

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Шик Алшабаб Мари

Интегральный учёт средствами BIM энергозатрат на строительные материалы в течение всего производственного и инвестиционно-строительного проекта

Направление подготовки: 08.06.01 Техника и технологии строительства
Направленность (профиль): 05.23.01 Строительные конструкции, здания и сооружения

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт-Петербург

2021

Научно-квалификационная работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, ФГАОУ
ВО Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого

Николай Иванович Ватин

Официальные рецензенты:

доктор технических наук, профессор,
Ташкентский институт инженеров
иригации и механизации сельского
хозяйства

Базаров Дильшод Райимович

доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого, высшая школа
промышленно-гражданского
и дорожного строительства,

Корсун Владимир Иванович

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Актуальность темы исследования	4
Проблема исследования.....	5
Цель и задачи исследования.....	6
Объект и предмет исследования	7
Научная новизна исследования.....	7
Теоретическая значимость исследования	8
Практическая значимость исследования.....	8
Положения, выносимые на защиту.....	9
Степень достоверности результатов.....	9
СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ	11
Исследовательская задача 1: определить, что такой BIM эскиз для симуляции LCA.....	12
Исследовательская задача 2: разработать методологию для использования BIM инструмента Revit для проведения iEE-LCA оценки здания	16
<i>Исследовательская задача 2.1: оценка качества баз данных коэффициентов строительных материалов</i>	<i>16</i>
<i>Исследовательская задача 2.2: оценка и оптимизация точности расчета количества строительных материалов из BIM модели</i>	<i>18</i>
Исследовательская задача 3: разработать систему оценки точности BIM эскиза для симуляции iEE-LCA.....	32
ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	34
СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА.....	36
БИБЛИОГРАФИЯ.....	37

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Современный мир сталкивается с серьезными экологическими проблемами, такими как глобальное потепление, истощение озонового слоя, накопление отходов и т.д. За последние несколько десятилетий исследования показали, что глобальный климат быстро меняется [1; 2], а также выявили тот факт, что эти изменения будут продолжаться со временем [3]. Для того чтобы обратить вспять эти изменения и ограничить их последствия, необходимо предпринять шаги в различных секторах. Строительный сектор является одним из основных потребителей энергии. На здания приходится 40% потребления первичной энергии и 72% потребления электроэнергии. Приблизительно 10% всего мирового конечного потребления энергии происходит при производстве строительных материалов [4]. Ежегодно здания потребляют 3 миллиарда тонн сырья, что составляет 40% от общего объема сырья в мире. Здания занимают первое место по уровню углеродного следа по сравнению с другими отраслями промышленности [5; 6]. Здания также ответственны за более чем 13% потребления питьевой воды. Отходы строительства и сноса составляют около 40% всех твердых отходов в развитых странах [4]. В связи с постоянно растущим дефицитом ресурсов и повышением стоимости энергии, минимизация энергопотребления и ограничение выбросов парниковых газов, связанных со строительной отраслью, становятся все более актуальными задачами. Поэтому строительная индустрия инвестирует в устойчивое проектирование и строительство [7]. Такие требования к устойчивости в строительном секторе можно увидеть в глобальных климатических амбициях, заявленных в Парижском соглашении, которые требуют 30% улучшения энергопотребления на квадратный фут зданий к 2030 году [8].

Повышение осведомленности о последствиях воздействия зданий на окружающую среду меняет способы их проектирования. Оценка жизненного цикла (Life Cycle Assessment or LCA) — это экологическая рамка, которая измеряет потребление и воздействие на окружающую среду различных процессов и продуктов, включая здания. LCA здания измеряет воздействие на окружающую среду всех видов деятельности и процессов на протяжении четырех этапов жизненного цикла здания. Начиная с (1) производства строительных материалов и изделий; (2) возведения этих материалов и изделий в здание; через (3) эксплуатацию и техническое обслуживание; и, наконец, через (4) снос и утилизацию.

LCA строительного материала рассчитывается путем умножения коэффициентов материалов, измеряющих воздействие на окружающую среду, на количество каждого материала,

используемых во всем здании. Часто объем LCA здания ограничивается измерением только определенных этапов жизненного цикла. Одним из распространенных примеров этого является оценка первоначальной воплощенной энергии (initial embodied energy or iEE) строительных материалов. iEE-оценка измеряет объём энергозатрат на деятельности и процессы, вовлеченных в производство строительных материалов на первом этапе жизненного цикла здания.

Исследователи часто утверждают, что переход строительной отрасли к зданиям с низкими или нулевыми эксплуатационными энергозатратами, или то, что называется оперативной энергии (operative energy or OE), сделает расчеты воплощенной энергии (embodied energy or EE) более важными [9–13]. Здание с низкой или даже нулевой эксплуатационной энергией, но с высоким показателем iEE может быть не лучшим вариантом с точки зрения экологической устойчивости. Данные литературы [14] показывают, что при эксплуатационных энергозатратах ниже 33 кВтч/м² в жилых зданиях iEE превышает 50% энергии жизненного цикла здания. Более того, исследования подтверждают выявленную необходимость в точных результатах моделирования для улучшения оценки характеристик здания на ранней стадии проектирования [15; 16]. Таким образом, в данном исследовании рассматривается вопрос о том, как интегрировать iEE-LCA на ранней стадии проектирования здания для эффективного учета воздействия на окружающую среду при оценке различных проектных решений.

Проблема исследования

LCA строительных материалов – это сумма произведений коэффициентов LCA каждого строительного материала на количество этого материала, используемого во всем здании. Из-за своих размеров и сложности здания используют большое количество материалов и продуктов. Это делает расчет LCA строительных материалов сложным процессом, что приводит к неэффективной его интеграции в практику и решения проектировщиков зданий. Это ограничивает использование экологической рамки LCA в качестве инструмента для оказания помощи проектировщикам в снижении воздействия строительных конструкций на окружающую среду [17; 18].

Для упрощения расчета LCA строительных материалов были созданы LCA инструменты. Эти инструменты можно разделить на две группы.

- LCA Инструменты, представляющие собой базы данных экологических коэффициентов строительных материалов.
- BIM-LCA инструменты, которые работают с BIM инструментами и дают автоматическую симуляцию LCA строительных материалов, беря количества строительных материалов из BIM

модели и умножая их на соответствующие экологические коэффициенты строительных материалов, которые сохраняются в самом BIM-LCA инструменты.

Хотя BIM-LCA инструменты дают преимущество в автоматизации расчета LCA строительных материалов и в его интеграции в практику проектировщиков зданий, они имеют следующие проблемы:

- Точность количества строительных материалов, взятых из BIM-модели, не определена.
- Отсутствует комплексная методология проектирования различных строительных элементов для расчета количества их материалов из BIM модели точно и с минимальными затратами времени на проектирование и расчет количества материалов.
- BIM-LCA инструменты имеют встроенные базы данных экологических коэффициентов строительных материалов, которые могут не подходить для того места, где строится здание.
- Обычно расчет LCA строительных материалов производится только ретроспективно на этапе разработанного проекта здания. Согласно принципу Маклими для моделирования характеристик здания, любые изменения, внесенные в проекте здания после этого этапа, приводят к дополнительным крупным расходам, к чрезмерным затратам времени и усилий на моделирование, и являются непрактичными.
- Точность моделирования LCA на ранней стадии проектирования здания (на этапе эскизного проекта здания) не определена. Не существует методологии для интеграции моделирования LCA строительных материалов на ранней стадии проектирования здания.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является интеграция симуляции iEE-LCA строительных материалов на ранней стадии разработки строительного проекта с использованием BIM путем решения следующих задач:

1. Определение элементов здания, которые необходимо смоделировать на ранней стадии проектирования для симуляции iEE-LCA строительных материалов путем изучения различных систем проектирования зданий, уровней зрелости BIM, спецификаций уровня детализации элементов BIM.
2. Разработка метода для выбора наиболее подходящей базы данных экологических коэффициентов строительных материалов из имеющихся путем учета влияния следующих факторов: метода расчета экологических коэффициентов строительных материалов, географической и временной корреляции, надежности источника экологических коэффициентов строительных материалов.

