



СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
СТАЛЬНЫХ И БЕТОННЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ
НА ПРИМЕРЕ ДВУХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ
В ИРАНЕ

АРСС

Ассоциация развития
стального строительства

Статья

Сравнительная оценка жизненного цикла стальных и бетонных каркасов зданий на примере двух жилых зданий в Иране

Амир Олазими ¹, Саид Мансур ^{1,*} и Сейед Аббас Хоссейниджу ²

¹ Кафедра промышленной инженерии и систем управления, Технологический университет имени Амира Кабира, 15916-34311 Тегеран, Иран; amirazimi2093@aut.ac.ir

² Кафедра промышленной инженерии, Инженерный факультет, Университет Голестана, 49138-15759 Голестан, Иран; sa.hosseini@gu.ac.ir

* Эл. почта: s.mansour@aut.ac.ir

Дата получения: 27 января 2020 г.; дата утверждения: 29 февраля 2020 г.; дата публикации: 12 марта 2020 г.

Аннотация: учитывая тот факт, что в последние годы большинство зданий в Иране было построено на основе стальных, либо бетонных каркасов, важно изучить влияние материалов, используемых в таких конструкциях, на окружающую среду. Для этой цели в настоящем исследовании рассматриваются два многоэтажных жилых здания с аналогичным функционалом, построенные в Тегеране. Одно здание было построено на стальном каркасе, а другое построено из бетона. С помощью инструмента оценки жизненного цикла был проведен полный анализ всех этапов жизненного цикла здания: от закупки сырьевых материалов до сноса и переработки строительных отходов. В рамках исследования были рассмотрены такие факторы воздействия на окружающую среду, как потенциал глобального потепления в течение следующих 100 лет, окисление, потенциал эвтрофикации, токсичность для человека (онкологические и другие заболевания), истощение ресурсов (вода и минеральные ресурсы), изменение климата, потребление ископаемых видов топлива, подкисление воздуха и биотоксичность. На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что общее загрязняющее воздействие бетонного каркаса по всем одиннадцати вышеупомянутым факторам почти на 219 000 тонн превышает показатель стального каркаса. Кроме того, результаты показали, что бетонный каркас отличался худшими характеристиками в отношении всех факторов воздействия, кроме одного. Что касается потенциала глобального потепления, то результаты исследования показывают, что воздействие на процесс глобального потепления оказывают два типа органических и неорганических газов. Среди неорганических выбросов CO₂ вносит наибольший вклад в потенциал глобального потепления, в то время как среди органических выбросов наибольшее влияние оказывает метан. Такие результаты позволяют предположить, что использование стальных каркасов в строительной индустрии Ирана является лучшим выбором для предотвращения дальнейшего причинения ущерба окружающей среде; тем не менее, в будущем необходимо провести дополнительные исследования в данной области для полного изучения всех аспектов правильного выбора каркасов зданий, включая экономические и социальные аспекты.

Ключевые слова: оценка жизненного цикла; программное обеспечение GaBi; строительные материалы; бетонный каркас; стальной каркас.

1. Введение

Строительная отрасль является крупнейшим потребителем энергии в Иране, поэтому уровень энергопотребления зданий и коммерческих секторов за последние годы вырос с 30 % до 41 % [1]. Данный показатель энергопотребления превышает международные стандарты и показатели многих других стран. В глобальном масштабе строительная отрасль развивается беспрецедентными темпами, и, судя по всему, эта тенденция сохранится. Ожидается, что в течение следующих 40 лет в существующий объем будут добавлены 230 миллиардов квадратных метров новых строительных площадей [2]. Строительная промышленность привела к значительному загрязнению окружающей среды. Кроме того, ожидается, что к 2050 году выброс парниковых газов, основным источником которых является строительная промышленность, увеличится на 110 % [3]. Также известно, что строительная отрасль характеризуется производством около 30 % парниковых газов антропогенного происхождения и почти 40 % энергопотребления [4].

Использование более эффективных методов в строительной промышленности может привести к значительному улучшению ситуации в различных областях, включая снижение конечного энергопотребления на 42 %, выбросов парниковых газов на 35 %, использования добываемых материалов на 50 % и воды на 30 % [5]. Исследования, проведенные на примере 60 жилых и нежилых зданий в девяти странах, показали, что на материалы, используемые в низкоэнергетических и обычных зданиях, приходится соответственно 46 % и 38 % выбросов углерода [6]. Глобальное производство строительных материалов, таких как цемент и сталь, требует около 26 эксаджоулей, что составляет около 6 % от мирового энергопотребления [2]. С ростом численности мирового населения растет и потребность в жилом и рабочем пространстве. Исследования альтернативных методов проектирования зданий показали, что промышленность оказывает существенное влияние на глобальное изменение климата, а также на экосистемы [7]. Загрязнение из-за строительной деятельности главным образом обусловлено использованием материалов, различными методами строительства, сноса и переработки [8]. В последние годы наряду с повышением уровня жизни наблюдается использование в зданиях все большего количества различных сырьевых материалов и видов энергии, что, в свою очередь, приводит к увеличению объема отходов. Тем не менее, по сравнению с прочими секторами, строительство все же обладает большим потенциалом для достижения экоустойчивости, поскольку на этапе планирования можно отобрать надлежащие материалы [9]. В своих исследованиях Хамиди и Булбул [10] использовали инструменты оценки жизненного цикла, такие как SimaPro и Athena, для изучения воздействия внешних стен здания университета на окружающую среду с использованием двух различных сценариев. Тем временем Робертсон и др. [7] изучили воздействие на окружающую среду и объем энергозатрат на примере двух среднеэтажных зданий с каркасами из железобетона и деревянного бруса, находящихся в Канаде. При изучении этапов жизненного цикла многоэтажных зданий Сиднейского университета Базалья и др. [3] сравнили объем выбросов парниковых газов, источником которых являются бетонные перекрытия, многослойные клееные деревянные панели и деревожелезобетонные балки. В последние годы большинство зданий в Иране и других частях мира были построены с использованием либо бетонных, либо стальных каркасов. Таким образом, важно изучить воздействие бетонных и стальных каркасов на окружающую среду. В ходе исследования трех несущих каркасов (бетон, сталь и древесина) для каждого из них были проведены анализы экологического воздействия и экономической эффективности [11]. В своем исследовании двух офисных зданий, одного с бетонным каркасом, другого – со стальным, Гуггемос и Хорват [8] выполнили оценку выбросов парниковых газов и объема энергопотребления. При сравнении трех зданий, возведенных на базе бетонного, стального и деревянного каркасов, Коул и Кернан [12] учитывали такие факторы, как транспортировка рабочих, перевозка материалов и тяжелого оборудования, а также материально-техническое обеспечение строительных работ для получения более четкого представления о потреблении энергии и выбросах парниковых газов.

В настоящем исследовании мы приложили усилия для подготовки двух аналогичных конструкций с различными каркасами и создали две модели жизненного цикла для получения уникальные результаты, которые могут оказаться неоценимыми в плане повышения осведомленности как местного населения, так и проектировщиков о воздействии каркасов на окружающую среду. Насколько нам известно, наше исследование является первым исследованием в Иране, в котором учитывались два типа несущих каркасов и оценивались их воздействия на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла. Кроме того, столица Ирана, Тегеран, страдает от сильного загрязнения, а местная строительная промышленность играет решающую роль в этом вопросе. Результаты исследования могли бы иметь практическое значение для предотвращения дальнейшего нанесения ущерба окружающей среде на местном уровне, поскольку ранее в стране такого исследования не проводилось.

2. Методика исследования

2.1. Оценка жизненного цикла (LCA)

Существуют различные способы определения объема выбросов загрязняющих веществ на каждом этапе жизненного цикла здания. Среди них метод оценки жизненного цикла (LCA). В контексте строительства LCA представляет собой комплексный подход к оценке всех этапов жизненного цикла здания, включая добычу и производство материалов, их транспортировку, строительные работы, использование и техническое обслуживание и впоследствии снос, для того чтобы дать широкую и полную оценку общего загрязняющего воздействия здания. В целом LCA обеспечивает всестороннюю оценку воздействия строительства на окружающую среду посредством проверки всех процессов, мероприятий и продуктов, связанных с жизненным циклом здания. Также этот метод известен как модель полного цикла существования [13]. В рамках метода LCA обсуждаются различные сценарии и возможности, с тем чтобы свести к минимуму потребление энергии и ресурсов и уменьшить воздействие строительных материалов на окружающую среду.

LCA здания делится на три этапа: подготовительные работы к строительству, строительные работы и работы после проведения строительства [14]. Данный метод оценки позволяет получить ряд входных параметров (таких как сырьевые материалы и энергия) и выходных параметров (например, выбросы в атмосферу, переносимые водой отходы, твердые отходы и другие загрязняющие вещества), сумма которых приводит к экологическому ущербу, например к потенциалу глобального потепления, возможному разрушению озонового слоя, потенциалу окисления, увеличению энергопотребления и эвтрофикации [15]. Согласно рисунку 1 метод LCA включает четыре взаимосвязанных этапа, а именно: определение цели и области исследования, инвентаризационный анализ жизненного цикла, оценка воздействия жизненного цикла и интерпретация жизненного цикла [16].



