

19. Kupchikova N. V., Demkina I. A., Shkrudnev Ye. O. Razrabotka programnogo modulya s veb-interfeisom dlya proverki TIM-modelei zdaniy i sooruzheniy pri prokhozhenii gosudarstvennoi ekspertizy [Development of a software module with a web interface for checking TIM models of buildings and structures during state expertise]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026, no. 1(55), pp. 86–93. (In Russ.) DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93.
20. Zolina T. V., Kupchikova N. V. Tsifrovie keisi kak instrument tsifrovoy transformatsii proektnoi deyatel'nosti [Digital cases as a tool for digital transformation of design activity]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2023, no. 4 (46), pp. 86–91. (In Russ.) DOI 10.52684/2312-3702-2023-46-4-86-91.
21. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62–66. DOI 10.1109/TSMC.1979.4310076.
22. Selvachandran G., Quek S. G., Lan L. T. H., Son L. H., Giang N. L., Ding W., Abdel-Basset M., De Albuquerque V. H. C. A New Design of Mamdani Complex Fuzzy Inference System for Multiattribute Decision Making Problems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2021, vol. 29, no. 4, pp. 716–730. DOI: 10.1109/TFUZZ.2019.2961350.
23. Krysander M., Aslund J., Nyberg M. An efficient algorithm for finding minimal over-constrained subsystems for model-based diagnosis. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 2008, part A, vol. 38, no. 1, pp. 197–206.
24. Chvatal V. A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem. *Mathematics of Operations Research*. 1979, vol. 4, no. 3, pp. 233–235.

© С. В. Петренко, М. Э. Громова

Ссылка для цитирования:

Петренко С. В., Громова М. Э. Алгоритм многокритериальной оценки информативности параметров сложной технической системы // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань: ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 82–92.

УДК 69.05

DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-92-98

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

С. Х. Байрамуков, З. Н. Долаева

Байрамуков Салис Хамидович, доктор технических наук, профессор кафедры строительства, транспорта, машиностроения и электроэнергетики, Невинномысский государственный гуманитарно-технический институт, г. Невинномысск, Российская Федерация, тел.: + 7 (86554) 9-55-50 доб. 139; e-mail: salis_pochta@mail.ru;

Долаева Зурьят Ньюзюровна, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела аспирантуры, Северо-Кавказская государственная академия, г. Черкесск, Российская Федерация, тел.: + 7 (8782) 29-35-98; e-mail: zuridolaeva@yandex.ru

Статья посвящена разработке концепции многоцелевой оптимизации управления строительным производством в условиях возрастающей сложности инвестиционно-строительных проектов и необходимости одновременного учета противоречивых критериев эффективности. Исследование проблем и особенностей строительной отрасли показал, что эффективность управления строительным производством предполагает формализовать именно эту многомерность, то есть находить набор решений, каждое из которых представляет собой разумный компромисс между несколькими одновременно важными показателями. Авторами статьи предлагается многоцелевая структура оптимального управления процессом строительного производства, которая позволяет достичь как плавного, так и экономически эффективного управления. В рамках этой структуры состояние между последовательными управляющими воздействиями рассматривается как равноправная цель оптимизации наряду с экономическими факторами, генерируя фронт Парето для явного отображения компромисса между плавностью управления и стоимостью. Предложенная концепция обеспечивает значительное повышение эффективности управления.

Ключевые слова: многоцелевая оптимизация, детерминированные алгоритмы, метаэвристические методы, строительное производство, эффективность управления, энергоэффективность, фронт Парето.

