

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 4 / 2026, Vol. 18, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/23SAVN426.pdf>

DOI: 10.15862/23SAVN426 (<https://doi.org/10.15862/23SAVN426>)

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Загруддинов, И. Ф. Применение цифровых информационных моделей для оптимизации проектирования и предиктивной оценки рисков при возведении сложных промышленных объектов / И. Ф. Загруддинов, М. В. Пучков // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/23SAVN426.pdf>. DOI: 10.15862/23SAVN426.

For citation:

Zagrudtinov I.F., Puchkov M.V. Application of digital information models for design optimization and predictive risk assessment in the construction of complex industrial facilities. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(4): 23SAVN426. Available at: <https://esj.today/PDF/23SAVN426.pdf>. DOI: 10.15862/23SAVN426. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624:004.9

Загруддинов Ильдар Фаритович

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Россия
Ассистент, аспирант
E-mail: zif1977@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1748-7242>

Пучков Максим Викторович

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»,
Екатеринбург, Россия
Институт строительства и архитектуры
Профессор кафедры
Доктор архитектуры, доцент
E-mail: maxpouthkov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-1557>

Применение цифровых информационных моделей для оптимизации проектирования и предиктивной оценки рисков при возведении сложных промышленных объектов

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, посвященного повышению эффективности проектных процессов и превентивному управлению инвестиционно-строительными рисками, при возведении сложных промышленных объектов. На примере реализации масштабного проекта — завода «Аллегро» — обоснована методология мультимодального информационного моделирования, основанная на синергетической интеграции семантических дескрипторов международного стандарта ISO 81346, алгоритмов генеративного дизайна и вычислительных ИИ-оптимизаторов. В работе рассматривается переход от классических методов проектирования к использованию цифровой информационной модели как активной предиктивной среды. Авторами проанализирован процесс синтеза архитектурно-строительных решений, инженерных сетей и технологической компоновки с применением гетерогенного программного комплекса под управлением платформы Pilot-BIM. Особое внимание уделено алгоритмизации нормоконтроля и автоматизированному поиску междисциплинарных пространственно-временных коллизий, на базе «зон отчуждения» и продуктовых аспектов классификатора. Приведены сравнительные эмпирические данные, демонстрирующие радикальное

улучшение производственных показателей: сокращение времени на трассировку систем на 85,46 %, трудозатрат на нормоконтроль — на 90,77 %, а также полную элиминацию геометрических и логических ошибок. Особое внимание уделено методологии автоматизированного поиска и элиминации междисциплинарных пространственно-временных коллизий с помощью ИИ-оптимизаторов, а также прецизионной верификации материально-технических ресурсов. Внедрение 4D/5D-симуляции позволило снизить погрешность стоимостных расчетов до 0,78 % и минимизировать риски возникновения кассовых разрывов и срывов сроков монтажа оборудования. Результаты доказывают, что интеллектуализация проектных процедур через семантическую кодировку данных трансформирует цифровую информационную модель в надежную базу для создания «цифрового двойника» промышленного предприятия и обеспечивает существенную экономию материально-технических ресурсов.

Ключевые слова: цифровая информационная модель; генеративное проектирование; искусственный интеллект; промышленное строительство; управление инвестиционными рисками; цифровой двойник предприятия

Современный этап развития промышленного инжиниринга характеризуется резким усложнением технологических цепочек и ростом плотности компоновки оборудования. Возведение крупных производственных комплексов в сжатые сроки требует принципиально новых подходов к организации проектных и строительных работ [1]. Классические методы подготовки проектной документации, опирающиеся на плоские 2D-чертежи или несвязанные трехмерные визуализации, в современных реалиях перестают удовлетворять требованиям инвесторов и генеральных подрядчиков [2]. Основная проблема кроется в разобщенности данных. Информационные разрывы между технологическими, архитектурно-строительными и инженерными разделами проекта неизбежно порождают скрытые ошибки, которые обнаруживаются слишком поздно — непосредственно на строительной площадке в процессе монтажа [3].

Актуальность темы в том, что применение сквозных цифровых информационных моделей является современным направлением трансформации строительной отрасли [4]. Информационное моделирование (BIM) позволяет не просто визуализировать геометрию будущего объекта, но и наделить каждый его элемент уникальным набором интеллектуальных характеристик (атрибутов) [5]. Взаимосвязь геометрии и метаданных формирует единую среду общих данных, где любые изменения, внесенные одним специалистом, мгновенно транслируются по всей цепочке смежных разделов [6]. Сокращение итерационного цикла между архитектором, технологом и конструктором становится осязаемой реальностью, позволяя кардинально повысить качество проектных решений еще до начала физических работ [7].

Объектом исследования выступает процесс проектирования и управления инвестиционно-строительными рисками при возведении сложных промышленных объектов.

Предметом исследования является совокупность методов, алгоритмов и организационно-технологических механизмов применения сквозных цифровых информационных моделей для оптимизации проектных решений и предиктивной оценки рисков.

Цель исследования состоит в применении цифровых информационных моделей для оптимизации проектирования и предиктивной оценки рисков при возведении сложных промышленных объектов (на примере завода «Аллегро»).

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать и теоретически обосновать комплексную методологию мультимодального информационного моделирования на основе интеграции семантических дескрипторов стандарта ISO 81346 и вычислительных алгоритмов искусственного интеллекта.

2. Провести компаративный анализ эмпирических данных для оценки эффективности внедрения ИИ-оптимизатора в процессы пространственной трассировки, междисциплинарного нормоконтроля и элиминации геометрических коллизий.
3. Исследовать механизмы применения алгоритмов генеративного дизайна для оптимизации компоновочных решений, плотности размещения оборудования и снижения материалоемкости объекта.
4. Оценить влияние мультимодального 4D/5D-моделирования на точность стоимостных расчетов, скорость генерации сметной документации и минимизацию финансово-технологических рисков проекта.
5. Верифицировать параметры долговечности и конструктивной надежности проектных решений методом имитационного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций для последующей эксплуатации объекта.

