

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION



УДК 627.8.05

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-106-116>

Применение моделей машинного обучения в процесс организации строительной площадки

С.Е. Манжильевская 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ smanzhilevskaya@yandex.ru



EDN: DEMQTY

Аннотация

Введение. Стратегическое планирование важно для эффективности инвестиционно-строительных проектов. Сложность решения задач увеличивается с ростом переменных в расчетах и ограничений. Для эффективного планирования строительных площадок нужно учитывать множество факторов, таких как пространственные ограничения и расстояния между объектами. Для решения таких задач возможно применение математической модели машинного обучения — генетического алгоритма (GA) для оптимизации размещения объектов на строительном участке. Цель данного исследования — улучшение точности и гибкости решений в организации строительной площадки, уменьшение сложности вычислений и минимизация объема данных.

Материалы и методы. Реализация цели исследования возможна с помощью внедрения в процесс планирования метода Systematic layout planning (SLP) для оптимизации пространства на строительных площадках. Для подтверждения эффективности оптимизации расположения объектов метод SLP был применен в организации планирования строительной площадки административного здания. В планировании учитывали этапы производства работ, требуемые хозяйственные объекты, данные о технике безопасности и экологической безопасности территории строительства. Применение плагина Dynamo для анализа позволило скорректировать расположение объектов с учетом коэффициента использования территории.

Результаты исследования. В результате проведенного моделирования плана строительной площадки установлено, что с помощью метода SLP процесс происходит адаптировано, учитывая расположение объектов согласно установленным значениям матрицы взаимосвязей с помощью автоматизации и цветовой кодировки для упрощения анализа. Гибкость в принятии обоснованных решений важна для проектировщиков, учитывая безопасность и интенсивность рабочего процесса. Метод SLP сокращает расстояния через оптимизацию логистики, оптимизирует расположение объектов на строительной площадке с учетом ограничений. Этот гибридный подход повышает эффективность внедрения моделей машинного обучения в процесс проектирования строительных генеральных планов объектов. Интеграция генетического алгоритма и BIM-технологий в процесс организации строительной площадки помогает оптимизировать решения на основе оптимальных расстояний, совершенствует визуализацию принимаемых решений и корректировку проблем.

Обсуждение и заключение. Результаты проведенной работы способствуют эффективному и быстрому принятию решений при организации строительной площадки, минимизируя время, необходимое для анализа, по сравнению с другими подходами. В результате исследования создана система, которая не только гибка и поддается регулировке, но и преодолевает ограничения, характерные для предыдущих методов. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования оптимальных проектных решений и автоматизации установления ключевых связей может значительно уменьшить необходимость ввода данных вручную, тем самым упрощая и ускоряя процессы разработки. Добавление новых примеров разнообразных планов и пространственных ограничений укрепит основы концепции и обогатит ее применение в разнообразных инвестиционно-строительных проектах.

Ключевые слова: организация строительства, строительная площадка, алгоритмы машинного обучения, искусственный интеллект, сквозные технологии

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Манжильевская С.Е. Применение моделей машинного обучения в процесс организации строительной площадки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(2):106–116. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-106-116>

Original Empirical Research

Implementation of Machine Learning Models in the Construction Site Organization Process

Svetlana E. Manzhilevskaya 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ smanzhilevskaya@yandex.ru

Abstract

Introduction. Strategic planning is important for effectiveness of investment and construction projects. Complexity of solving problems increases with growth of variables in calculations and constraints. For effective planning of construction sites, many factors need to be taken into account, such as spatial constraints and distances between objects. To solve such problems, it is possible to use a mathematical machine learning model – a genetic algorithm (GA) to optimize the placement of objects on a construction site. The aim of this study is to improve the accuracy and flexibility of solutions in the organization of the construction site, reduce complexity of calculations and minimize the amount of data.

Materials and Methods. The realization of this goal is possible by introducing the Systematic layout planning (SLP) method into the planning process to optimize space on construction sites. To confirm the effectiveness of optimizing the location of objects, the SLP method was applied in the organization of planning the construction site of an administrative building. The planning took into account the stages of work, the required economic facilities, data on safety and environmental safety of the construction site. The use of the Dynamo plugin for analysis made it possible to adjust the location of objects taking into account the utilization factor of the territory.

Research Results. As a result of the modeling of the construction site plan, it was found that using the SLP method, the process is adapted, taking into account the location of objects according to the established values of the relationship matrix using automation and color coding to simplify analysis. Flexibility in making informed decisions is important for designers, given the safety and intensity of the workflow. The SLP method reduces distances through optimization of logistics, optimizes the location of objects on the construction site, taking into account restrictions. This hybrid approach increases the efficiency of implementing machine learning models in the design process of building master plans of facilities. The integration of the genetic algorithm and BIM technologies into the construction site organization process helps to optimize solutions based on optimal distances, improves the visualization of decisions and problem correction.

Discussion and Conclusions. The results of the study contribute to decision-making efficiently and quickly, minimizing the time required for analysis compared to some other approaches. The result of the research is the creation of a system that is not only flexible and adaptable, but also overcomes the limitations typical of previous methods. The use of machine learning technologies to predict optimal design decisions and automate the establishment of key relationships can significantly reduce the need for manual data entry, thereby simplifying and speeding up development processes. Adding new examples of diverse plans and spatial constraints will strengthen the foundations of the concept and enrich its application in a variety of investment and construction projects.

Keywords: construction organization, construction site, machine learning algorithms, artificial intelligence, end-to-end technologies

Acknowledgments. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the above comments making it possible to improve its quality.