Рисунок 1. Модель оценки жизненного цикла в соответствии с ИСО 14044

2.2. Программное обеспечение GaBi

В последние годы были разработаны различные программы для расчета оценки жизненного цикла. Среди различных типов таких программ можно назвать Gabi, SimaPro, Open LCA и Umberto [17]. SimaPro и Gabi – это две известные программы, используемые многими специалистами в качестве основной вспомогательной утилиты [18]. Используемые для LCA инструменты делятся на три основные группы: первая группа включает инструменты, которые фокусируются на материалах и продуктах для строительства зданий, например ПО SimaPro, Gabi и Umberto. Вторая группа охватывает весь процесс строительства и включает такие программы, как Athena, EcoQuantm, Envest, а также EnergyPlus. К третьей группе относятся инструменты, которые обеспечивают полную оценку экоустойчивости, а именно: оценку экологических, экономических и социальных аспектов строительства. Последняя группа включает такие программы, как LEED, GBTool и Green Globes [19]. Следует отметить, что такое ПО, как GaBi, является более предпочтительным по сравнению с другими инструментами LCA благодаря своей способности создавать процессы и анализировать сценарии, оценивать все этапы жизненного цикла, выполнять оптимизированное моделирование и создавать статические отчеты [20]. Это ПО создает совершенную модель всех элементов продукта или системы на основе его/ее жизненного цикла и дает возможность принять наилучшее решение по производству продукта [21]. Учитывая вышеизложенное и тот факт, что исследование в основном было посвящено оценке компонентов и материалов, используемых в несущих каркасах из бетона и стали, для анализа данных по рассматриваемому жизненному циклу использовалось учебное ПО GaBi версии 8.7.

Как показано на рисунке 2, ПО Gabi учитывает различные процессы, создавая для каждого один входной и один выходной параметр, в результате чего устанавливает связи между всеми процессами для формирования цепочки поставок. Данная программа осуществляет анализ всех этапов жизненного цикла в целях проведения комплексной оценки потенциала глобального потепления, разрушения озонового слоя, окисления, эвтрофикации, токсичности для человека и, наряду с прочим, истощения ресурсов [21].

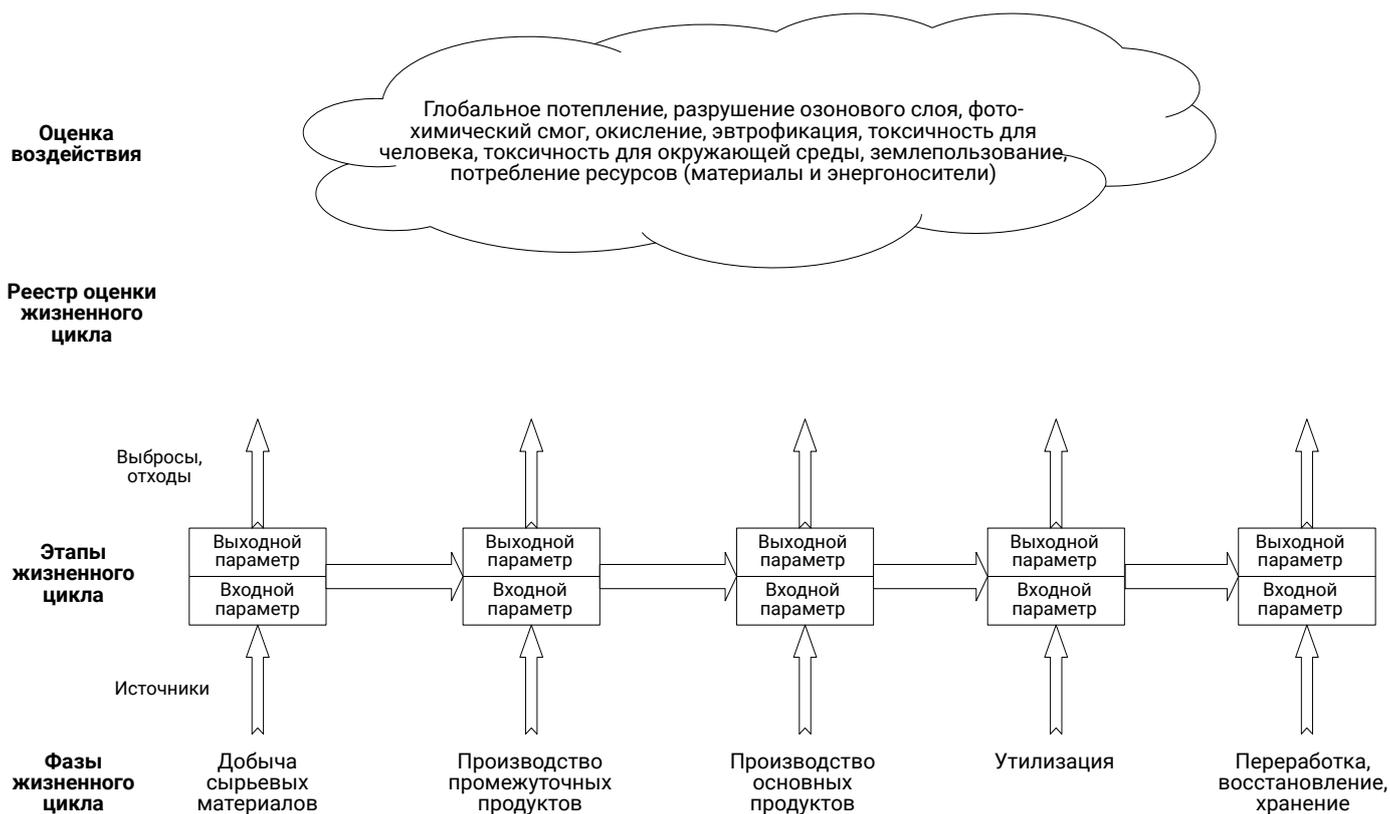


Рисунок 2. Обзор оценки жизненного цикла в ПО GaBi [21].

2.3. Методика оценки воздействия жизненного цикла

На основе одиннадцати, уже упомянутых, в настоящем исследовании факторов воздействия, для оценки воздействия был использован метод ReCiPe. Данный метод использует два способа оценки, когда речь идет о различных факторах воздействия — промежуточный и конечный. GaBi использует промежуточный способ применительно к таким факторам воздействия, как те, что упоминаются в настоящем исследовании, поскольку он может обеспечить более надежную оценку с меньшей степенью неопределенности [21,22].

2.4. Сбор данных

Данные, необходимые для оценки различных этапов жизненного цикла двух зданий, были получены из различных источников. Данные об этапе строительства (включая спецификацию материалов для двух каркасов) были получены от инженеров-проектировщиков зданий и подрядчиков. На рисунке 3 изображен общий план двух несущих каркасов. Данные, необходимые для закупки сырьевых материалов, производства материалов и стадий завершения жизненного цикла, были получены из международных источников (таких как международные стандарты и руководства), а также из местных источников (таких как национальные стандарты, руководства и отраслевые отчеты).

2.5. Моделирование жизненного цикла двух несущих каркасов в ПО GaVi

2.5.1. Определение цели и области исследования (системные ограничения)

Первым шагом в LCA является определение цели и области исследования, а также определение системных ограничений. Как уже упоминалось, цель настоящего исследования заключалась в оценке объема загрязнения, вызванного двумя наиболее распространенными несущими каркасами многоэтажных зданий в Иране, а именно шестиэтажного здания на базе бетонного каркаса и семиэтажного здания на базе стального каркаса, которые были специально выбраны для оценки. Функциональный блок был определен как материалы, используемые в бетонных и стальных каркасах двух жилых зданий с полезной площадью этажей 4900 кв. метров каждое, расположенных в северной части Тегерана и эксплуатируемых в течение всего 50-летнего жизненного цикла.

Поскольку исследование было в основном сосредоточено на сравнении несущих каркасов двух зданий, другие части, такие как стены и полы, были определены как идентичные. Таким образом, в ПО GaVi был смоделирован только жизненный цикл двух каркасов, в то время как другие части зданий были исключены из процесса моделирования.

Кроме того, следует отметить, что эти две конструкции соответствуют требованиям одних и тех же строительных стандартов, установленных муниципалитетом Тегерана. Таким образом, согласно исследованию их функции также были определены как идентичные. Для оценки воздействия двух альтернативных каркасов на окружающую среду, как показано на рисунке 4, во внимание были приняты все этапы, включая закупку сырьевых материалов, производство материалов, строительство, использование и в конечном итоге переработка по окончании жизненного цикла и захоронение отходов.