CONCEPT OF MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION PRODUCTION MANAGEMENT

S. Kh. Bayramukov, Z. N. Dolayeva

Bayramukov Salis Khamidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Construction, Transport, Mechanical Engineering, and Electric Power Engineering Department, Nevinnomyssk State Humanities and Technical Institute, Nevinnomyssk, Russian Federation; phone: + 7 (86554) 9-55-50, ext. 139; e-mail: salis_pochta@mail.ru;

Dolayeva Zuryat Nyuzyurovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Postgraduate Studies Department, North Caucasus State Academy, Cherkessk, Russian Federation; phone: + 7 (8782) 29-35-98; e-mail: zuridolaeva@yandex.ru

This article addresses the development of a multi-objective optimization concept for managing construction operations, necessitated by the increasing complexity of investment and construction projects and the need simultaneously consider conflicting efficiency criteria. An analysis of the construction industry's challenges and characteristics reveals that effective management requires formalizing this multidimensionality—specifically, identifying a set of solutions where each represents a reasonable compromise among several simultaneously important indicators. The authors propose a multi-objective optimal control structure for the construction process that enables both smooth and cost-effective management. Within this framework, the interval between successive control actions treated as an optimization objective of equal importance to economic factors, generating a Pareto front that explicitly illustrates the trade-off between control smoothness and cost. The proposed concept leads to a significant improvement in management efficiency.

Keywords: multi-objective optimization, deterministic algorithms, metaheuristic methods, construction production, management efficiency, energy efficiency, Pareto front.

Введение (Introduction).

В современном мире строительная отрасль функционирует в условиях неопределенностей, возрастающей сложности инвестиционно-строительных проектов, увеличения числа взаимодействующих участников и усиления взаимного влияния организационных, технологических и экономических решений друг на друга, что делает традиционные методы недостаточными для принятия эффективных управленческих решений. Ключевые показатели строительного производства – сроки, стоимость, качество, ресурсоемкость, энергоэффективность, безопасность работ объективно находятся в противоречии друг с другом, а существующий методический аппарат, разработанный преимущественно для задач с единственной целевой функцией, не позволяет комплексно учитывать строительное производство, что подтверждается анализом научных публикаций последних лет [1–3], в которых, несмотря на разнообразие частных решений, отсутствует целостная концепция многоцелевой оптимизации применительно к управлению строительным производством в целом [4–6]. На основании анализа литературы и научных публикаций [7–9] можно выделить проблемы и особенности. Выделенные проблемы и противоречия обуславливают необходимость разработки теоретико-методологической концепции многоцелевой оптимизации, обеспечивающей согласование разнонаправленных целей управления и формирование обоснованного инструментария поддержки принятия решений [10–12].

Таким образом, актуальность исследуемой тематики обусловлена тем, что традиционные методы управления строительством, ориентированные на оптимизацию по определенному критерию, а именно минимизации сроков или финансовых затрат, не позволяют комплексно учитывать взаимосвязанные и часто конфликтующие показатели строительного процесса, что снижает эффективность принимаемых управленческих решений [13–15].

Целью исследования является разработка теоретико-методологической концепции многоцелевой оптимизации, обеспечивающей согласование разнонаправленных целевых функций управления строительным производством

и формирование научно-обоснованного инструментария поддержки принятия управленческих решений.

Методы (Methods)

В исследовании применены методы системного анализа, теории многокритериальной оптимизации, математического моделирования организационно-технологических процессов, а также методы построения множества Парето-оптимальных решений.

Алгоритмы оптимизации в строительном производстве направлены на решение важных задач, возникающих на протяжении всего жизненного цикла зданий, как на этапе проектирования и строительства, так и на этапе эксплуатации. Алгоритмы оптимизации находят управленческое решение для заданной цели оптимизации с учетом ограничений, например, для минимизации сроков строительства или максимизации экономического дохода инвестиционно-строительного проекта [1–3]. Для разработки таких алгоритмов важно разбить на типы оптимизируемые переменные: целочисленные и непрерывные. Целочисленные переменные обозначают состояние «включено/выключено» или количество управляемых элементов. Непрерывные переменные могут обозначать мощность и заданные значения в зависимости от конкретной задачи оптимизации.

Алгоритмы оптимизации широко используются в различных системах и процессах строительного производства для решения таких задач, как оптимальное проектирование, реагирование на изменение спроса и оптимальное управление [1–3]. Оптимальное проектирование позволяет определить оптимальную конфигурацию таких систем, оптимальная конфигурация систем обеспечивает идеальное соответствие между спросом и предложением. На этапе эксплуатации алгоритмы оптимизации могут использовать управленческую гибкость строительных систем для управления рисками [3, 4].