For citation. Manzhilevskaya S.E. Implementation of Machine Learning Models in the Construction Site Organization Process. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(2):106–116. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-2-106-116>

Введение. Стратегическое планирование превращает строительную площадку в высокоорганизованный механизм, где каждый элемент подчинен логике оптимального использования пространства, времени и материальных ресурсов. Инновационные методы проектирования позволяют создавать максимально адаптивные и эффективные рабочие среды [1].

Логистическая эффективность строительных площадок зависит не только от технических параметров, но и от качества предварительного планирования. Экономические потери могут возникать из-за неправильной организации рабочего пространства, которая создает задержки и снижает общую производительность рабочих.

Объекты строительной площадки представляют собой сложные системы, где каждый элемент — от подъездных путей до внутренней инфраструктуры — играет критическую роль в общей концепции устойчивого развития. Ключевым аспектом является не просто физическое размещение объектов, а их интегрированность в общую стратегию оптимизации ресурсов для минимизации непредвиденных расходов [2]. Важно понимать, что первоначальная планировка участка под строительное производство может кардинально влиять на конечную эффективность инвестиционно-строительного проекта, трансформируя инвестиции либо в существенную экономию, либо в дополнительные непланируемые затраты.

Эффективность проекта значительно возрастает благодаря грамотному планированию расположения хозяйственных объектов. Такой подход не только оптимизирует рабочие процессы, но и создает безопасную среду, способствующую повышению производительности труда. Беспрепятственное передвижение по объекту и бесперебойное функционирование становятся возможными при тщательно продуманной организации пространства, что в конечном итоге приводит к улучшению общих показателей и маневренности на площадке.

Организация пространства на строительном участке, согласно теории алгоритмов, относится к категории задач NP-полных, что подразумевает высокую вычислительную сложность [3]. С увеличением количества переменных и ограничений сложность решения таких задач возрастает, усложняя нахождение оптимального расположения из-за быстрого увеличения количества возможных вариантов. В частности, разработка эффективных планов для строительных площадок требует учета множества факторов, включая пространственные ограничения и необходимость соблюдения определенных расстояний между объектами [4]. Для решения подобных сложных задач могут применяться разнообразные подходы, включая математическое моделирование, компьютерные алгоритмы и подходы, основанные на правилах и знаниях, каждый из которых предлагает уникальные преимущества для организации пространства на участке застройки [5].

В то время как методы, обеспечивающие наилучшие результаты, требуют значительных вычислительных усилий и времени, особенно при расширении задач, эвристические подходы выделяются своей способностью к быстрым вычислениям и адаптивности к новым условиям и проблемам [6]. Несмотря на это, основная проблема с эвристическими методами заключается в их непостоянстве в достижении наилучшего результата, что может вынудить к поиску баланса между скоростью и точностью. В условиях, где время является критическим фактором, особенно при работе с большими и сложными задачами, принято идти на компромисс, выбирая между скоростью выполнения вычислений и точностью результатов [7].

В рамках повышения эффективности разработки плана строительного участка и оптимального размещения объектов на нем рекомендуется использовать продвинутые техники математической оптимизации, в частности «генетический алгоритм» (GA) [8]. Этот метод оптимизации считается наиболее подходящим для планирования расположения объектов на строительных площадках [9]. Генетический алгоритм, вдохновленный дарвиновской теорией эволюции, эффективно решает задачи, аналогичные процессам естественной селекции и генетическим изменениям, что позволяет находить наилучшие варианты распределения пространства [10].

Алгоритмы, основанные на генетике, выделяются своей способностью к глобальному поиску и эффективно при решении нелинейных задач высокой сложности. Впрочем, внедрение их в работу может оказаться запутанным, и, как правило, они работают медленнее в процессе поиска [11]. Это, в свою очередь, повышает вероятность того, что алгоритмы могут достигнуть несовершенных решений еще до того, как будет найден действительно оптимальный ответ.

При разработке строительных генеральных планов обычно применяют проверенные временем подходы и опираются на прошлый опыт, а также руководствуются специализированными стандартами и правилами, такими как СТО НОСТРОЙ 2.33.52-2011¹ и СП 48.13330.2019², содержащими нормы по устройству стройплощадок, вместо того чтобы опираться на математические методы. Внедрение инновационных стратегий планирования в строительстве нередко сталкивается с препятствиями из-за множества факторов. Существующие математические подходы к планированию предлагают лишь частные решения, неспособные адекватно адаптироваться к переменчивым и нестабильным условиям, характерным для строительных проектов.

Одной из ключевых проблем является необходимость в значительном времени на обработку данных алгоритмами при их стремлении найти идеальные решения, что становится особенно заметно с увеличением размеров и сложности проектов. Инструмент для разработки плана стройплощадки должен быть простым в использовании,

¹ СТО НОСТРОЙ 2.33.52-2011. Организация строительного производства. Организация строительной площадки. Новое строительство. Москва: ЦНИИОМТП; 2012. 41 с.

² СП 48.13330.2019 Организация строительства. Актуализированная редакция. Москва: НИЦ «Строительство»; 2020. 87 с.

способным работать с ограниченным количеством исходных данных и готовым к адаптации под разнообразные проекты в строительстве и земельные участки. Он должен способствовать скорейшему получению результатов, при этом учитывая ключевые аспекты, такие как длительность транспортных перевозок, безопасность выполнения работ и финансовые затраты, минимизируя необходимость в глубоком анализе для достижения лучшего исхода.

