

Луцык Екатерина Валерьевна
Кандидат технических наук, доцент
Уфимский государственный нефтяной университет

Ситдиков Айнура Русланович, студент
Уфимский государственный нефтяной университет

ОПТИМИЗАЦИЯ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА СPM-PERT-МОНТЕ-КАРЛО НА ПРИМЕРЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПАО «УФАОРГСИНТЕЗ»

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения комбинированного подхода к управлению сроками строительного-монтажных работ, основанного на интеграции методов СPM, PERT и Монте-Карло. Проведён сравнительный анализ традиционных и комбинированных методов календарного планирования с учётом региональных условий и факторов риска.

Ключевые слова: Календарное планирование, метод критического пути, имитационное моделирование Монте-Карло, управление сроками строительства, метод сетевого планирования, оценка рисков в строительстве.

Проблема своевременного выполнения строительных работ в рамках установленных контрактом сроков продолжает оставаться одной из ключевых для повышения эффективности строительной отрасли. Согласно статистическим данным Росстата за 2023–2024 годы, порядка 30–35% строительных объектов в России сдаются с опозданием относительно первоначального графика, что влечёт за собой существенные финансовые убытки как для заказчиков, так и для подрядных организаций [1]. Особенно остро эта проблема проявляется в проектах реконструкции действующих промышленных предприятий, где вероятность срыва сроков увеличивается на 15–25% по сравнению с новым строительством. Это связано с неопределённостью фактического технического состояния существующих конструкций, необходимостью поэтапного вывода производственных мощностей из эксплуатации и наличием жёстких технологических ограничений [2].

Традиционные инструменты календарного планирования, базирующиеся на детерминированных оценках длительности отдельных видов работ, такие как линейные графики или метод критического пути (СPM), далеко не всегда обеспечивают нужную точность прогнозирования сроков в условиях многофакторной неопределённости строительного производства [3]. В российской практике управления проектами распространено применение нормативных методов расчёта продолжительности работ (СП 48.13330.2019, СНиП 1.04.03-85), но и они опираются на усреднённые показатели и не учитывают специфические риски конкретного объекта [4] [5].

Для повышения надёжности планирования в зарубежной строительной практике активно используются вероятностные методы, такие как PERT (Program Evaluation and Review Technique) и имитационное моделирование методом Монте-Карло [6] [7]. Метод PERT даёт возможность учесть неопределённость длительности работ через трёхточечную оценку: оптимистический, наиболее вероятный и пессимистический сценарии. Однако его применение ограничивается предположением о нормальном распределении случайных величин [8]. Метод Монте-Карло позволяет снять это ограничение: он даёт возможность задавать любые распределения вероятностей и получать статистически обоснованные оценки вероятности завершения проекта в заданные сроки [9].

Тем не менее, несмотря на теоретическую обоснованность вероятностных методов, их реальное применение в российском строительстве остаётся ограниченным из-за методических трудностей адаптации к специфике отечественной нормативной базы, недостаточной



квалификации специалистов и отсутствия проверенных на практике программных инструментов. В связи с этим актуальной научной и практической задачей является разработка комбинированных моделей календарного планирования, которые бы интегрировали преимущества детерминированных и вероятностных методов с учётом региональных особенностей климата, логистики и организации строительных процессов.

В качестве объекта исследования был взят проект реконструкции очистных сооружений ПАО «Уфаоргсинтез», расположенный в городе Уфа, Республика Башкортостан. Очистные сооружения были введены в эксплуатацию в 1956 году, их проектная мощность составляет 10850 кубических метров в сутки. Реконструкция осуществляется поэтапно в период с июня 2022 года по июнь 2026 года без полной остановки производственных процессов.

Общая сметная стоимость работ по реконструкции составляет 5 403 835 тыс. рублей. Этап первый – реконструкция блока биологической очистки №1. Сметная стоимость составляет 761 801 тыс. руб., срок завершения по контракту от 20.04.2023. Этап второй – реконструкция блока биологической очистки №2. Сметная стоимость составляет 975 331 тыс. руб., планируемое завершение в 2026 году. Этап третий – модернизация системы аэрации и дозирования реагентов на сумму 1 612 814 тыс. руб., срок завершения к концу 2025 года.