3. Изучения влияния различных методов моделирования сборок элементов зданий на точность расчета количества их материалов в Autodesk Revit и в Autodesk Navisworks Manage, и на время утрачено на моделирование сборок элементов зданий и расчет количества их материалов.
4. Оптимизация расчета количества строительных материалов из BIM-модели путем разработки методологии для моделирования и расчета количества материалов различных элементов зданий в Autodesk Revit и в Autodesk Navisworks Manage без отклонений от реальных количеств материалов и с минимальными затратами времени.
5. Валидация разработанной методологии для оптимизации расчета количества строительных материалов из BIM-модели путем ее тестирования для расчета количества материалов целевого здания.
6. Разработка метода оценки точности симуляции iEE-LCA строительных материалов на ранней стадии разработки строительного проекта путем определения приемлемого калибровочного допуска для средней ошибки смещения и коэффициента вариации среднеквадратичной ошибки моделирования.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются строительные конструкции и материалы, составляющие здание.

Предметом исследования являются параметры симуляции iEE-LCA строительных материалов здания на ранней стадии разработки строительного проекта средством BIM, а именно: моделированная информация о здании на эскизном проекте для симуляции iEE-LCA строительных материалов и уровень детализации BIM-модели, точность расчет количества строительных материалов в BIM модели, качество баз данных iEE-LCA коэффициентов материалов, и точность симуляции iEE-LCA строительных материалов.

Научная новизна исследования

1. Определен надлежащий уровень зрелости BIM-модели и уровень детализации BIM-объектов для эффективной интеграции iEE-LCA строительных материалов на этапе эскизного проекта.
2. Разработан метод для выбора наиболее подходящей базы данных экологических коэффициентов строительных материалов.
3. Численно определена точность расчета количества строительных материалов на основе BIM (BIM-QTO) при использовании разных методов для моделирования сборок элементов зданий.

4. Разработана методология для оптимизации расчета количества строительных материалов из BIM-модели в Autodesk Revit и в Autodesk Navisworks Manage без отклонений от реальных количеств материалов и с минимальными затратами времени.
5. Методология, упомянутая в предыдущем пункте, подтверждена экспериментально.
6. Численно определены параметры, измеряющие точность симуляции iEE-LCA средством BIM на этапе эскизного проекта.

Теоретическая значимость исследования

Теоретическая значимость данного исследования заключается в определении измеряемых критериев точности моделирования iEE-LCA для учета при выборе проектного решения на ранних стадиях процесса проектирования здания; в определении того, какая информация о здании должна быть смоделирована, и насколько детальной она должна быть. Полученные теоретические результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Практическая значимость исследования

На практическом уровне определение детализации, необходимой для BIM-модели для расчета воздействия здания на окружающую среду с помощью iEE-LCA оценки, может быть использовано в существующих BIM-LCA-инструментах, таких как IMPACT [19] и Tally [20]. Данное исследование выявило проблему, когда отсутствие определения требуемой детализации BIM-модели ограничивает эффективность этих инструментов в качестве инструментов поддержки принятия решений на ранних стадиях проектирования. Эти инструменты используют iBIM-модель, с очень высоким уровнем детализации, и в них не определяется точностью LCA, как в данном диссертационном исследовании. Построение BIM-модели на основе исследований, не основанных на LCA, может привести к неточному моделированию или моделированию, которое занимает слишком много времени, чтобы быть эффективным в качестве инструментов оценки воздействия здания на окружающую среду на ранней стадии проектирования.

Другой практический результат данного исследования заключается в разработке надежной методологии для точного с минимальными временными затратами расчета количеств строительных материалов из BIM-моделей (BIM-QTO). Эта методология устраняет ограничения, упомянутые в литературе [21–24], такие как отсутствие руководства по моделированию для эффективного расчета количеств материалов и некорректность количеств материалов, взятых из BIM-модели. Она может быть использована сметчиками и оценщиками для составления точных ведомостей количества строительных материалов, а также LCA-экспертами для составления

точного графика количества строительных материалов для оценки воздействия зданий на окружающую среду в рамках LCA.

Положения, выносимые на защиту

1. Количество строительных материалов может быть точно рассчитано из BIM-модели.
2. BIM-модель с уровнем детализации эскизного проекта может дать симуляцию, достаточно точную для iEE-LCA оценки строительных материалов.

Для проверки первой гипотезы различные элементы здания были смоделированы с использованием различных методов моделирования, затем количества их материалов были взяты из BIM-модели и сравнены с реальными значениями. На основе этого была разработана методология моделирования различных элементов здания для обеспечения того, чтобы их количества были взяты из BIM-модели без отклонения от реальных значений. Затем методология была проверена путем ее применения для расчета количества материалов одного жилого здания.

Вторая гипотеза проверяется путем определения каких элементов зданий нужно моделировать, определения подходящей базы данных для расчета iEE-LCA-коэффициентов строительных материалов, и определения критерий точности симуляции iEE-LCA оценки здания. Затем моделируется жилое здание до уровня детализации эскизного проекта, и берутся количества строительных материалов из BIM-модели (на основе методологии, разработанной при проверке первой гипотезы) и используются наряду с iEE-LCA-коэффициентами для симуляции iEE-LCA оценки здания. После того, сравниваются с таблицей количественных показателей, которая определяется как 100% точная путем нормализации их обоих к значениям iEE. Разница iEE между этими двумя показателями является мерой точности имитации BIM-модели. Если она достаточно высока по сравнению с определенными критериями точности симуляции iEE-LCA, это доказывает, что BIM-модель достаточно детализирована.

Степень достоверности результатов

Степень достоверности результатов обоснована использованием основных концепций информационного моделирования зданий и оценки жизненного цикла зданий, включая оценки воплощенной энергии зданий. Результаты подтверждены путем тестирования предложенных методологии на жилом здании. В рамках данного исследования учитывается только показатель iEE. Различные экологические показатели имеют разную интенсивность воздействия на окружающую среду для одних и тех же материалов. Если гипотеза данной диссертации проверялась для другого экологического показателя, например, воплощенного диоксида углерода (ECO_2), BIM-модель на уровне разработки эскизного проекта может потребовать

другого уровня детализации моделирования для достижения требований к точности симуляции. Для оценки этого риска используется тестирование на робастность, чтобы определить, влияет ли он на обобщаемость результатов.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность исследования, представлена степень разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов. В первой главе представлен анализ решений для расчета воздействия строительных объектов на окружающую среду, LCA-рамки для оценки воздействия зданий на окружающую среду, iEE зданий, BIM-инструменты для проведения LCA-симуляции, а также предложенная концепция Эскиза характеристик здания (BPS) для проведения iEE-LCA-оценки BIM-модели. Во второй главе представлен анализ литературы по расчету количества строительных материалов, обоснование необходимости использования для этого метода расчета количества строительных материалов на основе BIM (BIM-QTO) и проблемы, связанные с этим методом. В третьей главе представлены результаты тестирования точности BIM-QTO на элементном уровне, методология, разработанная для эффективного BIM-QTO, и результаты проверки этой методологии путем ее применения для определения количества материалов целого жилого здания. В четвертой главе представлены результаты интеграции iEE-LCA на уровне эскизного проекта, включая требуемый уровень детализации BIM-модели, точность моделирования, а также результаты теста для валидации предлагаемой методологии при ее применении для расчета iEE-LCA-оценки BIM-модели жилого здания. В заключении дается краткое изложение данного исследования и его результатов, ограничения исследования и предложения для будущих исследований в этой области.

Переменные переведены в **Таблица 1** были определены как влияющие на проверку гипотезы исследования. Они вытекают из взаимосвязи количества строительных материалов и iEE коэффициентов строительных материалов, описанной в **Формула 1** [25], и плана исследования для проверки гипотезы диссертации.

Формула 1. Оценка первоначальной воплощенной энергии всего здания

$(EEC_i) \times (Q_i) = WBiEE$, где:

(EEC_i) : EE Коэффициенты строительных материалов;

(Q_i) : Количество строительных материалов;

$WBiEE$: Результаты iEE всего здания.