Для реализации поставленной задачи оптимизации планирования строительной площадки необходимо применять гибридный подход, который объединяет профессиональный опыт, нормативы и стратегии оптимизации пространства. Его целью является улучшение точности и гибкости решений, уменьшение сложности вычислений и минимизация необходимости в больших объемах данных для ввода. В контексте упорядочивания работы на строительных площадках гибридный метод математической оптимизации Systematic layout planning (SLP), который находит широкое применение в организации пространства на производственных предприятиях и в области услуг (рис. 1), выступает как еще одна логичная стратегия для оптимизации [12].

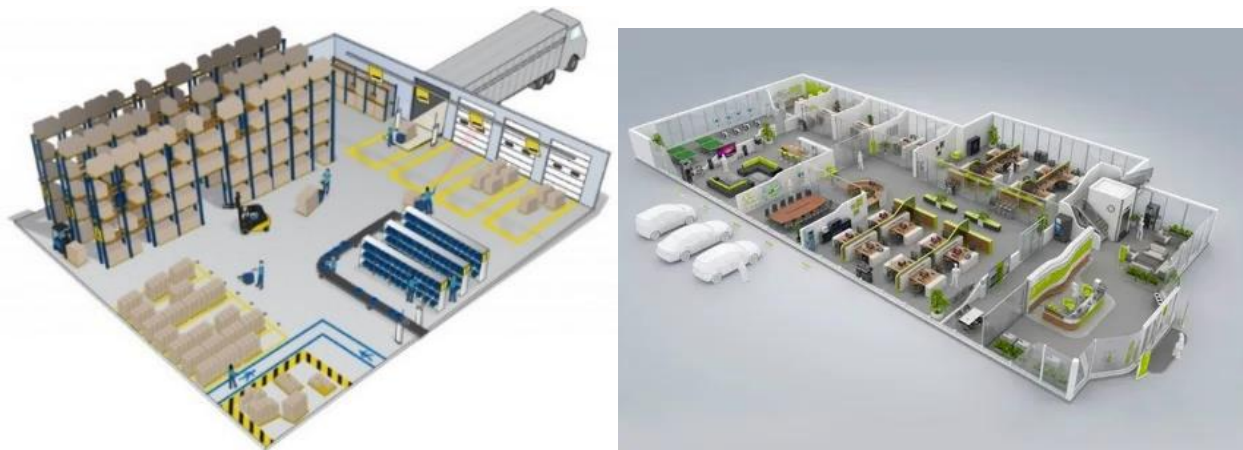


Рис. 1. Оптимизация пространства с применением метода SLP

Метод SLP уникален тем, что он позволяет применять нормы, выработанные на основе глубокого анализа связей элементов компоновки и их расположения. В свою очередь, технологии BIM предоставляют возможность эффективно организовать строительный процесс. Принципы SLP подчеркивают интегрированный подход к разработке планов строительной площадки, учитывая взаимодействия строительных процессов и оптимальное использование пространства. Применение среды для визуального программирования Dynamo и языка Python автоматизирует процессы и повышает качество планирования. Использование плагина Dynamo в Revit позволило оптимизировать планировки в BIM-среде, обеспечивая анализ в реальном времени.

Исследования, направленные на анализ эффективности методов SLP и GA, демонстрируют, что гибридные подходы приводят к успешным итогам, хотя и сталкиваются с рядом проблем [13, 14].

Во всех проведенных анализах применялся специально разработанный метод упорядочивания пространства, при котором расстановка объектов происходила в автоматизированном режиме. Пространственный объем строго соответствовал потребностям в размещении моделируемых объектов, которые были идентичны по размеру и форме. Эти аналитические работы обогащают практику новыми сведениями о синтезе разнообразных стратегий для организации пространства, однако указывают на необходимость в увеличении гибкости процессов планирования.

Цель данного исследования — улучшение точности и гибкости решений в организации строительной площадки, уменьшение сложности вычислений и минимизация объема данных.

Методы исследования. Применение технологии оптимизации расположения объектов на строительной площадке через SLP (construction site layout optimization — CSLP) является ключевым для эффективного расширения доступного пространства путем интеграции элементов в неиспользуемые зоны при соблюдении комплекса уникальных и взаимосвязанных задач и ограничений. Такой подход в планировании не только повышает общую эффективность использования земли, но и ведет к сокращению расходов на проектирование, уменьшает необходимость в перевозке строительных материалов и обеспечивает более высокий уровень доступности и безопасности для работников на площадке.

Для глубокого понимания CSLP необходимо ознакомиться с рядом ключевых терминов, среди которых особое место занимают концепции пространства, времени и аспектов структурирования. В контексте пространственного анализа особое внимание уделяется трём главным методам представления рабочей зоны. Один из методов включает в себя использование фиксированных локаций, что значительно упрощает процесс CSLP, превращая его в процесс распределения объектов по заранее определённым позициям. Другой подход разделяет территорию

на участки с помощью сетки, где каждая ячейка оборудована контрольной точкой, давая возможность эффективно использовать каждый квадратный метр для размещения предметов.

В методе, признающем пространство как непрерывное, объекты могут быть размещены где угодно на заданной территории, представляя собой непрерывную зону. Впрочем, это усложняет процесс, так как необходимо использовать более сложные алгоритмы, чтобы избежать конфликтов между объектами, и требует больше времени на обработку данных.

