенция различных методик, а также их диверсификация. Так в планировании строительных проектов популярность приобретает метод критической цепи, который в своем классическом виде не учитывает особенностей строительства, и поэтому требует адаптации.

Таким образом, существует обоснованная необходимость совершенствования процедуры календарного планирования строительных работ с учетом особенностей применяемых нормативных баз, а также адаптации метода критической цепи с целью снижения риска несвоевременности реализации проектов.

Степень разработанности темы исследования. Анализ научно-технической литературы показал, что, несмотря на достаточно широкую проработку вопросов календарного планирования, применение существующих и общепринятых методов не снимает в полном объеме проблему несвоевременности работ. Это позволило выдвинуть научную гипотезу о том, что ее решение возможно при применении метода критической цепи, зарекомендовавшего себя в сфере промышленного производства, при его адаптации к строительным работам и конвергенции с методами поточного строительства.

В основу исследования легли труды отечественных и зарубежных ученых, работающих над проблемами повышения надежности планирования строитель-

ного производства. Среди них монографии и статьи Э.М. Голдратта, Л. Лича, В.А. Афанасьева, С.А. Баркалова, С.А. Болотина, В.З. Величкина, П.А. Козина, В.И. Воропаева, П.Г. Грабового, С.М. Кузнецова, В.Я. Мищенко, С. Мубарака, У. Детмера, Г. Ле Роя, Г. Ганта, Дж. Келли, М. Уолкера, З. Хейдуцки, А.А. Солина, Верстова В.В., Бадьина Г.М., а также труды проектных и научно-исследовательских институтов.

Цель исследования – совершенствование календарного планирования путем адаптации алгоритма метода критической цепи к формированию календарных графиков строительных проектов с учетом особенностей используемых сведений о трудовых затратах рабочих-строителей и продолжительности работ.

Задачи исследования:

1. Разработать обобщенную классификацию рисков несвоевременного выполнения строительных работ в соответствии с научно-практическим анализом источников их возникновения.

2. Провести сопоставительный анализ широко используемого метода критического пути и метода критической цепи применительно к календарному планированию строительных проектов, выполняемых по методологии поточного строительства.

3. Провести анализ путей совершенствования методов календарного планирования в направлении сочетания положительных элементов современных методов.

4. Выявить скрытые (латентные) риски несвоевременности, заложенные в нормативах трудовых затрат, с указанием причин их возникновения и разработать алгоритм актуализации отфильтрованных нормативов трудовых затрат базы ЕНиР для формирования календарных графиков строительных проектов.

5. Провести оценку зарубежных нормативных баз, включающих в себя данные о трудовых затратах рабочих-строителей, с целью их сопоставления с российскими нормативными базами и возможного применения на территории РФ.

6. Разработать механизм адаптации метода критической цепи к поточной организации строительных работ; и с помощью статистических испытаний провести проверку его устойчивости к изменению состава комплексов и применяемых методов поточной организации строительства.

7. Разработать конвергированную методику календарного планирования поточного строительства, основанную на сочетании матричной модели расчета и актуальных элементов метода критической цепи.

Объектом исследования являются методы календарного планирования строительных работ.

Предмет исследования – адаптация метода критической цепи применительно к формированию календарных графиков строительства и их статистическому моделированию, а также особенности использования нормативных баз трудовых затрат при календарном планировании.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Создана оригинальная классификация рисков несвоевременного выполнения работ по основным источникам их возникновения, включающая в себя 5

типовых групп: проектные, ресурсные, организационные, операционные, климатические, что позволило конкретизировать направление, в котором следует совершенствовать существующие методы календарного планирования.

2. Обоснована возможность применения нормативов базы ЕНиР в современных условиях для целей календарного планирования.

3. Разработана методика актуализации отфильтрованных производственных нормативов трудозатрат базы ЕНиР, включающая в себя 6 этапов: идентификацию выполняемых операций, норм ЕНиР, действующих нормативов ЕНиР, частично действующих нормативов, корректировку частично действующих нормативов, замену недействующих нормативов, которая позволяет снизить влияние латентных рисков, неявно заложенных в нормативы трудозатрат, и повысить надежность календарного графика.

4. Обоснована возможность применения зарубежных нормативных баз трудозатрат рабочих-строителей для условий российской действительности и целей календарного планирования.

5. Разработаны механизм адаптации метода критической цепи к поточной организации строительных работ и конвергированная методика календарного планирования поточного строительства на основании матричной модели с внедрением элементов метода критической цепи, предусматривающая 8 этапов: анализ исходных данных, выбор подхода к оценке продолжительности работ в составе проекта, расчет продолжительности работ, выбор метода поточной организации строительства, расчет детерминированной продолжительности проекта, определение фиксированной части длительностей работ, формирование проектного буфера, расчет наиболее вероятной продолжительности проекта. Данная методика позволяет формировать расписание работ с повышенным уровнем точности.

Теоретическая значимость работы заключается в возможности дальнейшего совершенствования методологии календарного планирования строительства, что будет способствовать повышению надежности календарных планов и исключению срывов сроков реализации проектов.

Практическая значимость заключается в адаптации метода критической цепи к календарному планированию строительных работ с сохранением принципиальных преимуществ, позволяющих данному методу давать улучшенные результаты по сравнению с другими, и устранением основных недостатков классического алгоритма. Вместе с учетом особенностей используемых нормативных баз трудозатрат это позволяет повысить надежность проектного и исполнительного календарного графика и свести к минимуму проявление риска несвоевременности завершения строительства.

Основные результаты диссертационного исследования внедрены в деятельность следующих строительных и судостроительных компаний: ООО «МорНефтегазСтрой» г.Санкт-Петербург, ООО «Морские Комплексные Системы» г.Санкт-Петербург, ООО «Современные Экологические Системы» г.Северодвинск.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использованы классические и инновационные методы календарного планиро-

вания строительных проектов; математическое моделирование; статистические испытания.

Положения, выносимые на защиту:

- классификация рисков несвоевременного выполнения работ по основным источникам их возникновения;
- применение нормативов базы ЕНиР в современных условиях для целей календарного планирования;
- методика актуализации отфильтрованных производственных нормативов трудозатрат базы ЕНиР;
- применение зарубежных нормативных баз трудозатрат рабочих для условий РФ и целей календарного планирования;
- механизм адаптации метода критической цепи к поточной организации строительных работ и конвергированная методика календарного планирования поточного строительства на основании матричной модели с внедрением элементов метода критической цепи.

Область исследования соответствует п.9 «Разработка принципов организации строительства крупных народнохозяйственных объектов и комплексов; развитие поточных методов, сетевых и других моделей строительства; совершенствование методов календарного планирования» паспорта научной специальности 05.23.08 «Технология и организация строительства».

