

## МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРЕФАБ

**Аннотация.** В статье рассмотрен опыт применения модульного строительства и зданий заводской готовности в России и за рубежом. Проанализированы технологии изготовления модульных конструкций и современные подходы к автоматизации процессов проектирования. На основе проведенного анализа сделан вывод о недостаточном уровне внедрения технологий информационного моделирования в направлении промышленного производства модулей. В соответствии с этим целью данного исследования является повышение эффективности решения задач управления жизненным циклом модульных объектов на этапах проектирования и производства.

Для достижения поставленной цели был проведен обзор существующих производственных процессов и методов автоматизации проектирования, в частности расчета технико-экономических параметров проекта. Разработана и апробирована методика, основанная на использовании имитационной прогностической модели. Проанализированы полученные результаты, представлены возможности и преимущества применения данной методики в рамках промышленного производства по технологии префаб, сформулированы направления дальнейших исследований.

Предложенная методика существенно ускоряет разработку проекта за счет систематизации данных и повышает точность расчета компонентов проекта. Это позволяет уточнить расход материалов и ускорить процесс принятия решений на всех стадиях проектирования, а также способствует снижению риска ошибок и сокращению совокупных затрат на этапе производства.

**Ключевые слова:** информационное моделирование, жизненный цикл модульных конструкций, заводское производство, прогностическая модель, обработка информации, автоматизация проектирования.

**Введение.** Модульное строительство представляет собой технологию возведения зданий, основанную на предварительном изготовлении строительных элементов в заводских условиях [1].

Постоянное модульное строительство реализуется в части европейских стран: Великобритании, Германии, Бельгии, Нидерландах, Люксембурге, а также активно используется в Азии. Но в таких странах, как Италия, Франция, Польша, Турция, модульные объекты строятся в меньших масштабах, так в 2020 году на модульные здания приходилось до 2,50 % общего объема строительства. На территории Северной Америки (Канада, США и Мексика) процент несколько выше и до 2022 года доля производства временных и постоянных модулей составляла 6,03 % [2]. На сегодняшний день по технологии заводского изготовления производятся модули для зданий различных назначений: больницы, школы, дошкольные учреждения, гостиницы, кемпинги, многоквартирные жилые дома, частные дома, в то время как до распространения этой технологии основным направлением реализации модульных конструкций были малоэтажные здания временного назначения. По оценкам специалистов Группы «Эталон» и Министерства строительства до 2034 года доля объемно-модульных

конструкций может составлять до 30–35 % от общего объема строительства в России.

Технология заводского изготовления в России получила название «префаб» от английского слова «prefabricated (prefab)». Она позволяет сократить время строительства и повысить его качество [3]. Основные действия, такие как сборка пространственного каркаса, установка инженерных систем и оборудования, нанесение отделочных материалов производятся заранее. Модули производятся с учетом всех необходимых технических решений, коммуникаций и дизайна, что ускоряет монтаж на месте за счет упрощения сборки и привлечения меньшего количества рабочих на строительной площадке (рис. 1).

Более того, модульные конструкции обладают гибкостью (вариативностью типовых решений) и масштабируемостью, что позволяет адаптировать проекты под различные потребности и изменения [4]. Также преимущества модульного строительства заключаются в высоком качестве, удобной транспортировке, повторном использовании материалов и снижении затрат на строительство [5, 6].

С качественной точки зрения, производство модулей повышает безопасность на месте строительства, снижает риск непредвиденных экологических рисков для проекта и сокращает общий график строительства. С количественной точки

зрения, в исследовании [7] автором делается вывод о снижении затрат на твердые и мягкие материалы на 10–20 %, уменьшении количества заказов на изменение до менее чем шести процентов, з

сокращении графика строительства до 45 % и повышении производительность труда более чем на 30 %.



Рис. 1. Этапы реализации строительного проекта

Растущая потребность проектов модульного строительства требует разработки высоко детализированных чертежей, чтобы избежать потенциальных задержек, которые могут снизить эффективность этого подхода. В современных условиях эта потребность реализуются технологией информационного моделирования (ТИМ).

Авторы источников [8–10] исследуют вопрос применения ТИМ для модульного строительства. Они акцентируют внимание на эффективности, отмечая, что эта технология значительно уменьшает затраты, ускоряет сроки реализации проектов и повышает точность как в проектировании, так и других этапах жизненного цикла зданий и сооружений. Однако исследования в основном сосредоточены на использовании ТИМ для управления процессами строительства и эксплуатации модульных объектов, оставляя в стороне аспекты, связанные с проектированием, расчетами технико-экономических показателей (ТЭП) префаб-модулей. Применение информационного моделирования для этих направлений остается на недостаточном уровне, поскольку в индустрии промышленного строительства существует множество узких мест в зависимости от завода, технологии производства, используемых материалов и принятых методик разработки проекта.

В условиях заводского производства модульных конструкций особую роль приобретает точное и оперативное управление ресурсами и процессами. Прогностическое моделирование объемов материалов и затрат позволяет реализовать управление проектом модульного объекта на принципиально новом уровне: система прогнозов, основанная на данных ТИМ-модели и па-

раметрах производственной системы, обеспечивает автоматизированный расчет всех компонентов проекта с высокой степенью точности. Благодаря разработанной методике, где каждому элементу присваиваются параметры и формула расчета (с учетом габаритов модуля, материалов, станций монтажа), возможно заранее определить количественные и стоимостные показатели. Это позволяет минимизировать отклонения от проектных значений, предотвратить дефицит или избыточные поставки материалов, снизить производственные потери, сократить время проектирования и ускорить принятие решений. Такой подход обеспечивает не только повышение управляемости на стадии производства, но и создает условия для оптимизации всего жизненного цикла модульного объекта.

Поэтому есть целесообразность разработки методики проектирования, которая будет учитывать специфику производства.

**Материалы и методы.** Разработка методики и модели данного исследования включала несколько процессов. Сначала были проанализированы проектный и производственный процессы обобщенного модульного производства путем мониторинга. Во-вторых, каждый производственный процесс модуля был проанализирован для определения задач и используемых материалов и компонентов; кроме того, взаимозависимость между компонентами была проанализирована с помощью DSM (матрицы структуры зависимостей) [11]. В-третьих, был установлен общий процесс модульной сборки на основе технологии производства, определенный в результатах мониторинга и реализованных проектах. В-четвертых, этот обобщенный процесс модульной

сборки был использован для разработки имитационной прогностической модели, которая может анализировать возможные альтернативы в соответствии с характеристиками проекта (габариты, дизайнерское решение, планируемые материалы) и выполнять расчет части элементов проекта в зависимости от пункта проектной документации.