Таблица 1. Зависимые и независимые переменные для проверки второй гипотезы исследования

Переменная	Дизайн исследования для проверки второй гипотезы
Зависимая переменная: Что проверяется?	<ul style="list-style-type: none"> • Детализация по модели BIM. Это расчет количества строительных материалов, которые нормализуются в iEE для того, чтобы их можно было сравнить с набором количества материалов в истинной модели.
Независимая переменная: Все переменные, влияющие на результат.	<ul style="list-style-type: none"> • iEE коэффициенты. • BIM инструмент. • LOD спецификация. • Определение BIM эскиза для симуляции iEE. • Максимально допустимые допуски калибровки, определяющие точность и прецизионность. • Количество строительных материалов в истинной модели.

Исследовательская задача 1: определить, что такой BIM эскиз для симуляции LCA.

На сегодняшний день нет исследований, посвященных тому, как рассчитать количество строительных материалов на ранних стадиях процесса проектирования, начиная с информации, полученной на этапе эскизного проектирования, до уровня детализации, эквивалентного строительной смете детального проекта, который позволяет получить точную LCA или iEE оценку. Отсутствуют стандартизированные требования или руководство по тому, какие

строительные элементы и материалы должны быть смоделированы. В настоящее время не существует определения, какие элементы и материалы здания должны быть смоделированы для BIM эскиза по симуляции iEE. Поэтому его необходимо разработать. Вопросы, перечисленные в **Таблица 2**, обеспечивают основу для определения элементов здания, которые должны быть смоделированы в данном эскизе. Вопросы основаны на концепции ‘эскиза характеристик здания’ [16] и на требованиях, специфичных для iEE-LCA оценки строительных материалов.

Таблица 2. Рамка для определения элементов здания, составляющих BIM эскиз для симуляции iEE-LCA

Тематическая область	Вопросы
Интеграция iEE-LCA в текущие проектные решения для снижения воздействия здания на окружающую среду	Какие проектные решения принимаются для снижения воздействия на окружающую среду?
Интеграция iEE-LCA в ранние фазы процесса проектирования	Какие из этих проектных решений должны быть приняты на ранних стадиях процесса проектирования?
	Какая информация о здании доступна на этапе эскизного проектирования?
Точность моделирования	Достаточно ли информации, имеющейся на этапе эскизного проектирования, для выполнения требований к точности моделирования iEE-LCA для принятия обоснованных решений?

В основе концепции эскиза характеристик здания лежит принятие решений на этапе эскизного проектирования. Разработка BIM эскиза для симуляции iEE-LCA требует определения проектных решений, которые принимаются на этапе эскизного проектирования, и информации об элементах здания, которая доступна на этапе эскизного проектирования. Это, в свою очередь, определяет элементы здания для моделирования и уровень их детализации на этапе эскизного проектирования.

Системы проектирования упрощают процесс проектирования до серии этапов проектирования. Каждая фаза определяет ключевые задачи проектирования, проектные решения и информацию, которая должна быть доступна для продвижения процесса проектирования в идеализированном процессе. Это было объединение рамочных документов Американского института архитекторов (AIA) и Королевского института британских архитекторов (RIBA) по процессу проектирования [26; 27] Используя эти документы и их контрольные списки проектной документации, можно получить подробное описание того, какие проектные решения

принимаются на этапе эскизного проектирования, и определить информацию, имеющуюся о каждом элементе здания на данный момент в проекте (Таблица 3).

Таблица 3. Образец рабочего определения строительной информации, доступной во время эскизного проектирования [26; 27].

* В полную таблицу включены следующие группы элементов здания: Общие, Внутренние помещения, Площадка, Транспортные системы, Фундамент и основание, Механические системы, Надстройка, Электрические и осветительные системы, Наружные помещения, Оборудование, Крыша.

		Проектные решения	
		Эскизные проектные решения	Разработанные проектные решения
Общие*	Выбор основных материалов и оценка воплощенного воздействия строительных материалов в течение срока службы здания	Определить устойчивые материалы и продукты, сбалансировав оценку жизненного цикла, обслуживание, долговечность и стоимость	
	Проектирование с целью минимизации количества материалов и строительных отходов	Определить/выбрать строительные компоненты и материалы	
	Определить глубину плана здания для естественной вентиляции, дневного света и видов.	Набросать спецификации, определяющие основные материалы и системы, и устанавливающие в целом уровни их качества.	
	Проектные решения для максимального приспособления здания к использованию, компонентам и материалам	Спецификации и детали выбранных материалов и систем	
	Определить, какие пассивные проектные решения могут быть использованы для снижения потребности в инженерных системах	Изготовление типовых строительных деталей	
	Определить площади застройки	-	
	Определить объемы здания, включая определение высоты между этажами здания	Площади и объемы зданий фиксированные	

Основной вывод из разработки этого рабочего определения эскизного проекта заключается в том, что итеративное тестирование и принятие решений о пассивных проектных решениях, размере здания, форме, форме и выборе материала тепловой оболочки здания является основным фокусом в этот период процесса проектирования. Энергоэффективность, проектные решения по

возобновляемым источникам энергии, включая вентиляцию и кондиционирование воздуха, и другие услуги здания ограничиваются только выбором систем, а не их конкретным проектированием. Эти проектные соображения не рассматриваются до этапа разработки проекта. Это устраняет необходимость рассмотрения элементов здания инженерных систем здания во время эскизного проектирования, делая их вне сферы применения BIM эскиза для симуляции iEE-LCA. Кроме того, исключение инженерных систем является ограничением объема, налагаемым возможностями BIM-LCA инструментов. Из существующих инструментов ни IMPACT, ни Tally [19; 20] не способны рассчитывать LCA результаты для инженерных систем. Это связано с отсутствием надежных и полных LCA данных по компонентам инженерных систем.

В **Таблица 4** представлен уточненный список элементов здания, которые должны быть смоделированы в BIM эскиза для симуляции iEE-LCA. Это является выполнением первой исследовательской задачи для проверки второй гипотезы исследования. Этот список был составлен путем перевода решений и информации, принятых во время эскизного проектирования, и оценки того, влияют ли они на выбор строительных материалов и/или их количества. В **Таблица 4** также приведены коды элементов из системы классификации UniClass 2.0, на которую делаются ссылки в данной диссертации.

Таблица 4. Уточненный список элементов, необходимых для создания BIM эскиза для симуляции iEE-LCA

UniClass 2.0 Классификация элементов	
Название элемента здания	Код строительного элемента
Колонна	EE-15-10
Пол	EE-20-40
Крыша	EE-20-10
Стена	EE-25
Окно	-

Исследовательская задача 2: разработать методологию для использования BIM инструмента Revit для проведения iEE-LCA оценки здания

В Таблица 5 представлен процесс моделирования BIM эскиз для симуляции iEE-LCA в виде трех отдельных этапов моделирования.

Таблица 5. Процесс моделирования BIM эскиз для симуляции iEE-LCA.

Этапы моделирования			Задачи моделирования	
Введение/вычисление входных данных моделирования	1	Использование электронной таблицы анализа результатов LCA	Постановка целей характеристик здания	-
			Поиск входных данных для моделирования	Выбор соответствующей базы данных iEE коэффициентов строительных материалов. Ввод их в электронную таблицу анализа результатов LCA.
Выполнение процесса расчета результатов BIM-LCA	2	Использование BIM инструмента Revit	Построение BIM эскизной модели и расчет количества строительных материалов с помощью BIM инструмента	Создание BIM объектов с вложенными необходимыми метаданными строительных материалов. Построение BIM геометрии
			Анализ результатов	Экспорт рассчитанных в BIM модели количественных показателей строительных материалов и их импорт в Excel таблицу анализа результатов

Исследовательская задача 2.1: оценка качества баз данных коэффициентов строительных материалов

Инструменты оценки неопределенности LCA можно разделить на две категории: качественные и количественные. Качественные инструменты оценивают качество данных по

какому-либо критерию, обычно с помощью простой системы баллов. Одним из примеров является матрица показателей качества данных [28]. BIM эскиз для симуляции iEE-LCA не требует всесторонней оценки качества данных, которую дает оригинальная матрица показателей качества данных. Вместо этого, чтобы помочь проектировщикам зданий в выборе наиболее подходящих баз данных EE коэффициентов материалов, проектировщики зданий должны знать только основные факторы, вызывающие неопределенности, и выбрать базу данных, которая минимизирует их настолько, насколько это практически возможно. Таким образом, существует необходимость адаптации оригинальной матрицы для удовлетворения этих специфических требований в рамках выполнения исследовательской задачи 2.1. Это является важной частью снижения сложности расчетов LCA и улучшения его интеграции в эскизный проект. В **Таблица 6** представлена матрица показателей качества EE данных. Выбор оценок показателей происходит из вопросов, специфичных для EE коэффициентов материалов.