Достоверность научных результатов обеспечивается использованием в расчетах нормативных данных, а также применением обоснованных методов и методик, предложенных российскими и зарубежными учеными, занимающимися вопросами календарного планирования строительного производства. Надежность полученных данных обеспечивается проведением процедуры статистических испытаний на основании математических вычислительных моделей. Все допущения и ограничения, принятые в расчетах, основываются на действующих нормативных актах и методах, применяемых при планировании строительных работ.

Апробация результатов. Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы были представлены автором на международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов СПбГАСУ «Актуальные проблемы строительства и архитектуры» (2012-2014 гг.); международной научно-практической конференции СПбГАСУ 10-12 октября 2012 г. «Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения»; международной научной конференции СПбГАСУ 20-21 февраля 2014 г. «Петербургская школа поточной организации строительства».

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах общим объемом 9 п.л., в т.ч. лично автором – 4,9 п.л. В научных журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК РФ, опубликованы 6 статей общим объемом 1,86 п.л., в т.ч. лично автором – 0,9 п.л.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение и список литературы из 143

наименований. Работа изложена на 141 листе (шрифт Times New Roman, 14 пт) и содержит 22 таблицы, 30 рисунков и 18 формул.

Во *введении* обоснована актуальность темы, поставлены цель и задачи исследования, описаны объект, предмет и научная новизна исследования, обозначена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об их апробации, а также публикациях по теме исследования.

В *первой главе* проанализированы пути совершенствования календарного планирования. Обзор научной литературы позволил выделить 5 типовых групп причин несвоевременного выполнения работ. Кроме того, аргументирована необходимость введения дополнительной классификации рисков несвоевременного выполнения работ на случайные и систематические.

Помимо этого в главе описаны латентные (скрытые) риски, неявно заложенные в нормативах, используемых при формировании календарных планов. Они обусловлены историей и спецификой создания сборников, анонсированием устаревания норм ЕНиР, отсутствием ясного методологического подхода к формированию ГЭСН и рядом других причин, сказывающихся на точности календарных планов.

Во *второй главе* рассмотрены наиболее распространенные методы календарного планирования: метод критического пути (МКП) и альтернативный ему метод критической цепи (МКЦ), предложенный Э.М. Голдратом для области промышленного производства.

Прямое применение МКЦ к формированию календарного графика строительного проекта показало положительные результаты. Однако при его детальном анализе выяснилось, что он не может применяться в буквальном виде и требует адаптации с учетом особенностей строительных процессов.

Самым перспективным направлением для повышения надежности расчета расписаний работ является разработка новых подходов к календарному планированию путем объединения нескольких методов, поэтому адаптацию МКЦ к строительству целесообразно провести именно таким способом.

В *третьей главе* рассмотрено использование нормативных баз трудозатрат рабочих-строителей в контексте МКЦ. В основе метода лежат экспертные оценки продолжительности операций, которые традиционно применяются в зарубежном строительстве. В РФ формирование графика строительства производится на основании нормативных данных. В связи с отсутствием более проработанной базы производственных нормативов, чем ЕНиР, для повышения надежности планирования предлагается в процессе проектирования календарного графика проводить процедуру актуализации отфильтрованных норм по алгоритму, включающему в себя 6 этапов.

В процессе календарного планирования возможно использование и зарубежных нормативов трудозатрат, таких как *RATU*, *RSMeans* и др.

В *четвертой главе* проработан вопрос снижения риска несвоевременного строительства на основе адаптации МКЦ к поточной организации работ.

Экспертные оценки продолжительности, применяемые в МКЦ, Э.М. Голдратт ассоциирует с пессимистическими. Поэтому он предлагает уменьшать экспертно планируемую продолжительность в 2 раза, а для демпфирования не-

своевременности выполнения работ в календарный план вводить защитные буферы. В главе формируется адаптированная модель расчета расписания работ, включающая в себя матричную модель с внедрением в нее элементов МКЦ и проводится статистический эксперимент с применением программы *MS Excel*.

Практической основой эксперимента стали данные о продолжительности строительства объектов из СНиП 1.04.03-85*. В результате сделан вывод о том, что применение конвергированной методики для расчета расписаний работ, организованных в строительные потоки, позволяет прогнозировать своевременное выполнение проектов с большей вероятностью. Эксперимент проведен и с другими возможными вариантами жилых комплексов, чем подтверждена устойчивость адаптированной модели реализации МКЦ применительно к разным составам комплексов объектов и методам поточной организации строительства.

Когда имеется статистическая база сроков реализации проектов, можно обращаться и к ней. В диссертационном исследовании предложена форма генератора случайных продолжительностей для такого варианта, а также для варианта использования данных из нормативных баз трудозатрат, которые обладают высокой энтропией и описываются равномерным распределением.

Основным результатом исследования является конвергированная методика формирования календарного плана поточного строительства, включающая в себя 8 этапов.

В заключении сформулированы выводы по результатам проведенного диссертационного исследования.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создана оригинальная классификация рисков несвоевременного выполнения работ по основным источникам их возникновения, включающая в себя 5 типовых групп: проектные, ресурсные, организационные, операционные, климатические, что позволило конкретизировать направление, в котором следует совершенствовать существующие методы календарного планирования.

В рамках обоснования необходимости совершенствования методов календарного планирования проведен анализ рисков несвоевременного выполнения работ, на основании чего установлено, что источник возникновения риска является наиболее подходящим классификационным критерием. В итоге сформирована обобщенная классификационная схема, включающая 5 групп рисков: проектные, ресурсные, организационные, операционные и климатические.

К проектной группе рисков несвоевременного выполнения работ относятся те предпосылки, которые закладываются еще на стадии планирования и проектирования.

Ресурсная группа рисков включает в себя все проблемы, возникающие с поставками и использованием основных и расходных материалов, изделий, машин, инструментов, оборудования, а также с обеспечением участков людьми.

Организационные риски подразумевают потери из-за некомпетентного управления строительной площадкой и из-за неэффективной организации работ

на ней, а также из-за задержек в подготовке и передаче фронтов, в информировании бригад и т.п.

В группу операционных рисков входят проблемы, возникающие из-за некачественного выполнения работ и соответствующих переделок, выполнения лишних и непредвиденных работ, выполнения работ с использованием неэффективных методов.

Климатические риски связаны с воздействием погоды на ход работ.

Кроме того, установлена необходимость введения дополнительной классификации, включающей случайные и систематические риски.

Случайным риском несвоевременности работ можно назвать такое событие, наступление которого является труднопредсказуемым от проекта к проекту. К нему относится большинство причин, входящих в 5 ранее выделенных групп.

Систематическим риском несвоевременности работ является ожидаемое событие, поддающееся предсказанию и позволяющее заблаговременно скорректировать календарные планы производства строительных работ с учетом новых обстоятельств. Одним из таких рисков является несоответствие между планируемой и фактически используемой при производстве работ нормативной базой. Зная степень отличия между ними, можно привести сроки выполнения работ по проектной документации в соответствие с фактическими условиями.