Для компоновки модульных блоков и определения оптимального технологического процесса требуется тщательное изучение процесса производства модульных блоков. В ходе этого исследования был проведен мониторинг заводского производства для анализа процесса производства модульных элементов. В качестве объекта мониторинга был выбран наиболее популярный тип модульной конструкции компании с большим опытом работы. Мониторинг включал технологию производства, работу на станциях, материалы и рабочее время.

Производственные процессы в модульных конструкциях формируются на одной производственной линии, работа выполняется в соответствии с последовательностью. Территория завода (производственных цехов) в значительной степени разделена на рабочее пространство, пространство во дворе, цех сборки оснований и укладки бетона. В частности, основание изготавливается путем заливки бетона, которая осуществляется в отдельном цехе и требует нескольких транспортных операций. За исключением отдельного цеха, производственный процесс внутреннего модуля имеет U-образную форму и состоит из линейной производственной линии (станции монтажа). В исследовании [12] авторами было выведено, что фабрики используют от 7 до 12 станций для производства единичных модулей.

Основная цель анализа модульных блоков – определить процесс производства модулей. Таким образом, для данного исследования было выбрано простое, но репрезентативное жилое модульное производство в России.

Так как технология префаб подразумевает производство модулей максимальной готовности (с проложенной электрикой, водоснабжением, сантехникой и отделкой [13]) для работы имитационной расчётной модели предполагается использование универсальной ТИМ-модели, где проектировщик в общей модели разрабатывает все инженерные системы и с помощью вспомогательных инструментов (скриптов) их рассчитывает для будущей калькуляции непосредственно в среде моделирования. Подобный подход описывается авторами статьи [15], где назначения составного классификатора в зависимости от ра-

бочих зон строительного объекта элементам задается посредством нодов Dynamo Script и Excel. Порядок решения в этом исследовании следующий:

Элементам ИМ присваивается базовое значение классификатора (код сборки). С помощью скрипта Dynamo данные элементов автоматически извлекаются с фильтрацией по уровню в таблицу Excel с подготовленным форматом. В файле Excel фильтруется код работы из подключенной базы данных тарифов федеральных единиц. Исходя из свойств полученных элементов, пользователь выбирает конкретный код, получая эталон времени и цену. Рассчитываются сроки и стоимость работ, пользователь назначает количество рабочих, машин и рабочих часов. Второй код, автоматизирует присвоение атрибутов элементам модели (каждый элемент получает классификатор работы, сгенерированный автоматически). Третий код делит конструктивный элемент по рабочим зонам (от пользователя требуется только указание границ рабочих зон линиями). Детали в границах одной рабочей зоны присваивается ее номер, для каждой детали получается подробный код работы («AK\_WorkIntegral»). Формируется график строительства (в средах таблиц MS Project или csv), в расписании каждой соответствующей конкретной работе детали присваиваются сводные классификаторы частей элементов.

При этом подходе количество времени на проектирование сокращается за счет ускорения шагов, которые состоят из монотонных одинаковых операций, следовательно, это сокращает количество ошибок, возникающих из-за человеческого фактора. Однако такие методы требуют больше времени в начале, например, по сравнению с процессами проектирования ТИМ и САПР. Дополнительное время требуется на отладку скриптов, кодов и создание элементов модели.

Для разработки модели был исследован вопрос о применении расчетных прогностических моделей для определения объемов материалов. Авторы источника [16] с помощью множественного регрессионного анализа вывели 24 фактора, влияющих на определение стоимости строительства проектов больниц. В этом исследовании была разработана модель прогнозирования затрат, где средний процент ошибки (АЕР) по всем составляющим проекта (работам, оборудованию, материалам, монтажу и т.д.) составил 4,51%. Вычисления проходили на основе 7 объектов-аналогов, была спрогнозирована стоимость и выведен средний процент ошибки по формуле (1):

$$AEP = \frac{|AC - PC|}{AC}, \quad (1)$$

где АС – реальная стоимость, полученная из данных о реализованных проектах; РС – спрогнозированная при помощи модели стоимость.

Сравнив точность оценки различных компонентов проекта, например, стоимость механических и электротехнических работ (2,53 % и 2,51 % соответственно), где относительно малый процент расхождения, с точностью определения затрат на работы на площадке и электромонтажные работы, которые показывают средний процент ошибки 8,02 % и 5,11 % соответственно, авторы смогли выделить области, подверженные неточностям оценки затрат. Это понимание позволило направить внимание на необходимость повышения точности оценки стоимости в этих критически важных секторах, тем самым снизить отклонения в расходах от цен, указанных в тендере. С внедрением этой модели по заявлению авторов лица, принимающие решения, могут лучше оценивать и управлять затратами на проекты строительства больниц.

Также рассматривалась работа [17] где проводилось прогнозирование объемов бетона для проектов цементных заводов, в частности складских сооружений и высотных конструкций. В результате ошибка прогнозирования находилась в пределах от – 13 % до 17 %.

**Основная часть.** Методика проектирования заключается в распределении всех используемых материалов по станциям монтажа и последующего автоматизированного расчета при помощи прогностической расчетной модели, то есть задача сводится к корректной классификации элементов ТИМ-модели и выгрузке массива данных в модель.

Для разработки модели были проанализированы производственный процесс сборки модуля, существующие спецификации расхода по четырем типовым проектам и функции зависимости материалов от габаритов и функционала разрабатываемого модуля. Каждому компоненту были присвоены наименование, артикул и индекс в зависимости от станции монтажа (таблица 1).

Таблица 1

### Идентификация и функционал станций

№	Индекс станции монтажа	Код станции монтажа	Наименование основных рабочих процессов на станции	Распределение по листам проекта
1	A	St.-01	Сборка каркаса основания	L.1
2	B	St.-01	Бетонирование основания	L.2
3	C	St.-02	Сборка каркаса и поверхности потолка	L.3
4	D	St.-03	Сборка каркаса и поверхности стен	L.4
5	E	St.-04	Гидроизоляционные работы пола	L.5
6	F	St.-05	Сборка всех частей каркаса модуля	L.6
7	G	St.-06	Прокладка инженерных сетей	L.7
8	H	St.-07	Укладка облицовочной плитки стен	L.8
9	I	St.-08	Установка сантехники, мебели и аксессуаров	L.9
10	J	St.-09	Закрепление элементов и упаковка модуля	L.10

При проверке ведомостей выдачи материалов на различных станциях монтажа было выявлено, что для некоторых материалов объёмы расхода не соответствуют проектным данным. В частности, расхождения наблюдались в оценках расхода, которые были связаны с человеческим фактором в процессе проектирования и/или производства. Поэтому для корректировки этих ошибок был сделан вывод о необходимости введения эталонных значений расхода. Эти данные представляют собой значения расхода материалов, полученные на основе оптимизированных расчетов согласно технологии производства и нормам расхода от производителя материала, которые исключают влияние случайных факторов и обеспечивают более высокую точность. Использование таких значений позволило выявить отклонения в данных из реализованных проектов (рис. 2).