Таблица 6. Матрица показателей качества EE данных

Показатель качества данных		Оценка показателя				
		1	2	3	4	5
A	Метод расчета EE коэффициента материала	Гибридный	Вход-выход	Процессный	Нет критериев	Неизвестен
B	Географическая корреляция	Данные из исследуемой географической области, например, из исследуемой страны	Данные из области с аналогичными условиями производства, например, с похожими технологиями и энергией производства	Данные из области с немного похожими условиями производства, например, с немного похожими технологиями и энергией производства	Нет критериев	Данные из неизвестной области или области с сильно отличающимися условиями производства
C	Временная корреляция	Менее трех лет разницы с годом проведения исследования	Разница менее шести лет	Разница менее 10 лет	Разница менее 15 лет	Возраст данных неизвестен или разница составляет более 15 лет
D	Надежность	EE коэффициенты взяты из авторитетного источника, например, из опубликованной литературы или коммерческой базы данных	Нет критериев	Нет критериев	Нет критериев	Неизвестно

Исследовательская задача 2.2: оценка и оптимизация точности расчета количества строительных материалов из BIM модели

Созданные модели для проверки первой гипотезы исследования

Точность QTO, извлеченных из нескольких типов геометрических моделей, определенных с использованием различных переменных, анализируется для разработки методологии моделирования и QTO. Изученные модели были созданы с учетом различных сборок строительных элементов, представленных независимой переменной X , и различных методов и решений для проектирования этих сборок, представленных независимой переменной Y , а независимая переменная Z использовалась для выражения технического состояния сборки элементов, такого как соединение, пересечение или частичное встраивание. Для каждого случая зависимые переменные 'площадь поверхности' и 'объем сборки' были сняты в Revit и Navisworks Manage и сравнены с рассчитанными вручную величинами для расчета отклонения. Также оценивалось мастерство моделиста и время, затраченное на проектирование и снятие материалов в каждом случае. Затем методы были сравнены с точки зрения точности, эффективности использования времени и мастерства моделиста. В **Таблица 7** приведены независимые переменные, которые описывают каждую модель.

Таблица 7. Независимые переменные для проверки первой гипотезы исследования

Сборка элементов здания (X)	Метод проектирования сборки (Y)	Техническое состояние (Z)
1. Многослойная наружная стена с двумя видами наружной отделки одинаковой толщины	1. Многослойная базовая стена	1. Соединения
2. Многослойная наружная стена с двумя видами наружной отделки разной толщины	2. Каждый слой стены – простая стена	2. Перекресток
3. Многослойная внутренняя стена	3. Создать части	3. Проем
4. Наружная стена + проем в стене	4. Составная стена	4. Частичное встраивание
5. Наружная стена + дверь	5. Редактировать профиль	
6. Наружная стена + окно	6. Отсоединить элементы геометрии	
7. Наружная стена + пол	7. Присоединить элементы геометрии	
8. Внутренняя стена + пол	8. Отсоединить верх/основание	
9. Наружная стена + колонна	9. Присоединить верх/основание	
10. Несущая стена + несущая колонна	10. Автоматическое присоединение	
11. Пол + балка + несущая колонна	11. Переключение порядка присоединения	
12. Несущие колонны	12. На осях	
13. Фундаменты	13. Вставить, выровненный по выбранным уровням	
	14. Разделить частей по пересекающимся плоскостям	

Согласно приведенной выше таблице, каждая модель кодируется на основе переменных X, Y, Z. Например, модель (X3, Y1 + Y3, Z2) – это многослойная базовая внутренняя стена, смоделированная как одна стена и разделенная на составляющие ее слои с помощью инструмента ‘Создать части, и она пересекается с другой внутренней стеной с теми же характеристиками. Было исследовано 11 моделей различных сборок элементов здания и 26 кейсов, соответствующих различным способам, опробованным для моделирования каждой сборки.

Пример анализа созданных моделей и кейсов

В первой модели, которая представляет собой соединение двух наружных стен (**Рисунок 1**).

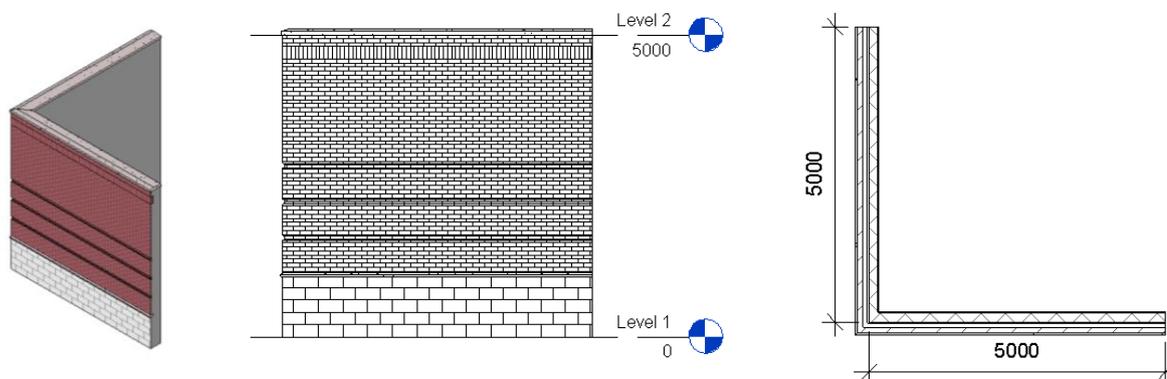


Рисунок 1. первая модель: 3D вид (левая панель); вид сверху (средняя панель); вид в плане (правая панель)

Первый кейс (X1, Y1, Z1) представляет собой две многослойные стены с различной внешней отделкой одинаковой толщины, каждая стена моделируется как одна многослойная базовая стена, и две стены соединены в углу. Второй кейс (X1, Y2, Z1) представляет собой две многослойные стены с различной внешней отделкой одинаковой толщины, каждый слой моделируется как простая стена, две стены соединены в углу. Третий кейс (X1, Y1 + Y3, Z1) представляет две многослойные стены с различной внешней отделкой одинаковой толщины, каждая из которых смоделирована как одна составная стена с помощью инструмента ‘Создать части’, две стены соединены в углу. На следующих гистограммах (**Рисунок 2**) показано сравнение этих трех изученных методов проектирования и снятия количественных показателей материалов наружных стен в Revit и Navisworks Manage. Сравнение проводится по трем аспектам: отклонения площади поверхности и объема от реальных значений, время, затрачиваемое на моделирование и извлечение величин количественных показателей материалов стен, требуемая квалификация моделиста. Как видно, в Revit второй метод требует в четыре раза больше времени, но по сравнению с другими методами он дает немного лучшую точность, чем первый метод, что делает его неэффективным, особенно потому, что он требует мастерства проектировщика. В Navisworks первый метод в принципе неприменим, так как многие расчеты должны быть изменены в окне ‘Расчеты элементов’, а это требует участия опытного моделиста; отклонение составляет около 5% по площади и 11% по объему. Принимая во внимание все факторы, рекомендуется использовать третий метод для проектирования и подсчета количества наружных стен. Этот метод предлагает моделировать наружные стены как многослойные

базовые стены, а затем разделить их на составляющие слои и развертки с помощью инструмента 'Создать части'.