Для отображения объектов на стройплощадке используют формы, такие как цилиндры и прямоугольники, что позволяет точно определить расположение и размеры. Это дает ясное представление о доступных ресурсах и объектах на участке. В процессе строительства по мере готовности здания потребность в определенных объектах и занимаемом ими пространстве меняется, что напрямую влияет на продолжительность их применения на стройплощадке.

В контексте временных изменений, которые могут произойти в ходе строительства, выделяют три метода моделирования. Один из них — статический, который предусматривает постоянное присутствие всех объектов на протяжении всего срока реализации проекта, игнорируя любые временные колебания [15].

Применение метода, разделяющего процесс строительного производства на разные периоды и предусматривающего разработку отдельных вариантов на каждом этапе, помогает преодолеть некоторые ограничения. В контрасте с этим метод, который адаптируется к реальным временным рамкам каждого этапа строительства и вносит коррективы в планы в соответствии с текущими изменениями на строительной площадке, отличается от последовательного подхода, где определенные элементы проекта остаются неизменными на протяжении нескольких этапов.

Стратегии совершенствования параметров для CSLP-моделирования можно классифицировать как точные, основанные на опыте (эвристические) и смешанные методы.

Для достижения наилучших результатов применяются различные подходы. В случае использования методов, основанных на точных вычислениях, задействуются целевые функции для идентификации идеальных ответов, однако эти методы затратны с точки зрения вычислительных ресурсов, что снижает их эффективность в рамках масштабных инвестиционно-строительных проектов. С другой стороны, эвристические подходы способны предложить решения, близкие к идеалу, без необходимости выделять значительные ресурсы на поиск абсолютного оптимума. Сочетая эти два подхода, гибридные методы используют математическое моделирование и алгоритмические стратегии для повышения эффективности решений. Оптимизационные задачи формулируются с помощью математических моделей, которые включают в себя различные методы количественного анализа, включая линейное программирование, целочисленное программирование и смешанное программирование [16].

С ростом сложности задачи, вызванной увеличением числа целей и ограничений, решение становится значительно более трудоемким из-за экспоненциального увеличения сложности. Вместо того, чтобы уделять внимание только определенным целям оптимизации, применение правил, основанных на личном опыте, позволяет формировать направляющие принципы, облегчающие задачу проектировщикам. Алгоритмы, в свою очередь, ориентированы на нахождение наилучших или почти наилучших решений для тех задач оптимизации, которые по своей сути являются высоко сложными, особенно в контексте теории сложности вычислений [17].

Принципы SLP устанавливают подход к разработке пространственных планов через интегрированный подход, начиная с анализа данных и заканчивая выбором оптимального варианта планировки. В основе методологии лежит важность понимания взаимодействий между различными видами деятельности, а также необходимость определения объема, формы и типа каждого отведенного пространства. Эффективное сочетание этих объектов в рамках проекта позволяет достигать более качественных результатов в планировании. На рис. 2 представлена последовательность процедур метода SLP, показывающая результаты на каждом этапе.

Метод SLP направлен на оптимизацию пространства участка застройки, которое не только функционально, но и рационально организовано — от начального этапа анализа данных до окончательного определения планировки. Процесс, охватывающий несколько этапов, позволяет проектировщику создавать сбалансированные и продуманные пространственные концепции, выстраивая мосты между ключевыми объектами для достижения наилучших результатов. На самом начальном этапе осуществляется оценка взаимодействия ресурсных потоков в разных областях и их влияния на сферы деятельности, используя предпочтительные способы визуализации этих связей.

Данный метод облегчает понимание связей между различными объектами, предоставляя возможность создавать схемы, которые визуализируют эти связи через активность. На графиках (рис. 2) каждый элемент, похожий на ромб, отображает уровень взаимосвязи в численном выражении.



Рис. 2. Этапы моделирования строительной площадки с применением SLP

Для SLP были введены определенные обозначения уровней взаимосвязи объектов: «А» — абсолютная, «З» — значимая, «С» — стандартная, «Д» — допустимая, «Б» — необязательная и «Н» — неприемлемая. Количество линий между двумя элементами отражает степень значимости их взаимосвязи.

Сначала проектировщик собирает и анализирует данные, чтобы разработать схему, которая покажет, как объекты будут взаимодействовать между собой. Далее идет вторая фаза, где основное внимание уделяется выявлению требований к занимаемой объектом площади, необходимому оборудованию, механизмам и наличию свободного пространства для обеспечения оптимального расположения. После этого анализ переходит к этапу, на котором оцениваются потенциальные изменения в конструкции для определения их выполнимости и оптимальности, учитывая при этом стоимость, технические ограничения и вопросы безопасности. Финальная стадия процесса проектирования заключается в анализе альтернативных вариантов расположения и выборе наиболее подходящего, сравнивая их преимущества и недостатки.

В данном исследовании применяется проектный подход, известный как Design Science Research (DSR), результаты которого называются артефактами [18]. Проектирование начинается с серии шагов, выполняемых специалистом-проектировщиком, целью которых является разработка продукта-артефакта. Создание артефакта углубляет понимание исследователем задачи, что способствует улучшению процесса проектирования благодаря переосмыслению проблемы. Обычно этот процесс оценки и разработки повторяется многократно до того момента, как будет завершён итоговый проектный артефакт. Эти артефакты также имеют важное значение для развития теоретических подходов. В рамках этого проекта была разработана платформа, основанная на базе BIM-технологии, для оптимизации планирования строительных площадок с применением SLP.