Алгоритмы оптимизации в зависимости от процесса поиска оптимального решения можно разделить на детерминированные и метаэвристические. Детерминированные алгоритмы определяют оптимальное решение задачи с помощью определенной выборки математических закономерностей [5–7]. Например, метод динамического

программирования разбивает задачу на более простые задачи, оптимальное решение подзадач приводит к оптимальному решению основной задачи [5]. Метаэвристические алгоритмы, в свою очередь, являются недетерминированными и основанными на теории вероятностей [8]. Метаэвристические алгоритмы часто используют в качестве источника реализации законы природы или физики для поиска оптимальных решений. Например, генетический алгоритм - метод глобальной оптимизации поиска, основанный на механизмах естественного отбора и генетики [8–10].

Для полного выявления особенностей детерминированных и метаэвристических алгоритмов в таблице представлены анализ и сравнение этих алгоритмов. Детерминированные алгоритмы обычно разрабатываются под конкретные задачи и могут найти оптимальное ре-

шение, если оно существует. В отличие от метаэвристических алгоритмов, детерминированные алгоритмы не подвержены влиянию случайных воздействий [8]. Для конкретной задачи оптимизации процесс решения является детерминированным, и детерминированные алгоритмы всегда выдают один и тот же результат. В отличие от имеющихся методик, применимых только к определенным типам переменных, предложенная система управления на основе многоцелевой оптимизации может быть использована для решения различных задач благодаря использованию дискретных и непрерывных переменных расстояния. Что представляет собой универсальное и комплексное решение для повышения плавности управления в сложных задачах оптимизации, включающих в себя как последовательность использования оборудования, так и управление по заданному значению.

Таблица

Анализ факторов детерминированных и метаэвристических алгоритмов

Table

Analysis of factors of deterministic and metaheuristic algorithms

№ п/п	Факторы	Детерминированные алгоритмы	Метаэвристические алгоритмы
1	2	3	4
1	Качество решения	Оптимальное решение гарантировано, если оно существует для конкретного типа задачи	Приближенное к оптимальному решение
2	Случайность	Нет влияния случайных факторов, процесс определен и предсказуем	Случайные процессы помогают избежать локальных оптимумов и исследовать пространство решений
3	Гибкость	Жесткий подход, ориентированный на решение конкретных проблем	Более гибкий и адаптируемый к различным типам проблем
4	Методы	Метод динамического программирования; метод Лагранжа	Генетические алгоритмы; Метод имитации отжига

Вместо того чтобы полагаться на абстрактный настраиваемый весовой коэффициент, система рассматривает плавность управления и эксплуатационные расходы как две конкурирующие, но явные цели. Создавая весь фронт недоминируемых решений по Парето, система предоставляет операторам четкое и полное представление об оптимальных компромиссах. Предложенный метод выбора на основе уровня допустимых отклонений позволяет интуитивно и гибко выбирать из набора оптимальных решений, напрямую сопоставляя экономические цели с эксплуатационной стабильностью. Формально определяя расстояние между последовательными управляющими воздействиями как основную цель оптимизации, система напрямую ищет решения, которые по своей сути являются плавными и стабильными. Такой методический подход позволит значительно повысить эффективность управления, обеспечивая баланс производительности и стабильности.

Цель оптимизации 1 – минимизация эксплуатационных расходов.

Повышение энергоэффективности зданий - основная цель управления энергопотреблением в строительстве, которая часто достигается за счет оптимизации конкретных показателей эффективности [10]. Эксплуатационные расходы – широко распространенный показатель для количественной оценки и повышения энергоэффективности, поскольку он напрямую отражает экономические последствия энергопотребления. Минимизация эксплуатационных расходов рассматривается как показательный пример для цели оптимизации № 1. Однако предложенная система является универсальной, и эту цель можно легко заменить другими важными задачами, такими как минимизация выбросов углекислого газа или максимальное использование возобновляемых источников энергии.

Цель оптимизации 2 – повышение плавности управления.