График показывает, что по показателю МАРЕ (средняя процентная ошибка) в проектах существует неточность в оценке расхода материалов, в частности на станциях St-04, -06, -07, где имеется наибольшая ошибка (38,94 %, 18,33 % и 40,18 % соответственно) с эталонным расходом. Был сделан вывод, что проекты-аналоги имеют места, подверженные неточностям оценки затрат. Это можно нивелировать уточнением функции зависимостей на этих станциях в прогностической модели.

Схема настройки алгоритмов модели была разработана согласно структуре вычислительного эксперимента для расчета префаб-модулей в исследовании [18], где изложен концепт модели расчета, и отражена на рис. 3.

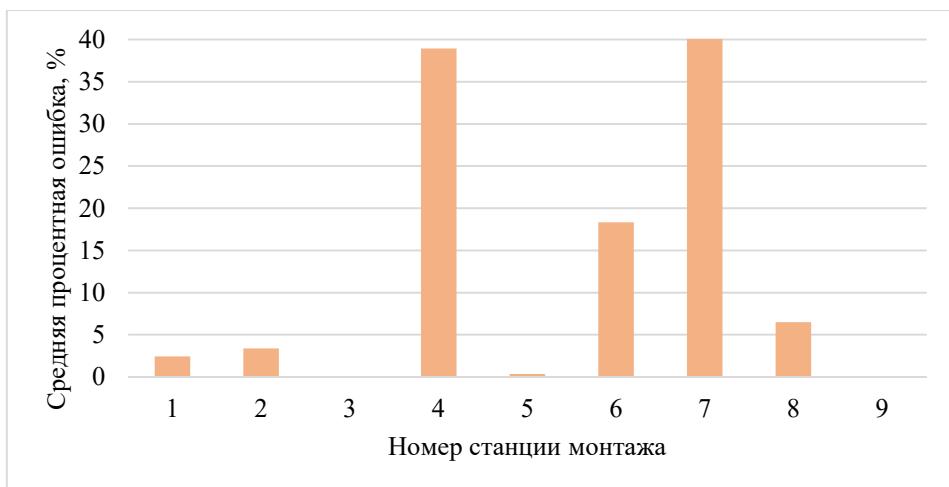


Рис. 2. Гистограмма найденных расхождений в оценке расхода материалов

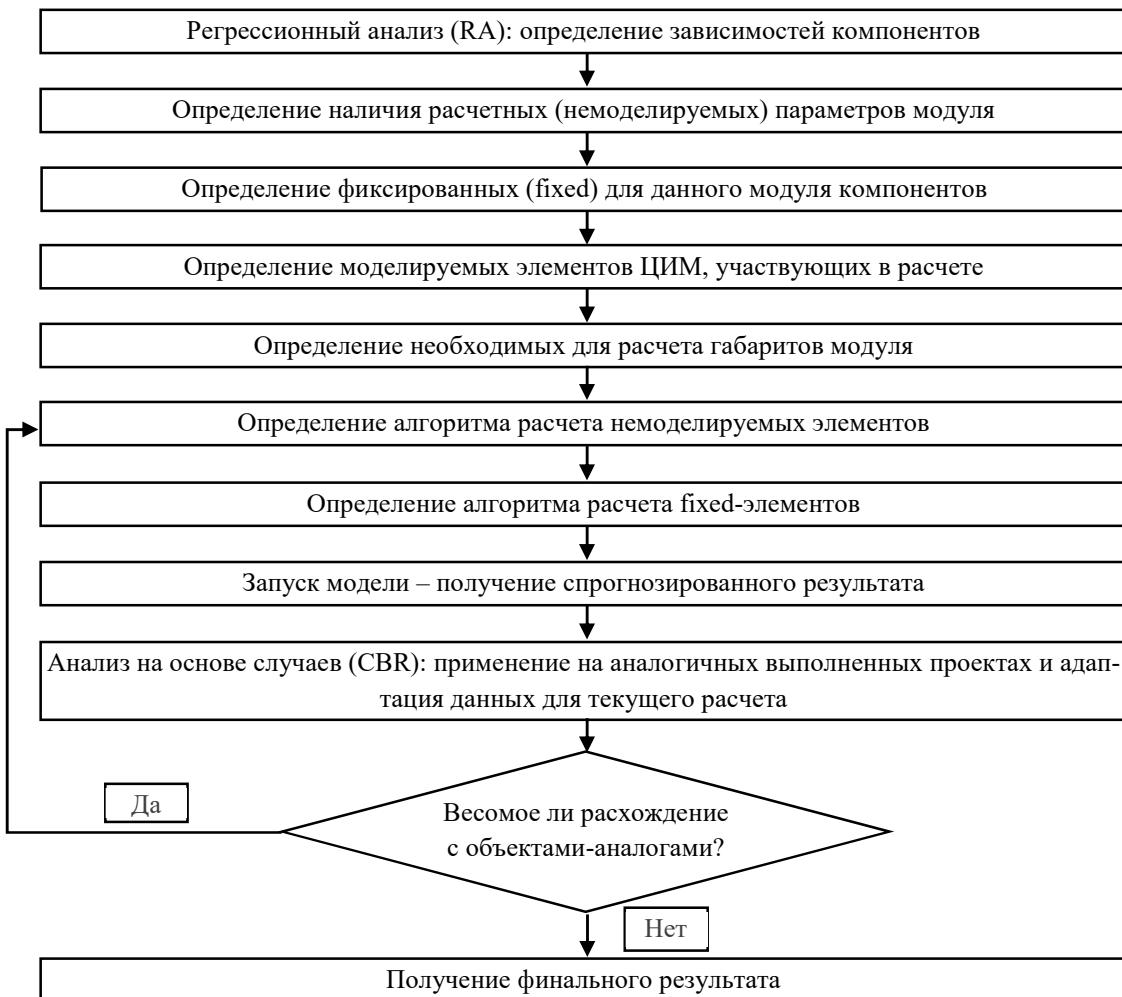


Рис. 3. Структура вычислительного эксперимента модели

Поскольку работа прогностической модели предполагает расчет по двум направлениям: фиксированные компоненты (наличие которых гарантировано для типового проекта и рассчитывается в зависимости от габаритов модуля) и немоделируемые компоненты (наличие и количество которых зависит от элементов ТИМ-модели), то в модели были созданы 2 подхода к расчету. Например, количество креплений, используемых

в пространственном каркасе из профилей, определяется согласно расходу по технологии производства (в данном случае технология компании Knauf) и габаритам модуля, как показано ниже в таблице 2. Аналогичные атрибуты были присвоены всем фиксированным позициям компонентов, количество которых, согласно технологии производства, составило 29 шт.