На рис. 3 представлен план проекта исследования. Проект реализуется в несколько этапов: сначала определяется проблематика, затем идёт этап предложений, за ним следует разработка, после чего проводится оценка и, наконец, формулируется итог. В ходе каждого этапа были предприняты специфические шаги, ведущие к завершению исследования, что обеспечивает успешное внедрение идеи.

Для обработки данных применялись среда для визуального программирования Dynamo, язык программирования Python и программный комплекс Revit 2023, что обеспечило автоматизацию процессов CSLP. Среда Dynamo служила платформой для визуального программирования, что позволило создать информационную модель для вычислений, обеспечивая тем самым удобное и гибкое управление программными процессами с помощью системы узлов.

Этапы	Действия	Результаты
1 Определение проблемы	Определение проблемы исследования ↓ Ознакомление с нормативами планирования строительной площадки ↓ Изучение, сравнение и повышение квалификации в области языков программирования	Систематизация знаний о планировании земельного участка под строительное производство с применением метода SLP
2 Принятие решения	Организация макроэтапов на основе генетического алгоритма процедур и алгоритмов SLP	Структурирование вычислительного инструмента
3 Проведение исследования	Получение информации из нормативной документации ↓ Предварительная разработка модели алгоритма ↓ Применение математической модели в исследовании ↓ Выявление проблем и ограничений	Разработка модели на основе метода SLP
4 Оценка результатов исследования	Корректировка решений ↓ Проверка эффективности математической модели	Оптимизация проектных решений
5 Выводы по результатам исследования	Результаты исследования	Определение теоретической и практической значимости проведенного исследования

Рис. 3. План реализации исследования

В процессах визуального программирования с помощью среды Dynamo активно использовались Python-скрипты для расширения возможностей моделирования, в том числе они были применены для выполнения сложных задач, например, оптимизации планировок с помощью генетического алгоритма. Такой подход в моделировании позволил создавать множество вариантов планировок, настраивая различные параметры и отбирая наиболее эффективные решения. Взаимодействие с программным комплексом Revit через плагин Dynamo обеспечило наглядное отображение оптимизированных планировок в BIM-среде, что дало возможность провести тщательный анализ и оптимизацию процесса планирования в реальном времени.

Информационная модель для анализа дорабатывалась поэтапно по мере корректировки результатов, что способствовало ее совершенствованию и позволило достичь более высоких показателей в точности и эффективности работы. Внимательное изучение обратной связи способствовало улучшению функциональности модели, в том числе способности адаптироваться к сложным условиям строительных площадок и разрабатывать оптимальные виды планировок. Это привело к появлению новой более надежной и гибкой модели принятия решений, которая интегрировала подходы SLP и предоставила полезные инструменты для оценки степени взаимосвязи и важности различных элементов и объектов на площадке.

Первостепенно была разработана стратегия для разработки планов территории участка застройки, основываясь на опыте проектирования и нормативной документации. Далее была произведена оценка связей между различными объектами, необходимыми для расположения на строительной площадке, отмечая важность их взаимного расположения, что в целом дало возможность разработать оптимальную модель расположения объектов на строительной площадке. При помощи программного обеспечения Dynamo был реализован инструмент оценки, который вычислил общую длину путей между объектами, принимая во внимание оптимальные расстояния и взаимное расположение этих объектов. Используя генетические алгоритмы, было выбрано оптимальное расположение объектов после того, как программа автоматически сформировала эталонный план. Прогресс был оценен с использованием метода DRS (Design Science Research). Отличия между первоначальным и оптимизированным планом были выявлены благодаря коэффициенту использования территории, который демонстрировал степень достигнутого прогресса, применяя сокращенный список уровней взаимосвязи объектов в SLP до четырех для оценки степени значимости связей, которые в модели были закодированы под символами «В» — высокий уровень, «С» — средняя важность, «Н» — низкий уровень важности, и «Х» — нежелательное взаимодействие. В оценке взаимодействия объектов учитывались такие факторы, как операционная деятельность, безопасность и управленческие предпочтения, к которым может относиться, к примеру, стремление руководства разместить временные здания возле въезда на строительную площадку для облегчения доступа. В процедуре оценки уровня взаимосвязи между объектами каждая степень значимости взаимосвязи оценивалась по шкале с четырьмя уровнями: 0 — отсутствует, 1 — минимальная, 2 — средняя и 3 — высокая. Объединение этих оценок приводило к формированию индекса близости, варьирующегося от 0 (отсутствие потребности во взаимодействии) до 3 (высокая потребность во взаимодействии). Матрица взаимосвязей объектов представлена на рис. 4.

Уровни согласованности объектов на стройплощадке	Выезд	Склад хранения сыпучих материалов	Полузакрытый склад для хранения цемента	Бетоно-смесительный узел	Закрытый склад	Место складирования материала для ограждающих конструкций	Место складирования опалубки	Площадка для укрупненной сборки элементов и конструкций	Временные здания	Штаб строительства	Место накопления отходов
Выезд	ВНМ1										
Склад хранения сыпучих материалов	ННН0	ННН0									
Полузакрытый склад для хранения цемента	ННН0	ННН0									
Бетоно-смесительный узел	ННН0	ВНВ3	ВНВ3								
Закрытый склад	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0						
Место складирования материала для ограждающих конструкций	СНС2	ННН0	МНВ3	ННН0	ННН0						
Место складирования опалубки	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННС1	ННС1					
Площадка для укрупненной сборки элементов и конструкций	ННН0	ВНВ3	ННН0	ННН0	ВНВ3	ННН0	ННН0				
Временные здания	НВВ2	ННН0	ННН0	ННН0	НВВ2	ННН0	НВВ2	ННН0	ННН0	ННН0	
Штаб строительства	ВВВ3	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	
Место накопления отходов	ННС1	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ВВН1	ННН0	