Цель 2 – повысить плавность управления за счет минимизации расстояния между популяцией NSGA-II и предыдущим действием управления, то есть улучшить плавность перехода между двумя действиями управления. Предыдущее действие управления представлено в виде следующего вектора действий:

$$C_{t-1} = [c_{d,t-1}, c_{u,t-1}], \quad (1)$$

где $c_{d,t-1}$ – вектор управляющих дискретных переменных, $c_{u,t-1}$ – вектор управляющих непрерывных переменных, нормализованных в диапазоне от 0 до 1.

При оптимальном управлении различными системами зданий целочисленными управляющими переменными обычно являются сигналы включения/выключения (обозначаются как 1/0) устройств или количество устройств, которые должны быть включены в следующем периоде управления. Непрерывные управляющие переменные обычно относятся к заданным значениям параметров устройств или локальных контроллеров, например, к температуре подачи охлажденной воды, частоте вращения насосов с регулируемой скоростью или заданному значению температуры воздуха в помещении. Для каждой непрерывной переменной диапазон значений нормализуется в пределах от 0 до 1 в соответствии с минимально и максимально допустимым рабочим диапазоном.

Для измерения расстояния между двумя векторами с целочисленными и непрерывными элементами используются значения L_1 и L_2 для вычисления расстояния между целочисленными и непрерывными переменными соответственно:

$$S(c_t, c_{t-1}) = ||c_{d,t} - c_{d,t-1}||_1 + ||c_{u,t} - c_{u,t-1}||_2, \quad (2)$$

$$L_1 = ||x||_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|, \quad (3)$$

$$L_2 = ||x||_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (4)$$

где x – n -размерный вектор; x_i – i -й элемент вектора.

L_1 – норма вектора представляет собой сумму абсолютных значений всех элементов вектора. Например, в двумерном пространстве L_1 представляет собой сумму горизонтального и вертикального расстояний от начала координат до точки, в которой расположен вектор. Например, если $c_{d,t} = [1,0]$ и $c_{d,t-1} = [0,1]$, то это означает, что одновременно включено только первое устройство и только второе устройство. Расстояние между $c_{d,t}$ и $c_{d,t-1}$ равняется $|1 - 0| + |0 - 1| = 2$. Расстояние по L_1 измеряет количество действий «включено» и «выключено» между двумя управляющими действиями и предпочтительно используется для измерения расстояния между целочисленными переменными.

L_2 – норма вектора, также называемая евкли-

довым расстоянием, представляет собой квадратный корень из суммы квадратов всех элементов вектора. Поэтому L_2 подходит для измерения расстояния между непрерывными переменными.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Выбор решения. В NSGA-II фронт Парето – это группа решений, представляющих собой оптимальный компромисс между противоречивыми целями 1 и 2. В NSGA-II используется концепция доминирования по Парето, которая определяет качество решений. Решение А доминирует над решением В, если решение В равно или хуже решения А по всем оптимизируемым показателям и лучше решения А хотя бы по одному показателю. Фронт Парето – это множество всех недоминируемых решений в совокупности, которое позволяет глубже понять компромисс между конфликтующими целями.

Шаг 1. Сортировка элементов целевой матрицы по ограничениям целевой функции 2, то есть по расстоянию между предыдущим управляющим воздействием и каждым решением на границе Парето, в порядке возрастания.

Шаг 2. Группировка решений по целочисленному значению (наибольшему целому числу, которому меньше или равно текущее число) для цели 2). Таким образом будет возможным расставить приоритеты для решений с одинаковым количеством дискретных изменений.

Шаг 3. Выборка решений с оптимальным значением целевой функции 1 в каждой группе (исключение остальных решений).

Шаг 4. Сортировка оставшихся решений по значению целевой функции 2 в порядке возрастания (от наиболее гладких к наименее гладким). Обозначим эти отсортированные решения как $f_1, f_2, \dots, f_k$, где k – общее количество оставшихся решений.