Таблица 2

## Примеры заполнения информации о фиксированных компонентах

Станция	Наименование компонента	Подробная информация о задаче	Индекс станции монтажа	Артикул компонента	Формула расчета
St.-03	Саморез 3,5x25 с буром фосфатированный по металлу	Крепление потолочных профилей между собой, шаг крепления 250 мм	C	Артикул 21	ОКРУГЛВВЕРХ(ЕСЛИ(«Длина модуля по осям»>2,4м;«Ширина модуля по осям»/0,25*4; «Ширина модуля по осям»/0,25*2;0)*2)

Пример немоделируемого компонента, рассчитываемого в зависимости от конкретных элементов ТИМ-модели представлен в таблице 3.

Аналогичные атрибуты были присвоены всем немоделируемым компонентам, количество наименований которых, согласно технологии производства, составило 67 шт.

Такое разделение расчета обуславливается тем, что готовые компоненты могут варьироваться в зависимости от количества проектов и количества поставщиков, производящих материалы и элементы. Таким образом, все возможные процессы и потенциальные проектные изменения могут быть внесены и рассчитаны согласно тех-

нологии изготовления типового проекта. Комбинации, созданные с помощью таких зависимостей, были сопоставлены один к одному для получения корректного расчета в прогностической модели.

Модель предполагает наличие одной производственной линии, состоящей из станций монтажа, аналогично методика предполагает разработку всех листов проектной документации в одном разрабатываемом файле, чтобы задействовать минимальное количество разработчиков проекта.

Схема реализации модели в программном обеспечении Dymamo и MS Excel (рис. 4).

Таблица 3

## Примеры заполнения информации о немоделируемых компонентах

Станция	Наименование компонента	Подробная информация о задаче	Индекс станции монтажа	Артикул компонента	Формула расчета
St.-07	Клей плиточный	Фиксация отделочной плитки на стенах, расход 9,5 кг на м <sup>2</sup>	H	Артикул 11	9,5*«Кол-во стеновой плитки»

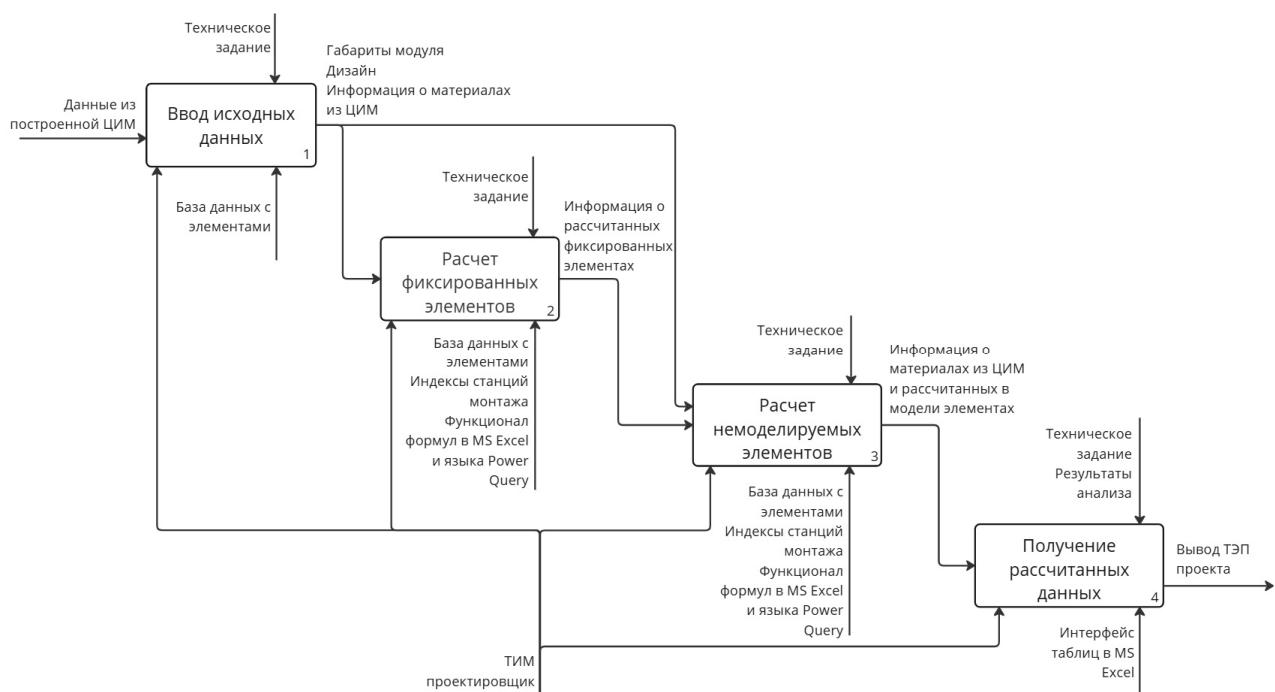


Рис. 4. Схема работы модели в программном обеспечении в формате IDEF0

MS Excel была выбрана в качестве платформы модели, потому что – это универсальная программа, использующаяся на большинстве компьютеров специалистов стран СНГ и за рубежом. Также среди Excel обладает широким инструментарием для создания ведомостей и спецификаций нужного для производства вида, а также связи с различными базами данных, в том числе, в актуальной для отечественной промышленности среде «1С», поэтому было выбрано данное ПО.

Метод оценки работы модели заключается в сопоставлении оцениваемого проекта с усредненными результатами из объектов-аналогов на

основе соизмерения связанных с разработкой проекта затрат и результатов в условиях ограничения по технологии производства. За критерий оценки в этом случае принимается минимум приведенных затрат и максимум приведенного результата [19].

Соответственно по каждой из 96 позиций компонентов проекта (фиксированные и немоделируемые) было проведено сравнение точности расчета для оценки работы модели (пример на рис. 5).