Обозначение	Уровень согласованности объектов
В	Высокий
С	Средний
Н	Низкий
Х	Нежелательный

Обозначение	Уровень значимости взаимосвязи
3	Высокий
2	Средний
1	Минимальный
0	Отсутствует

Рис. 4. Матрица взаимосвязей объектов на строительной площадке

В процессе исследования метод CSLP подвергли проверке при планировании строительной площадки. Моделирование площадки производилось с целью сравнения первоначального и оптимизированного плана площадки, в результате чего была оценена эффективность оптимизации. Объектом исследования стал участок площадью 300 м² с площадью застройки 158 м², предназначенный под строительство административного здания.

В начальной стадии разработки плана особое внимание уделялось учету конструкций, находящихся в стадии возведения. Основные элементы, такие как места для входа рабочих и транспортировки материалов, а также распределение дорожной сети влияли на первоначальную настройку используемой платформы. Кроме того, важной и неизменной частью планирования был монтажный кран, расположение которого требовало значительных вычислительных ресурсов, превышающих возможности применяемого алгоритма. Для формирования единого пространства на территории застройки было произведено включение 14 новых объектов к уже имеющимся. Эти объекты имеют разнообразные габариты, ограниченные минимальными размерами, установленными проектной документацией. Приоритет был отдан компактности расположения, благодаря чему удалось создать плотно связанную матрицу взаимосвязей, которую можно увидеть на рис. 5.

Уровни согласованности объектов на стройплощадке	Выезд	Склад хранения сыпучих материалов	Полузакрытый склад для хранения цемента	Гардеробная	Закрытый склад	Место складирования материала для ограждающих конструкций	Место складирования опалубки	Столовая	Временные здания	Штаб строительства	Место накопления отходов
Выезд	ННН0										
Склад хранения сыпучих материалов	ННН0	ННН0									
Полузакрытый склад для хранения цемента	ННН0	ННН0									
Гардеробная	ВНВ3	ННН0	ННН0								
Закрытый склад	СНС2	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0						
Место складирования материала для ограждающих конструкций	СНС2	ННН0	МНВ3	ННН0	ННН0						
Место складирования опалубки	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННС1	ННС1					
Столовая	ВНВ3	ННН0	ННН0	ВНВ3	ННН0	ННН0	ННН0	ВНВ3			
Временные здания	НВВ2	ННН0	ННН0	ВНВ3	НВВ2	ННН0	ННН0	ВНВ3	ННН0	ННН0	
Штаб строительства	ВВВ3	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	
Место накопления отходов	ННС1	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ННН0	ВВН1	ННН0	

Рис. 5. Матрица взаимосвязей объектов на строительной площадке административного здания

На рис. 6 представлен первоначально запроектированный план строительной площадки и план, оптимизированный методом CSLP, где различные функциональные зоны выделены разными цветами: зеленым — стационарные объекты, красным — производственные и складские объекты, желтым — временные здания.

Применение для анализа встроенных функций Dynamo позволило оценить и скорректировать расположение объектов, учитывая коэффициент использования территории. В таблице 1 представлены результаты вычислений и сопоставление итоговых значений коэффициента застройки для двух вариантов.

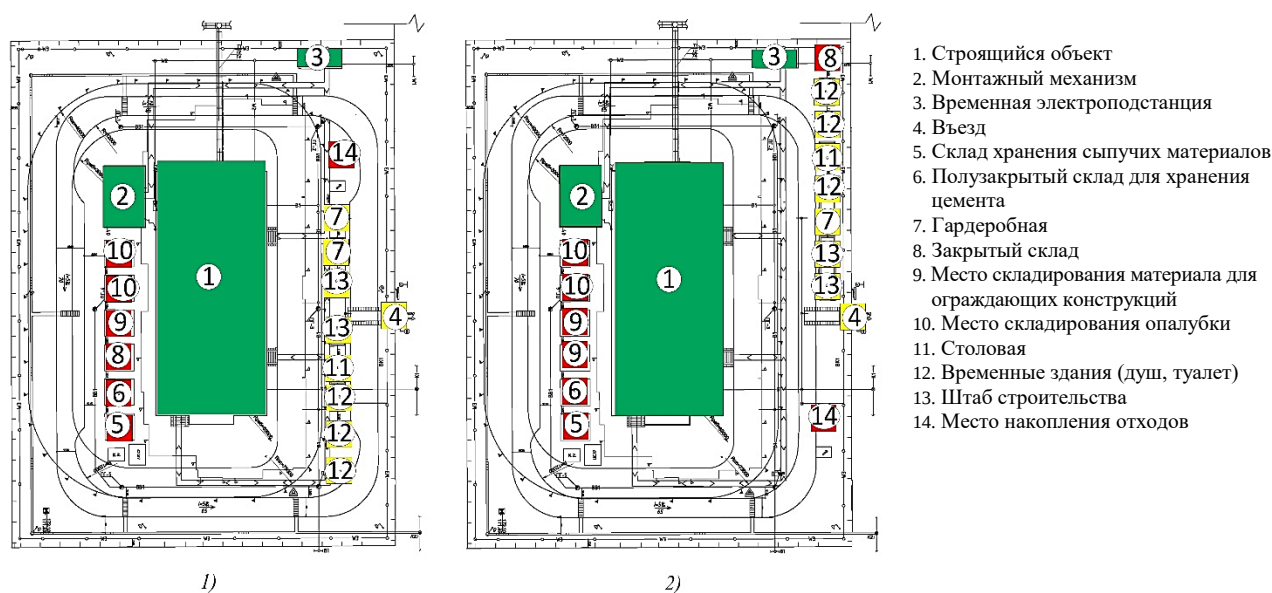


Рис. 6. Планировка строительной площадки: 1 — первоначальный план; 2 — оптимизированный план