Исходный календарный план проекта включает в себя 500 работ, длительность которых варьируется от 10 до 836 дней. Структура плана построена на технологических и организационно-технологических связях типа «финиш–старт» (FS) с временными лагами от 0 до 16 дней, а также частично использованы связи типа «старт–старт» (SS) для параллельного выполнения отдельных видов работ.

Анализ календарного плана с помощью метода критического пути (CPM) показал, что критическая последовательность работ проходит через следующие этапы: подготовительные работы (разработка проектной документации, получение разрешений); основные строительно-монтажные работы по первому этапу; работы по модернизации системы аэрации (второй этап) и пусконаладочные работы с окончательным завершением в июне 2026 года.

Общая длительность критического пути по детерминированному расчёту составляет 3023 дня.

Контроль выполнения работ на объекте осуществляется ежеквартально. По данным отчётности за 2023–2024 годы, выполнение работ по первому этапу к концу 2024 года составило 96% от запланированного объёма. Задержки были связаны с несвоевременными поставками технологического оборудования (по контракту от 14.10.2022), что привело к увеличению фактической продолжительности отдельных работ на 12–14%.

В ходе предварительного анализа были выявлены ключевые факторы риска, которые могут привести к нарушению сроков выполнения работ:

Во-первых, климатические условия региона. Средняя температура января в Уфе составляет -15°C , продолжительность периода с температурой ниже -30°C достигает 15–20 дней. Это существенно снижает производительность труда и требует введения поправочных коэффициентов к нормативной продолжительности работ.

Во-вторых, логистические ограничения. Удалённость объекта от основных промышленных центров (Москва, Екатеринбург) на 1200–1500 км увеличивает сроки поставки нестандартного оборудования и импортных комплектующих на 20–35 дней.

В-третьих, организационно-технологические риски. Необходимость согласования графика работ с технологическим режимом действующих производств предприятия ограничивает возможность параллельного выполнения отдельных видов работ.

Предлагаемая в данной работе комбинированная модель календарного планирования основана на последовательной интеграции трёх методов: детерминированного метода критического пути (CPM), вероятностного метода PERT и имитационного моделирования методом Монте-Карло.

На первом этапе выполняется построение сетевой модели проекта и расчёт параметров сети по стандартному алгоритму CPM. Это включает в себя определение раннего и позднего



начала работ, расчёт резервов времени и выявление критического пути. Для работ, лежащих на критическом пути (то есть имеющих нулевой полный резерв времени), проводится детальный анализ факторов, определяющих их длительность.

Для каждой работы, входящей в критический путь, формируются три сценарные оценки длительности:

t_o – оптимистичная оценка (минимально возможная длительность при благоприятных условиях);

t_m – наиболее вероятная оценка (типичная длительность на основе нормативов и опыта выполнения аналогичных работ);

t_p – пессимистичная оценка (максимальная длительность при неблагоприятных условиях).

Ожидаемая длительность работы t_e и стандартное отклонение σ рассчитываются по формулам PERT:

$$t_e = \frac{(t_o + 4 \cdot t_m + t_p)}{6}; \sigma = \frac{(t_p - t_o)}{6}$$

Для учёта региональной специфики климатических условий Республики Башкортостан в модель вводится коэффициент сезонности $k_s = 1,15$, который применяется к работам, выполняемым в зимний период с декабря по март. Значение коэффициента установлено на основе анализа фактических данных по аналогичным объектам региона и рекомендаций Приказа Минстроя России от 04.08.2020 №421/пр.

На третьем этапе проводится имитационное моделирование сроков выполнения проекта с использованием метода Монте-Карло. Для каждой работы критического пути задаётся треугольное распределение вероятностей с параметрами t_o , t_m , t_p скорректированными на региональный коэффициент сезонности для соответствующих временных периодов.