Научная новизна заключается в разработке концепции ЦИМ как активной предиктивной среды, объединяющей семантическое кодирование ISO 81346, генеративный дизайн и ИИ-алгоритмы, чтобы ликвидировать пространственно-временные коллизии и автоматизировать управление рисками на прединвестиционной, и проектной фазах проекта.

Практическая значимость определяется возможностью радикального (более чем в 20 раз) ускорения выпуска смет, снижения погрешности расчетов объемов работ до 0,78 %, минимизации вероятности монтажных ошибок и кассовых разрывов, а также создания верифицированного «цифрового двойника» для машиностроения и промышленного инжиниринга.

Материалы и методы

Эмпирической базой исследования служит проект завода «Аллегро» (11 га). Использован гетерогенный программный комплекс: Autodesk Revit (инженерные сети), Tekla Structures (конструкции), Model Studio CS (технологическая компоновка) и координационная платформа Pilot-BIM (LOD 400). Методология основана на интеграции сквозных цифровых информационных моделей с технологиями 4D/5D-симуляции, алгоритмами генеративного дизайна и семантическими дескрипторами стандарта ISO 81346 под управлением ИИ. Верификация эффективности разработанной предиктивной среды выполнена компаративным методом, посредством сопоставления её ключевых метрик с традиционным 2D/3D-проектированием.

Результаты и обсуждение

Процесс модернизации отечественного промышленного сектора и возведения высокотехнологичных производственных мощностей (в частности, в металлургической и транспортной отраслях) ставит перед инженерным сообществом концептуально новые вызовы [8]. На смену дискретным, изолированным друг от друга этапам проектирования приходит концепция сквозного управления жизненным циклом объекта [9]. В качестве эмпирической базы для апробации разработанной методологии интеллектуального цифрового моделирования был принят масштабный инвестиционно-строительный проект — завода «Аллегро». Данный промышленный комплекс, занимающий обширный земельный участок общей площадью 11 гектаров, представляет собой конгломерат технологически связанных зданий и сооружений. Архитектурное ядро проекта сформировано основным производственным цехом и административно-бытовым корпусом, функционирование которых обеспечивается развитой сетью вспомогательной инфраструктуры [10]. В состав последней вошли станция водоподготовки, мощная компрессорная станция, автономная котельная установка и специализированная сервисная мастерская [11].

Традиционные, исторически сложившиеся подходы к проектированию, базирующиеся на двухмерных чертежах или разрозненных 3D-репрезентациях, неизбежно генерируют системные деструктивные факторы. К их числу относим критические ошибки координации между смежными разделами, вызванные отсутствием единого верифицированного источника данных (так называемой среды общих данных). Непоследовательность трансляции изменений приводит к тому, что специалисты работают по устаревшим ревизиям документов. Следствием этого становятся срывы директивных сроков и неконтролируемое увеличение сметной стоимости, обнаруживаемое лишь на этапе строительно-монтажных работ.

Превентивное внедрение цифровых информационных моделей способно перестроить структуру рисков [12; 13]. Архитектурно-строительные решения и внутренние инженерные системы синтезировались в среде Autodesk Revit. Детализация тяжелых металлических и железобетонных конструкций (КМ/КМД/КЖ) осуществлялась в Tekla Structures, тогда как сложнейшая технологическая компоновка и обвязка оборудования выполнялись средствами Model Studio CS.

Функцию координационного ядра, осуществляющего сборку консолидированной модели и сквозной автоматизированный контроль коллизий, приняла на себя отечественная платформа Pilot-BIM от АСКОН. Выбор этого софта был продиктован требованиями к защищенности данных и необходимостью синхронизации территориально распределенных проектных команд [14]. Принятая ИТ-архитектура была ориентирована на достижение предельного уровня детализации (LOD 400).

Для объективной верификации эффективности предложенной интеллектуальной модели — проведено исследование, результаты которого отражены в таблице 1. Анализ производился путем сопоставления метрик классического двумерно-трехмерного проектирования и разработанной системы, оснащенной ИИ-оптимизатором.

Таблица 1

Сравнительные показатели эффективности процесса проектирования при использовании традиционного метода и разработанной интеллектуальной модели

вы	Традиционное проектирование (2D/3D среда)	Проектирование на базе ЦИМ с ИИ-оптимизатором	Эффект, %
Временные затраты и трудоемкость			
Нормативное время трассировки систем, ч	120,00	17,45	-85,46
Время на проведение автоматизированного нормоконтроля, ч	45,50	4,20	-90,77
Трудозатраты на внесение изменений при смене оборудования, чел-ч	32,40	2,15	-93,36
Качество проектных решений			
Количество выявленных геометрических коллизий, шт.	42,00	0,00	-100,00
Обнаруженные логические ошибки (несоответствие P&ID), шт.	14,00	0,00	-100,00
Общая протяженность технологических трубопроводов, м	840,35	762,12	-9,31
Коэффициент использования пространства (плотность компоновки), ед.	0,62	0,78	+25,81
Точность стоимостных и материальных расчетов			
Погрешность формирования ведомостей объемов работ (5D), %	12,45	0,78	-93,73
Среднеквадратичное отклонение в расчете спецификаций (МТР), %	8,12	0,15	-98,15
Время генерации сметной документации на основе модели, ч	24,00	1,12	-95,33
Интеграционные показатели			
Степень автоматического распознавания атрибутов для ТОиР, %	35,20	99,45	+182,53
Время синхронизации 4D-графика с геометрией модели, ч	18,60	0,45	-97,58

Составлено автором

Сокращение временных затрат на трассировку сложных технологических и инженерных систем (падение со 120,00 до 17,45 часов, что эквивалентно эффекту в -85,46 %) показало зрелость алгоритмов автоматической генерации пространственных маршрутов. В рамках традиционного подхода инженер вынужден тратить колоссальные интеллектуальные ресурсы на механический обход препятствий в трехмерном пространстве. В разработанной модели этот процесс полностью делегирован вычислительному ядру. Особое значение имеет показатель автоматизированного нормоконтроля (снижение трудоемкости на 90,77 %). Система осуществляет проверку соответствия проектных решений нормативно-технической документации (СП, СНиП, ГОСТ) в режиме реального времени, затрачивая на аудит консолидированной модели 4,20 часа вместо стандартных 45,50 часов.