Таблица 1

Показатели планировки участка застройки

Планировка строительной площадки	Коэффициент использования территории
Первоначальная	1,04
Оптимизированная с помощью метода SLP	1,2

Результаты исследования. Для процесса CSLP было важно адаптировать процедуры SLP, чтобы лучше соответствовать динамике в планировании строительных площадок, отличающихся от статичных планировок. В процессе производства SLP объединяет как стационарные, так и передвижные объекты, в то время как временные объекты в строительстве перемещаются по ходу производства работ. CSLP позволяет усовершенствовать матрицу взаимосвязей SLP, делая ее более удобной и интуитивно понятной за счет автоматизации и использования цветов для упрощения анализа взаимосвязи. Также CSLP учитывает интенсивность рабочего процесса и аспекты безопасности при определении взаимосвязи объектов, что способствует созданию более эффективных планировок, учитывающих ход строительного производства.

Гибкость в принятии обоснованных решений важна для проектировщиков, так как они могут учитывать ключевые факторы, такие как безопасность и интенсивность рабочего процесса. Основная цель метода SLP заключается в сокращении ненужных расстояний через оптимизацию логистики, что достигается за счет процессов принятия решений.

Метод CSLP отличается тем, что позволяет оптимизировать расположение объектов на строительной площадке для любого участка, соблюдая ограничения. Такой гибридный подход отражает выбор проектировщика при планировании и повышает доверие к инструменту в отличие от жестких критериев заранее установленных норм.

Интеграция генетического алгоритма в процесс компоновки дает возможность реализовать разнообразные решения и оптимизирует их, основываясь на оптимальных расстояниях, что значительно расширяет возможности компоновки. BIM-технологии играют ключевую роль, обеспечивая визуализацию, которая улучшает выявление проблем и их последующую коррекцию. Сочетание SLP с BIM-технологиями и генетическими алгоритмами позволяет сохранить логику оптимизации, адаптируя ее к планировке строительной площадки. Хотя изменения планировки в реальном времени на различных этапах строительного производства пока не учитываются в нормах проектирования, такой подход существенно повышает эффективность работы и минимизирует ненужные перемещения.

Обсуждение и заключение. В данной работе представлен новаторский подход к созданию совместной вычислительной среды, которая объединяет элементы стратегического логистического планирования (SLP) с функционалом BIM-платформы, формируя уникальную гибридную систему. Основное преимущество системы заключается в визуализации процесса проектирования, акцентируя внимание на оптимальной организации пространства для временных объектов с учетом таких важных аспектов, как эффективность рабочих процессов, безопасность и учет предпочтений управленческого звена. Инновация этого подхода заключается в интеграции механизмов принятия решений в процесс территориального распределения административно-хозяйственных объектов на

строительной площадке, что обеспечивает улучшение производительности труда за счет грамотной организации логистики на объекте. Эта гибридная модель успешно сочетает в себе алгоритмы машинного обучения с привлечением экспертного опыта, давая возможность эффективно генерировать различные варианты планировок с минимальным требованием к исходным данным, тем самым ускоряя процесс разработки.

В результате исследования была создана платформа для оптимизации процессов и пространства на стройплощадках, которая обеспечивает множественные функции для эффективного распределения пространства и планирования работы. Этот инструмент упрощает задачи по устройству строительной площадки, делая их более гибкими и результативными благодаря выбору наилучших стратегий действий. Платформа интегрирует возможности визуализации через BIM-технологии и следует принципам SLP для обеспечения более гибкого и результативного планирования строительных процессов. Она учитывает различные аспекты, включая эффективность рабочего процесса, безопасность и предпочтения управленческого персонала, чтобы оптимизировать расположение объектов на строительной площадке.

Данная платформа применяет методы моделирования, которые позволяют объектам занимать пространство без привязки к жестким координатам или предопределенным сеткам. Это дает возможность оптимизировать использование каждого квадратного метра, автоматически рассчитывая оптимальные размеры объектов и их размещение таким образом, чтобы избежать ненужного занимаемого пространства. Эффективная адаптация и оптимизация пространства напрямую влияет на повышение производительности труда на строительной площадке, минимизируя занимаемое пространство на участке застройки и, соответственно, финансовые издержки.

Результаты проведенной работы способствуют эффективному и быстрому принятию решений, минимизируя время, необходимое для анализа, по сравнению с другими подходами. Результат проделанной работы — это создание системы, которая не только гибка и поддается регулировке, но и преодолевает ограничения, характерные для предыдущих методов. В отличие от стандартных подходов, которые полагались на нормативы или заранее заданные шаблоны, предложенная система оперирует в рамках модели безграничного пространства, что дает возможность свободного размещения элементов. Такой подход предоставляет проектировщикам необычайно высокий уровень контроля над установлением ограничений, выбором доступного пространства и определением точек доступа.

Проведенный анализ с применением CSLP по улучшению планировки земельного участка для постройки административного здания выявил, что возможности для снижения неэффективно используемого пространства без увеличения затрат различаются в зависимости от размера проекта и его сложности.