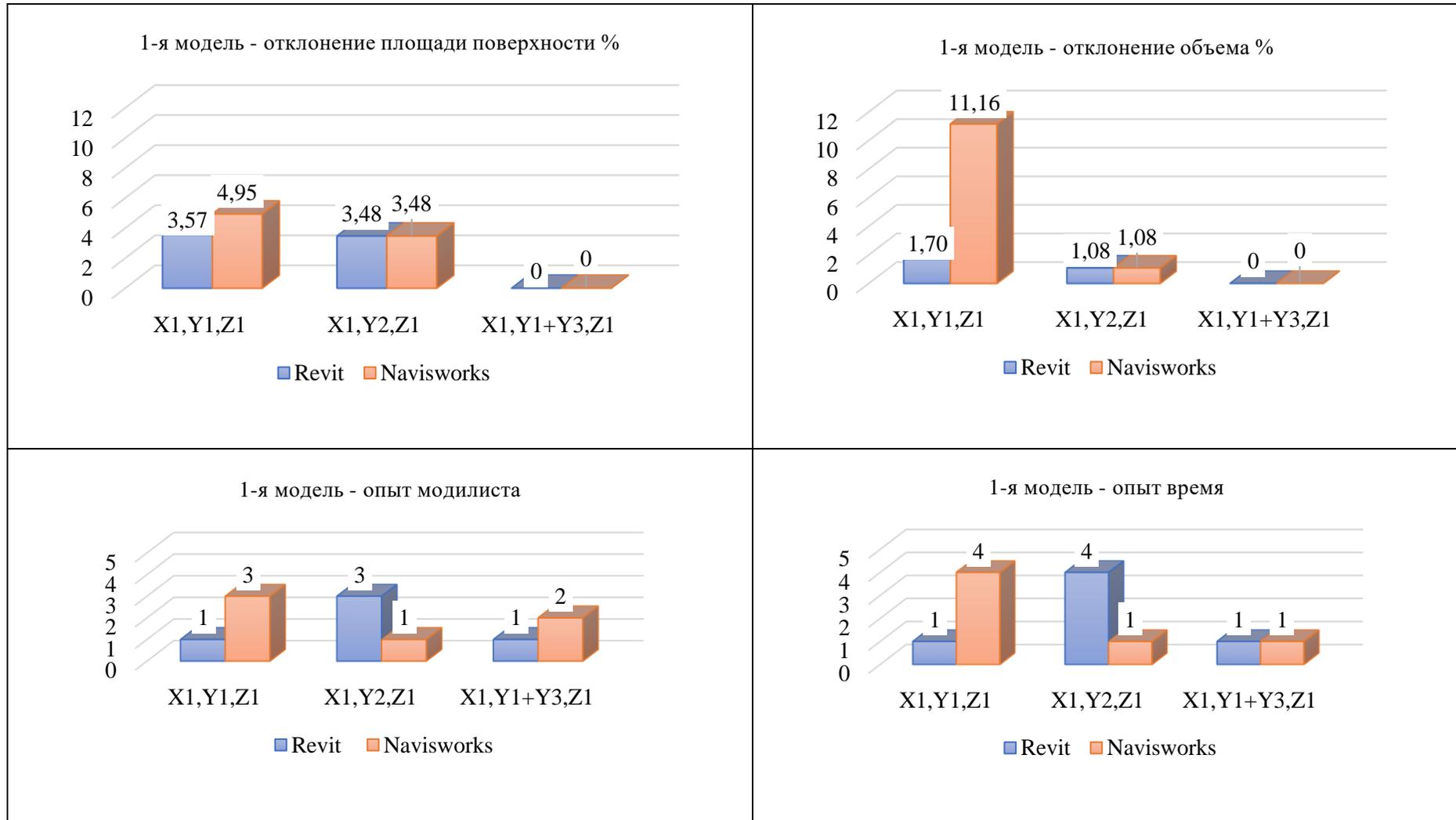


Рисунок 2. Результаты анализа первой изученной модели и ее 3 кейсов

Результаты проверки первой гипотезы исследования

Аналогичные шаги предпринимаются для пробы остальных моделей. Особенности элементов, собранных в каждой модели, и самой сборки рассматриваются и обсуждаются в деталях. Результаты анализа 11 моделей различных сборок элементов здания и 26 кейсов, соответствующих различным опробованным способам моделирования каждой сборки, представлены в **Таблица 8** и в **Таблица 9** для Autodesk Revit и Navisworks Manage соответственно.

Инструкции, приведенные в таблицах, при их соблюдении гарантируют, что количественные параметры этих элементов здания могут быть взяты из Revit и Navisworks Manage без отклонения от реальных значений и с минимальными затратами времени на процессы проектирования и QTO. Тем не менее, поскольку BIM-модель всего здания сложнее, чем изученные модели, разработка тщательной методологии для проектирования и QTO модели всего здания требует учета других шагов, важных при работе с BIM-моделями и для обнаружения и решения любых возможных несоответствий и столкновений различных элементов здания. Схема показана на **Рисунок 3** предлагает рабочий процесс для проектирования архитектурной модели и модели конструкции всего здания и снятия количественных параметров материалов здания из Revit и Navisworks Manage.

После начала проектирования архитектурной модели, чтобы начать проектирование структурной модели, сначала необходимо установить координацию между двумя моделями, чтобы все элементы были правильно выровнены. Настройка координации начинается с установки точки съемки проекта в архитектурной модели, затем привязки архитектурной модели к структурной модели с помощью опции 'Origin to Origin', закрепления связи и получения координат из нее, чтобы точка съемки структурной модели совпадала с архитектурной. Затем мы можем 'Скопировать/мониторить' оси и уровни из архитектурной модели в структурную, принимая во внимание установку опций записи для инструмента 'Копирование/мониторинг'. Затем проектирование двух моделей может идти параллельно в соответствии с инструкциями, приведенными в **Таблица 8** и в **Таблица 9**. После завершения работы над каждой моделью рекомендуется экспортировать ее в Navisworks Manage для проверки пересечений между элементами, обнаружения и устранения возможных коллизий. Затем в каждой модели рекомендуется создать 3D-вид для экспорта в Navisworks. Мы можем выбрать, какие элементы скрыть, а какие оставить в каждом из 3D-видов для экспорта в Navisworks, чтобы при сборке окончательной модели не было дублирования, если некоторые элементы смоделированы в обеих моделях. Затем мы можем добавить обе модели в Navisworks, чтобы перепроверить их соответствие друг другу, обнаружить и устранить нестыковки. Предпочтительнее создавать

части объектов в конце процесса моделирования, так как разделение объектов на их составляющих частей затруднят процесс обнаружения столкновений, а также сделают модель (0,5-1) раз тяжелее в Revit. После этого модели будут готовы к извлечению из них количественных параметров материалов в соответствии с инструкциями, приведенными в **Таблица 8** и в **Таблица 9**.