2. Обоснована возможность применения нормативов базы ЕНиР в современных условиях для целей календарного планирования.

История развития производственных и сметных строительных нормативов в России насчитывает уже 200 лет. Поскольку многочисленные документы, созданные за этот период, имели преемственный характер, то в существующей нормативной базе латентно могут воспроизводиться и ранние ошибки. В начале 90-х годов ЕНиР утратили силу общеобязательных нормативных документов и перестали совершенствоваться. В качестве альтернативы предложена сметно-нормативная база 2001 г., включающая сборники ГЭСН. С одной стороны, это объективная необходимость, вызванная развитием строительной техники и технологий. С другой – к формированию СНБ-2001 имеется много вопросов, а ЕНиРы остаются единственной базой производственных нормативов, проработанных с высокой степенью тщательности и сформированных по регламентированной методологии.

Исследование показало, что нормы ГЭСН выше аналогичных норм ЕНиР. Максимальное значение превышения в малой выборке составило 172%. Если считать ГЭСН более актуальными, выявляется несоответствие. Таким образом, для целей календарного планирования база ЕНиР является более подходящей.

Нормы ЕНиР можно разделить на 3 категории: полностью неприменимые (нормы, в которых задействованы машины и механизмы, в связи с появлением строительной техники с более высокими показателями производительности); частично применимые (нормы, из которых можно выделить отдельные операции, используемые в современном строительном производстве в составе технологически новых работ); полностью применимые (нормы на операции, которые технологически не изменились и используются в современном строительстве).

В рамках исследования была проведена проверка базы ЕНиР на предмет выявления актуальных и неактуальных норм. Для этих целей в случайном порядке отобраны 3 сборника: Е3 «Каменные работы»; Е7 «Кровельные работы»; Е20 «Ремонтно-строительные работы» Выпуск 2 «Автомобильные дороги и искусственные сооружения».

В качестве исследуемых показателей приняты:

- общее количество норм трудозатрат и времени работы машин;
- количество актуальных норм (упрощенный критерий актуальности – использование ручного труда без применения машин или механизмов);
- количество неактуальных норм.

Результаты исследования отражены в таблице 1.

Актуальных норм в выборке из трех ЕНиРов больше, чем неактуальных, на 8%. При этом для каждого отдельного сборника это соотношение индивидуально и зависит в большей степени от специфики описываемых работ.

Гипотезу о степени актуальности сборника можно вывести на основании его названия, где находятся первичные сведения о содержащихся в нем нормативах. Так в сборнике Е1 «Внутрипостроечные транспортные работы» неактуальных норм будет больше по причине прямого указания в названии на механический характер работ. А в сборнике Е8 «Отделочные покрытия строительных конструкций», напротив, подавляющее количество нормативов является актуальным, т.к. отделочные работы предполагают использование ручного труда.

Таблица 1 – Результаты исследования по выявлению актуальных и неактуальных нормативов ЕНиР

Наименование	Кол-во, шт.	Отношение к общему кол-ву нормативов
Исследуемые нормативы, из них:	1 057	-
Е3 Каменные работы	342	-
Е7 Кровельные работы	119	-
Е20 Ремонтно-строительные работы Выпуск 2 Автомобильные дороги и искусственные сооружения	596	-
Актуальные нормативы, из них:	572	54%
Е3 Каменные работы	288	84%
Е7 Кровельные работы	91	76%
Е20 Ремонтно-строительные работы Выпуск 2 Автомобильные дороги и искусственные сооружения	193	32%
Неактуальные нормативы, из них:	485	46%
Е3 Каменные работы	54	16%
Е7 Кровельные работы	28	24%
Е20 Ремонтно-строительные работы Выпуск 2 Автомобильные дороги и искусственные сооружения	403	68%

Таким образом, использование нормативов ЕНиР в современных условиях для целей календарного планирования обосновано.

3. Разработана методика актуализации отфильтрованных производственных нормативов трудозатрат базы ЕНиР, включающая в себя 6 этапов: идентификацию выполняемых операций, норм ЕНиР, действующих нормативов ЕНиР, частично действующих нормативов, корректировку частично действующих нормативов, замену недействующих нормативов, которая позволяет снизить влияние латентных рисков, неявно заложенных в нормативы трудозатрат, и повысить надежность календарного графика.

Схема алгоритма приведена на рисунке 1.

Этап 1. Идентификация выполняемых операций.

Заинтересованный субъект определяет перечень операций, подлежащих нормированию, а также условия, в которых они будут выполняться.

Этап 2. Идентификация норм ЕНиР.

Из сборников ЕНиР выбираются те нормы, которые в максимальной степени соответствуют операциям, определенным на этапе 1, с учетом всех поправочных коэффициентов, продекларированных в Общей части, Технической части сборника, выпуска, раздела, параграфа, примечаниях к параграфу.

Этап 3. Идентификация действующих норм.

Из числа норм, определенных на этапе 2, выделяются полностью применимые. Критериями применимости являются:

1. выполнение операций вручную, без задействования строительных машин и средств малой механизации, что определяется путем изучения состава работ, состава звена;

2. выполнение операций с использованием материалов, аналогичных по своим качественным характеристикам материалам, определенным в норме;

3. выполнение операций с использованием строительных машин и средств малой механизации, аналогичных по своим характеристикам машинам в норме.

Условия 1-2 и 2-3 реализуются одновременно. Условия 1-3 не зависимы.

Этап 4. Идентификация частично действующих норм.

Из числа норм, определенных на этапе 2, выделяются частично применимые. Критерием отбора является одновременное выполнение трех условий:

1. использование механизма, сильно превышающего по своим техническим параметрам параметры механизма, описываемого в норме ЕНиР;

2. норма включает в себя операции, выполняемые и вручную, и с помощью механизма;

3. выполнение операций с использованием материалов, аналогичных по своим качественным характеристикам материалам, определенным в норме (аналогично п.2 этапа 3).

Этап 5. Корректировка частично действующих норм.

Частично применимые нормы подлежат корректировке. При этом трудозатраты рабочих можно считать актуальными и брать в расчет.