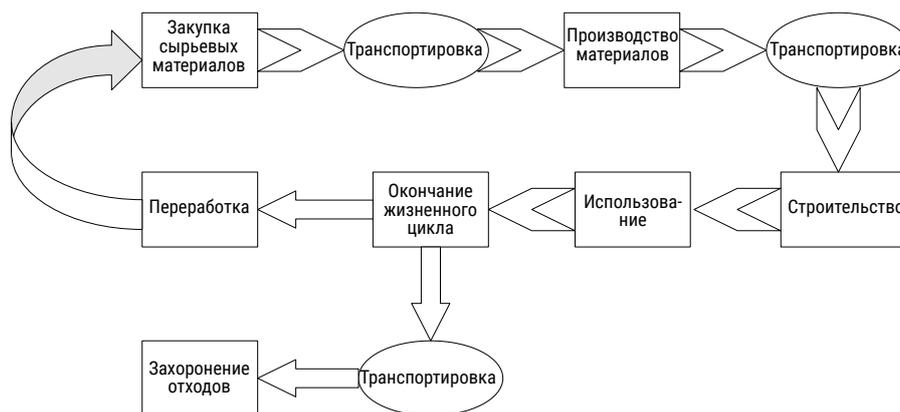


Рисунок 4. Системные ограничения.

Рисунок 4. Системные ограничения.

2.5.2. Закупка сырьевых материалов

Данные, собранные на основе двух планов зданий, свидетельствуют о том, что основными материалами, используемыми для двух несущих каркасов, являются бетон, сталь и арматурная сталь. Исходя из имеющихся данных о мировом рынке стальной продукции [23], для производства 1 тонны стали требуется 56 % железной руды плюс 28 % металлургического кокса, а также 16 % стального скрапа. Для производства 1 м³ бетона требуется примерно 76 % гравия и 24 % портландцемента. Эти данные приведены в таблицах 1 и 2 и отражают точное количество сырьевых материалов (на тонну).

Таблица 1. Состав стали

Материал	Процентное содержание на ед. (массы)	Масса (т)
Железная руда	56 %	423
Металлургический кокс	28 %	212
Стальной скрап	16 %	121

Таблица 2. Состав бетона

Материал	Процентное содержание на ед. (массы)	Масса (т)
Портландцемент	24 %	1521
Гравий	76 %	4814

2.5.3. Производство материалов

На данном этапе сырьевые материалы передаются на предприятия, производящие строительные материалы, откуда продукция будет транспортироваться на строительные площадки [24]. В таблицах 3 и 4 показано расстояние, на которое должен был перевозиться каждый материал, а также местонахождение производственных предприятий и транспортные средства, использовавшиеся для перевозки. Следует отметить, что автобетономешалки используются для перевозки бетонных смесей, которые обычно измеряются в единицах объема (кубический метр), однако из-за отсутствия таких транспортных средств в базе данных ПО GaVi были учтены обычные грузовые автомобили, и поэтому все предполагаемые объемы были преобразованы в массу для масштабирования.

Таблица 3. Транспортировка компонентов бетона

Материал	Местонахождение завода	Расстояние до бетонного завода (км)	Тип грузового автомобиля
Портландцемент	Тегеран	10	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т
Гравий	Тегеран	10	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т

Таблица 4. Транспортировка компонентов стали

Материал	Местонахождение завода	Расстояние до сталелитейного завода Исфахана (км)	Тип грузового автомобиля
Железная руда	Керман	670	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т
Металлургический кокс	Керман	670	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т
Стальной скрап	Исфахан	10	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т

2.5.4. Этап строительства

Поскольку характер исследования предполагал оценку воздействия материалов, используемых в несущих каркасах, на окружающую среду, этап строительства был определен как процесс доставки необходимых материалов с заводов на строительную площадку, а другие строительные работы были исключены из моделирования в силу того, что ПО GaVi рассматривает только материалы и их транспортировку, а не строительные операции. Данные, приведенные в таблице 5, представляют собой объем материалов, необходимых для двух несущих каркасов, которые были взяты из планов зданий, возведенных на их базе. В таблице 6 отображена информация о транспортировке каждого строительного материала. Выходным параметром данного этапа являются рассматриваемые несущие каркасы.

Таблица 5. Общее количество каждого материала

Материал	Бетонный каркас	Стальной каркас
Бетон	3481 м ³ *	2543 м ³
Конструкционная сталь	-	474 т
Арматурная сталь	351 т	282 т

* Из-за отсутствия данных об объеме автобетономешалок в базе данных ПО GaVi все объемы были преобразованы в эквивалентную массу (1 м³ считался как 2500 кг).

Таблица 6. Транспортировка

Материал	Местонахождение завода	Расстояние до строительной площадки (км)	Тип грузового автомобиля
Бетон	Тегеран	10	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т
Конструкционная сталь	Исфахан	450	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т
Арматурная сталь	Исфахан	450	Грузовик, класс Евро 0–6 микс, вес автомобиля с грузом 20–26 т

2.5.5. Этап использования

Несмотря на то, что процессы ремонта и технического обслуживания некоторых частей зданий рассматривались в ряде исследований, в Иране такие данные по несущим каркасам отсутствуют. Кроме того, в ходе настоящего исследования оба несущих каркаса были изучены отдельно, и, как представляется, они не производили значительных выбросов в течение стандартного 50-летнего жизненного цикла. В связи с этим какие-либо работы по капитальному ремонту или техническому обслуживанию в рамках исследования предусмотрены не были.

2.5.6. Этап окончания жизненного цикла

Этот процесс не представляется совершенно ясным, поэтому данная тема обычно игнорируется в LCA здания [25]. Брун и Мензис [13] использовали два сценария сноса и повторного использования для изучения воздействия трех типов стен на окружающую среду. Джервасио [24] перечислил пять сценариев для окончания жизненного цикла (EoL) здания: три сценария, включая захоронение, переработку и повторное использование стальных конструкций, а также два сценария переработки и захоронения бетонных конструкций. На данном этапе 100 % стального скрапа, полученного после сноса стального здания, считаются пригодными для переработки, в то время как в бетонном здании на переработку отправляется 85 % арматурной стали, а весь бетон подлежит захоронению [11]. Поскольку жизненный цикл двух зданий, рассматриваемых в настоящем исследовании, составляет 50 лет, очевидно, что по истечении этого периода и после сноса останется стальной скрап и бой бетона. Для каждого из этих материалов был разработан отдельный сценарий. Согласно рисунку 5, на котором отображены процессы ПО GaVi, первый сценарий включает переработку стального скрапа и его повторное использование для промышленного производства стали. В то же время второй сценарий предусматривает передачу боя бетона на захоронение с целью утилизации. В таблице 7 приведена информация о массе каждого материала на этапе EoL зданий. Следует отметить, что расстояние для перевозки боя бетона со строительной площадки на место захоронения было принято равным 50 км, а расстояние для перевозки стального скрапа – 10 км.

Таблица 7. Выходные параметры по окончании жизненного цикла

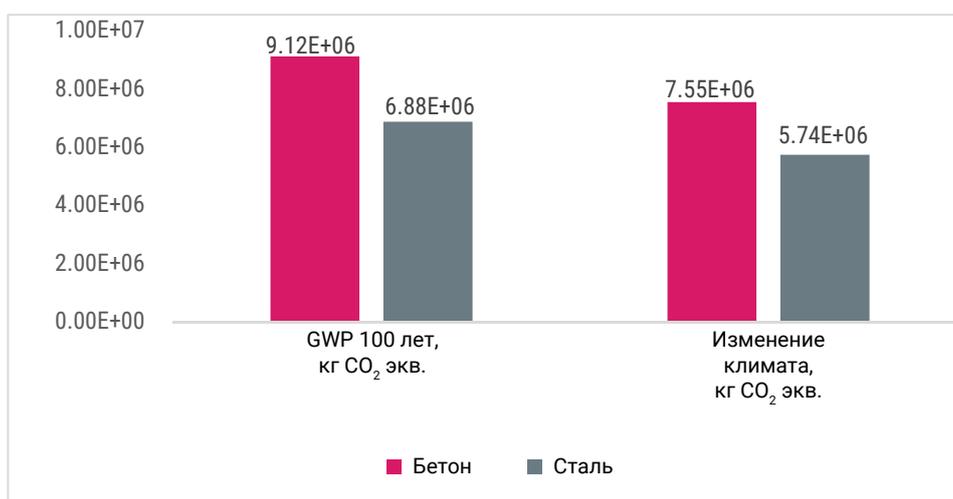
Материал	Бетонный каркас	Стальной каркас
Гравий для бетона	8702 т	6335 т
Стальной скрап	3511	756 т

На рисунке 5 показаны все процессы, связанные с жизненным циклом двух несущих каркасов, смоделированные с помощью ПО GaVi.