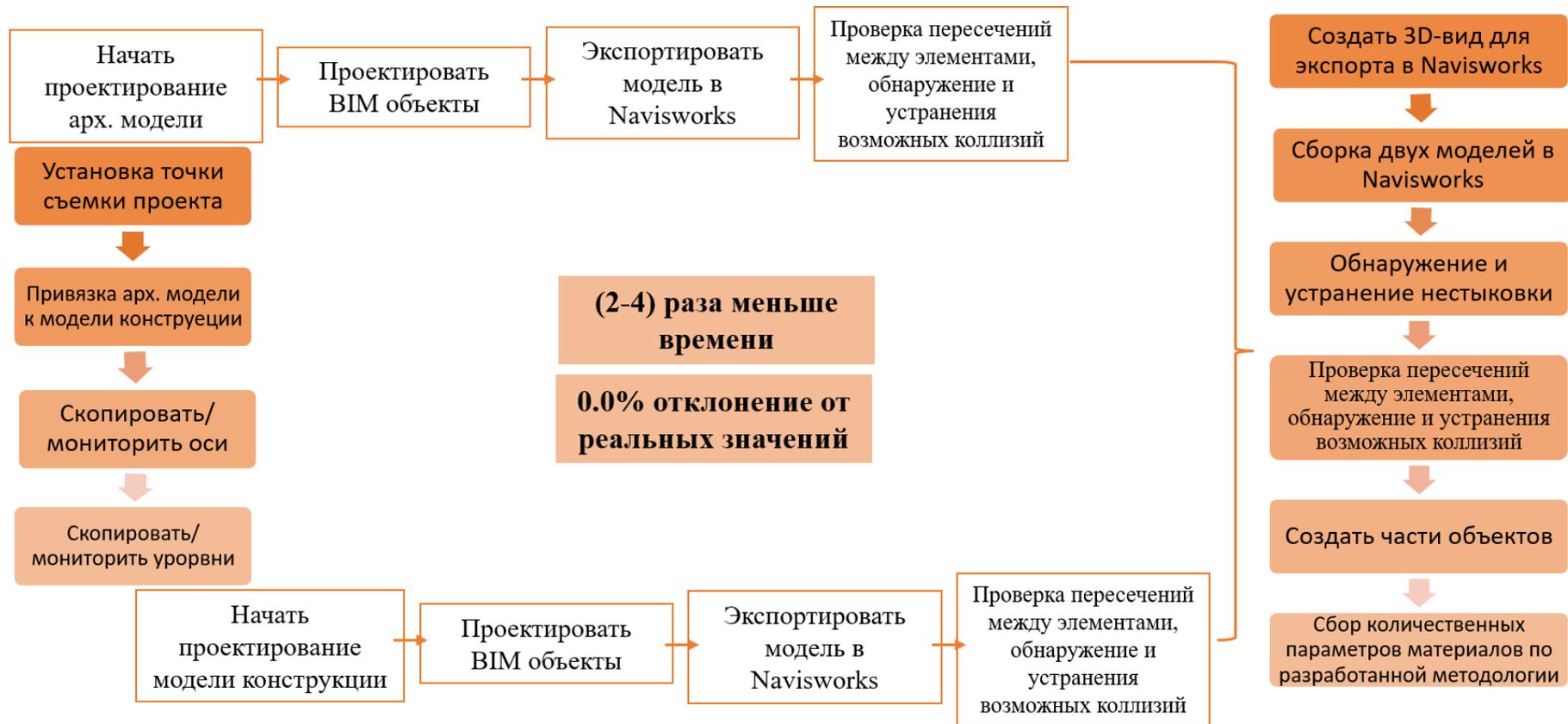


Рисунок 3. Предлагаемая схема рабочего процесса для оптимизации процесса QTO

Таблица 8 – продолжение

Инструмент Категория	Соединения стен	Создать части	Присоединить элементы геометрии	Присоединить вверх/ основание	Переключить порядок присоединения	На осях	На колоннах	Разделить части по пересекающимся плоскостям	Ведомость/ Спецификация	Ведомость материалов
Пирс			√ (с перекрытием, ребром перекрытия и несущими стенами)		√ (с перекрытием, ребром перекрытия и несущими стенами)		√			√
Балки			√ (с полами)		√ (с полами)					√
Несущие стены			√ (с пирсами)	√ (с перекрытием)						√ *
Отдельные фундаменты (Фундаменты несущих колонн)			√ (с фундаментами несущих стен)				√			√
Ленточные фундаменты (фундаменты несущих стен)			√ (с Фундаментами несущих колонн)							√
Перекрытие			√ (с пирсами и балками)							√
Ребро перекрытия			√ (с пирсами)						√	

Таблица 9. Моделирование элементов здания в Revit для QTO в Navisworks Manage

* Редактировать расчеты элемента: Площадь = Площадь модели×2

** Редактировать расчеты элемента: Площадь = (Длина × Ширина × 2 + Длина × Толщина × 2 + Ширина × Толщина × 2)/1000000

*** Редактировать правил картирования элементов: ТолщинаМодели → Тип Revit → Толщина фундамента

и редактировать расчеты элементов: Площадь = Площадь модели × 2 + (Ширина × Толщина × 2+(Площадь модели × 1000000/Ширина) × Толщина × 2)/1000000

Инструмент Категория	Соединения стен	Создать части	Присоединить элементы геометрии	Присоединить вверх/ основание	Переключить порядок присоединения	На осях	На колоннах	Разделить части по пересекающимся плоскостям	Отнести объекты к соответствующему элементу в расчете элементов
Наружные стены	√ (Под углом)	√							√
Внутренние стены	√ (Стыковое соединение на пересечении/ под углом на углях)			√ (с полом/крышей)					√
Полы/Крыши			√ (с наружными стенами, балками и колоннами)		√ (с балками и колоннами)				√
Потолки									√
Несущие колонны		√	√ (с наружными стенами и полами)		√ (с полами)	√		√	√ *

Таблица 9 – продолжение

Инструмент	Соединения стен	Создать части	Присоединить элементы геометрии	Присоединить вверх/основание	Переключить порядок присоединения	На осях	На колоннах	Разделить части по пересекающимся плоскостям	Отнести объекты к соответствующему элементу в расчете элементов
Несущий каркас									√
Пирс			√ (с перекрытием, ребром перекрытия и несущими стенами)		√ (с перекрытием, ребром перекрытия и несущими стенами)		√		√ *
Балки			√ (с полами)		√ (с полами)				√ *
Несущие стены			√ (с пирсами)	√ (с перекрытием)					√ *
Отдельные фундаменты (Фундаменты несущих колонн)			√ (с фундаментами несущих стен)				√		√ **
Ленточные фундаменты (фундаменты несущих стен)			√ (с Фундаментами несущих колонн)						√ ***
Перекрытие			√ (с пирсами и балками)						√

Результаты тестирования валидности разработанной методологии для оптимизации BIM-QTO

Далее предложенная методология проходит проверку на валидность. Для этого BIM-модель целого здания разрабатывается дважды двумя разными BIM-моделистами с одинаковым уровнем опыта в BIM-моделировании. Первого моделиста просят создать модель здания, как он обычно это делает, и снять количественные параметры элементов модели в Revit и Navisworks Manage. Второго моделиста просят следовать предложенной методологии для проектирования различных элементов здания и учета их количественных параметров как в Revit, так и в Navisworks Manage. Затем QTO двух моделей сравниваются с реальными значениями количественных параметров элементов здания. Исследуемое здание представляет собой 5-этажный жилой дом с кирпичным фасадом, сложной плоской крышей, бетонным фундаментом и несущей конструкцией из стали. Созданная BIM-модель здания содержит архитектурные и структурные компоненты здания. На гистограммах ниже (**Таблица 10**) показаны два примера результатов сравнения. В целом были изучены 10 разных категорий элементов здания.

В целом, при соблюдении предложенной методологии проектирования и снятия количественных показателей BIM-модели исследуемого здания в Revit и Navisworks количественные показатели различных элементов здания могут быть получены точно и без отклонений от реальных значений. С другой стороны, когда предложенная методология не соблюдается, существует риск серьезного отклонения от реальных значений, как это показано в данном примере, где наблюдается отклонение (1 - 33)% в Revit-QTO и отклонение (1 - 247)% в Navisworks-QTO по сравнению с реальными значениями.

Результаты выполнения данных исследовательских задач были опубликованы [29; 30].