В зависимости от сложности условий для планирования участка под строительство различные факторы, такие как ограничения по площади, многообразие и характеристики объектов, необходимость в определенном расположении, фиксированные местоположения некоторых объектов, многоуровневое размещение и нестандартные формы участков, могут ухудшать способность платформы уменьшать ненужные расстояния. Вопреки этим сложностям, метод CSLP способен значительно улучшить производительность как в простых, так и в более комплексных условиях. Тем не менее, эффективность этого инструмента ограничена качеством исходных данных и активным вовлечением проектировщика в процесс определения взаимосвязей.

Для успешного проектирования необходимо, чтобы разработчики накапливали опыт, помогающий предотвратить возможные просчеты. Однако следует учитывать, что их личные взгляды могут неосознанно влиять на конечный продукт, особенно в аспектах, касающихся установления связей и взаимодействий в системе.

В будущем внедрение моделей машинного обучения в процесс проектирования может значительно преобразиться за счет внедрения алгоритмов оптимизации. Эти алгоритмы предназначены для достижения рационального баланса между быстродействием и точностью обработки данных, что критически важно для сложных задач. Применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования оптимальных проектных решений и автоматизации установления ключевых связей может значительно уменьшить необходимость ввода данных вручную, тем самым упрощая и ускоряя процессы разработки. Добавление новых примеров разнообразных планов и пространственных ограничений укрепит основы концепции и обогатит ее применение в разнообразных инвестиционно-строительных проектах.

Список литературы/References

1. Xu M, Mei Z, Luo S, Tan Y Optimization Algorithms for Construction Site Layout Planning: A Systematic Literature Review. *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2020;27:1913–1938. <https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2019-0457>
2. Al Hawarneh A, Bendak S, Ghanim F Dynamic Facilities Planning Model for Large Scale Construction Projects. *Automation in Construction*. 2019;98:72–89. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.021>
3. Succar B Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders. *Automation in Construction*. 2009;18(3):357–375. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003>

4. Kaveh A, Vazirnia Y Construction Site Layout Planning Problem Using Metaheuristic Algorithms: A Comparative Study. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2019;43:105–115. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0148-6>
5. Jaafar K, Elbarkouky R, Kennedy J Construction Site Layout Optimization Model Considering Cost and Safety in a Dynamic Environment. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2021;22:297–312. <https://doi.org/10.1007/s42107-020-00314-3>
6. Prayogo D, Cheng M-Y, Wu Y-W, Redi AANP, Yu VF, Persada SF at al. A Novel Hybrid Metaheuristic Algorithm for Optimization of Construction Management Site Layout Planning. *Algorithms*. 2020;13:117. <https://doi.org/10.3390/a13050117>
7. Yang B, Fang T, Luo X, Liu B, Dong M A BIM-Based Approach to Automated Prefabricated Building Construction Site Layout Planning. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021;26:1535–1552. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0746-x>
8. Papadaki IN, Chassiakos AP Multi-Objective Construction Site Layout Planning Using Genetic Algorithms. *Procedia Engineering*. 2016;164:20–27. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.587>
9. Salah M, Elbeltagi E, Elsheikh A Optimization of Construction Site Layout Using BIM Generative Design. *International Journal of Construction Management*. 2024;24:314–322. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2222997>
10. Chemim L, Sotsek N, Kleina M Layout Optimization Methods and Tools: A Systematic Literature Review. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*. 2021;16(4):59–81. <https://doi.org/10.15675/gepros.v16i4.2806>
11. Said H, El-Rayes K Optimizing Material Procurement and Storage on Construction Sites. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2011;137:421–431. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000307)
12. Maghfiroh MFN, Redi AANP, Ong J, Fikri MR Cuckoo Search Algorithm for Construction Site Layout Planning. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*. 2023;12:851. <https://doi.org/10.11591/ijai.v12.i2.pp851-860>
13. Schwabe K, Teizer J, König M Applying Rule-Based Model-Checking to Construction Site Layout Planning Tasks. *Automation in Construction*. 2019;97:205–219. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.012>
14. Le PL, Dao TM, Chaabane A BIM-Based Framework for Temporary Facility Layout Planning in Construction Site: A Hybrid Approach. *Construction Innovation*. 2019;19:424–464. <https://doi.org/10.1108/CI-06-2018-0052>
15. Petroutsatou K, Apostolidis N, Zarkada A, Ntokou A Dynamic Planning of Construction Site for Linear Projects. *Infrastructures*. 2021;6:21. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020021>
16. Dienstknecht M A Branch and Bound Approach for the Tower Crane Selection and Positioning Problem with Respect to Mutual Interference. *4OR*. 2022;21:105–123. <https://doi.org/10.1007/s10288-022-00503-7>
17. Karmakar A, Singh AR, Kumar Delhi VS Automated Route Planning for Construction Site Utilizing Building Information Modeling. *Journal of Information Technology in Construction*. 2022;27:827–844. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.040>
18. Lacerda DP, Dresch A, Proença A, Antunes Júnior JAV Design Science Research: Método de Pesquisa para a Engenharia de Produção. *Gestão & Produção*. 2013;20(4):741–761. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2013005000014>

Об авторе:

Светлана Евгеньевна Манжильевская, кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](#), [ScopusID](#), smanzhilevskaya@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Svetlana E. Manzhilevskaya, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Construction Management Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ScopusID](#), [ORCID](#), smanzhilevskaya@yandex.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 17.02.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 12.03.2025

Принята к публикации / Accepted 28.03.2025