3. Обсуждение результатов

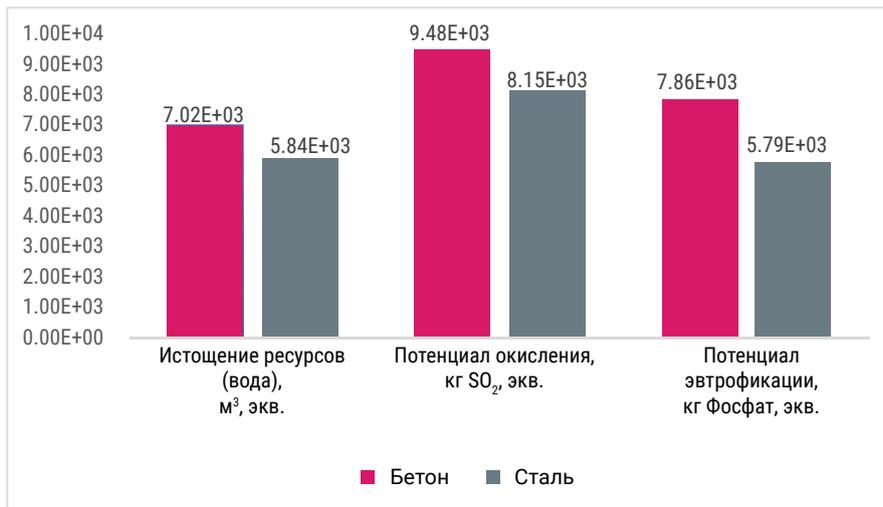
3.1. Воздействие жизненного цикла двух типов каркасов

Результаты, полученные в ПО GaBi, содержат исчерпывающую информацию о воздействии каждого этапа жизненного цикла несущих каркасов. В рамках других исследований для анализа такого воздействия учитывались различные параметры. Для оценки воздействия рассматривались такие факторы, как потенциал глобального потепления, токсичность для человека, эвтрофикация, истощение ископаемых видов топлива и окисление [11, 26, 27]. В настоящем исследовании, как показано на рисунке 6, оценивалось воздействие потенциала глобального потепления в течение 100 лет, окисления, эвтрофикации, токсичности для человека (с учетом онкологических и других заболеваний) и истощения ресурсов (воды, минералов и возобновляемых ресурсов), а также изменения климата, истощения ископаемых видов топлива и токсичности для окружающей среды. Согласно результатам, полученным в ПО GaBi, и результатам сравнения двух бетонных и стальных зданий выяснилось, что в большинстве случаев бетонные здания являются источником большего количества загрязняющих веществ. Как показано на рисунке 6а, при объеме производства в 9120 т (CO_2 , экв.), бетонное здание оказало существенное воздействие на потенциал глобального потепления (GWP) в отличие от стального здания, которое является источником меньшего (на 24 %) количества загрязняющих веществ. За период EoL бетонного здания образовалось на 2000 т (CO_2 , экв.) больше загрязнений, чем у стального здания, что свидетельствует о заметном различии между их воздействиями. Кроме того, оценка этапов закупки сырьевых материалов и производства материалов показала 21,67 % и 0,5 % воздействия бетонного здания на GWP, соответственно; воздействие же стального здания на этапах закупки и производства материалов составило 23,9 % и 1,0 %, соответственно. В отношении потенциала окисления (AP), бетонное здание стало источником 9480 кг загрязняющих веществ (SO_2 , экв.), что на 1330 кг больше показателя для стального здания. Закупка сырьевых материалов сильно повлияла на AP, так что выбросы на данном этапе составили 78 % и 81 % для бетонных и стальных зданий, соответственно. Что касается последствий изменения климата, то два бетонных и стальных здания привели к выбросу 7550 т (CO_2 , экв.) и 5740 т (CO_2 , экв.) загрязняющих веществ, соответственно. Бетонное здание стало причиной дополнительных последствий изменения климата главным образом из-за этапов закупки сырьевых материалов и EoL, которые привели к увеличению выбросов на 27 % и 16 %, соответственно. Кроме того, этап EoL оказал наибольшее влияние на потенциал эвтрофикации (EP), так как количество загрязняющих веществ от бетонного здания было на 2000 кг (фосфат, экв.) выше, чем от стального здания. Как показано на рисунке 6б, стальное здание оказало более негативное воздействие на экосистему, чем бетонное здание, только в одной категории – истощение ресурсов (минералы, ископаемые и возобновляемые ресурсы) – всего на 3,37 кг (Sb, экв.) из всех результатов оценки воздействия. На рисунке 6 показан объем выбросов загрязняющих веществ от двух несущих каркасов по каждому фактору воздействия.

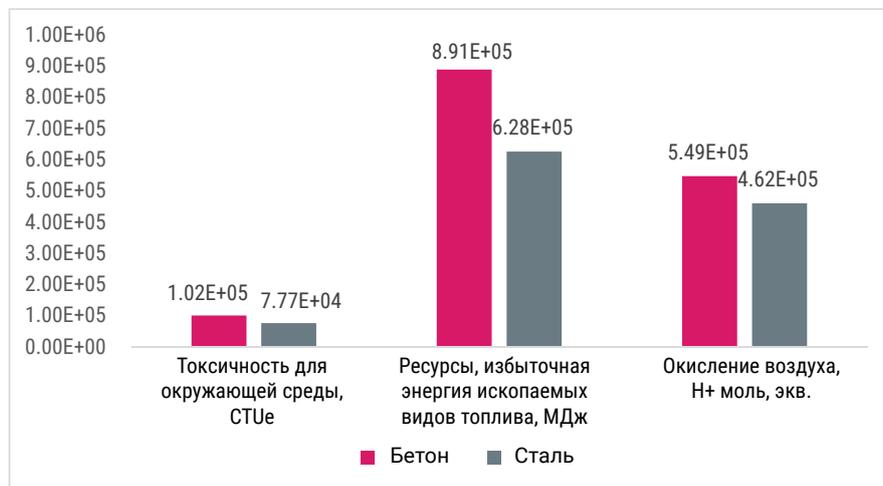


(а)

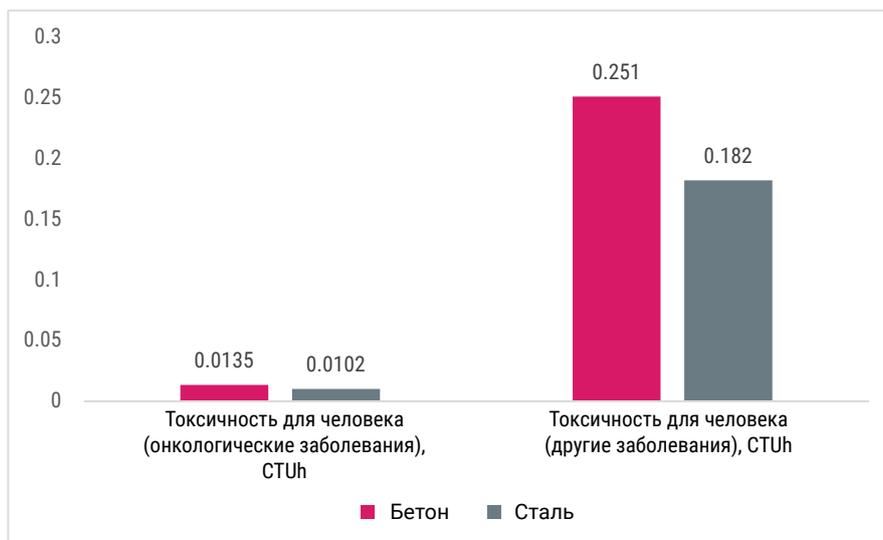
Рисунок 6. Продолжение



(b)

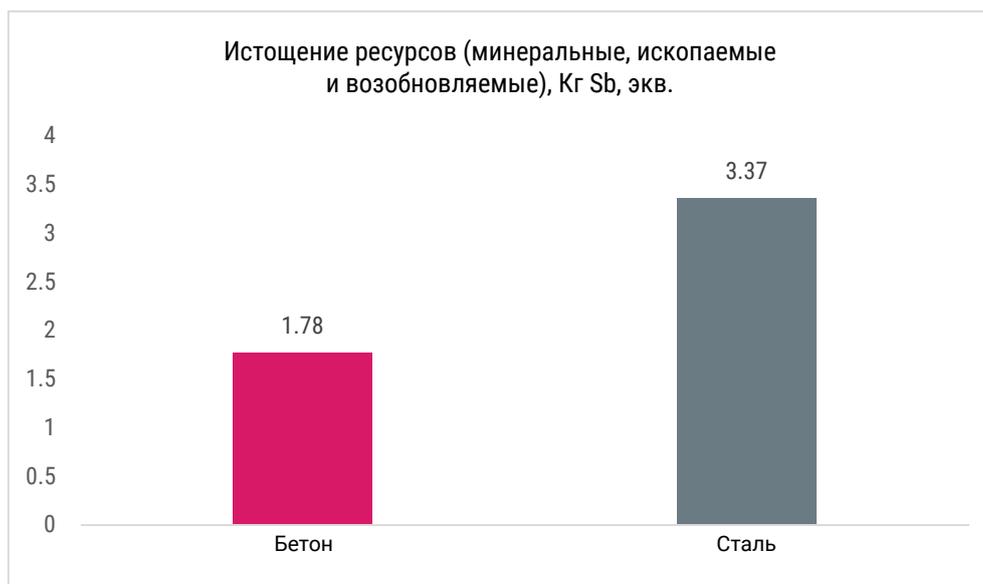


(c)



(d)

Рисунок 6.