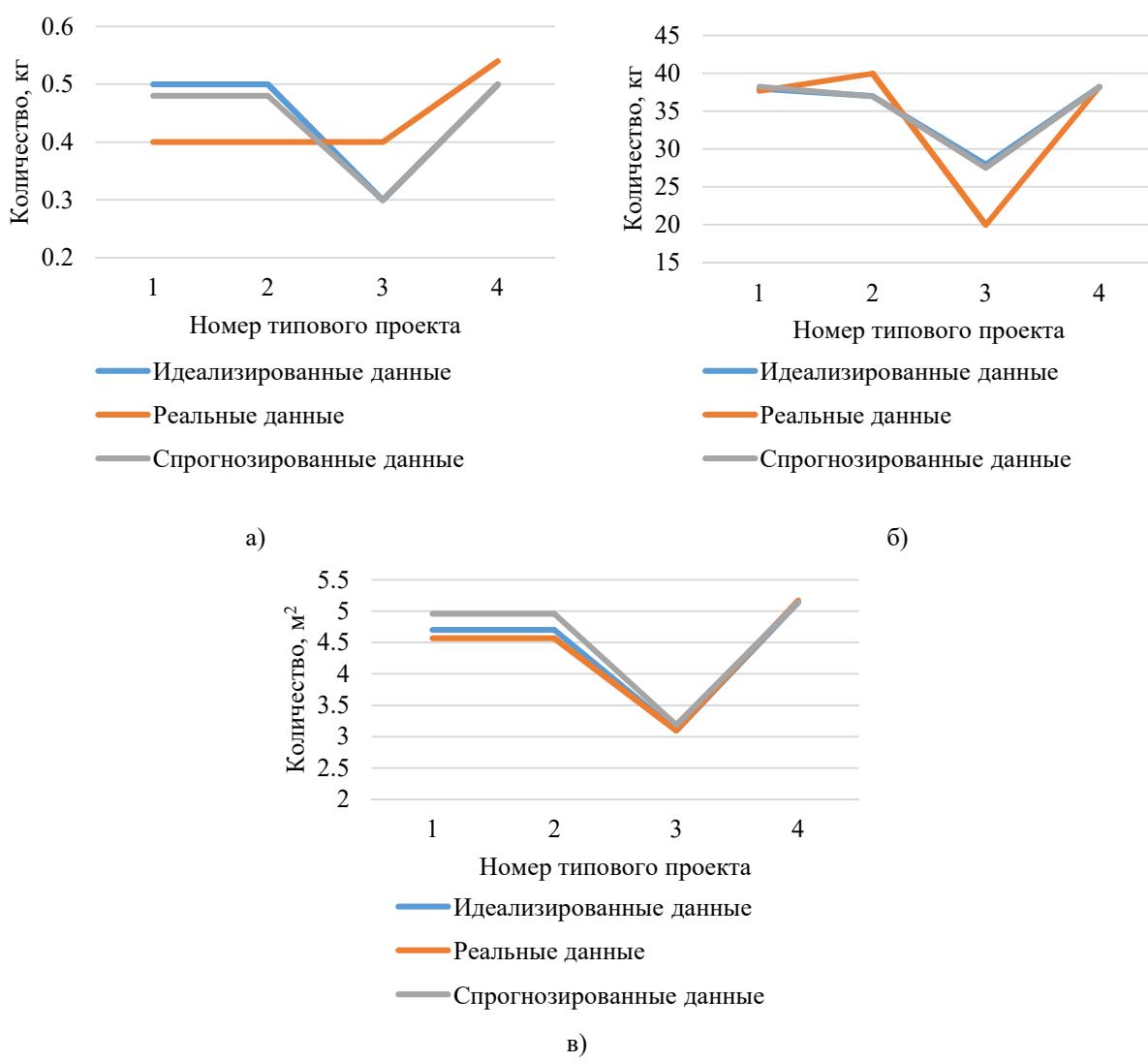


Рис. 5. Сравнение данных по расходу грунтовки (а), клея плиточного (б), пленки для гидроизоляции (в)

Таким образом, применяя регрессионный анализ, были скорректированы 96 рассчитываемых позиций компонентов для обеспечения достаточной точности расчета.

Далее были проанализированы полученные результаты для каждой станции монтажа (рис. 6).

График на рис. 6 показывает, что спрогнозированные результаты в среднем выражении по

станциям монтажа точнее данных, собранных с реализованных модульных проектов, то есть ошибка в оценке расхода материалов на рис. 2 была нивелирована в модели.

Для более точного анализа результатов в табл. 4 сведены результаты работы модели по различным проектным критериям.



Рис. 6. Сравнение точности расчета материалов по различным станциям монтажа

Таблица 4

## Критериальное сравнение результатов работы

№	Наименование критерия	Результаты в реализованных проектах	Результаты работы прогностической модели
1	Кол-во наименований компонентов	159 поз.	161 поз.
2	Диапазон средней процентной ошибки при расчете расхода (объемов) компонентов по станциям монтажа	0–40,2 %	0–12,0 %
3	Средняя процентная ошибка по расчету расхода компонентов для всего проекта	12,24 %	2,97 %
4	Средняя стоимость всех компонентов проекта	355742 руб.	350380 руб.
5	Длительность расчета компонентов	12–16 раб. ч.	0,34 раб. ч.

Суть критериального сравнения заключается в выявлении основных показателей работы модели при расчете всех элементов проекта модуля. Для заводского производства модулей важен критерий №1 для корректного заказа материалов, а на этапе производства для списания материалов со склада.

Показатель по критерию №2 позволяет выявить ошибки в расходе материалов на конкретной станции для последующего учета в логике расчета прогностической модели. Он является одним из основных, так как на каждой станции монтажа используются элементы с различными единицами измерения, поэтому был сделан вывод о необходимости сведения данной статистики в процентное выражение. Показатель №3 отражает данную статистику для всего проекта.

Критерий №4 позволяет понять, насколько имеется возможность оптимизировать процесс изготовления в стоимостном выражении в рамках одного проекта. Критерий №5 отражает эффективность применения разработанной модели по затраченному на расчет времени.

Данные критерии работы модели в сравнении с традиционным методом расчета компонентов (ЦИМ плюс ручной расчет немоделируемых

элементов) достигаются эвристическим анализом с программированием найденных закономерностей в логику работы модели.

Нахождение глобальных экстремумов решаемой оптимизационной задачи достигается посредством итерационного уточнения найденных закономерностей. Так, для работы данной модели были разработаны 9 версий модели. Результаты работы финальной версии модели, которые отражены в табл. 4, позволяют сделать вывод о целесообразности такого метода расчета в рамках разработки проектов и производства типовых модулей.

Показатель количества наименований компонентов из уже реализованных проектов (159 поз.) был проанализирован в сравнении с эталонным расходом. Сделан вывод, что показатель имеет расхождение, поэтому они были скорректированы. 161 поз. в результатах работы прогностической модели является корректным показателем на основе эталонного расхода различных материалов в объектах-аналогах.

В реализованных проектах длительность определения позиций и расчета расхода всех компонентов для проектной команды из 4 разработчиков составила от 12 до 16 ч. рабочего вре-

мени. Заполнение исходных данных и расчет расхода компонентов в предложенной модели потребовал 0,34 ч.

Для определения оптимального процесса разработки с предложенной методикой были

применены ограничивающие факторы, имеющиеся у производства по технологии префаб (рис. 7).