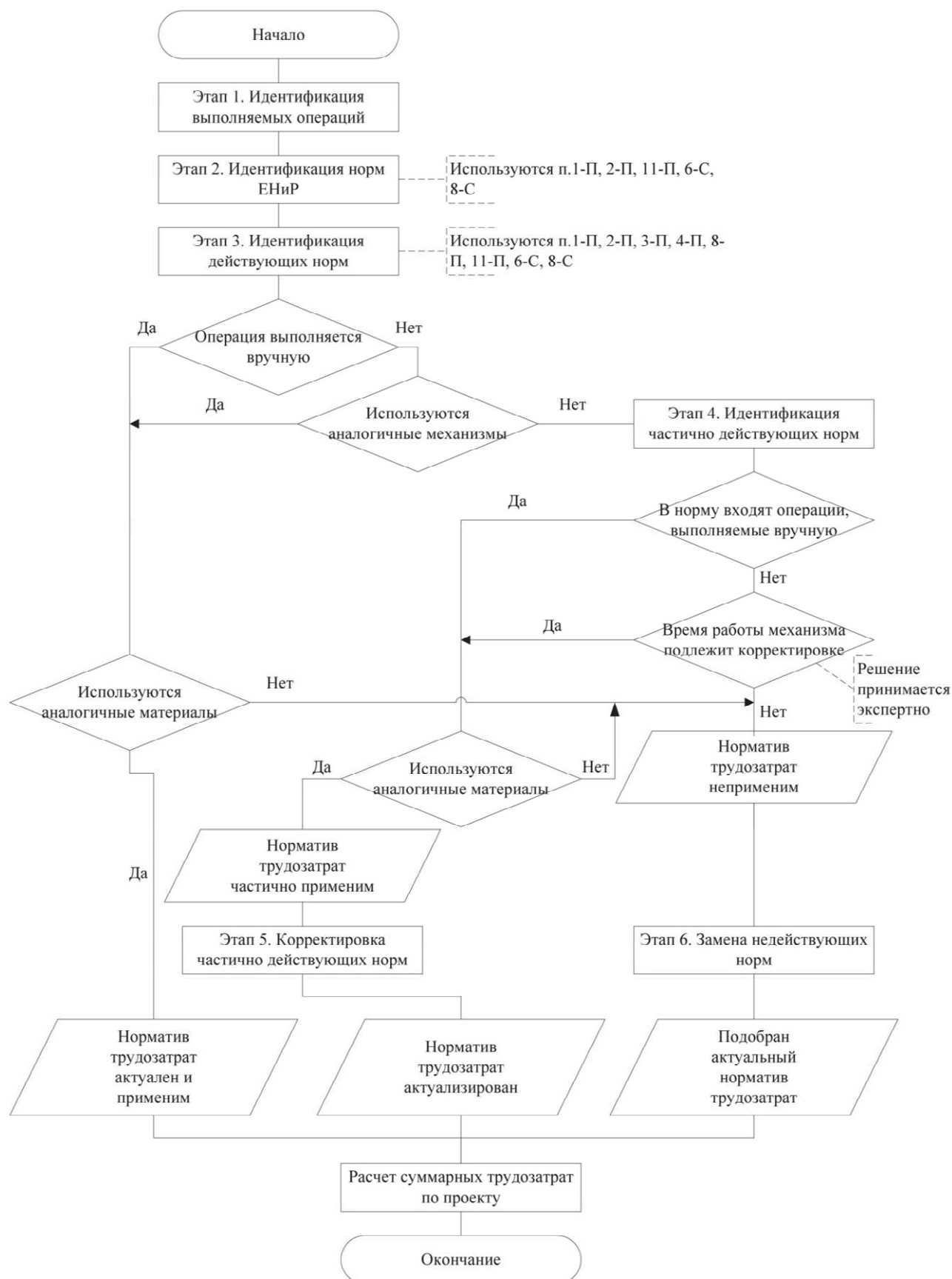


Рисунок 1 – Схема алгоритма актуализации нормативной базы ЕНиР

Ко времени работы ведущего механизма и машиниста необходимо применить поправочный коэффициент, рассчитываемый по формуле (1):

$$K = \sum_{ij=1}^n \frac{a_i}{b_j} \cdot \varphi, \quad (1)$$

где K – искомый поправочный коэффициент;

a_i – определяющая характеристика реально применяемой машины/механизма;

b_j – определяющая характеристика машины, описанной в норме ЕНиР;

φ – весовой коэффициент, задаваемый экспертно.

Этап 6. Замена недействующих норм.

Нормы, оставшиеся после проведения исследования по этапу 3, этапу 4 и этапу 5, следует признавать недействующими. Основными признаками устаревания нормы являются:

1. использование материалов, которые по своим свойствам и технологии применения сильно отличаются от описанных;

2. использование механизмов, время работы которых невозможно скорректировать.

Нормы, признанные недействующими, следует заменить нормой из другого справочника производственных нормативов либо, в случае отсутствия таковой, провести нормативное исследование рабочего процесса в соответствии с установленными методами технического нормирования.

4. Обоснована возможность применения зарубежных нормативных баз трудозатрат рабочих-строителей для условий российской действительности и целей календарного планирования.

Зарубежные нормативные базы отличаются большим разнообразием. В рамках исследования рассмотрены справочники *RSMMeans* (США) и *RATU* (Финляндия) и проведено их сопоставление с нормами ЕНиР.

Из основных особенностей необходимо отметить различия в статусе организаций, выпускающих сборники: в России этим занимаются государственные структуры, в Финляндии – строительное сообщество, а в США – коммерческие компании. Существенные различия наблюдаются и в подходе к обновлению данных: в России нормы ЕНиР не обновляются с 1987 года, в Финляндии ведется постоянное дополнение и совершенствование технологических карт *RATU*, а в США актуализированные сборники выпускаются 1 раз в год.

Сравнение показателей из баз ЕНиР, *RATU*, *RSMMeans* по ряду работ единой тенденции не выявило. Проведенный статистический анализ данных явной корреляции также не показал. При этом зафиксировано как превышение трудозатрат по российским нормам над трудозатратами по иностранным, что можно объяснить действием технического прогресса; так и уменьшение, что аргументируется достаточным запасом напряженности, заложенным в нормы ЕНиР. Соотношение таких тенденций в малой выборке составило 50/50, при этом финские нормативы *RATU* в целом более напряженные, чем ЕНиР, а американские *RSMMeans* – менее напряженные.

Принимая во внимание влияние технического прогресса, использование финской базы *RATU* на территории РФ более обоснованно, чем *RSMMeans*, поэтому нормативы ЕНиР, которые признаны непригодными для использования, при расчете трудоемкости для целей календарного планирования вполне могут быть заменены на нормативы *RATU*.

5. Разработаны механизм адаптации метода критической цепи к поточной организации строительных работ и конвергированная методика календарного планирования поточного строительства на основании матричной модели с внедрением элементов метода критической цепи, предусматривающая 8 этапов: анализ исходных данных, выбор подхода к оценке продолжительности работ в составе проекта, расчет продолжительности работ, выбор метода поточной организации строительства, расчет детерминированной продолжительности проекта, определение фиксированной части длительностей работ, формирование проектного буфера, расчет наиболее вероятной продолжительности проекта. Данная методика позволяет формировать расписание работ с повышенным уровнем точности.

Риски несвоевременного выполнения работ, классифицированные выше, заставляют специалистов создавать и развивать методики календарного планирования, как детерминированного, так и стохастического, с целью минимизации вероятности задержки сроков строительства.

Наибольшей популярностью в строительной отрасли пользуется МКП. Альтернативой МКП является МКЦ.