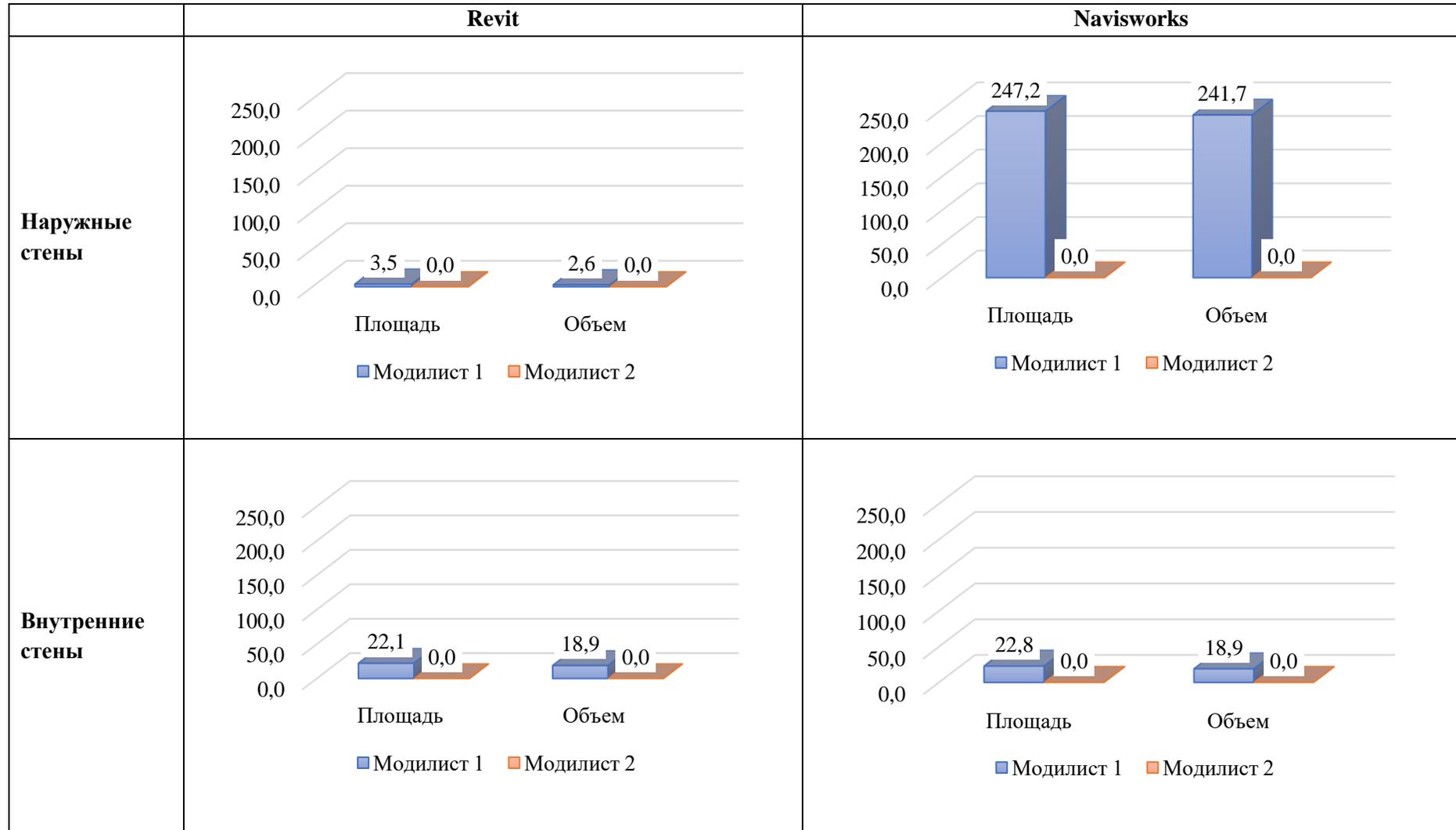


Таблица 10. Два примера результатов тестирования валидность разработанной методологии для оптимизации BIM-QTO

Исследовательская задача 2.3 достигается путем разработки ранее упомянутой электронной таблицы в Excel для расчета результатов LCA.

Исследовательская задача 3: разработать систему оценки точности BIM эскиза для симуляции iEE-LCA

В данном диссертационном исследовании калибровка моделирования используется для проверки точности моделирования BIM эскиза для симуляции LCA. Это оценка точности результатов моделирования, чтобы определить области, требующие улучшения; определить, когда моделирование достаточно точное, а когда BIM модель достаточно подробная для принятия решений по проектированию здания. Поскольку методика калибровки для LCA или EE отсутствует, ее необходимо разработать для выполнения третьей исследовательской задачи. Для разработки методологии калибровки моделирования для EE симуляции зданий необходимы следующие важные определения: определение истинных значений EE; определение максимально допустимых допусков калибровки. Определение истинного значения общего iEE здания — это вопрос о том, какие методы измерения iEE коэффициентов строительных материалов и количества строительных материалов наиболее репрезентативны для реальности?

Используя матрицы показателей качества EE данных, EE база данных, которая получает оценку в диапазоне 1-3, соответствует критерию ее истинного значения в контексте определения точности и калибровки EE моделирования. Перечень количественных показателей строительных материалов, измеренных или рассчитанных до уровня детализации, эквивалентного разработанной строительной смете, определяет их истинное значение в контексте определения точности и калибровки EE моделирования.

В **Таблица 11** представлены выбранные максимально допустимые допуски калибровки для данного диссертационного исследования. Значение $MBE_{Total} \pm 20,0\%$ было выбрано на основе требований к точности оценки стоимости здания на этапе концептуального проектирования (эскизного проекта). Ввиду отсутствия рекомендаций из других областей эксплуатации зданий по точности требований к $Cv(RSME)$, было принято руководящее указание ASHRAE 14:2002 [31]. Последующие исследования калибровки моделирования здания подтвердили соответствие допусков руководящего указания ASHRAE 14: 2002 для моделирования OE.

Таблица 11. Функциональное определение допусков точности и прецизионности калибровки моделирования ЕЕ [31; 32]

* МВЕ = средняя ошибка смещения

** CV(RSME) = Коэффициент вариации среднеквадратичной ошибки

Метрика калибровки	Максимально допустимые калибровочные допуски для моделирования ЕЕ
МВЕ _{Total} *	±10-20.0%
CV(RSME) _{Total} **	15.0-30.0%

Валидность разработанной методологии для интеграции анализа воплощенной энергии строительных материалов в ранние стадии процесса проектирования зданий с помощью BIM

Валидность разработанной методологии для интеграции анализа iEE-LCA строительных материалов в ранние стадии процесса проектирования зданий с помощью BIM можно проверять и обеспечивать посредством триангуляции данных [33]. Триангуляционное тестирование — это проверка робастность модели. Оно проверяет влияние, которое оказали iEE коэффициенты материалов на определение детализации BIM-модели. Этот тест на робастность проводится путем имитации калиброванной точной BIM-модели в Revit, разработанной в данной диссертации первый раз с другим набором данных для iEE, и второй раз с другим экологическим показателем, таким как воплощенный диоксид углерода (ЕСО₂), и дальше оценить точность моделирования в соответствии с методологией, предложенной в данной диссертации.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из проведенного исследования можно делать следующие выводы:

1) Элементы здания, которые должны быть смоделированы в BIM эскизе для симуляции iEE-LCA представляют собой следующие: колонны, полы, крыши, стены, окна. Этот список был составлен путем изучения систем проектирования зданий Американского института архитекторов (AIA) и Королевского института британских архитекторов (RIBA), и перевода решений и информации, принятых во время эскизного проектирования, и оценки того, влияют ли они на выбор строительных материалов и/или их количества.

- BIM-модель уровня зрелости 2 или 3 может быть использована для симуляции iEE-LCA строительных материалов на ранней стадии разработки проекта, при условии, что в модель заложена необходимая информация, особенно коды строительных элементов и материалов на основе системы классификации зданий UniClass 2.0. Учитывая, что моделирование BIM-модели уровня зрелости 3 требует много времени и усилий, более предпочтительной является BIM-модель уровня зрелости 2.

- BIM-модель, используемая для симуляции iEE-LCA строительных материалов, преимущественно представляет собой смесь BIM-объектов, построенных с уровнем детализации 200 или 300. Уровень детализации 200 подходит для BIM-объектов, состоящих из однородных отдельных слоев материала, таких как бетонные стены или бетонные балки. Он не подходит для однородных строительных изделий с несколькими однородными слоями материала или для неоднородных слоев материала. В этих случаях BIM-объекты должны быть смоделированы с уровнем детализации 300.

2) Гибридные EE коэффициенты в настоящее время являются наиболее полным методом расчета EE коэффициентов для измерения EE материалов, среди существующих трех методов расчета EE коэффициентов, поскольку гибридный анализ объединяет сильные стороны процессного анализа (достоверные цифры энергопотребления для конкретных процессов) и 'вход-выход' анализа (теоретически полная структура системы), устраняя, насколько это возможно, их недостатки (неполнота и присущие ошибки, соответственно).

- Базы данных iEE-LCA коэффициентов, которые имеют средний балл от 1 до 3 по 4 критериям качества iEE баз данных (метода расчета экологических коэффициентов строительных материалов, географической и временной корреляции, надежности источника экологических коэффициентов строительных материалов), считаются наиболее подходящими.

3, 4) Результаты изучения 11 модели разных сборок элементов здания и 26 кейсов, соответствующих разных методов моделирования каждой модели утверждают, что методы моделирования и учета количества материалов разных элементов здания представлены в таблице 8 и 9 для Autodesk Revit и Autodesk Navisworks Manage соответственно, дают точные количества материалов с минимальными затратами времени на моделирование и учет количества материалов.