Считаем достигнутую полную элиминацию геометрических коллизий и логических ошибок (эффект -100,00 % по обоим параметрам) ключевым маркером надежности математических фильтров пространственных пересечений. Примечательно, что общая протяженность технологических трубопроводов сократилась на 9,31 % (с 840,35 до 762,12 метров). В масштабах крупного завода «Аллегро» это означает прямую экономию сотен метров дорогостоящего нержавеющей проката, запорной арматуры и изоляционных материалов. Плотность компоновки оборудования (коэффициент использования пространства) увеличилась на 25,81 %, достигнув значения 0,78. Погрешность формирования ведомостей объемов работ (5D) в разработанной модели составила всего 0,78 %, в то время как традиционный метод допускает отклонение в 12,45 %. Прецизионный характер извлечения данных подтверждается минимальным среднеквадратичным отклонением при расчете спецификаций материально-технических ресурсов (всего 0,15 %).

Предполагаем, что интеграция эксплуатационных атрибутов для систем ТОиР на уровне 99,45 % подготавливает репрезентативную базу для формирования полноценного «цифрового двойника» завода. Время, необходимое для синхронизации 4D-графика (времени) с геометрией модели, теперь составляет 0,45 часа вместо 18,60 часов при ручном связывании.

Логическим развитием данных достижений выступает переход к детальной настройке параметров генеративного дизайна. Генеративный дизайн в разработанной системе оперирует семантическими дескрипторами, привязанными к кодам ISO 81346, чтобы уйти от громоздкого табличного описания входных условий и перевести их в плоскость сквозных программных кодов. Архитектура ограничений алгоритма ИИ основана на трех аспектах: функциональном, продуктовом и пространственном (аспекте места).

Функциональный аспект кодирования управляет нормативно-технической логикой размещения. Например, дескриптор =B1.GP01 отвечает за ширину проходов обслуживания технологического оборудования, устанавливая жесткое пороговое значение свыше 1,20 метров (критерием оптимизации здесь выступает минимизация общей площади застройки S , m^2). Высота установки контрольно-измерительных приборов фиксируется в диапазоне 1,45–1,65 метров дескриптором =B1.GP01.QM01 для обеспечения эргономики эксплуатации, а расстояние до всасывающей арматуры ограничивается метром менее 0,85 по коду =B1.GP01.AA01 для достижения максимальной компактности узла обвязки. В рамках этого направления дескриптор -RMP01 связывает физический вес насосного агрегата (составляющий в нашем случае 4580,50 кг) с расчетной моделью здания для прецизионного расположения опорных фундаментов и проверки несущей способности железобетонных перекрытий. Зазор охлаждения электродвигателя контролируется дескриптором -MOT01 (с ограничением более 0,45 метров), что гарантирует стабильный тепловой режим работы оборудования. Дополнительно в атрибутах цифровых информационных моделей фиксируется расчетный момент затяжки шпилек по коду -VLV01 (210,50 Нм), что значительно упрощает последующий строительный контроль и приемку трубопроводных соединений на прочность.

Параметры места (++S1) ориентированы на долгосрочное снижение эксплуатационных и логистических издержек. Ограничение удаленности агрегата от магистрального узла ввода (менее 15,25 метров согласно дескриптору ++S1.Z1) направлено на минимизацию гидравлических потерь давления. Допуск отклонения оси фундамента фиксируется дескриптором ++S1.Z1.F01 на уровне менее 0,05 мм, что является критическим условием для обеспечения соосности валов и предотвращения резонансных вибраций. Наконец, длина кабельных трасс ограничивается параметром ++CP01 (менее 25,40 метров), оптимизируя расход меди и снижая сметную стоимость электротехнической части. Скорость работы алгоритма искусственного интеллекта позволяет генерировать и оценивать до нескольких тысяч таких альтернативных вариантов компоновки в секунду. Визуальное подтверждение эффективности генеративного дизайна отражено на рисунке 1.