Основное отличие МКП от МКЦ состоит в том, что в критическом пути неопределенность учтена внутри каждой задачи, а в критической цепи – вынесена отдельно в конец проекта в виде защитного буфера.

Прямое применение МКЦ к формированию графика строительства коттеджа позволило получить продолжительность проекта на 16% меньше, чем по МКП. Однако при рассмотрении полученного расписания с точки зрения технологии обнаружился ряд неприемлемых фактов. В строительстве самым распространенным способом сокращения продолжительности работ при условии нормальной выработки бригады является увеличение ее численного состава. Но такой шаг никак не скажется на длительности процессов, привязанных к технологическому поведению материалов. Например, время набора прочности бетона нельзя принудительно сократить вдвое, т.к. это приведет к недопустимому снижению качества конструкции, поэтому МКЦ не может применяться в классическом виде.

С целью развития МКЦ для применения в строительстве предложено внедрение его элементов в матричную модель расчета расписаний работ. Основной частью классического МКЦ, которая подлежит пересмотру, является использование проектного буфера. Его трактовка при этом изменяется и определяется временем, необходимым для завершения работ, невыполненных при переходе потока на следующий этап.

Для построения модели требуется определение вида функции плотности вероятности выполнения задач в установленный срок. Обоснованием вида кривой распределения случайной продолжительности работы является следующая

закономерность: вероятность большего отклонения от плановой продолжительности ниже вероятности меньшего отклонения от той же плановой продолжительности. Как следствие: кривая, отражающая распределение плотности вероятности случайной продолжительности, – монотонно убывающая функция. С учетом того, что чем больше отставание проекта от графика, тем больше усилий необходимо прикладывать для его устранения, данный процесс будет описываться дифференциальным уравнением:

$$\frac{df(t)}{dt} = \alpha \cdot f(t), \quad (2)$$

где α – коэффициент пропорциональности.

Интегрирование уравнения (2) и нормировка параметров дает экспоненциальную функцию распределения плотности вероятности:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma} \exp \frac{-(t-a)}{\sigma}, \quad (3)$$

где σ – стандартное отклонение от средней продолжительности (по Голдратту – это половина средней величины, т.е. $\sigma = m/2$; m в данном контексте – среднее значение продолжительности работы);

a – минимальная продолжительность, которая при традиционным детерминированном планировании определяется как плановая продолжительность.

В практических целях условный размах продолжительностей ограничим диапазоном 4σ . Тогда вероятность нахождения продолжительности работы в диапазоне от $m-\sigma$ до $m+3\sigma$ будет более 98% (рисунок 2).

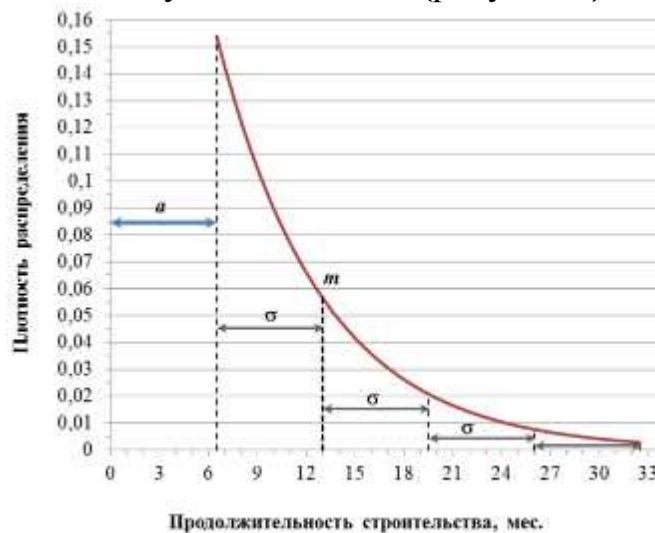


Рисунок 2 – Плотность вероятности экспоненциального распределения продолжительности строительства

Формула генератора экспоненциального распределения случайных продолжительностей для реализации эксперимента в *MS Excel* примет вид:

$$t = 0,5m[1 - \ln(Rnd)], \quad (4)$$

Для адекватной работы конвергированной матричной модели требуется введение ограничения на минимально допустимый процент выполнения предшествующих работ. Это связано с тем, что технологически, если за отведенное время (уже сокращенное вдвое) выполнено, например, только 15% фундаментных работ, начало работ по возведению каркаса здания невозможно.

Уточнению подлежит и организация проектного буфера. Учитывая, что для завершения каждый невыполненный вид работ требует специализированных ресурсов, целесообразно принять параллельное выполнение всех работ в процессе доведения их до 100% готовности. При этом общую продолжительность буфера будет определять работа с наибольшей оставшейся длительностью.

Проверка матричной модели, конвергированной с МКЦ, произведена на основании данных нормативной статистики из СНиП 1.04.03-85*.

В рамках проведения вычислительного эксперимента рассмотрено строительство комплексов из 4-5 зданий. Пример отражен в таблице 2 с переводом продолжительностей работ в календарные недели. Общая детерминированная длительность проекта составляет 160 недель. Пример реализации конвергированной модели представлен на рисунке 3.

	Фундамент			Коробка			Отделка			Проектный буфер				
1	0	2	3	3	18	50,4	50,4	4	54,4	Всего	Вып. объем	Ост. нед.	Факт нед.	
		0,46	0,7		0,30	0,8		0,24						
2	3	6	20	50,4	14	74,6	74,6	6	80,6					
		0,25	0,7		0,46	0,8		0,50						
3	20	6	26	74,6	18	95,2	95,2	6	101,2	Фундамент	Коробка	Отделка		
		0,93	0,93		0,70	0,8		0,58						
4	26	6	35,4	95,2	22	128,6	128,6	6	135					
		0,45	0,7		0,53	0,8		0,95						
			0,7				0,8							
Минимум выполнения фундаментных работ				Минимум выполнения работ по возведению этажей зданий										
Конец проекта как случайная величина (135 + 29) нед.														
										40	77%	9,2	11	
										144	80%	28,8	29	
										44	60%	17,7	16	
										164				

Рисунок 3 – Вариант реализации модели с учетом экспертных оценок продолжительности

В серых ячейках указана доля объема работ, выполненная за случайное время, закон распределения которого задается с учетом формулы (3).

В середине верхней строки каждой ячейки отражена половинная детерминированная продолжительность работы. Левое значение в верхней строке каждой ячейки характеризует момент начала выполнения задачи, а правое – момент завершения определенного объема работ для перехода на следующий этап строительства, но не ниже минимального.