Шаг 5. Алгоритм перебирает отсортированные решения, начиная с самого гладкого (f_1). На каждом этапе i он оценивает целесообразность перехода к следующему, менее оптимальному решению (f_{i+1}). Если предельное процентное снижение затрат (5) составляет ниже заданного пользователем допустимого уровня (f_{i+1}), текущее решение (f_i) выбрано, так как незначительный прирост энергии не компенсирует потерю плавности управления.

$$p = \frac{\cos t(f_i) - \cos t(f_{i+1})}{\cos t(f_i)}. \quad (5)$$

Если это условие не выполняется, процесс продолжается с оценкой следующего решения (f_{i+1}). Если итерация проходит по всему списку без выполнения условия остановки, это означает, что каждый шаг приводил к существенной экономии энергии. В этом случае наиболее энергоэффективным решением будет (f_k).

В рамках этой концепции уровень толерантности является ключевым параметром для поиска компромисса между энергоэффективностью и плавностью управления. Этот параметр используется в процессе выбора, описанном в шагах 1–5, чтобы получить новое управляющее воздействие $C_t = [c_{d,t}, c_{u,t}]$, из набора недоминируемых решений на границе Парето. Затем это действие применяется к энергетической системе здания на текущем этапе управления. Чтобы завершить цикл управления, при переходе к следующему этапу управления выполняется то же действие передается в качестве входных данных в алгоритм, чтобы при следующей оптимизации учитывалась плавность перехода от только что принятого решения.

Заключение (Conclusions)

Таким образом, в статье предлагается концепция управления, которая выявляет четкую границу компромисса между эксплуатационной стабильностью и стоимостью. Ключевой вывод заключается в том, что для сложных систем вы-

является значительный, неиспользованный потенциал повышения плавности с незначительными энергетическими потерями.

Предложена структура концепции, включающая формирование системы целевых функций (цель оптимизации 1 – минимизация эксплуатационных расходов; цель оптимизации 2 – повышение плавности управления), обоснование выбора методов и моделей поддержки принятия решений, предложен пошаговый алгоритм выбора решений на различных уровнях управления строительным производством. Определены принципы формирования области допустимых компромиссных решений с учетом ограничений строительного производства.

Одним из перспективных направлений является расширение предложенной многоцелевой структуры и применение этого подхода для комплексного управления компромиссами между энергопотреблением, плавностью управления и эффективностью компонентов во всей системе строительного производства для оптимизированной и интеллектуальной эксплуатации зданий.

Список литературы

1. Золина Т. В. Цифровизация предпроектной и проектной стадий в реализации инвестиционно-строительного проекта многофункционального жилого комплекса / Т. В. Золина, Н. В. Купчикова, К. Е. Джантазаева, Е. Е. Купчиков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2022. – № 3 (41). – С. 144–148. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-144-148.
2. Купчикова Н. В. Разработка программного модуля с веб-интерфейсом для проверки ТИМ-моделей зданий и сооружений при прохождении государственной экспертизы / Н. В. Купчикова, И. А. Демкина, Е. О. Шкруднев // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2026. – № 1 (55). – С. 86–93. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93.
3. Купчикова Н. В. Автоматизация проверки соответствия конструктивно-технологических решений высотного здания нормативным требованиям на основе интеграции ТИМ и RAG-LLM / Н. В. Купчикова, А. И. Сухорукова, Т. В. Золина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2026. – № 2(56). – С. 125–131. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-125-131.
4. Баламирзоев Н. Л. Метод обработки экспертных данных для построения эмпирических математических моделей сложных систем, функционирующих в нестабильных окружающих средах / Н.Л. Баламирзоев, В.Б. Мелехин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2025. – Т. 52. № 2. – С. 63–73.
5. Говоруха П. А. Внедрение гибких систем управления в строительном производстве / П. А. Говоруха, И. А. Снегирев, Д. В. Равочкин // Components of Scientific and Technological Progress. - 2025. – № 5 (107). – С. 61–65.
6. Саид Ю. С. Основные принципы структурно-функционального подхода к управлению инвестиционно-строительным проектом с учетом принципов «бережливого производства» / Ю. С. Саид, Л. Б. Зеленцов // Инженерный вестник Дона. – 2023. – №1. – Режим доступа: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8137>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Олейник П.П. Моделирование системы контроля качества инженерных систем при возведении объектов высотного строительства / П. П. Олейник, М. Х. Абас // Строительное производство. - 2024. – № 4. – С. 90–94.
8. Горбанева Е. П. Оптимизация методов реализации строительных проектов при календарном планировании / Е. П. Горбанева, А. В. Бухтояров // Недвижимость: экономика, управление. – 2024. – № S3. – С. 152–157.
9. Bairamukov S. H., Dolaeva Z. N. Dynamic programming in optimization of comprehensive housing stock modernization / S. H. Bairamukov, Z. N. Dolaeva // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – № 8 (76). – P. 3–19.
10. Лапидус А. А. Оптимизация процессов использования строительной техники с применением методов линейного программирования / А. А. Лапидус, З. Р. Тускаева, Е. И. Соколова // Строительное производство. – 2024. – № 1. – С. 85–91.
11. Rajwar K., Deep K., Das S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: taxonomy, applications, and open challenges / K. Rajwar, K. Deep, S. Das. // Artif. Intell. Rev. – 2023. – № 56. – P. 13187–13257. – <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y>.
12. Кремер О. Б. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма / О. Б. Кремер, С. Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 21–24.