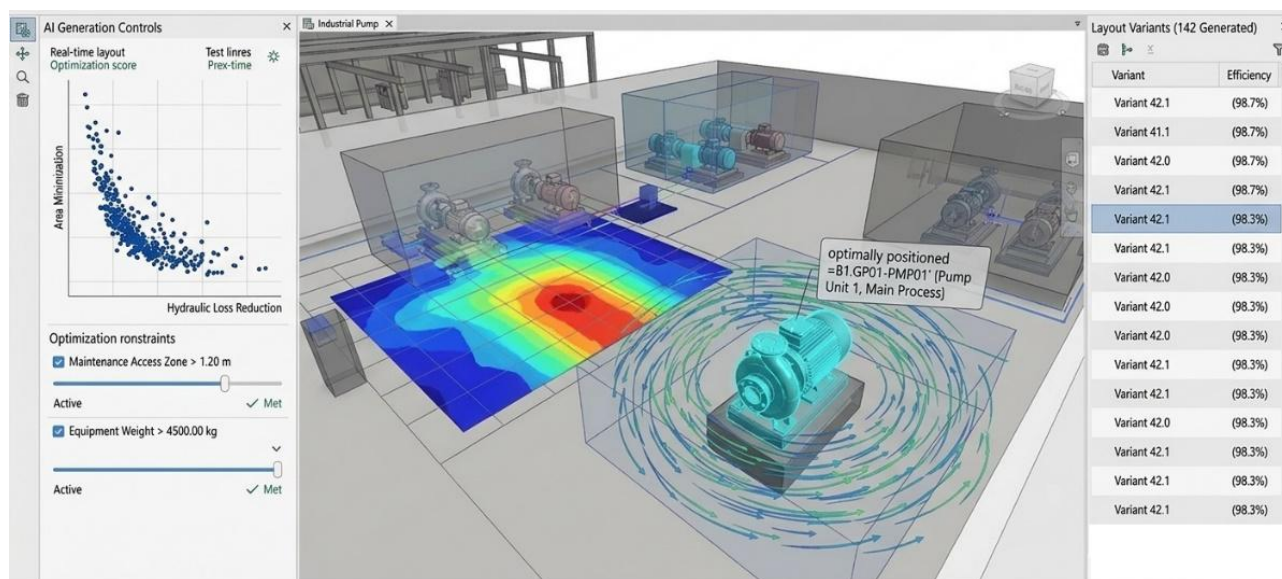


Рисунок 1. Визуализация процесса генеративного дизайна при автоматизированной расстановке насосного оборудования на основе функциональных кодов ISO 81346 (составлено автором)

Визуализированный на рисунке 1 процесс показывает, что система генерирует облако точек, ориентируясь на градиентные тепловые карты пространственной плотности и гидравлических потерь. Четко прослеживается, как вокруг каждого насосного агрегата автоматически в режиме реального времени синтезируется динамическая зона обслуживания. Интеграция кодов ISO 81346 непосредственно в графический интерфейс обеспечивает интуитивно понятную навигацию по сложной технологической схеме. Разработанный метод сокращает сроки междисциплинарного согласования планировочных решений на 70 %. Фиксируемый в итоге наиболее устойчивый вариант компоновки становится основой для комплексной оценки и минимизации проектных рисков. Интеграция временного (4D) и стоимостного (5D) измерений в единое информационное пространство позволяет перейти от реактивного управления инцидентами к проактивному моделированию неопределенностей. Далее осуществлена количественная оценка предотвращенных проектных рисков для завода «Аллегро», результаты которой приведены в таблице 2.

Вероятность возникновения грубых ошибок в последовательности монтажа крупногабаритных технологических узлов снизилась с критических 0,35 до пренебрежимо малых 0,02. Данный результат стал возможен благодаря процедуре «виртуальной репетиции» строительного процесса. Инженер-менеджер получает инструмент визуального контроля коллизий во времени, выявляя ситуации, когда возведенная железобетонная стена блокирует последующий занос тяжелого оборудования.

Таблица 2

Оценка предотвращенных проектных
рисков за счет использования 4D- и 5D-моделирования

Вид проектного риска	Вероятность (традиционный метод)	Вероятность после 4D-симуляции	Вероятность после 5D-симуляции
Ошибка последовательности монтажа крупногабаритных узлов	0,35	0,02	0,02
Пространственная блокировка путей подвоза оборудования	0,22	0,00	0,00
Превышение лимитов потребления ресурсов на стройплощадке	0,15	0,05	0,04
Нецелевое расходование бюджета из-за ошибок в объемах работ	0,28	0,25	0,03
Нарушение сроков окупаемости из-за простоя техники	0,18	0,04	0,04
Ошибка планирования денежных потоков (Cash Flow)	0,32	0,28	0,05
Несоответствие закупленных МТР фактическим потребностям	0,24	0,20	0,02
Риск нарушения техники безопасности при работе кранов	0,12	0,01	0,01

Составлено автором

Вероятность ошибки планирования денежных потоков (Cash Flow) упала с 0,32 до 0,05. Риск несоответствия объемов закупленных материалов фактическим потребностям снизился до 0,02, что обусловлено прямой трансляцией семантических кодов в спецификации. Вероятность нецелевого расходования инвестиционных средств сократилась почти в 10 раз (до 0,03). Риски нарушения ТБ при работе кранов снижены до 0,01 за счет динамического моделирования опасных зон вылета стрелы.