(e)

Рисунок 6. Результаты оценки воздействия жизненного цикла (LCIA) для бетонных и стальных зданий в одиннадцати сценариях: (a) GWP и Изменение климата; (b) Вода, AP и EP; (c) Токсичность для окружающей среды, Ресурсы и Окисление воздуха; (d) Токсичность для человека; (e) Минеральные, ископаемые и возобновляемые ресурсы.

Согласно таблице 8 все выбросы, которые играют роль в глобальном потеплении, были разделены на две группы, а именно: органические и неорганические. Среди органических выбросов на метан приходится наибольшая доля в 59,1 %, и этот объем высвобождается в период EoL. Среди неорганических выбросов на долю диоксида углерода приходилось 30,4 %. Выбросы CO₂ происходили на трех этапах жизненного цикла, т. е. во время закупки сырьевых материалов (20,14 %), EoL (9,8 %) и производства материалов (0,5 %). Как показано в таблице 8, общий объем выбросов газа в связи с GWP составил 9770 т (CO₂, экв.), из которых 5830 т были органическими, а 3940 т – неорганическими. В таблице 8 перечислены газы, внесшие наибольший вклад в GWP; не все газы были упомянуты ввиду их незначительного воздействия.

Таблица 8. Выбросы в атмосферу от бетонного здания (кг CO₂, экв.)

Тип выбросов	Закупка сырьевых материалов	Производство материалов	Строительство	Использование	Окончание жизненного цикла	Итого
Неорганические выбросы	1,97 x 10 ⁶	3,9 x 10 ⁴	-	-	1,93 x 10 ⁶	3,94 x 10 ⁶
Диоксид углерода	1,97 x 10 ⁶	3,7 x 10 ⁴	-	-	9,28 x 10 ⁵	2,96 x 10 ⁶
Диоксид углерода (биотический)	6,1 x 10 ²	2,0 x 10 ³	-	-	9,73 x 10 ⁵	9,75 x 10 ⁵
Органические выбросы	8,8 x 10 ³	-	-	-	5,82 x 10 ⁶	5,83 x 10 ⁶
Метан	8,8 x 10 ³	-	-	-	6,25 x 10 ⁴	7,12 x 10 ⁴
Метан (биотический)	-	-	-	-	5,75 x 10 ⁶	5,75 x 10 ⁶
Всего выбросов	1,98 x 10 ⁶	4,0 x 10 ⁴	-	-	7,75 x 10 ⁶	9,77 x 10 ⁶

Согласно данным таблицы 9 все выбросы, которые приводят к глобальному потеплению, ниже примерно на 25 % в случае стального несущего каркаса. Такое снижение представляется логичным в связи с меньшим использованием бетона в конструкции и переработкой стального скрапа на этапе EoL. Что касается стальных несущих каркасов, то наибольшие выбросы были связаны с метаном (57,1 %) и диоксидом углерода (32,5 %). Общий объем выбросов сократился до 7350 т (CO₂, экв.), из которых 4250 т (CO₂, экв.) были органическими, а 3100 т (CO₂, экв.) – неорганическими.

Таблица 9. Выбросы в атмосферу от стального здания (кг CO₂, экв.)

Тип выбросов	Закупка сырьевых материалов	Производство материалов	Строительство	Использование	Окончание жизненного цикла	Итого
Неорганические выбросы	1,63 x 10 ⁶	6,7 x 10 ⁴	-	-	1,4 x 10 ⁶	3,1 x 10 ⁶
Диоксид углерода	1,63 x 10 ⁶	6,3 x 10 ⁴	-	-	6,95 x 10 ⁵	2,39 x 10 ⁶
Диоксид углерода (биотический)	-	3,3 x 10 ³	-	-	7,08 x 10 ⁵	7,1 x 10 ⁵
Органические выбросы	1,5 x 10 ⁴	-	-	-	4,23 x 10 ⁶	4,25 x 10 ⁶
Метан	1,5 x 10 ⁴	-	-	-	4,55 x 10 ⁴	6,04 x 10 ⁴
Метан (биотический)	-	-	-	-	4,19x10 ⁶	4,19 x 10 ⁶
Всего выбросов	1,98 x 10 ⁶	4,0 x 10 ⁴	-	-	5,64 x 10 ⁶	7,35 x 10 ⁶

3.2. Сопоставление полученных результатов с результатами других исследований

В рамках нескольких исследований была проведена оценка воздействия двух несущих каркасов на окружающую среду. В ходе исследования, проведенного на примере четырех зданий (двух многоэтажных и двух малоэтажных), возведенных на базе стальных или железобетонных каркасов, объем выбросов CO₂ и потребляемой энергии был рассчитан методом анализа входных и выходных параметров. Результаты показали, что выбросы CO₂ и энергопотребление для железобетонных несущих каркасов на 26 % меньше, чем для стальных несущих каркасов, и что усиленные несущие каркасы являются более оптимальным выбором с точки зрения воздействия на окружающую среду [28]. Джервасио [24] выбрал два многоквартирных дома, один из которых возведен на базе бетонного каркаса, а другой – стального, для оценки жизненного цикла стен и несущих каркасов. В исследовании влияние на окружающую среду и энергопотребление этих двух зданий было рассчитано для четырех этапов, а именно: производство материалов, строительство, эксплуатация и окончание жизненного цикла. Результаты анализа LCA показали, что бетонное здание является источником большего количества загрязняющих выбросов, чем стальное здание по таким аспектам, как потребление ресурсов, здоровье человека и экосистема. С точки зрения энергопотребления стальной несущий каркас более устойчив и потребляет меньше энергии. В исследовании, где сравнивались только несущие каркасы, были выбраны четырехэтажные здания, соответствующие австралийским стандартам, и использовалось LCA ПО SimaPro для анализа объема выбросов загрязняющих веществ от бетонных, деревянных и стальных несущих каркасов и их воздействия на потенциал глобального потепления, токсичность для человека, потенциал эвтрофикации, а также потребление ископаемых видов топлива и потенциал окисления. Влияние неопределенности на экологическую функцию было оценено с использованием модели Монте-Карло 1000 в ПО SimaPro, и результаты показали больший объем выбросов от бетонного каркаса, чем от двух других каркасов [11].

Результаты этих исследований свидетельствуют о том, что выходные параметры могут варьироваться в зависимости от конкретного случая с учетом различных географических и климатических условий. Кроме того, использование различных методов и программ также может привести к определенным результатам [29]. Таким образом, в настоящем исследовании, где для анализа использовалось ПО GaBi, результаты показали, что в целом бетонный каркас является источником большего объема выбросов загрязняющих веществ. На рисунке 7 показан общий уровень выбросов по всем факторам воздействия. Основываясь на данном рисунке, можно сказать, что общий объем выбросов загрязняющих веществ от бетонного каркаса на всех этапах жизненного цикла был почти на 219 000 т (CO₂, экв.) выше, чем у стального каркаса.