Моделирование было реализовано в программной среде Microsoft Excel с использованием встроенной функции генерации случайных чисел и пользовательских макросов для автоматизации расчёта 1000 итераций. Для каждой итерации выполняются следующие шаги:

Случайная генерация длительности каждой работы в соответствии с заданным распределением вероятностей.

Пересчёт длительности критического пути с учётом случайных значений длительности работ.

Накопление статистики распределения общей длительности проекта.

По результатам 1000 итераций строится кумулятивная функция распределения длительности критического пути и определяются ключевые вероятностные характеристики.

Результаты применения комбинированной модели СРМ–PERT–Монте-Карло к календарному плану реконструкции очистных сооружений ПАО «Уфаоргсинтез» представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение оценок общей продолжительности проекта различными методами

Метод/показатель	Общая продолжительность, дни	Отклонение от плановой, дни	Отклонение, %
Плановая длительность (график)	3023	-	-
Аналитический PERT, t_e	3534	+511,39	+16,9
Монте-Карло P_{50} (симуляция)	3538	+515,36	+17
Монте-Карло P_{80} (симуляция)	3736	+713,06	+23,6
Монте-Карло P_{90} (симуляция)	3834	+810,80	+ 26,8



Анализ полученных результатов показывает, что детерминированная оценка длительности проекта по исходному календарному графику (3023 дня) существенно занижает реальные сроки выполнения работ. При учёте вероятностной природы длительности работ по методу PERT ожидаемая длительность возрастает до 3534,39 дня (+16,9% по сравнению с планом). Имитационное моделирование методом Монте-Карло подтверждает эту оценку: медианная длительность проекта (P_{50}) составляет 3538,36 дня, а при целевом уровне надёжности 80% общая продолжительность возрастает до 3737,06 дня. Для уровня 90% длительность достигает 3833,80 дня, что свидетельствует о существенном риске срыва исходного календарного графика без введения дополнительных резервов.

Критически важным результатом является определение длительности проекта с заданным уровнем надёжности. Если при планировании ориентироваться на завершение работ с вероятностью 80%, что является типичным требованием для контрактов с жёсткими сроками и штрафными санкциями, то требуемый резерв времени составляет 713 дней относительно плановой длительности исходного календарного графика (3736,06 дня по симуляционной оценке P_{80} против 3023 дней по плану). Для обеспечения вероятности завершения проекта на уровне 90% резерв должен быть увеличен примерно до 811 дней (3833,80 дня по оценке P_{90} против 3023 дней).

Декомпозиция источников неопределённости по результатам анализа чувствительности показала следующее распределение влияния факторов на разброс общей длительности проекта:

Климатические риски (сезонный коэффициент k_s) – 42% общей дисперсии. Логистические риски (задержки поставок оборудования) – 31%. Организационно-технологические риски (согласование с действующим производством) – 27%.

На основе результатов моделирования были разработаны следующие рекомендации по оптимизации календарного плана:

Перераспределение работ с высокой вариативностью длительности на периоды с более благоприятными климатическими условиями (с апреля по октябрь).

Увеличение интенсивности ресурсного обеспечения критических работ (коэффициент увеличения численности бригад – 1,2) для компенсации сезонного снижения производительности труда.

Формирование резервного графика поставок критического оборудования с привлечением альтернативных поставщиков.

Реализация предложенных мероприятий в оптимизированном календарном плане позволила сократить общую продолжительность проекта по результатам моделирования методом Монте-Карло с учетом вероятностной оценки с 3736,06 до значения, близкого к плановой длительности 3023 дня, что соответствует снижению расчетного временного перерасхода примерно на 23-24%. При этом вероятность завершения работ в контрактные сроки возросла с 21% для исходного календарного плана до 78% для оптимизированного варианта.