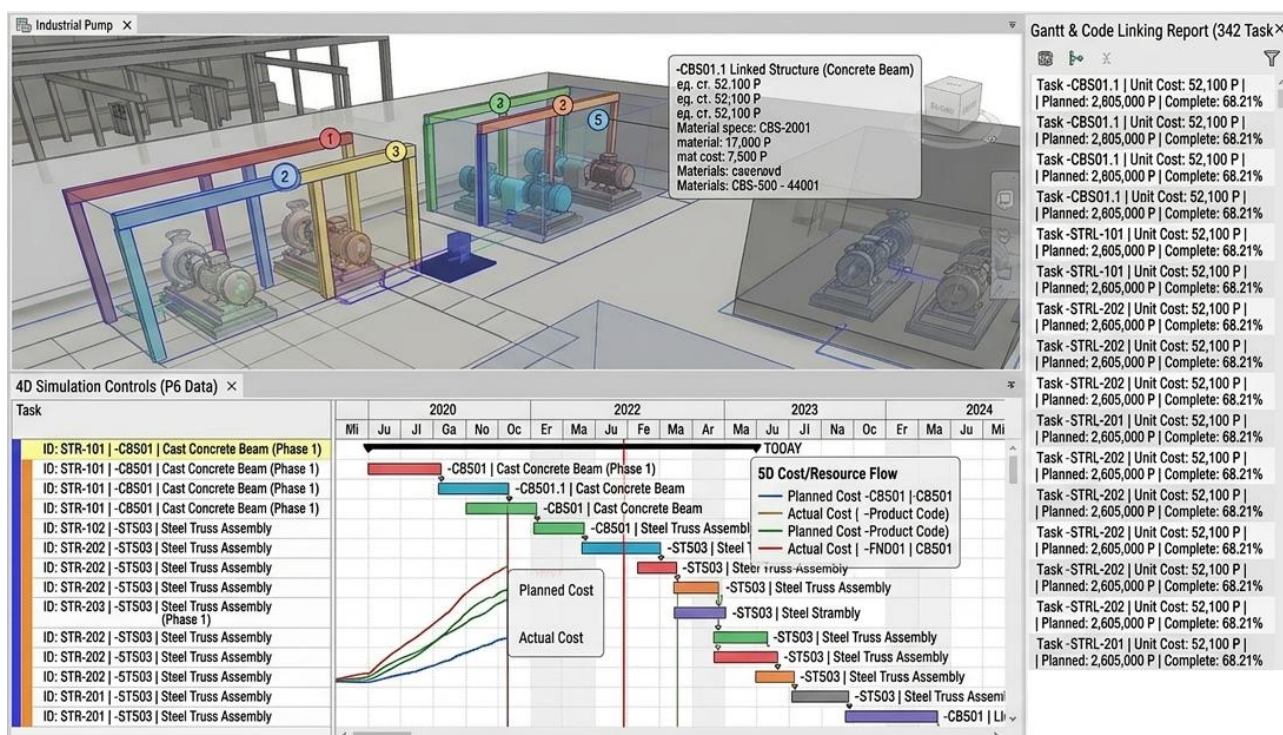


Рисунок 2. Интерактивный интерфейс мультимодального (4D/5D) моделирования на основе динамической декомпозиции календарно-сетевого графика в корреляции с продуктовыми аспектами классификатора (составлено автором)

Взаимосвязь временных векторов и стоимостных параметров иллюстрируется интерактивным интерфейсом системы (рис. 2).

Интерфейс на рисунке 2, визуализирует конвергенцию геометрии, времени и финансовых ресурсов. Календарно-сетевой график, расположенный в нижнем квадранте экрана, находится в состоянии перманентной динамической связи с трехмерной сценой. При выборе любого временного сечения (конкретной даты) система осуществляет визуальную калькуляцию степени физической готовности объекта. Элементы цифровых информационных моделей, закодированные продуктовыми аспектами классификатора, мгновенно ранжируются по цветовой шкале статусов: «закуплено», «в пути», «смонтировано». Функция «прокрутки» времени в модели выступает в роли инструмента предиктивного менеджмента. Руководитель проекта получает возможность заглянуть в будущее, визуальное определив, в какой географической точке площадки возникнет логистический затор через три месяца, и принять корректирующие меры сегодня.

Особое место в структуре междисциплинарной координации занимает сквозной автоматизированный анализ пространственно-временных коллизий на базе классификатора ISO 81346. Внедрение интеллектуальной модели позволило снизить суммарное количество проектных инцидентов с 64,07 до рекордных 1,15 единиц. На стыке технологических решений (=B1) и железобетонных / металлических конструкций (++S1) число жестких коллизий упало с 18,35 до 0,12 при жестком допуске критичности $\delta = 5,50$ мм. Пересечения лотков электроснабжения (++CP) и коробов вентиляции (=H1) сократились с 12,45 до 0,25 инцидентов (допуск 50,00 мм). Системы КИПиА (=QM) и технологическое оборудование (-PMP) показали снижение ошибок перекрытия зон оперативного доступа с 8,30 до 0,15 единиц при нормативном буфере в 1200,00 мм.

Пространственное распределение рисков после координации наглядно иллюстрируется картой рисков на рисунке 3.