Таблица 2 – Исходные данные для формирования расписания работ

№ зд.	Тип	Этажи	Площадь, кв.м	Фундамент, нед.	Коробка, нед.	Отделка, нед.
1	Монолитное	12	12000	4	36	8
2	Монолитное	16	12000	12	28	12
3	Монолитное	16	18000	12	36	12
4	Монолитное	20	16000	12	44	12

Таким образом, один из вариантов расчета расписания реализации проекта по конвергированному методу с использованием экспертных оценок дает продолжительность, равную 164 неделям. Общая вероятность завершения строительства к нормативному сроку 160 недель составляет 63%. Проверка модели на других составах комплекса по методам НИР, НОФ, МКР с учетом их конвергенции с МКЦ показала ее достаточную устойчивость. Разброс значений вероятностей завершения строительства к заданному сроку, полученных в результате статистического эксперимента, проведенного с помощью встроенного генератора случайных чисел программы MS Excel, не превышает 4% (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты вычислений вероятности окончания проекта в нормативный срок

Комбинация зданий	Суммарн. площадь комплекса, кв.м	Нормативн. срок, нед.	Вероятность завершения работ в нормативный срок, %		
			НИР	НОФ	МКР
М-12; М-16; М-16; М-20	58 000	160	63	62	63
М-12; М-16; М-16; М-20; М-25	76 000	212	60	61	61
М-16; М-12; М-20; М-16; М-5	59 500	172	59	59	60
К-5; К-9; К-10; К-12; К-14	51 000	158	62	62	61
К-12; К-5; К-9; К-14; К-10	51 000	162	62	63	63
П-5; П-9; П-10; П-16; П-10	47 500	86	61	61	60
П-16; П-5; П-10; П-10; П-9	47 500	88	62	61	63
М-10; П-9; М-9; К-9; К-14	61 000	162	63	62	63
М-14; М-12; М-25; К-14; К-12	58 000	88	61	60	61
Минимальное значение вероятности, %			59	59	60
Максимальное значение вероятности, %			63	63	63
Размах значений вероятности, %			4	4	3

Использование экспертных оценок продолжительности является традиционным приемом в зарубежном строительстве. Однако это не единственный подход. Когда имеется статистическая база сроков реализации проектов, целесообразно обращаться к ней. Пример таких данных и результаты их обработки представлены в таблице 4.

В итоге получена следующая эмпирическая функция распределения плотности вероятности:

$$f(x) = 62,5 \cdot \exp\left(\frac{-x}{50,5}\right), \quad (5)$$

где x – величина запаздывания, равная $(t/a-1)$, при этом t – ожидаемый срок реализации проекта; a – нормативный (оптимистический) срок.

Таблица 4 – Статистическая обработка данных по запаздываниям работ

1. Диапазон	0-20%	21-50%	51-100%	101-200%	Суммы
2. Центр диапазона	10%	35%	75%	150%	
3. Частость	52,0%	27,0%	18,0%	3,0%	100%
4. Среднее запаздывание	32,65%				
5. Стандартное отклонение	31,69%				
6. по СКО	62,7%	28,5%	8,1%	0,8%	100%
7. $ \Delta $ по СКО	10,7%	1,5%	9,9%	2,2%	max 10,7%
8. по Регрессии	51,3%	31,3%	14,2%	3,2%	100%
9. $ \Delta $ по регрессии	0,7%	4,3%	3,8%	0,2%	max 4,3%

При использовании статистически обоснованной формулы запаздывания генератор случайных продолжительностей будет иметь вид:

$$t = 0,505 \cdot a \cdot [1,51 - \ln(Rnd)], \quad (6)$$

В конвергированной модели, построенной на основании данной формулы, рассмотрен тот же состав комплекса зданий, что и в экспертном варианте (рисунки 4). При этом прием в качестве оптимистической продолжительности нормативно установленное значение 160 недель.

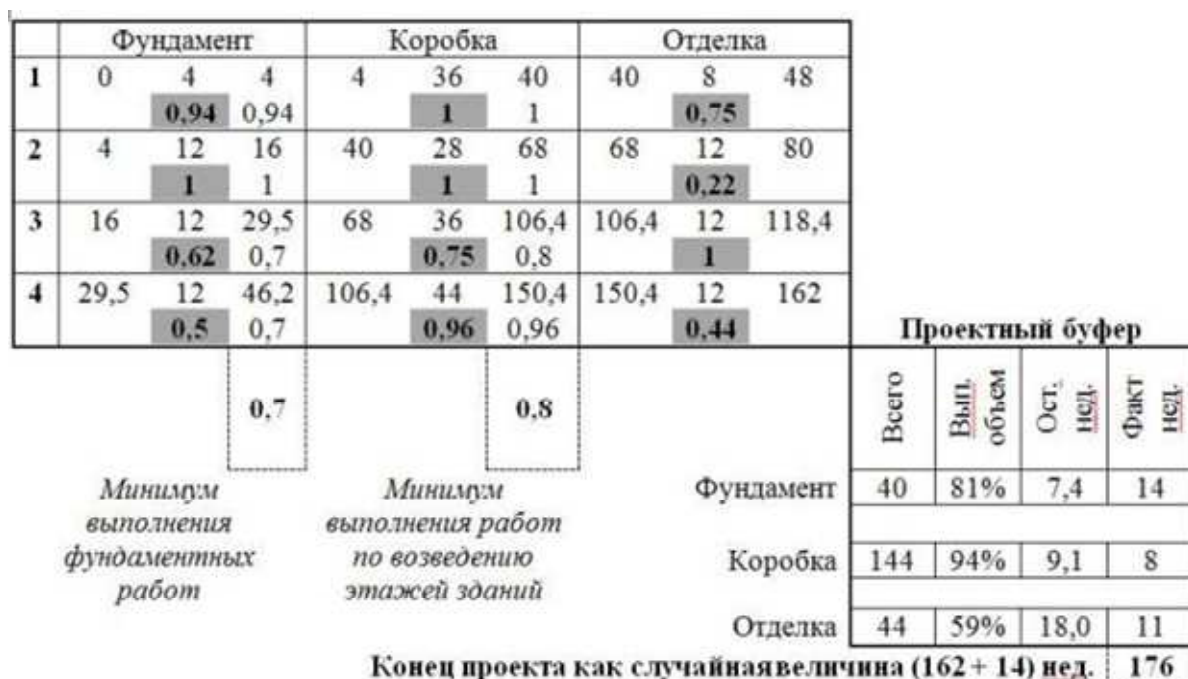


Рисунок 4 – Вариант реализации модели с учетом статистических оценок

В данном варианте модели среднее число верхней строки каждой ячейки – нормативно установленная продолжительность работы на указанном фронте. Остальные значения аналогичны ранее описанным.

При таком подходе вероятность завершения проекта с 20% запаздыванием по сравнению с нормативным, т.е. за 190 недель, будет составлять 44%, а в срок до 240 недель (50% запаздывание) уже 92%.

Однако не все статистические данные коррелируют с экспоненциальным распределением. В таких случаях рекомендуется применять равномерное распределение, которое в определенной степени является пределом экспоненциального распределения, при условии стремления показателя степени к нулю. Аналогичный подход применим и в случае использования данных из нормативных справочников.