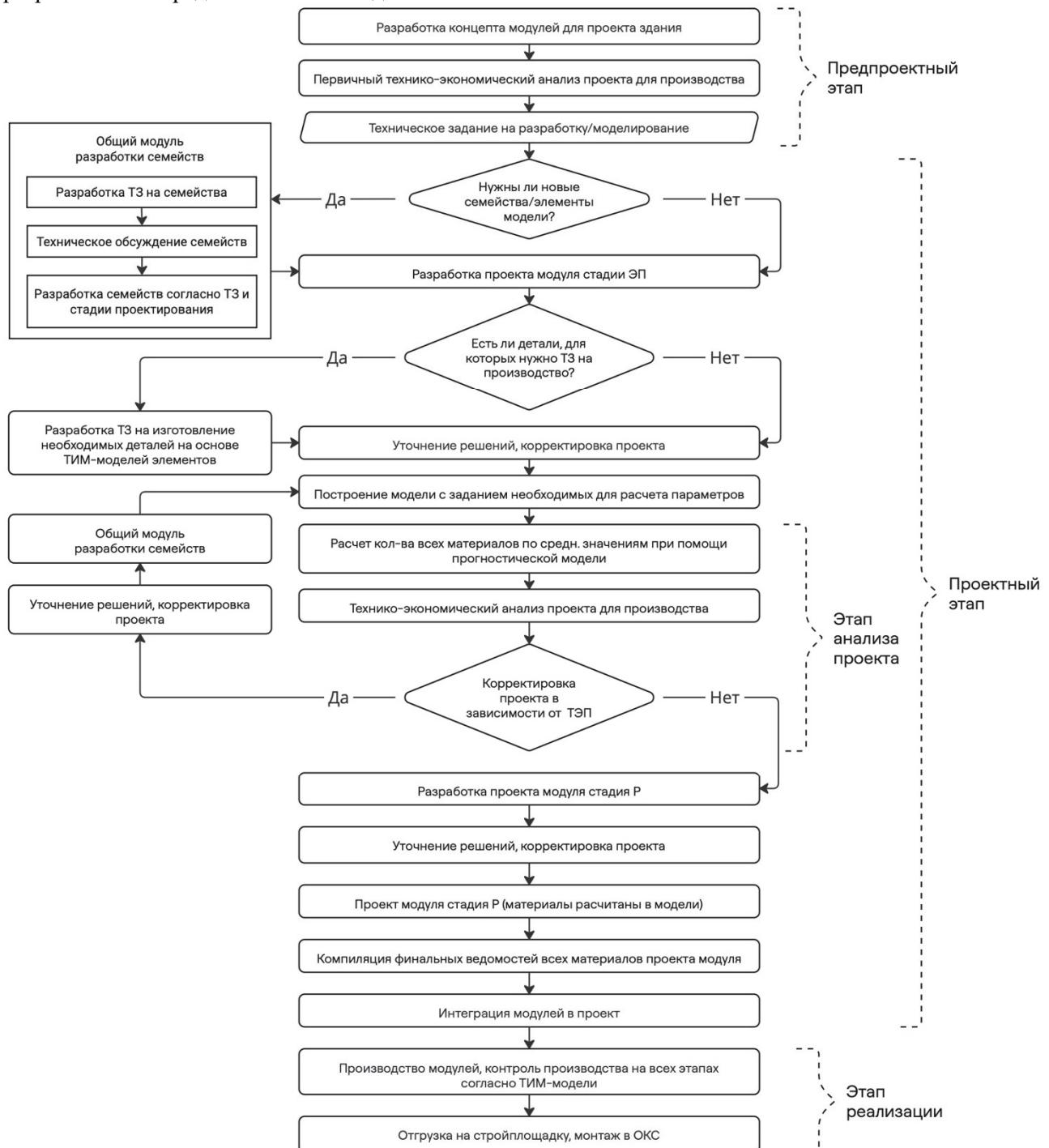


Рис. 7. Процесс реализации проекта с предложенной методикой

Апробация методики проведена на 4 реализованных проектах-аналогах. Сравнение производилось в рамках реализации проектов префаб-модулей СТМ (сантехнические модули) [20]. Было использовано небольшое количество объектов-аналогов линейного производства по станциям монтажа, но применение СТМ считается наиболее подходящим для проверки полезности разработанных инструментов проектирования,

так как такие проекты содержат все основные разделы проектной документации. В модулях устанавливаются пространственный каркас, сантехническое оборудование, элементы инженерных систем и производятся отделочные работы (пример на рис. 8). Прогностическая модель, основанная на том, что допущения близко отражают действительность [21], дала возможность

рассчитать компоненты модулей, а наличие элементов, относящихся к различным разделам проекта, позволило детально исследовать результаты.

В реализованных проектах-аналогах расчет всех элементов различных разделов проекта проходил с помощью ТИМ – связка «надстройка Dynamo-Revit плюс ручной расчет».

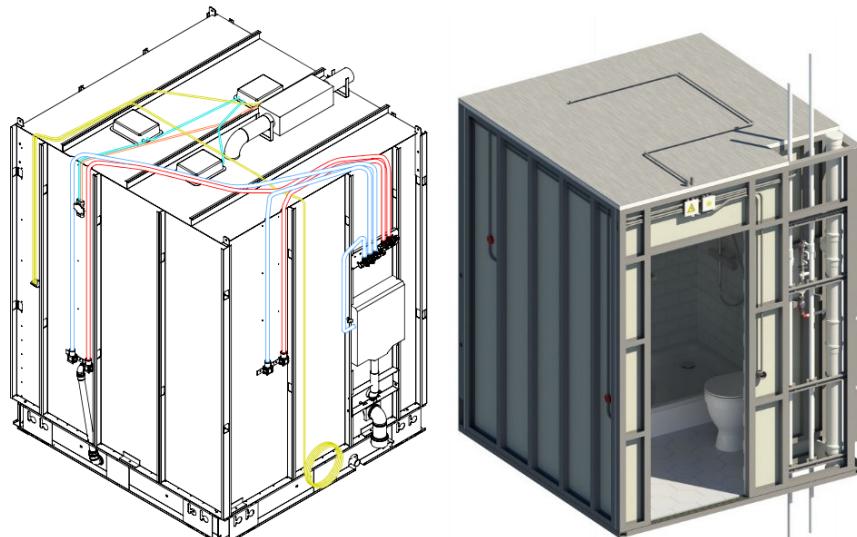


Рис. 8. Префаб-модули СТМ

Проектирование с помощью предложенной методики показало более корректный результат, чем традиционное использование ТИМ. Так, классификация используемых компонентов в зависимости от станции монтажа с последующим расчетом в прогностической модели позволили повысить точность оценки расхода компонентов на 8,99% и сократить расход материалов в стоимостном выражении на 1,51% для типового модуля, что в масштабах промышленного строительства является значимой экономией затраченных средств.

Средняя процентная ошибка в показателе расхода материалов при расчете с моделью составляет 2,97%, в то время как исследованный традиционный расчет имеет 12,24%, что показывает повышение точности калькуляции компонентов модульной конструкции. Проанализировав этот показатель, был сделан вывод, что спрогнозированные результаты достаточно точны (точность регрессионной модели составила 97,03%). Данные результаты соответствуют классификации Estimate Class 1 (диапазон точности оценок от -3 % до -10 % (нижний предел) и от +3 % до +15 % (верхний предел)), разработанной ассоциацией по развитию стоимостного инжиниринга (AACE International). Это означает, что полученные данные можно использовать в качестве основы для контроля за изменениями затрат и ресурсов. Также использование методики сокращает срок расчета материалов и элементов для модуля, что снижает длительность разработки типового проекта на 9,38 %.