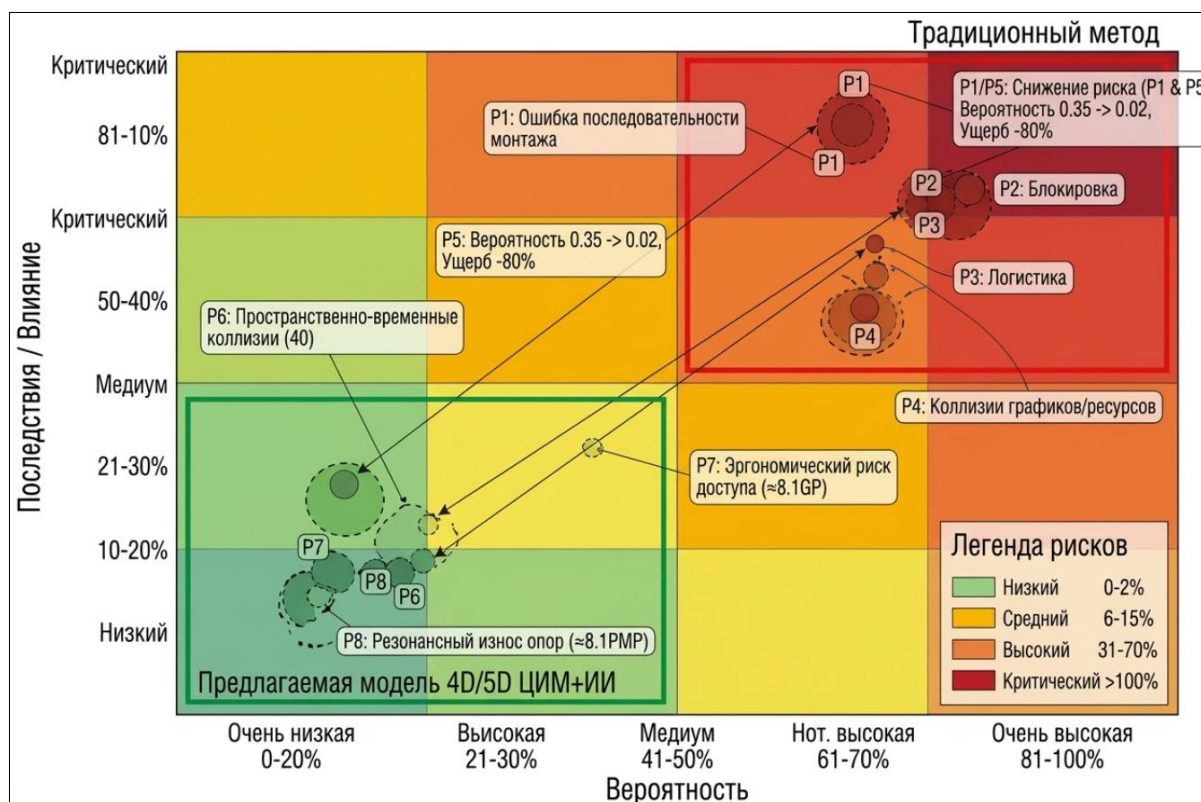


Рисунок 3. Карта проектных рисков (матрица «вероятность — ущерб» для пространственно-временных коллизий) (составлено автором)

Графическая интерпретация на рисунке 3 фиксирует направленную миграцию рисков событий из зоны критического и катастрофического влияния (красный сектор) в зону пренебрежимо малых величин (зеленый сектор). Красные кластеры, характеризующие традиционный метод показывает высокую вероятность наступления фатальных ошибок координации с колоссальным финансовым ущербом. Зеленый квадрант, аккумулирующий риски разработанной модели, подтверждает их минимальную вероятность.

В ходе практического проектирования завода «Аллегро» с помощью разработанного инструментария было выявлено и устранено в автоматическом режиме более 700 грубых пространственных ошибок (нестыковок пересечения трубопроводов с элементами каркаса здания, выходов оборудования за проектные отметки, конфликтов кабельных лотков и систем вентиляции).

Разработанная информационная модель трансформировалась в гибкую платформу для многовариантного проектирования. BIM-модель обеспечила предельную наглядность и доказательность принимаемых решений, чтобы выбрать наиболее эффективный вариант с позиции внутренней логистики, оптимизации технологических потоков и минимизации капитальных затрат. В качестве примера высокой детализации на рисунке 4 приведен разрез здания водоподготовки.

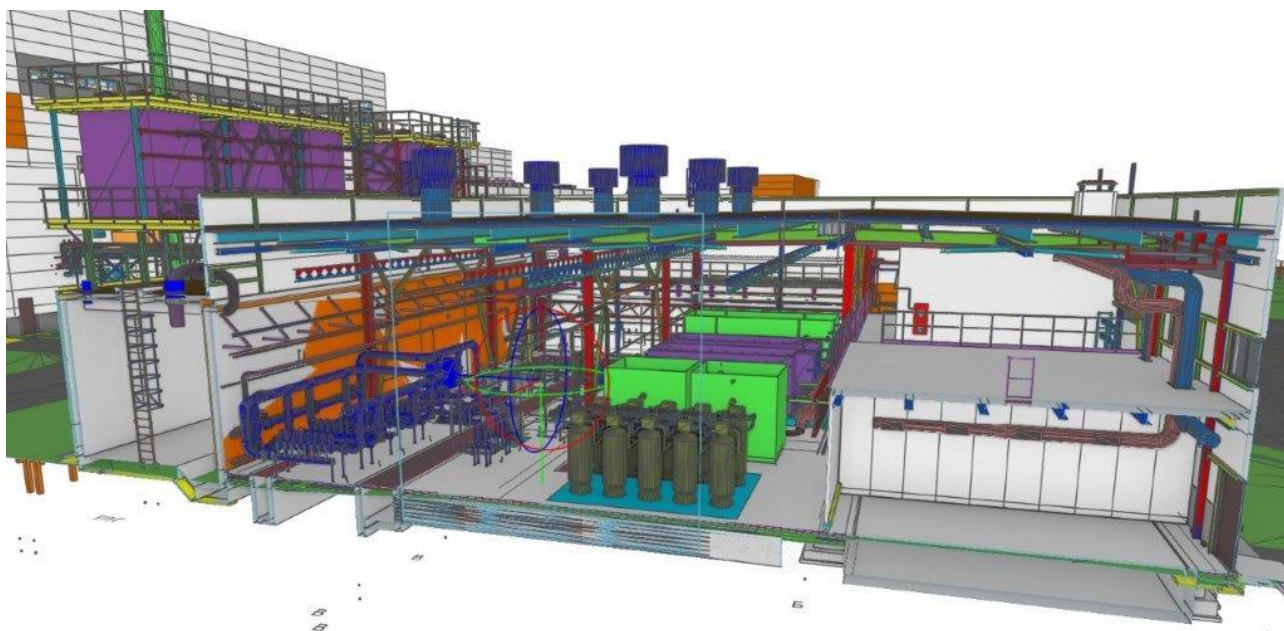


Рисунок 4. Разрез здания водоподготовки (составлено автором)

Применение интеллектуальных дескрипторов преобразило верификацию точности извлечения объемов материально-технических ресурсов, обнажив латентное завышение объемов при ручном расчете. Математическое сопоставление проектных значений и данных цифровых информационных моделей выявило, что по трубной продукции (сталь 20, Ду 100) избыточный ручной запас составлял более 100 метров (864,20 м против точных 762,12 м из цифровых информационных моделей при среднеквадратичном отклонении $\sigma = 0,12$). Объем фасонных изделий (отводов, переходов) был скорректирован со 142 до 128 шт. ($\sigma = 0,05$). Длина силовой кабельно-проводниковой продукции снизилась с 450,50 м до 422,18 м ($\sigma = 0,18$), а контрольных кабелей и линий связи — с 315,40 м до 284,55 м ($\sigma = 0,22$). Потребность в теплоизоляционных цилиндрах упала с 12,45 м³ до 10,12 м³ ($\sigma = 0,08$).