Формула генератора случайной продолжительности для нормативных данных:

$$t = a + (b - a) \cdot Rnd, \quad (7)$$

где a – минимальная продолжительность работы, определенная по нормативному справочнику (например, ЕНиР);

b – максимальная продолжительность работы, определенная по альтернативному справочнику (например, ГЭСН) либо экспертным путем.

Разработанная конвергированная методика календарного планирования поточного строительства, основанная на сочетании матричной модели расчета и актуальных элементов метода критической цепи, предусматривает использование как экспертных оценок продолжительностей работ, так и более точных статистических данных, а также информации о трудозатратах из нормативных баз. Она состоит из следующих алгоритмических этапов.

Этап 1. Анализ исходных данных

Проводится анализ исходных данных по проекту, включая проектную документацию, техническое задание, условия и этап реализации проекта, нормативную базу, а также назначение разрабатываемого графика.

Этап 2. Выбор подхода к оценке продолжительности проекта

Осуществляется выбор подхода к оценке продолжительности проекта. Если в соответствии с заданными целями календарного планирования, необходимо разработать график, учитывающий максимальные риски, а также при отсутствии нормативных или статистических баз, применяются экспертные оценки продолжительности после их обработки в соответствии с установленными методиками. Если в распоряжении имеются статистические данные по запаздываниям сроков проектов, планирование осуществляется с их использованием. В остальных случаях формирование графиков производится на основании информации о трудозатратах из нормативных и сметных справочников.

Этап 3. Расчет продолжительности работ

В зависимости от выбранного подхода к формированию графика производится либо сбор экспертных оценок продолжительности, их аналитическая обработка в соответствии с установленными методиками, либо определение статистических оценок, либо расчет трудозатрат по нормативной базе.

Расчет общих трудозатрат ведется на основании любой имеющейся в распоряжении базы, т.к. исследование показало отсутствие действительной разницы между ними. При этом рекомендуется отдавать предпочтение базам производственных нормативов, аналогичных российским ЕНиР или финским *RATU*.

Если в качестве нормативной базы приняты ЕНиР, то расчет необходимо производить с учетом алгоритма актуализации.

Расчет продолжительностей осуществляется на основании данных о проектных трудозатратах и имеющихся трудовых ресурсах.

Этап 4. Выбор метода поточной организации строительства и **Этап 5.** Расчет детерминированной продолжительности проекта

На данном этапе производится определение детерминированной продолжительности проекта по матричной модели. Осуществляется расчет по методам НИР, НОФ и МКР. Далее выполняется вычисление дифференциальных критериев эффективности и интегрального критерия, на основании которого делаются выводы о наиболее целесообразном методе поточной организации строительства применительно к конкретному проекту.

Этап 6. Определение фиксированной части длительностей работ.

В зависимости от выбранного типа оценок продолжительности работ (экспертный, статистический, нормативный) определяется фиксированная длительность проекта по формуле расчета случайно выполненного объема с учетом заданных технологических ограничений на совмещение видов работ:

- экспертные оценки	$v=1/[1-\ln(Rnd)]$
- статистические оценки	$v=1/[0,505*(1,51-\ln(Rnd))]$
- нормативные оценки	$v=a/[a+(b-a)*Rnd]$

Этап 7. Формирование проектного буфера

По формуле (8) производится расчет среднего процента выполнения каждого вида работ в потоке за фиксированное время.

$$V\%_i = \frac{\sum_j t_{ij} v\%_{ij}}{\sum_j t_{ij}}, \quad (8)$$

где $V\%_i$ – процент выполненной i -й работы;

$v\%_{ij}$ – процент выполненной i -й работы на j -ом здании;

t_{ij} – плановая продолжительность i -й работы на j -ом здании.

Срок, необходимый для 100%-ного завершения вида работы в проекте, вычисляется пропорционально в соответствии с ранее определенным средним процентом выполнения.

Этап 8. Расчет наиболее вероятной продолжительности проекта.

Путем проведения статистических испытаний модели календарного плана определяется наиболее вероятная продолжительность проекта.

Схема алгоритма приведена на рисунке 5.

Разработанная методика позволила системно усовершенствовать метод критической цепи применительно к поточной организации строительства в программах управления проектами.