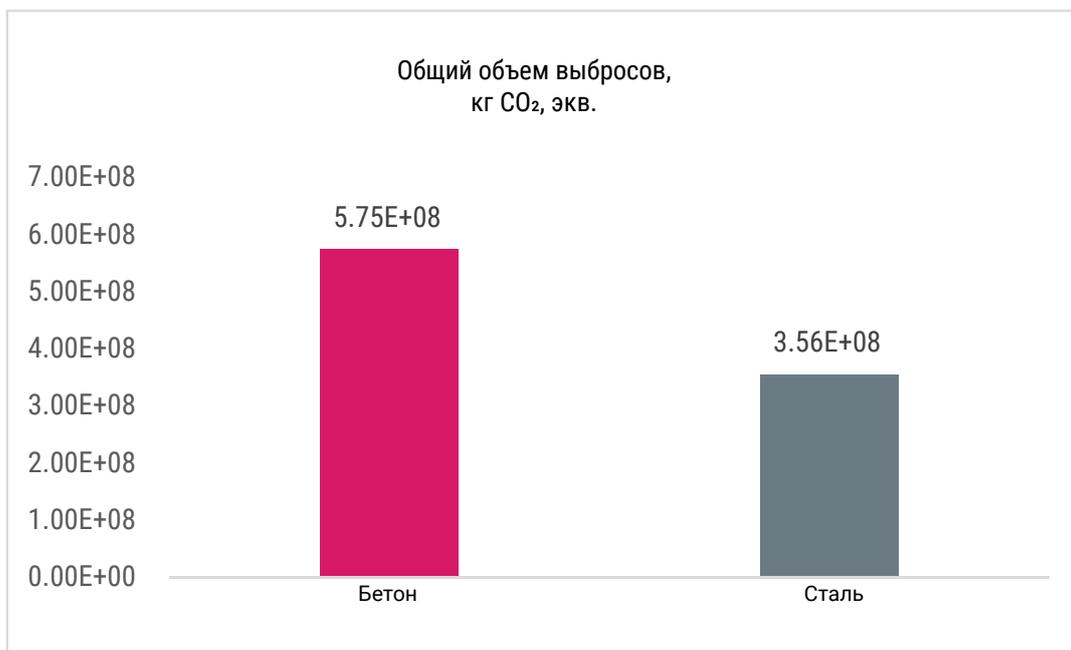
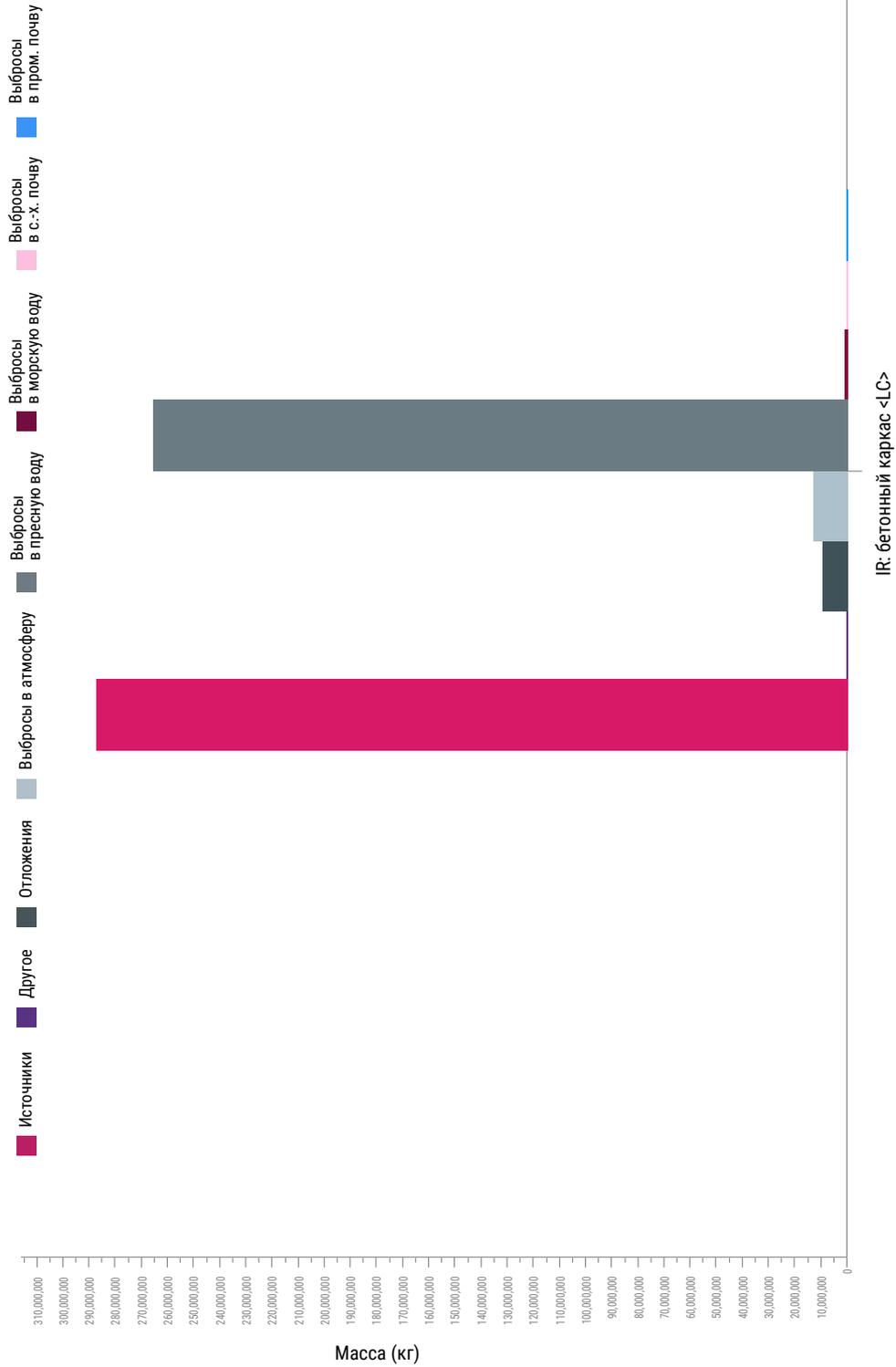


Рисунок 7. Общий объем выбросов загрязняющих веществ от двух несущих каркасов

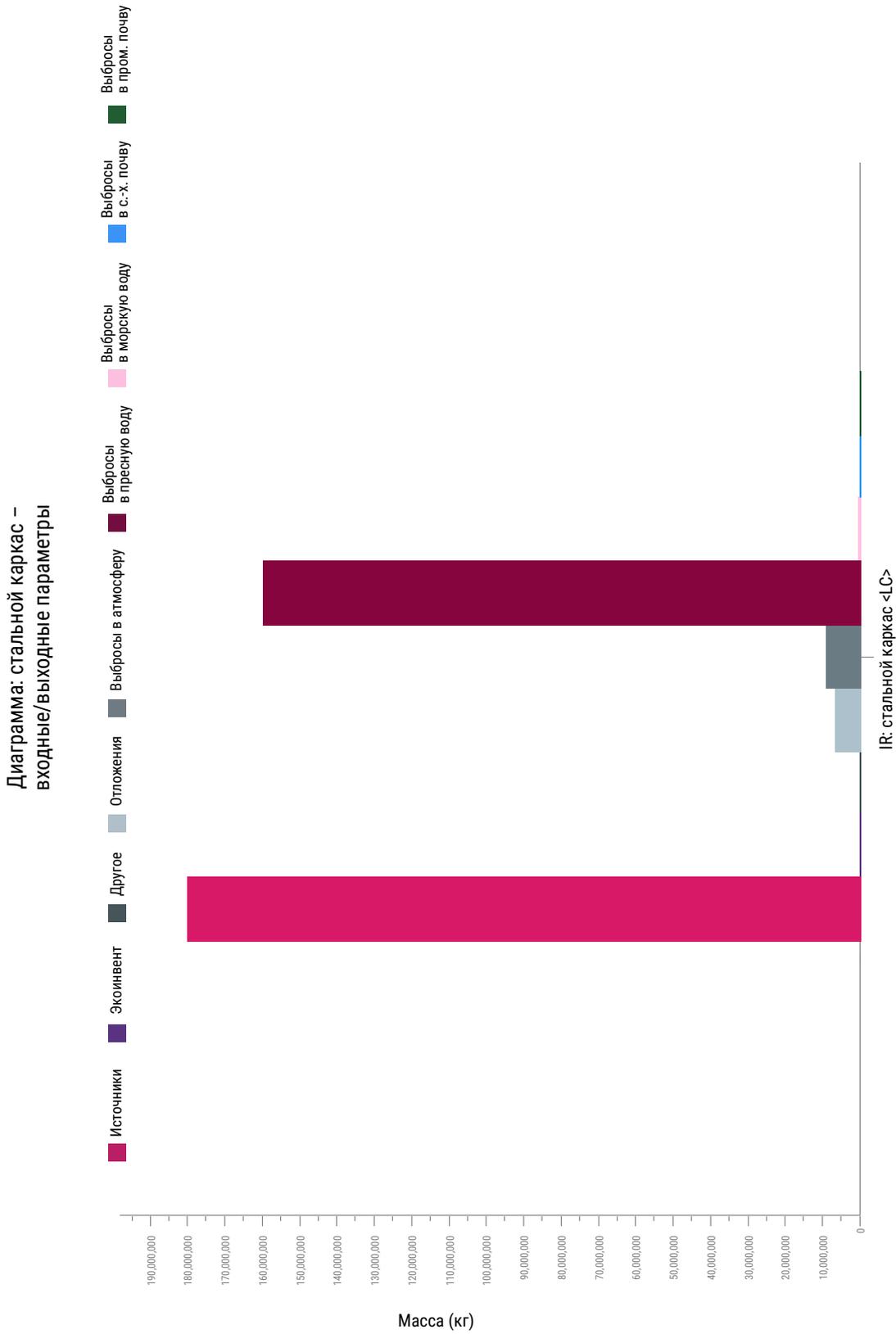
На рисунке 8 видно, что большая часть выбросов от этих двух типов зданий приходится на ресурсы, выбросы в пресную воду, выбросы в атмосферу и отложения, при этом на бетонное здание приходится 49,9 %; 46,1 %; 2,19 % и 1,59 %, соответственно. Объемы выбросов от стального здания по вышеупомянутым аспектам составили 50,6 %; 44,9 %; 2,56 % и 1,86 %, соответственно.