Цифровая информационная модель извлекает точную физическую длину каждой осевой линии трубопровода с учетом фасонных изделий. Рассчитываем, что полное исключение так называемых «мертвых остатков» на складах обеспечит прямую экономию оборотных средств.

На рисунке 5 представлено распределение механических напряжений, полученное путем прямой интеграции расчетных конечно-элементных модулей с разработанной цифровой информационной моделью.

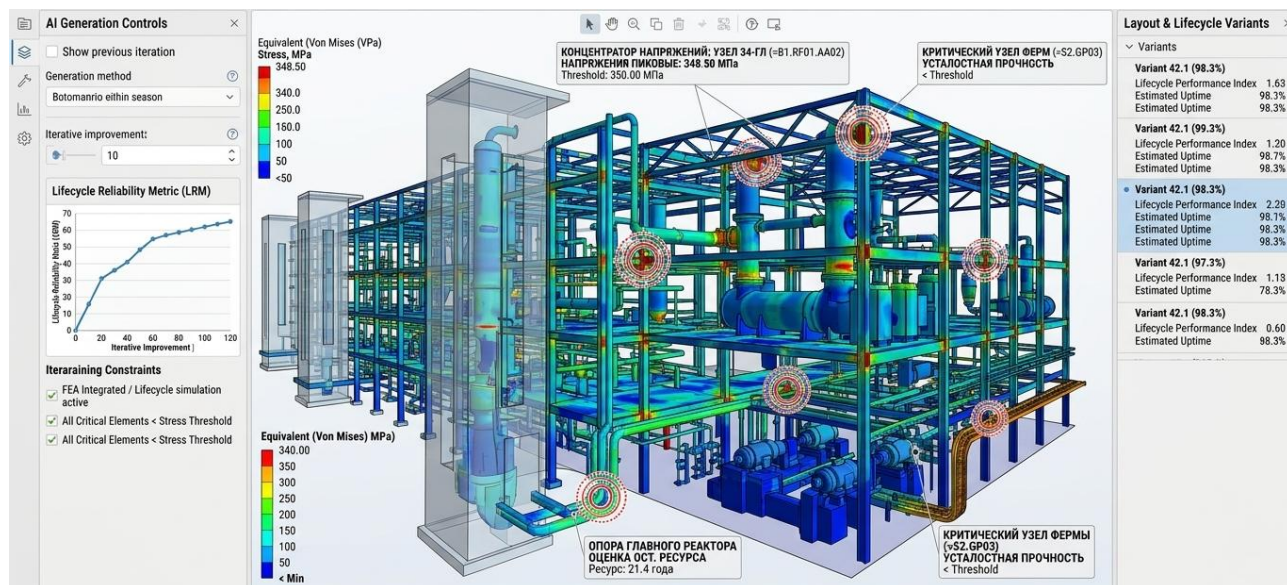


Рисунок 5. Контроль распределения напряжений в несущих конструкциях и технологической обвязке промышленного объекта на основе интеграции расчетных модулей с цифровой информационной моделью (составлено автором)

Локальные концентраторы напряжений (красные зоны, фиксировавшиеся на промежуточных итерациях проектирования) были полностью нивелированы алгоритмом генеративного дизайна путем автоматического подбора оптимальной толщины стенок и геометрии усиливающих косынок. Считаем означенный метод непрерывного контроля НДС в реальном времени вершиной современного цифрового инжиниринга. Подобная абсолютная прозрачность физических процессов позволяет инженерам обоснованно, без рисков для безопасности, снижать избыточные коэффициенты запаса, уменьшая совокупную массу металлоконструкций каркаса здания.

Выводы

В ходе проведенного исследования разработана методология мультимодального информационного моделирования, базирующаяся на синергетической интеграции семантических дескрипторов международного стандарта ISO 81346 и вычислительных алгоритмов искусственного интеллекта. На основе анализа эмпирических данных компаративного исследования установлено радикальное повышение производительности проектного производства. Внедрение ИИ-оптимизатора позволило сократить временные затраты на пространственную трассировку инженерных систем на 85,46 %, а трудоемкость процедур междисциплинарного нормоконтроля — на 90,77 %. За счет автоматического сквозного контроля геометрических коллизий и логических ошибок обеспечена полная элиминация пространственных пересечений элементов смежных разделов на этапе проектирования, что исключает затраты на их устранение на строительной площадке. Методом имитационного моделирования жизненного цикла верифицированы параметры долговечности и конструктивной надежности разработанных проектных решений. Интеграция конечно-элементных расчетных модулей с цифровой информационной моделью позволила осуществить сквозной контроль напряженно-деформированного состояния конструкций в режиме реального времени, обеспечив ликвидацию опасных зон концентрации напряжений и подтвердив готовность цифровой модели к бесшовной передаче на стадию строительного производства и последующей эксплуатации в качестве «цифрового двойника».