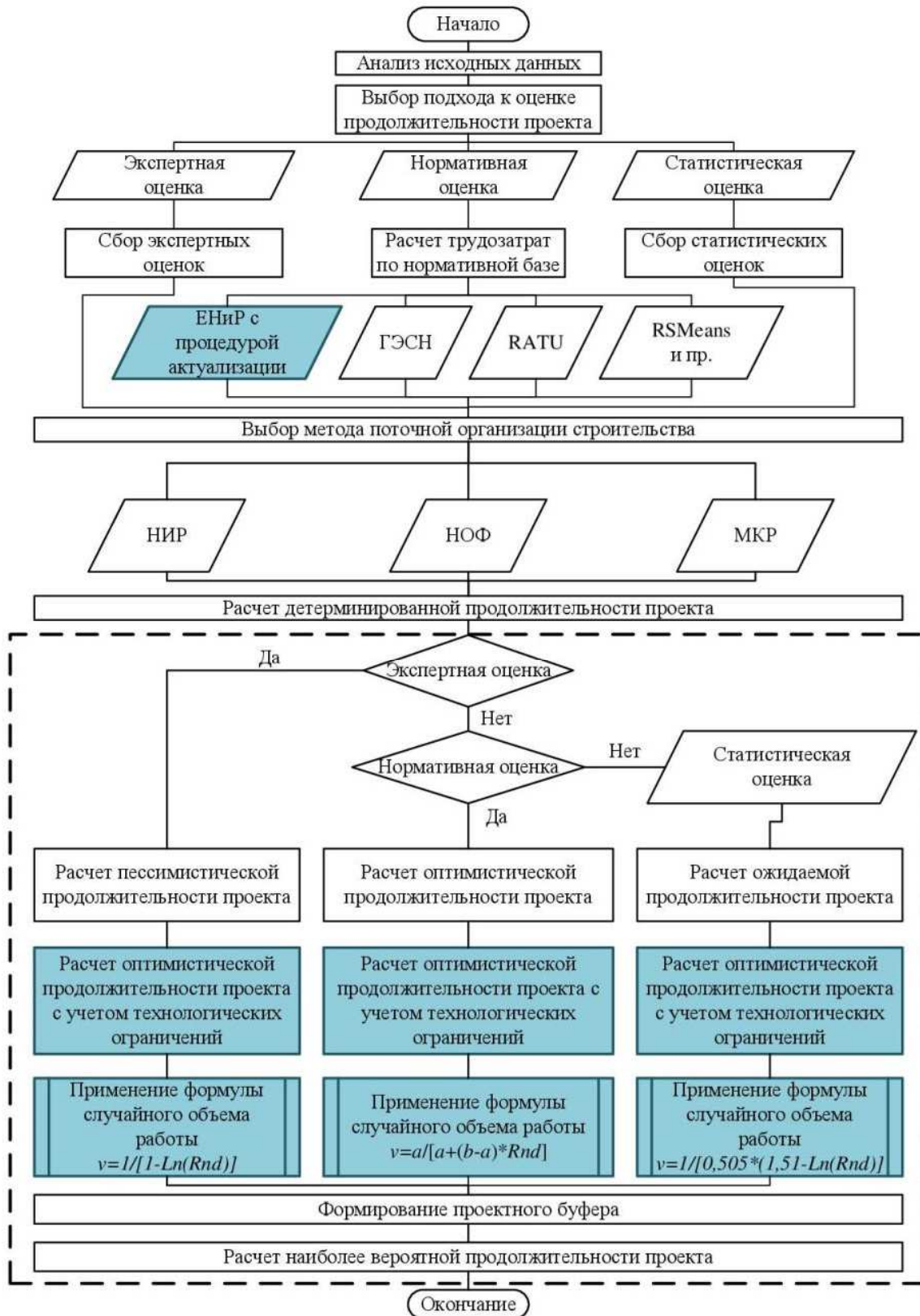


Рисунок 5 – Схема алгоритма конвергированной методики

III ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенного диссертационного исследования:

1. Разработана классификация рисков несвоевременного выполнения работ на основании источников их возникновения, включающая 5 групп: проектные, ресурсные, организационные, операционные, климатические.
2. Проведен сопоставительный анализ МКП и альтернативного ему МКЦ, хорошо зарекомендовавшего себя в области промышленного производства, но имеющего ограничения по применению в сфере строительства, т.к. он не учитывает особенностей технологических процессов, что делает невозможным его прямое применение к планированию строительных проектов.
3. Проведен анализ путей совершенствования методов календарного планирования, показавший, что наиболее перспективным является направление, связанное с конвергенцией и комбинированием различных методов и методик.
4. Выявлены латентные риски несвоевременности, скрытые в нормативах трудозатрат, применяемых в РФ, обусловленные спецификой их возникновения и развития, а также методической основой формирования; риск несвоевременности может быть снижен за счет проведения процедуры актуализации отфильтрованных показателей трудозатрат базы ЕНиР по предложенному алгоритму.
5. Проведена оценка применения зарубежных нормативных баз в качестве альтернативы российским. Единой тенденции по их соотношению с ЕНиРами не выявлено. Для применения в календарном планировании более пригодны финские нормативы *RATU*.
6. Разработан механизм адаптации метода критической цепи к поточной организации строительных работ, показавший по итогам проведения статистических испытаний эффективность и устойчивость к изменению состава строительных комплексов и методов поточной организации работ.
7. Разработана конвергированная методика календарного планирования поточного строительства, основанная на матричной модели с внедрением элементов МКЦ, которая позволяет прогнозировать своевременное выполнение проектов с большей вероятностью.

IV ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Болотин, С.А., **Котовская, М.А.** Анализ европейской и российской нормативных баз трудовых затрат применительно к календарному планированию строительства [Текст] / С.А. Болотин, М.А. Котовская // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – №2 (37). – С.98-103. (0,4 п.л./0,2 п.л.)
2. Болотин, С.А., Дадар, А.Х., **Котовская, М.А.** Модель пространственно-временной аналогии в оптимизации последовательности реконструируемых объектов [Текст] / С.А. Болотин, А.Х. Дадар, М.А. Котовская // Инженерно-строительный журнал. – 2013. - №7 (42). – С.51-57. (0,4 п.л./0,1 п.л.)
3. **Котовская, М. А.** Особенности теории ограничений систем Голдратта и метода критической цепи в области календарного планирования строительных проектов / М. А. Котовская. // Современные проблемы науки и образования :

научный журнал. – 2014. – № 4. – С.234-235 ; То же [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/118-14374>. (0,1 п.л.)

4. Болотин, С.А., **Котовская, М.А.** Адаптация метода критической цепи при поточной организации работ [Текст] / С.А. Болотин, М.А. Котовская // Недвижимость: экономика, управление. – 2015. - №3-4. – С.38-43. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

5. **Котовская, М. А.** Устойчивость модели адаптированного метода критической цепи к изменению состава комплекса объектов строительства [Электронный ресурс] / М.А. Котовская // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – №1. – С.290 ; То же [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.science-education.ru/121-18859. (0,1 п.л.)

6. Болотин, С.А., **Котовская, М.А.** Формирование конвергированной методики расчета расписаний работ при использовании матричной модели с элементами метода критической цепи [Текст] / С.А. Болотин, М.А. Котовская // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №4 (51). – С.79-86. (0,5 п.л./0,3 п.л.)

Статьи в других изданиях:

7. Sergey Bolotin, **Marina Kotovskaya**, Ivan Ptuhin, Irina Ptuhina, Ilya Chahkiyev, Jasmina Ćetković. Quasi float time revealing when evaluating construction schedules based on discounting // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – №725-726. – Pp.1019-1024. (0,4 п.л./0,1 п.л.)

8. **Котовская, М.А.** Оценка применимости норм ЕНиР к расчету трудозатрат при проектировании календарного плана [Текст] / М.А. Котовская // Актуальные проблемы строительства и архитектуры: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. – В 2 ч. Ч. II. – СПб, 2012. – С.197-200. (0,3 п.л.)

9. **Котовская, М.А.** Оценка применимости норм ЕНиР к расчету проектных трудозатрат при определении продолжительности строительства [Текст] / М.А. Котовская // Актуальные проблемы современного строительства и пути их эффективного решения: материалы международной научно-практической конференции 10-12 октября 2012 г. / под общей редакцией А.Н. Егорова, А.Г. Черных / СПбГАСУ. – В 2 ч. Ч. II. – СПб, 2012. – С.153-156. (0,3 п.л.)

10. **Котовская, М.А.** Российский и зарубежный опыт расчета трудозатрат при проектировании календарного плана [Текст] / М.А. Котовская // Актуальные проблемы строительства: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов / СПбГАСУ. – СПб, 2013. – С.92-94. (0,2 п.л.)

11. **Котовская, М.А.** Анализ латентных рисков применения производственных и сметных нормативов трудозатрат при проектировании календарного плана строительства [Текст] / М.А. Котовская // Петербургская школа поточной организации строительства: материалы международной научной конференции 20-21 февраля 2014 г. / под общей редакцией Е.Б. Смирнова / СПбГАСУ. – СПб, 2014. – С.44-47. (0,3 п.л.)

12. Птухина, И.С., Болотин, С.А., **Котовская, М.А.** Распределение ответственности между контрагентами строительства [Текст] / И.С. Птухина, С.А. Болотин, М.А. Котовская. – Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 95 с. (6 п.л./2 п.л.)