Диаграмма: бетонный каркас –
входные/выходные параметры



(a)

Рисунок 8. Продолжение



(b)

Рисунок 8. Общий объем выбросов в различных категориях: (а) бетонное здание; (b) стальное здание

4. Выводы

В рамках настоящего исследования был выполнен практический анализ воздействия двух многоэтажных жилых зданий на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла, одно из которых было возведено в Тегеране (Иран) на базе бетонного каркаса, а другое — на базе стального каркаса. Для проведения комплексного анализа всего жизненного цикла несущих каркасов использовался метод LCA и ПО GaBi. Результаты показали, что бетонное здание стало источником гораздо большего объема выбросов загрязняющих веществ, чем стальное здание. Значение общего объема выбросов от бетонного здания на различных этапах превысило значение для стального здания на 38 %. Кроме того, уровень выбросов на этапах закупки сырьевых материалов и EoL был выше, чем на всех других этапах жизненного цикла. На этапе EoL имела возможность переработки и повторного использования стального скрапа, в то время как бетонные каркасы подлежали захоронению, что оказывает негативное воздействие на экосистему. Результаты данного исследования показали, что стальной каркас в строительной промышленности является более экологичным решением, чем бетонный каркас. Вместе с тем застройщик может руководствоваться другими аспектами и критериями при выборе несущего каркаса. Таким образом, в будущих исследованиях также могут рассматриваться и другие аспекты выбора несущего каркаса, такие как экономические и социальные факторы. Для этих исследований могут использоваться такие методы, как оценка стоимости жизненного цикла (LCC) и социальная оценка жизненного цикла (SLCA).

Вклад авторов: концептуализация, А. О.; методология, С. М.; программное обеспечение, А. О.; проверка, С. М.; формальный анализ, С. М.; исследование, А. О.; ресурсы, А. О.; курирование данных, С. М., С. А. Х.; написание текста — подготовка проекта оригинального документа, А. О.; написание текста — просмотр и редактирование, С. М., С. А. Х., визуализация, А. О.; контроль, С. М.; управление проектом, М.; финансирование, Ю. Ю. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Список благодарностей от авторов: все авторы хотели бы выразить благодарность команде GaBi Education Team за их сотрудничество при подготовке настоящего документа.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сокращения

LCA	Оценка жизненного цикла
LCIA	Оценка воздействия жизненного цикла
GWP	Потенциал глобального потепления
AP	Потенциал окисления
EP	Потенциал эвтрофикации
GHG	Парниковые газы
EoL	Окончание жизненного цикла
BOM	Спецификация материалов
Sb	Сурьма
t	Тонна

Список литературы

1. Информационное агентство иранских студентов (ISNA). 2017. Доступно в Интернете: <https://www.isna.ir/> (по состоянию на 10 августа 2019 г.). (Iranian Students' News Agency (ISNA). 2017. Available online: <https://www.isna.ir/> (accessed on 10 August 2019)).
2. Глобальный отчет о состоянии. На пути к нулевому уровню выбросов, эффективности и устойчивости строительного сектора. 2017. Доступно в Интернете: <https://www.worldgbc.org/news-media/global-status-report-2017> (по состоянию на 5 августа 2019 г.). (Global Status Report. Towards a Zero-Emission, Efficient, and Resilience Building and Construction Sector. 2017. Available online: <https://www.worldgbc.org/news-media/global-status-report-2017> (accessed on 5 August 2019)).
3. Базалья Б.; Льюис К.; Шрестха Р.; Крюс К. Сравнительный метод оценки жизненного цикла двух инновационных большепролетных деревянных перекрытий и их железобетонных эквивалентов в австралийском контексте. В отчете о Международной конференции по строительному проектированию, ориентированному на результат и жизненный цикл, Брисбен, Австралия, 9–11 декабря 2015 г. (Basaglia, B.;

- Lewis, K.; Shrestha, R.; Crews, K. A comparative life cycle assessment approach of two innovative long span timber floors with its reinforced concrete equivalent in an Australian context. In Proceedings of the International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering, Brisbane, Australia, 9-11 December 2015.).
4. Программа ООН по окружающей среде. Строительство и изменение климата: краткий обзор для лиц, принимающих решения. 2009. Доступно в Интернете: <https://europa.eu/capacity4dev/unep/document/buildings-and-climate-change-summary-decision-makers> (по состоянию на 5 августа 2019 г.). (UNEP. Building and Climate Change: Summary for Decision Makers. 2009. Available online: <https://europa.eu/capacity4dev/unep/document/buildings-and-climate-change-summary-decision-makers> (accessed on 5 August 2019)).
 5. Европейская комиссия. Ресурсоэффективность в строительстве; 2014. Доступно в Интернете: <https://ec.europa.eu/environment/eusssd/pdf/Resource%20efficiency%20in%20the%20building%20sector.pdf> (по состоянию на 5 августа 2019 г.). (European Commission. Resource Efficiency in the Building Sector; 2014. Available online: <https://ec.europa.eu/environment/eusssd/pdf/Resource%20efficiency%20in%20the%20building%20sector.pdf> (accessed on 5 August 2019)).
 6. Сартори И.; Хестнес А. Г. Использование энергии на протяжении жизненного цикла обычных зданий и зданий с низким энергопотреблением: обзорная статья. Энерг. здан. 2007, 39, 249-257. [[ссылка](#)] (Sartori, I.; Hestnes, A.G. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energ. Build.* 2007, 39, 249-257. [[CrossRef](#)]).
 7. Робертсон А. Б.; Лэм Ф. К.; Коул Р. Дж. Сравнительная оценка полного жизненного цикла альтернативных вариантов среднеэтажных офисных зданий: ламинированный брус или железобетон. Здания 2012, 2, 245-270. [[ссылка](#)] (Robertson, A.B.; Lam, F.C.; Cole, R.J. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: Laminated timber or reinforced concrete. *Buildings* 2012, 2, 245-270. [[CrossRef](#)]).
 8. Гуггемос А. А.; Хорват А. Сравнение воздействия стальных и бетонных каркасов зданий на окружающую среду. Журнал Инфраструктурных Систем 2005, 11, 93-101. [[ссылка](#)] (Guggemos, A.A.; Horvath, A. Comparison of environmental effects of steel-and concrete-framed buildings. *J. Infrac. Syst.* 2005, 11, 93-101. [[CrossRef](#)]).
 9. Пантели К.; Килили А.; Стасюлене Л.; Седуйките Л.; Фокайдес П. А. Основа для проектирования навесов с использованием информационного моделирования зданий и оценки жизненного цикла. Журнал гражданского строительства 2018, 20, 248-255. [[ссылка](#)] (Panteli, C.; Kyliili, A.; Stasiulienė, L.; Seduikyte, L.; Fokaides, P.A. A framework for building overhang design using Building Information Modeling and Life Cycle Assessment. *J. Build. Eng.* 2018, 20, 248-255. [[CrossRef](#)]).
 10. Хамиди, Б.; Булбул, Т. Оценка инструментов анализа жизненного цикла (LCA) для анализа воздействия зданий на окружающую среду на стадиях его жизненного цикла. Сравнительное проектирование зданий гражданского назначения 2014, 1943-1950. [[ссылка](#)] (Hamidi, B.; Bulbul, T. An Evaluation of Life Cycle Analysis (LCA) Tools for Environmental Impact Analysis of Building End-of-Life Cycle Operations. *Comp. Civ. Build. Eng.* 2014, 1943-1950. [[CrossRef](#)]).
 11. Лю Х. Р.; Эль Хананде А.; Гилберт Б. П. Сравнительное исследование жизненного цикла альтернативных материалов для каркасов австралийских многоэтажных жилых зданий: экологический и экономический подход. Журнал «Чистое производство» 2017, 166, 458-473. [[ссылка](#)] (Lu, H.R.; El Hanandeh, A.; Gilbert, B.P. A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: Environmental and economic perspective. *J. Clean. Prod.* 2017, 166, 458-473. [[CrossRef](#)]).
 12. Коул Р. Дж.; Кернан П. К. Использование энергии на протяжении всего жизненного цикла в офисных зданиях. Искусственная среда. 1996, 31, 307-317. [[ссылка](#)] (Cole, R.J.; Kernan, P.C. Life-cycle energy use in office buildings. *Build. Environ.* 1996, 31, 307-317. [[CrossRef](#)]).
 13. Брун Р.; Мензис Г. Ф. Анализ энергопотребления и воздействия систем перегородок на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла в Великобритании. Процедура строительства 2011, 21, 864-873. [[ссылка](#)] (Broun, R.; Menzies, G.F. Life cycle energy and environmental analysis of partition wall systems in the UK. *Proc. Eng.* 2011, 21, 864-873. [[CrossRef](#)]).
 14. Наджар М.; Фигейредо К.; Палумбо М.; Хаддад А. Интеграция BIM и LCA: оценка воздействия строительных материалов на окружающую среду на ранней стадии проектирования типового офисного здания. Журнал гражданского строительства 2017, 14, 115-126. [[ссылка](#)] (Najjar, M.; Figueiredo, K.; Palumbo, M.; Haddad, A. Integration of BIM and LCA: Evaluating the environmental impacts of building materials at an early stage of designing a typical office building. *J. Build. Eng.* 2017, 14, 115-126. [[CrossRef](#)]).