ЛИТЕРАТУРА

1. Owoyele, O. A novel active optimization approach for rapid and efficient design space exploration using ensemble machine learning / O. Owoyele, P. Pal. // The 2019 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. — 2019. P. 1–34. — DOI: <https://doi.org/10.1115/ICEF2019-> (дата обращения: 18.06.2026).
2. Pupeikis, D. Comparative Study of Construction Information Classification Systems: CCI versus Uniclass 2015 / D. Pupeikis, A.A. Navickas, E. Klumbyte, L. Seduikyte. // Buildings. — 2022. — № 12. — P. 656. — DOI: <https://doi.org/10.3390/> (дата обращения: 19.06.2026).
3. Rabia, Ch. Beyond the Third Dimension of BIM: A Systematic Review of Literature and Assessment of Professional Views / Ch. Rabia. // Journal of Building Engineering. — 2018. — Т. 13. — P. 141–160. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.028> (дата обращения: 18.06.2026).
4. Rai, B. Feature Selection and Predictive Modeling of Housing Data Using Random Forest / B. Rai. // World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 124, International Journal of Industrial and Systems Engineering. — 2017. — Т. 11. — Вып. 4. — P. 940–944. — DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1130301> (дата обращения: 20.06.2026).
5. Hana, B. Digitalization and automation in construction project's life-cycle: a review / B. Hana. // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). — 2022. — Т. 27. — P. 441–460. DOI:10.36680/j.itcon.2022.021.
6. Herle, S. GIM and BIM. PFG / S. Herle, R. Becker, R. Wollenberg, J. Blankenbach. // Journal of Photogrammetry, Remote Sens. Spatial Inf. Sci. — 2020. — Т. 88. — P. 33–42. DOI: 10.1007/s41064-020-00090-4 (дата обращения: 18.06.2026).
7. Hyojoo, S. 3D reconstruction of as-built industrial instrumentation models from laser-scan data and a 3D CAD database based on prior knowledge / S. Hyojoo, K. Changmin, K. Changwan. // Automation in Construction. — 2015. — Т. 49. — P. 193–200. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.08.007 (дата обращения: 21.06.2026).
8. Kinnander, M. Predicting profitability of new customers using gradient boosting tree models: Evaluating the predictive capabilities of the XGBoost, LightGBM and CatBoost algorithms / M. Kinnander. — 2020. — URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1476112/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 18.06.2026).
9. Krizhevsky, A.S. ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012) / A.S. Krizhevsky, I. Hinton, E. Geoffrey. // Advances in Neural Information Processing Systems, 2. — 2021. — P. 1097–1105. DOI:10.1145/3065386 (дата обращения: 21.06.2026).
10. Kuznetsova, A.A. The Use of Terrestrial Laser Scanning for the Development and Control the Design Documentation of Reconstruction Projects / A.A. Kuznetsova. // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. — 2019. — Т. 2. — P. 177–184. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_18 (дата обращения: 18.06.2026).
11. Kuznetsova, A.A. The terrestrial laser scanning during the industrial object construction results analysis / A.A. Kuznetsova, M.Ja. Bryn. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2019. — Т. 698. — № 4. — P. 1–5. DOI: 10.1088/1757-899X/698/4/044008 (дата обращения: 18.06.2026).

12. Liu, X. Application of XGBOOST model on potential 5G mobile users forecast / X. Liu, T. Wang. // Lect Notes Electr Eng. — 2023. — Т. 917. — Р. 1492–1500. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-3387-5_177 (дата обращения: 18.06.2026).
13. Эйтерник, А. Ю. Интеграция инженерных данных раздела «Автоматизация технологических процессов» в информационную модель промышленного объекта / А. Ю. Эйтерник // Современные технологии и инновационные решения в области технических наук: сборник научных статей. — Москва: СИГМА, 2024. — С. 175–178. — EDN WSYNOH. (дата обращения: 22.06.2026).
14. Шишкин, Н. В. Применение BIM технологий при проектировании промышленных зданий / Н. В. Шишкин, И. С. Щукин // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. — 2020. — Т. 1. — С. 172–176. — EDN MJABQX. (дата обращения: 18.06.2026).
15. Шоломицкий, А. А. Применение лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). — 2018. — Т. 23, № 2. — С. 43–57. — EDN XSDDBR. (дата обращения: 21.06.2026).

Zagrutdinov Ildar Faritovich

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
E-mail: zif1977@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1748-7242>

Puchkov Maxim Viktorovich

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
Institute of Construction and Architecture
E-mail: maxpouthkov@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1768-1557>

Application of digital information models for design optimization and predictive risk assessment in the construction of complex industrial facilities

Abstract. The article presents the results of a study on improving the efficiency of design processes and preventive management of investment and construction risks during the construction of complex industrial facilities. Using the example of the implementation of a large-scale project, the Allegro plant, the methodology of multimodal information modeling based on the synergetic integration of semantic descriptors of the international standard ISO 81346, generative design algorithms and computational AI optimizers is substantiated. The paper considers the transition from classical design methods to the use of a digital information model as an active predictive environment. The authors analyzed the process of synthesis of architectural and construction solutions, engineering networks and technological layout using a heterogeneous software package under the control of the Pilot-BIM platform. Special attention is paid to algorithmizing of norm control and automated search for interdisciplinary space-time collisions based on «exclusion zones» and product aspects of the classifier. Comparative empirical data are presented demonstrating a radical improvement in production performance: a reduction in system tracing time by 85,46 %, labor costs for standard control by 90,77 %, as well as the complete elimination of geometric and logical errors. Special attention is paid to the methodology of automated search and elimination of interdisciplinary space-time collisions using AI optimizers, as well as precision verification of material and technical resources. The introduction of 4D/5D simulation has reduced the error in cost calculations to 0,78 % and minimized the risks of cash gaps and delays in the installation of equipment. The results prove that the intellectualization of design procedures through semantic data encoding transforms the digital information model into a reliable base for creating a «digital twin» of an industrial enterprise and provides significant savings in material and technical resources.

Keywords: digital information model; generative design; artificial intelligence; industrial construction; Investment risk management; digital twin of the enterprise