Результатом данного исследования является методика проектирования на основе использования расчетной прогностической модели, которая учитывает особенности заводского производства модульных конструкций. Применение методики позволит минимизировать отклонения от проектных значений, предотвратить возможный дефицит или избыточные поставки материалов, снизить производственные потери, сократить время проектирования, ускорить принятие решений, а также увеличить эффективность управления рисками и бюджетом.

### Выводы

Разработанный процесс реализации проекта, основанный на реальном модульном строительном заводе, позволил исследовать применимость результатов этого исследования и проанализировать эффекты от применения методики.

В дальнейших исследованиях возможно рассмотрение большего спектра модульных конструкций и моделей управления строительными проектами. Такой анализ позволит получить новые данные и соотнести результаты с различными организационными структурами на предприятиях.

Итоги данной работы имеют практическую и теоретическую ценность в области модульного проектирования для производственной и строительной отрасли. Предложенная методика систематизирует данные, увеличивает наглядность использования материалов и повышает точность расчета компонентов проекта на всех стадиях проектирования, а также способствует снижению

риска ошибок и сокращению затрат на производстве. Это, в свою очередь, позволяет улучшить процесс принятия решений как на начальных этапах разработки и производственной реализации проекта.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nam S., Lee D., Cho B., Kim K. Integrated management software for factory production of modular buildings // Advances in civil engineering. 2019. Vol. 2019. № 1. Pp. 7693459. DOI: 10.1155/2019/7693459.
2. Армихос Б.Х.Э. Тенденция строительства модульных зданий в мире // Молодой ученый. 2023. № 22 (469). С. 76–81.
3. Мотылев Р.В., Кочерыгин А.А. Современные технологии в производстве сантехнических модулей заводской готовности с применением каркаса из ЛСТК // Междунар. науч.-технич. конф. Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения) Сборник докладов. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. С. 139–144.
4. Захарова М.В., Пономарев А.Б. Опыт строительства зданий и сооружений по модульной технологии // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 148–155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13.
5. Quale J. Design in Modular Construction // Journal of architectural education. 2017. Vol. 71. Pp. 119–120. DOI: 10.1080/10464883.2017.1260969.
6. Lee J., Hyun J. Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms // Journal of construction engineering and management. 2019. Vol. 145. Pp. 04018116. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001585.
7. Thompson J. Modular construction: a solution to affordable housing challenges // Cornell real estate review. 2019. Vol. 17. Pp. 90–97.
8. Зюкина А.Г., Долженкова М.В. BIM-проектирование в модульной архитектуре // VII Междунар. науч.-практич. конф. Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры Материалы. СПбГАСУ. 2024. С. 318–324. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.043.
9. Екалиев М.Ж. Внедрение информационного моделирования в модульном строительстве: преимущества и проблемы // V Междунар. науч.-практ. конф. Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных Сборник докладов. СибАДИ. 2021. С. 286–290.
10. Бачин И.О. BIM-проектирование модульных жилых домов // Вопросы устойчивого развития общества. 2022. № 5. С. 1238–1246.
11. Nam S., Yoon J., Kim K., Choi B. Optimization of prefabricated components in housing modular construction // Sustainability. 2020. Vol. 12. Pp. 10269. DOI: 10.3390/su122410269.
12. Lee J., Park M., Lee H.-S., Kim T., Kim S., Hyun H. Workflow dependency approach for modular building construction manufacturing process using Dependency Structure Matrix (DSM) // KSCE Journal of civil engineering. 2017. Vol. 21. № 5. Pp. 1525–1535. DOI: 10.1007/s12205-016-1085-1.
13. Omurtay I., Soyluk A., Ünay A. Use of BIM with modular construction in future construction techniques // MANAS Journal of engineering. 2024. Vol. 12. Pp. 29–33. DOI: 10.51354/mjen.1220152.
14. Заторский С.П., Шумилов К.А. Алгоритм получения расчетных параметров инженерных систем в среде информационного моделирования // VII Междунар. науч.-практич. конф. Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры Материалы. СПбГАСУ. 2024. С. 188–195. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.026.
15. Kuzminykh A., Kukina A., Bardina G. 4D and 5D design processes automation using databases, classification and applied programming // Smart innovation, systems and technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 667–675. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_59.
16. Alriabi M.Y., Almohsen A.S., Alsanabani N.M., Al-Gahtani K.S. Developing a cost-predictive model for hospital construction projects // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1080/13467581.2024.2397119.
17. García de Soto B. A methodology to make accurate preliminary estimates of construction material quantities for construction projects : Doctoral Thesis ETH Zurich. 2014. 215 p. DOI: 10.3929/ethz-a-010361720.
18. Заторский С.П., Шумилов К.А. Концепт модели расчета материалов для префаб-производства модульной конструкции // V Национал. науч. конф. Актуальные проблемы строительной отрасли и образования Сборник докладов. НИИ МГСУ. 2025. С. 612–617.
19. Павлюченко Е.И., Асланова Р.Р. Анализ и совершенствование методики технико-экономического обоснования и оценки проектных решений в строительстве // Региональные проблемы преобразования экономики. 2015. № 8 (58). С. 33–38.
20. Семенова М. А. Инновации в проектировании и строительстве готовых сантехнических модулей // Научный лидер. 2023. № 3 (101). С. 13–14.
21. Rausch C., Nahangi M., Perreault M., Haas C. T., West J. Optimum assembly planning for modular construction components // Journal of computing in civil engineering. 2017. Vol. 31. № 1. Pp. 04016039. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000605.

## Информация об авторах

**Заторский Савелий Павлович**, аспирант кафедры информационных систем и технологий. E-mail: saveliy\_zatorskiy@mail.ru. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Поступила 15.03.2025 г.

© Заторский С.П., 2025

**Zatorskiy S.P.**

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

E-mail: saveliy\_zatorskiy@mail.ru

## THE METHODOLOGY OF DESIGNING MODULAR STRUCTURES IN PRODUCTION USING PREFAB TECHNOLOGY

**Abstract.** The article considers the experience of application of modular construction and factory ready buildings in Russia and abroad. The technologies of manufacturing modular structures and modern approaches to the automation of design processes are analyzed. Based on the analysis it is concluded that the level of implementation of information modeling technologies in the direction of industrial production of modules is insufficient. Accordingly, the purpose of this study is to improve the efficiency of solving the problems of life cycle management of modular objects at the stages of design and production.

To achieve this goal, a review of existing production processes and methods of design automation, in particular the calculation of technical and economic parameters of the project was carried out. A methodology based on the use of simulation predictive model was developed and tested. The obtained results are analyzed, the possibilities and advantages of applying this methodology within the framework of industrial production using prefab technology are presented, and the directions of further research are formulated.