13. Мищенко В. Я. Обоснование целесообразности использования генетических алгоритмов при оптимизации распределения ресурсов в календарном планировании строительства / В. Я. Мищенко, Д. И. Емельянов, А. А. Тихоненко // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – №10. – С. 71–73.
14. Dullinger C. A general approach for mixed-integer predictive control of HVAC systems using MILP / C. Dullinger, W. Struckl, M. Kozek // Appl. Therm. Eng. – 2018. – № 128. – P. 1646–1659. – <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.104>.
15. Junghans L. Hybrid single objective genetic algorithm coupled with the simulated annealing optimization method for building optimization / L. Junghans, N. Darde // Energy and Buildings. – 2015. – № 86. – P. 651–662. – <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.039>.
16. Liu S.-S. Optimizing project selection and scheduling problems with time-dependent resource constraints / S.-S. Liu, C.-J. Wang // Automation in Construction. – 2011. – Vol. 20, № 8. – P. 1110–1119.
17. Xie L. A generic framework and strategies for integrating AI into building automation systems for field-level optimization of HVAC systems / L. Xie, K. Shan, S. Wang // Energy. – 2025. – № 333. – P. 137405. – <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137405>.
18. Zhang H. Stochastic occupancy-integrated MPC for multi-objective optimal built environment control / H. Zhang, C.A. Thilker, F. Xiao, H. Madsen, R. Li, T. Ma, et al. // Build Simul. – 2025. – № 18. – P. 1963–1999. – <https://doi.org/10.1007/s12273-025-1300-4>.
19. Rauf M. Energy-efficient multi-objective scheduling for modern construction projects with dynamic resource constraints / M. Rauf, Ja. Mumtaz // Buildings. – 2026. – № 2. – P. 392.
20. Воробьев В. С. Математическая модель оптимизации и управления затратами строительного производства / В. С. Воробьев, М.Ю. Квинт // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 17. – С. 26–30.
21. Шеина С. Г. Устойчивое строительство зданий / С. Г. Шеина, Р. В. Балашев, Г. А. Живоглядов, Р. Д. Шахияев // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 12. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8911, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
22. Wang X. Long-term experimental evaluation and comparison of advanced controls for HVAC systems / X. Wang, B. Dong // Appl. Energy. – 2024. – № 371. – P. 123706. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123706>.
23. Luo Z. Multi-objective optimal dispatch of household flexible loads based on their real-life operating characteristics and energy-related occupant behavior / Z. Luo, J. Peng, M. Hu, et al. // Build. Simul. – 2023. – № 16. – P. 2005–2025. – <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1036-y>.