15. Кругманн У.; Миндерман Н.; Сенник Дж.; Эндрюс К. Дж. Оценка жизненного цикла здания Центра экологического и научного образования Комиссии Нью-Джерси Медоулендс; Центр экологического строительства Ратгерса: Нью-Брансуик, Нью-Джерси, США, 2008. (Krogmann, U.; Minderman, N.; Senick, J.; Andrews, C.J. Life-Cycle Assessment of New Jersey Meadowlands Commission Center for Environmental and Scientific Education Building; Rutgers Center for Green Building: New Brunswick, NJ, USA, 2008.).
16. Международная организация по стандартизации. ИСО 14044. Экологический менеджмент. Оценка жизненного цикла. Принцип и основные положения. 2006. Доступно в Интернете: <https://www.iso.org/standard/38498.html> (по состоянию на 10 августа 2019). (International Organization for Standardization. ISO 14044-Environmental management- Life Cycle Assessment Principle and Framework. 2006. Available online: <https://www.iso.org/standard/38498.html> (accessed on 10 August 2019)).
17. Синха Р.; Леннартссон М.; Фростелл Б. Оценка воздействия строительных конструкций на окружающую среду: сравнительное исследование. Искусственная среда. 2016, 104, 162-171. [[ссылка](#)] (Sinha, R.; Lennartsson, M.; Frostell, B. Environmental footprint assessment of building structures: A comparative study. Build. Environ. 2016, 104, 162-171. [[CrossRef](#)]).
18. Херман И. Т.; Мольтесен А. Имеет ли значение, какой инструмент оценки жизненного цикла (LCA) вы выбираете? – Сравнительная оценка SimaPro и GaBi. Журнал «Чистое производство» 2015, 86, 163-169. [[ссылка](#)] (Herrmann, I.T.; Moltesen, A. Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose?—a comparative assessment of SimaPro and GaBi. J. Clean. Prod. 2015, 86, 163-169. [[CrossRef](#)]).
19. Джраде А.; Абдулла Р. Интеграция инструментов информационного моделирования зданий и оценки жизненного цикла для проектирования экологически безопасных и энергоэффективных зданий. В материалах конференции CIB W78 2012: 29 Международная Конференция, Бейрут, Ливан, 17–19 октября 2012 г.; Доступно в Интернете: <https://www.cibw78.org/conferences/> (по состоянию на 20 августа 2019). (Jrade, A.; Abdulla, R. Integrating building information modeling and life cycle assessment tools to design sustainable buildings. In Proceedings of the CIB W78 2012: 29th International Conference, Beirut, Lebanon, 17-19 October 2012; Available online: <https://www.cibw78.org/conferences/> (accessed on 20 August 2019)).
20. Санданаяке М.; Чжан Г.; Сетунге С. Оценка выбросов в окружающую среду и воздействия строительства зданий – инструмент принятия решений для подрядчиков. Журнал гражданского строительства 2019, 21, 173-185. [[ссылка](#)] (Sandanayake, M.; Zhang, G.; Setunge, S. Estimation of environmental emissions and impacts of building construction—A decision making tool for contractors. J. Build. Eng. 2019, 21, 173-185. [[CrossRef](#)]).
21. ПО GaBi. 2018. Доступно в Интернете: <https://www.gabi-software.com/international/index/> (по состоянию на 1 августа 2019 г.). (GaBi software. 2018. Available online: <https://www.gabi-software.com/international/index/> (accessed on 1 August 2019)).
22. Дун И. Х.; Томас Нг. С. Сравнение промежуточного и конечного методов на основе ReCiPe – исследование коммерческих зданий в Гонконге. Международн. журнал «Оценка жизненного цикла» 2014, 19, 1409-1423. [[ссылка](#)] (Dong, Y.H.; Thomas Ng, S. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—A study of commercial buildings in Hong Kong. Int. J. Life Cycle Assess. 2014, 19, 1409-1423. [[CrossRef](#)]).
23. Международная Ассоциация производителей стали, 2019, По теме «Сталь», Сырьевые материалы. Доступно в Интернете: www.worldsteel.org (по состоянию на 1 августа 2019 г.). (World steel, 2019, Steel by topic, Raw materials. Available online: www.worldsteel.org (accessed on 1 August 2019)).
24. Джервасио Х. Сравнительное исследование на примере жилого здания (сталь в сравнении с бетоном) на основе количественной оценки жизненного цикла, Португалия; Факультет гражданского строительства, Коимбрский университет: Коимбра, Португалия, 2007. (Gervasio, H. Comparative Housing Case Study (Steel vs. Concrete) through a Quantitative Life Cycle Approach, Portugal; Department of civil engineering, University of Coimbra: Coimbra, Portugal, 2007).
25. Сандин Г.; Петерс Г. М.; Сванстром М. Оценка жизненного цикла строительных материалов: влияние предположений при моделировании окончания жизненного цикла. Международн. журнал «Оценка жизненного цикла» 2014, 19, 723-731. [[ссылка](#)] (Sandin, G.; Peters, G.M.; Svanstrom, M. Life cycle assessment of construction materials: The influence of assumptions in end-of-life modelling. Int. J. Life Cycle Assess. 2014, 19, 723-731. [[CrossRef](#)]).
26. Баласбанех А. Т.; Марсоно А. К. Б.; Ххалегхи С. Дж. Выбор различных гибридных деревянных конструкций для одноэтажного жилого здания средней стоимости для обеспечения экоустойчивости: экологическая, экономическая и социальная оценка. Журнал гражданского строительства 2018, 20, 235-247. [[ссылка](#)] (Balasbaneh, A.T.; Marsono, A.K.B.; Khaleghi, S.J. Sustainability choice of different hybrid timber structure for low

medium cost single-story residential building: Environmental, economic and social assessment. *J. Build. Eng.* 2018, 20, 235-247. [[CrossRef](#)].

27. Хоссейни Н.; Реза Б.; Ахтар С.; Садик Р.; Хеваг К. Система оценки устойчивости жизненного цикла (LCSA) на основе метода анализа иерархий (АНП): исследование шестиэтажных зданий, возведенных на базе деревянных и бетонных каркасов в Ванкувере. *Журнал экологического планирования и управления* 2015, 58, 1217-1241. [[ссылка](#)] (Hossaini, N.; Reza, B.; Akhtar, S.; Sadiq, R.; Hewage, K. AHP based life cycle sustainability assessment (LCSA) framework: A case study of six storey wood frame and concrete frame buildings in Vancouver. *J. Environ. Plan. Manag.* 2015, 58, 1217-1241. [[CrossRef](#)]).
28. Ким С.; Мун Дж. Х.; Шин Ю.; Ким Г. Х.; Сео Д. С. Сравнительный анализ энергопотребления и выбросов CO₂ от различных типов несущих каркасов зданий. *Журнал «Научный мир»*. 2013, 2013, 175702. [[ссылка](#)] [[PubMed](#)] (Kim, S.; Moon, J.H.; Shin, Y.; Kim, G.H.; Seo, D.S. Life comparative analysis of energy consumption and CO₂ emissions of different building structural frame types. *Sci. World J.* 2013, 2013, 175702. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]).
29. Эмами Н.; Хейнонен Дж.; Мартейнссон Б.; Сейняйоки А.; Юннонен Дж. М.; Лайне Дж.; Юннила С. Оценка жизненного цикла двух жилых зданий с использованием двух различных комбинаций базы данных и ПО LCA: признание единообразия и несоответствий. *Здания* 2019, 9, 20. [[ссылка](#)] (Emami, N.; Heinonen, J.; Marteinsson, B.; Saynajoki, A.; Junnonen, J.M.; Laine, J.; Junnila, S. A Life Cycle Assessment of Two Residential Buildings Using Two Different LCA Database-Software Combinations: Recognizing Uniformities and Inconsistencies. *Buildings* 2019, 9, 20. [[CrossRef](#)]).



© 2020 авторы. Лицензиат MDPI, Базель, Швейцария. Эта статья является статьей открытого доступа и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



АССОЦИАЦИЯ РАЗВИТИЯ
СТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

+7 (495) 744-02-63

info@steel-development.ru

www.steel-development.ru