5) При соблюдении разработанной методологии для моделирования и учета количества материалов целевого здания, гарантируется избежание отклонение в количестве материалов в Revit до 33% и в Navisworks Manage до 247%.

- При соблюдении разработанной методологии для моделирования и учета количества материалов целевого здания, время утрачено на моделирование и учет количества материалов сокращается в 2-4 раза.

6) Максимально допустимые пределы погрешности калибровки BIM модели для симуляции iEE-LCA: $MBE = \pm 20\%$; $Cv(RSME) = 15-30\%$.

- Валидность разработанной методологии для интеграции анализа iEE-LCA строительных материалов на раннем этапе процесса проектирования зданий с помощью BIM можно проверять и обеспечивать посредством триангуляции данных.

Существуют разные перспективы для развития данной исследовательской линии: разработанная методология для интеграции анализа iEE-LCA строительных материалов в ранние стадии процесса проектирования зданий с помощью BIM может тестируется путем ее применения для симуляции iEE-LCA целевого здания. Разработанная методология может приниматься с разными базами данных EE коэффициентов, при этом точность моделирования проверяется в соответствии с методологией, предложенной в данной диссертации. Разработанная методология может приниматься с другими экологическими показателями, такими как воплощенного диоксида углерода (ECO₂). Также, точности моделирования проверяется в соответствии с методологией, предложенной в данной диссертации. Кроме того, рекомендуется проводить исследования на национальном и региональном уровнях, направленные на расчет экологических коэффициентов строительных материалов и изделий в соответствии с региональными и национальными условиями производства, такими как технологии, используемые для производства и выработки энергии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

1. Shick Alshabab M., Vysotskiy A., Petrichenko M., Khalil T. BIM-Based Quantity Takeoff in Autodesk Revit and Navisworks Manage // Lecture Notes in Civil Engineering /. – Springer, 2020. – Vol. 70. – P. 413-421.
2. Shick Alshabab M., Vysotskiy A.E., Makarov S.I. Practical Recommendations to Increase Accuracy and Time Efficiency of BIM-Based Quantity Takeoff in Autodesk Revit and Navisworks Manage//BIM-Modeling in the Tasks of Construction and Architecture: Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference. SPb.: SPbGASU, 2018, P. 182–187.3.
3. Shick Alshabab M., Vysotskiy A.E., Khalil T., Petrochenko M. V. BIM-Based Quantity Takeoff//Construction of Unique Buildings and Structures, 2017, Vol. 55, No. 4, P. 124-134.4.
4. Strelets K., Perlova E., Platonova M., Pankova A., Romero M., Alshabab M.S. Post Occupancy Evaluation (POE) and Energy Conservation Opportunities (ECOs) Study for Three Facilities in SPbPU in Saint Petersburg // Procedia Engineering /. – Elsevier Ltd, 2016. – Vol. 165. – P. 1568-1578.5.
5. Shick Alshabab M., Andrianova M., Alsalloum D. Modification of Wastewater Treatment Technology at Cottonseed Oil Plant//MATEC Web of Conferences, 2016, Vol. 53, P. 01040.2.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Houghton J., Ding Y., Griggs D., Noguera M. Climate change 2001: the scientific basis. – 2001.
2. Sharma A., Saxena A., Sethi M., Shree V., Varun Life cycle assessment of buildings: A review. Vol. 15. - Pergamon, 2011.
3. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 2007.
4. Rode P., Burdett R., Gonçalves J.S. Buildings: investing in energy and resource efficiency, 2011.
5. Koepfel S., Ürge-Vorsatz D. Assessment of policy instruments for reducing greenhouse gas emissions from buildings, 2007.
6. Kibert C. Sustainable construction: green building design and delivery. – 2016.
7. Wong J.K.W., Zhou J. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. Vol. 57. - Elsevier, 2015.
8. Abergel T., Dean B., Dulac J. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: Global Status Report, 2017.
9. Alwan Z., Jones P. The importance of embodied energy in carbon footprint assessment//Structural Survey, 2014, Vol. 32, No. 1, P. 49-60.
10. Chastas P., Theodosiou T., Bikas D. Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review//Building and Environment, 2016, Vol. 105, P. 267-282.
11. Jiao Y., Lloyd C.R., Wakes S.J. The relationship between total embodied energy and cost of commercial buildings//Energy and Buildings, 2012, Vol. 52, P. 20-27.
12. Ajayi S.O., Oyedele L.O., Ilori O.M. Changing significance of embodied energy: A comparative study of material specifications and building energy sources//Journal of Building Engineering, 2019, Vol. 23, P. 324-333.
13. Dixit M.K., Fernández-Solís J.L., Lavy S., Culp C.H. Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper//Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, Vol. 16, No. 6, P. 3730-3743.
14. Berggren B., Hall M., Wall M. LCE analysis of buildings - Taking the step towards Net Zero Energy Buildings//Energy and Buildings, 2013, Vol. 62, P. 381-391.
15. Kellenberger D., Althaus H.J. Relevance of simplifications in LCA of building

components//Building and Environment, 2009, Vol. 44, No. 4, P. 818-825.

16. Donn M., Selkowitz S., Bordass B. The building performance sketch//<http://dx.doi.org/10.1080/09613218.2012.655070>, 2012, Vol. 40, No. 2, P. 186-208.

17. Crawford R.H. Life cycle assessment in the built environment//Life Cycle Assessment in the Built Environment, 2011, Vol. 9780203868171, P. 1-248.

18. Zabalza Bribián I., Aranda Usón A., Scarpellini S. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification//Building and Environment, 2009, Vol. 44, No. 12, P. 2510-2520.

19. BRE Group IMPACT. - URL: <https://www.bregroup.com/impact/> (дата обращения: 06.08.2021).

20. KT Innovations Tally. - URL: <https://choosetally.com/> (дата обращения: 06.08.2021).

21. Firat C.E., Arditi D., Hämäläinen J.P., Stenstrand J., Kiiras J. Quantity take-off in model-based systems//In 27th CIB W78 Conference, Cairo, Egypt, November 2010, 2010.

22. Saka A.B., Chan D.W.M. Knowledge, skills and functionalities requirements for quantity surveyors in building information modelling (BIM) work environment: an international Delphi study//Architectural Engineering and Design Management, 2019, Vol. 16, No. 3, P. 227-246.

23. Stanley R., Thurnell D. The benefits of, and barriers to, implementation of 5D BIM for quantity surveying in New Zealand//Australasian Journal of Construction Economics and Building, 2014, Vol. 14, No. 1, P. 105-117.

24. Monteiro A., Poças Martins J. A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design//Automation in Construction, 2013, Vol. 35, P. 238-253.

25. Dixit M.K. Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters//Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, Vol. 79, P. 390-413.

26. American Institute of Architects Integrated Project Delivery: A Guide. - URL: <https://www.aia.org/resources/64146-integrated-project-delivery-a-guide> (дата обращения: 28.08.2021).

27. Ostime N. RIBA Job book. – 2019.

28. Weidema B.P., Wesnæs M.S. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators//Journal of Cleaner Production, 1996, Vol. 4, No. 3-4, P. 167-174.

29. Shick Alshabab M., Vysotskiy A.E., Makarov S.I. Practical Recommendations to Increase Accuracy And Time Efficiency of BIM-Based Quantity Takeoff in Autodesk Revit and Navisworks

Manage//BIM-Modeling in the Tasks of Construction and Architecture: Materials of the All-Russian Scientific-Practical Conference. SPb.: SPbGASU, 2018, P. 182–187.

30. Shick Alshabab M., Vysotskiy A., Petrichenko M., Khalil T. BIM-Based Quantity Takeoff in Autodesk Revit and Navisworks Manage // Lecture Notes in Civil Engineering /. – Springer, 2020. – Vol. 70. – P. 413-421.

31. The American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Standards and Guidelines. - URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines> (дата обращения: 29.08.2021).

32. Holm L., Schaufelberger J.E. Construction Cost Estimating. – Routledge, 2021.

33. Carter N., Bryant-Lukosius D., DiCenso A., Blythe J., Neville A.J. The use of triangulation in qualitative research//Oncology Nursing Forum, 2014, Vol. 41, No. 5, P. 545-547.