References

1. Zolina T. V., Kupchikova N. V., Dzhantazayeva K. Ye., Kupchikov Ye. Ye. Tsifrovizatsiya predproektnoi i proektnoi stadii v realizatsii investitsionno-stroitel'nogo proekta mnogofunktsional'nogo zhilogo kompleksa [Digitalization of pre-design and design stages in the implementation of an investment and construction project of a multifunctional residential complex]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2022, no. 3 (41), pp. 144–148. (In Russ.). DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-144-148.
2. Kupchikova N. V., Demkina I. A., Shkrudnev Ye. O. Razrabotka programmnogo modulya s veb-interfeisom dlya proverki TIM-modelei zdaniy i sooruzhenii pri prokhozhenii gosudarstvennoi ekspertizy [Development of a software module with a web interface for checking TIM models of buildings and structures during state expertise]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026, no. 1 (55), pp. 86–93. (In Russ.). DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93.
3. Kupchikova N. V., Sukhorukova A. I., Zolina T. V. Avtomatizatsiya proverki sootvetstviya konstruktivno-tekhnologicheskikh reshenii visotnogo zdaniya normativnim trebovaniyam na osnove integratsii TIM i RAG-LLM [Automation of compliance checking of structural and technological solutions of a high-rise building with regulatory requirements based on TIM and RAG-LLM integration]. *Inzhenerno-stroitel'nii vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026, no. 2 (56), pp. 125–131. (In Russ.). DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-125-131.
4. Balamirzoev N. L., Melekhin V. B. Metod obrabotki ekspertnikh dannikh dlya postroyeniya empiricheskikh matematicheskikh modelei slozhnykh sistem, funktsioniruyushchikh v nestabilnykh okruzhayushchikh sredakh [Method for processing expert data to construct empirical mathematical models of complex systems operating in unstable environments]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences], 2025, vol. 52, no. 2, pp. 63–73.
5. Govorukha P. A., Snegirev I. A., Ravochkin D. V. Vnedrenie gibkikh sistem upravleniya v stroitel'nom proizvodstve [Implementation of agile management systems in construction production]. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2025, no. 5 (107), pp. 61–65.
6. Said Yu. S., Zelentsov L. B. Osnovnye printsipy strukturno-funktsional'nogo podkhoda k upravleniyu investitsionno-stroitel'nyim proektom s uchetoм printsipov «berezhlivogo proizvodstva» [Basic principles of a structural-functional approach to managing an investment-construction project taking into account the principles of "lean production"]. *Inzhener'nii vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2023, no. 1. Available at: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8137> (in Russ.).
7. Oleinik P. P., Abas M. Kh. Modelirovanie sistemi kontrolya kachestva inzhenernykh sistem pri vozvedenii obektov visotnogo stroitelstva [Modeling of the quality control system for engineering systems in the construction of high-rise buildings]. *Stroitel'noe proizvodstvo* [Construction Production]. 2024, no. 4, pp. 90–94.
8. Gorbaneva Ye. P., Bukhtoyarov A. V. Optimizatsiya metodov realizatsii stroitel'nykh proektov pri kalendar'nom planirovanii [Optimization of construction project implementation methods in schedule planning]. *Nedvizhimost: ekonomika, upravlenie* [Real Estate: Economics, Management]. 2024, no. S3, pp. 152–157.