The proposed methodology significantly accelerates the project development due to the systematization of data and increases the accuracy of calculation of project components. This allows specifying the consumption of materials and accelerating the decision-making process at all stages of design, also contributes to reducing the risk of errors and reducing total costs at the stage of production.

**Keywords:** information modeling, life cycle of modular structures, factory production, predictive model, information processing, design automation.

### REFERENCES

1. Nam S., Lee D., Cho B., Kim K. Integrated management software for factory production of modular buildings. *Advances in civil engineering*. 2019. Vol. 2019. No. 1. Pp. 7693459. DOI: 10.1155/2019/7693459.
2. Armihos B.h.e. The trend of modular building construction in the world [Tendenciya stroitel'stva modul'nyh zdanij v mire]. *Young scientist*. 2023. No. 22 (469). Pp. 76–81. (rus)
3. Motylev R.V., Kocherygin A.A. Modern technologies in the production of factory-ready sanitary modules with the use of lightweight steel thin-walled frameworks [Sovremennye tekhnologii v proizvodstve santechnicheskikh modulej zavodskoj gotovnosti s primenением karkasa iz LSTK]. *Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. Naukoemkie tekhnologii i innovacii (XXV nauchnye chteniya) Sbornik dokladov. BGTU im. V.G. Shuhova*. 2023. Pp. 139–144. (rus)
4. Zakharova M.V., Ponomarev A.B. Experience in construction buildings and structures using modular technology [Optyt stroitel'stva zdanij i sooruzhenij po modul'noj tekhnologii]. *Bulletin of PNIPU. Construction and Architecture*. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 148–155. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.13. (rus)
5. Quale J. Design in Modular Construction. *Journal of architectural education*. 2017. Vol. 71. Pp. 119–120. DOI: 10.1080/10464883.2017.1260969.
6. Lee J., Hyun J. Multiple modular building construction project scheduling using genetic algorithms. *Journal of construction engineering and management*. 2019. Vol. 145. Pp. 04018116. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001585.
7. Thompson J. Modular construction: a solution to affordable housing challenges. *Cornell real estate review*. 2019. Vol. 17. Pp. 90–97.
8. Zyukina A.G., Dolzhenkova M.V. BIM design in modular architecture [BIM-proektirovanie v modul'noj arhitekture]. VII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. *Informacionnoe modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury Materialy. SPbGASU*. 2024. Pp. 318–324. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.043. (rus)
9. Eskaliev M.Zh. Implementing information modeling in modular building: benefits and challenges [Vnedrenie informacionnogo modelirovaniya v modul'nom stroitel'stve: preimushchestva i problemy]. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. *Fundamen-*

tal'nye i prikladnye issledovaniya molodyh uchonykh Sbornik dokladov. SibADI. 2021. Pp. 286–290. (rus)

10. Bachin I.O. BIM design of modular residential buildings [BIM-proektirovanie modul'nyh zhilyh domov]. Issues of sustainable development of society. 2022. No. 5. Pp. 1238–1246. (rus)

11. Nam S., Yoon J., Kim K., Choi B. Optimization of prefabricated components in housing modular construction. Sustainability. 2020. Vol. 12. Pp. 10269. DOI: 10.3390/su122410269.

12. Lee J., Park M., Lee H.-S., Kim T., Kim S., Hyun H. Workflow dependency approach for modular building construction manufacturing process using Dependency Structure Matrix (DSM). KSCE Journal of civil engineering. 2017. Vol. 21. No. 5. Pp. 1525–1535. DOI: 10.1007/s12205-016-1085-1.

13. Omurtay I., Soyluk A., Ünay A. Use of BIM with modular construction in future construction techniques. MANAS Journal of engineering. 2024. Vol. 12. Pp. 29–33. DOI: 10.51354/mjen.1220152.

14. Zatorskiy S.P., Shumilov K.A. Algorithm for obtaining design parameters of engineering systems in the information modeling environment [Algoritm polucheniya raschetnyh parametrov inzheinernyh sistem v srede informacionnogo modelirovaniya]. VII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Informacionnoe modelirovaniye v zadachah stroitel'stva i arhitektury Materialy. SPbGASU. 2024. Pp. 188–195. DOI: 10.23968/BIMAC.2024.026. (rus)

15. Kuzminykh A., Kukina A., Bardina G. 4D and 5D design processes automation using databases, classification and applied programming. Smart innovation, systems and technologies. 2022. Vol. 247. Pp. 667–675. DOI: 10.1007/978-981-16-3844-2\_59.

16. Alriabi M.Y., Almohsen A.S., Alsanabani N.M., Al-Gahtani K.S. Developing a cost-predictive model for hospital construction projects. Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2024. Pp. 1–18. DOI: 10.1080/13467581.2024.2397119.

17. García de Soto B. A methodology to make accurate preliminary estimates of construction material quantities for construction projects : Doctoral Thesis ETH Zurich. 2014. 215 p. DOI: 10.3929/ethz-a-010361720.

18. Zatorskiy S.P., Shumilov K.A. Concept of a material calculation model for prefab production of modular design [Koncept modeli rascheta materialov dlya prefab-proizvodstva modul'noj konstrukcii]. V Natsional. nauch. konf. Aktual'nye problemy stroitel'noj otrazhi i obrazovaniya Sbornik dokladov. NII MGSU. 2025. Pp. 612–617. (rus)

19. Pavlyuchenko E.I., Aslanova R.R. Analysis and improvement of the methodology of feasibility study and evaluation of design solutions in construction [Analiz i sovershenstvovanie metodiki tekhniko-ekonomiceskogo obosnovaniya i ocenki proektnykh reshenij v stroitel'stve]. Regional problems of economic transformation. 2015. No. 8 (58). Pp. 33–38. (rus)

20. Semenova M. A. Innovations in the design and construction of prefabricated sanitary modules [Innovacii v proektirovaniye i stroitel'stve gotovyh santechnicheskikh modulej]. Science leader. 2023. No. 3 (101). Pp. 13–14. (rus)

21. Rausch C., Nahangi M., Perreault M., Haas C.T., West J. Optimum assembly planning for modular construction components. Journal of computing in civil engineering. 2017. Vol. 31. No. 1. Pp. 04016039. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000605.

#### Information about the authors

**Zatorskiy, Saveliy P.** Postgraduate student. E-mail: saveliy\_zatorskiy@mail.ru St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 190005, St. Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya st., 4

Received 15.03.2025

#### Для цитирования:

Заторский С.П. Методика проектирования модульных конструкций при производстве по технологии префаб // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 12. С. 49–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-49-61

#### For citation:

Zatorskiy S.P. The methodology of designing modular structures in production using prefab technology. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 12. Pp. 49–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-12-49-61