Экономический эффект от применения комбинированной модели оценивается через снижение потенциальных потерь, связанных с нарушением сроков реализации проекта и увеличением сопутствующих издержек. По расчётам, приведённым в диссертационном исследовании, для полного объёма работ стоимостью 1596,77 млн руб. потенциальный экономический эффект составляет 274,45 млн руб. для сценария P_{50} , 380,08 млн руб. для сценария P_{80} , 432,37 млн руб. для сценария P_{90} и 477,76 млн руб. для сценария P_{95} . Для периода реализации работ 2024–2026 гг. при стоимости 692,92 млн руб. соответствующий эффект оценивается в 119,07 млн руб., 164,90 млн руб., 187,59 млн руб. и 207,24 млн руб. соответственно.

Дополнительный эффект связан со снижением косвенных издержек от простоев: сокращение ожидаемой продолжительности проекта в оптимизированном календарном плане позволяет уменьшить накладные расходы строительной организации. Таким образом, общий потенциальный экономический эффект от применения комбинированной модели календарного планирования оценивается в 478 млн рублей.



Результаты выполненного исследования подтверждают высокую эффективность применения комбинированной модели СРМ–PERT–Монте-Карло для повышения точности календарного планирования и оптимизации сроков строительных работ. На примере реконструкции очистных сооружений ПАО «Уфаоргсинтез» было показано, что традиционное детерминированное планирование методом СРМ систематически занижает реальную общую продолжительность проекта на 10–20%, что приводит к нарушению контрактных обязательств и существенным финансовым потерям.

Интеграция вероятностных методов PERT и имитационного моделирования Монте-Карло в процесс календарного планирования позволяет получить объективную оценку ожидаемых сроков выполнения работ с учётом неопределённости длительности отдельных операций. Определить требуемые резервы времени для обеспечения заданного уровня надёжности выполнения контрактных обязательств. Выявить ключевые факторы риска и разработать целевые мероприятия по их снижению.

Введение в модель регионального коэффициента сезонности ($k_s=1,15$ для условий Башкортостана) обеспечивает адаптацию метода к специфике климатических условий и повышает точность прогнозирования по сравнению с использованием унифицированных нормативных оценок.

Практическое применение комбинированной модели на объекте ПАО «Уфаоргсинтез» позволило сократить ожидаемую продолжительность проекта и повысить вероятность выполнения контрактных обязательств в срок с 21% до 78%. Экономический эффект от применения комбинированной модели оценивается в 478 млн рублей, что подтверждает практическую значимость предложенного подхода для календарного планирования строительных проектов.

Разработанная методика может быть масштабирована на другие объекты реконструкции промышленных предприятий с соответствующей корректировкой региональных коэффициентов и структуры факторов риска. Перспективным направлением развития исследования является интеграция комбинированной модели с системами оперативного мониторинга выполнения работ и технологиями машинного обучения для автоматической корректировки вероятностных оценок на основе накопленных данных

Список литературы:

1. Федеральная служба государственной статистики. Строительство в России. Статистический сборник. – М.: Росстат, 2024.
2. Воскобойникова Т.А., Мамзина Т.Ю. Факторы, влияющие на сроки выполнения строительно-монтажных работ // Alley Science. 2020. № 3 (42). С. 156–162.
3. Яббарова Д.Х., Руденко Ю.С. Управление временем в строительных проектах: современные методы и инструменты // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 78–85.
4. СП 48.13330.2019. Организация строительства. Актуализированная редакция СНиП 12-01-2004. М.: Минстрой России, 2019.
5. СНиП 1.04.03-85 «Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений» – М., 1991.
6. Malcolm D.G., Roseboom J.H., Clark C.E., Fazar W. Application of a technique for research and development program evaluation // Operations Research. 1959. Vol. 7. No. 5. P. 646–669.
7. Kerzner H. Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling. 12th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. 1264 p.
8. Храмов Д.Е. Совершенствование методов календарного планирования строительно-монтажных работ на уровне строительного предприятия: дис.... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2016. 147 с.
9. Морозенко А.А., Пухова Е.С. Применение метода Монте-Карло для анализа рисков в управлении проектами // Системный анализ и прикладная информатика. 2018. № 2. С. 45–51