9. Bairamukov S. H., Dolaeva Z. N. Dynamic programming in optimization of comprehensive housing stock modernization. *Magazine of Civil Engineering*. 2017, no. 8 (76), pp. 3–19.
10. Lapidus A. A., Tuskaeva Z. R., Sokolova Ye. I. Optimizatsiya protsessov ispolzovaniya stroitelnoi tekhniki s prime-neniem metodov lineinogo programmirovaniya [Optimization of construction equipment usage processes using linear programming methods]. *Stroitelnoe proizvodstvo* [Construction Production]. 2024, no. 1, pp. 85–91.
11. Rajwar K., Deep K., Das S. An exhaustive review of the metaheuristic algorithms for search and optimization: tax-onomy, applications, and open challenges. *Artif. Intell. Rev.* 2023, no. 56, pp. 13187–13257. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10470-y>.
12. Kremer O. B., Podvalnii S. L. Programmaya realizatsiya resheniya optimizatsionnikh zadach metodom geneticheskogo algoritma [Software implementation of solving optimization problems by the genetic algorithm method]. *Vestnik Voro-nezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2012, no. 3, pp. 21–24.
13. Mishchenko V. Ya., Emelyanov D. I., Tikhonenko A. A. Obosnovanie tselesoobraznosti ispolzovaniya geneticheskikh algoritmov pri optimizatsii raspredeleniya resursov v kalendarnom planirovanii stroitelstva [Justification of the feasi-bility of using genetic algorithms to optimize resource allocation in construction schedule planning]. *Promishlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2013, no. 10, pp. 71–73.
14. Dullinger C., Struckl W., Kozek M. A general approach for mixed-integer predictive control of HVAC systems using MILP. *Appl. Therm. Eng.* 2018, no. 128, pp. 1646–1659. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.104>.
15. Junghans L., Darde N. Hybrid single objective genetic algorithm coupled with the simulated annealing optimization method for building optimization. *Energy and Buildings*. 2015, no. 86, pp. 651–662. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.10.039>.
16. Liu S.-S., Wang C.-J. Optimizing project selection and scheduling problems with time-dependent resource con-straints. *Automation in Construction*. 2011. vol. 206, no. 8, pp. 1110–1119.
17. Xie L., Shan K., Wang S. A generic framework and strategies for integrating AI into building automation systems for field-level optimization of HVAC systems. *Energy*. 2025, no. 333, pp. 137405. <https://doi.org/10.1016/j.en-ergy.2025.137405>.
18. Zhang H., Thilker C. A., Xiao F., Madsen H., Li R., Ma T., et al. Stochastic occupancy-integrated MPC for multi-objective optimal built environment control. *Build Simul.* 2025, no.18, pp. 1963–1999. <https://doi.org/10.1007/s12273-025-1300-4>.
19. Rauf M., Mumtaz Ja. Energy-efficient multi-objective scheduling for modern construction projects with dynamic resource constraints. *Buildings*. 2026, no. 2, pp. 392.
20. Vorobev V. S., Kvint M. Yu. Matematicheskaya model optimizatsii i upravleniya zatratami stroitel'nogo proizvodstva [Mathematical model for optimization and cost management of construction production]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of Siberian Transport University]. 2007, no. 17, pp. 26–30.
21. Sheina S. G., Balashev R. V., Zhivoglyadov G. A., Shakhiev R. D. Ustoychivoye stroitelstvo zdaniy [Sustainable con-struction of buildings]. *Inzhenernii vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2023, no. 12. Available at: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8911> (in Russ.)
22. Wang X., Dong B. Long-term experimental evaluation and comparison of advanced controls for HVAC systems. *Appl. Energy*. 2024, no. 371, pp. 123706. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123706>.
23. Luo, Z., Peng, J., Hu, M., et al Multi-objective optimal dispatch of household flexible loads based on their real-life operating characteristics and energy-related occupant behavior. *Build. Simul.* 2023, no. 16, pp. 2005–2025. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1036-y>

© С. Х. Байрамуков, З. Н. Долаева

Ссылка для цитирования:

Байрамуков С. Х., Долаева З. Н. Концепция многоцелевой оптимизации управления строительным производством // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архи-тектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 3 (57). С. 92–98.

УДК 519.852:519.876.5:004.94

DOI 10.52684/2312-3702-2026-57-3-98-106

**МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ
В ЗАДАЧАХ ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКИ: ОТ ЛОГИСТИКИ ДО УПРАВЛЕНИЯ ПОРТФЕЛЕМ**

П. М. Элькин, Е. А. Джалмухамбетова, М. В. Карташов

Элькин Павел Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Техни-ческая физика и информационные технологии», Энгельсский технологический институт – филиал Саратовского государственного технического университета имени Ю. А. Гагарина, г. Энгельс, Российская Федерация; e-mail: pashaelkin@yandex.ru;

Джалмухамбетова Елена Азатуллаевна, кандидат физико-математических наук, заведую-щая кафедрой «Математические и естественно-научные дисциплины», Каспийский институт мор-ского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф. М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: elena_jalm@mail.ru;

Карташов Максим Вячеславович, доцент кафедры «Экономика и управление на водном транспорте», Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф. М. Апраксина – филиал Волжского государственного университета водного транспорта, г. Астрахань, Российская Федерация; e-mail: elena_jalm@mail.ru