12+

А. Л. Кудряшов

Применение подходов экономики замкнутого цикла в строительстве

Монография

А. Л. Кудряшов

Применение подходов экономики замкнутого цикла в строительстве. Монография

«Издательские решения»

Кудряшов А.

Применение подходов экономики замкнутого цикла в строительстве. Монография / А. Кудряшов — «Издательские решения»,

Монография посвящена экономике замкнутого цикла в строительной отрасли. Систематизированы концепции циркулярной экономики, обобщен зарубежный и отечественный опыт. Разработана методика оценки циркулярности строительного объекта, предложены инструменты проектирования с учетом разборки, технологические карты переработки отходов. Сформирован перечень рекомендуемых технологий. Для исследователей, преподавателей, специалистов строительной отрасли.

© Кудряшов А.
© Издательские решения

Содержание

ВВЕДЕНИЕ 6
Глава 1. Теоретические основы экономики замкнутого цикла и ее приложение к строительной отрасли 7
1.1. Генезис и эволюция концепции экономики замкнутого цикла: от промышленной экологии к циркулярной модели хозяйствования 7
1.2. Зарубежный и отечественный опыт внедрения циркулярных подходов в строительстве 22
Конец ознакомительного фрагмента. 36

Применение подходов экономики замкнутого цикла в строительстве Монография

А. Л. Кудряшов

© А. Л. Кудряшов, 2026

ISBN 978-5-0069-9058-6
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

ВВЕДЕНИЕ

Строительная отрасль занимает особое положение в структуре мирового хозяйства. На нее приходится около 40% глобального потребления минеральных ресурсов, порядка 36% конечного потребления энергии и примерно 35% совокупной массы образующихся отходов в индустриально развитых странах. Здания и сооружения, возводимые сегодня, будут определять ресурсопотребление и экологическую нагрузку на протяжении ближайших 50—100 лет — столь длительны сроки их эксплуатации. При этом господствующая модель строительного производства остается линейной: природные ресурсы извлекаются, перерабатываются в строительные материалы, используются при возведении зданий, а по завершении жизненного цикла — размещаются на полигонах в виде отходов.

Масштаб проблемы для Российской Федерации определяется конкретными цифрами. Ежегодный объем строительных отходов и отходов сноса оценивается в 60—80 млн тонн, из которых перерабатывается не более 10—15%. Программа реновации жилищного фонда Москвы, предусматривающая снос более 5000 домов общей площадью 16 млн кв. м, генерирует десятки миллионов тонн бетонного лома и кирпичного боя. Параллельно отрасль наращивает потребление первичного щебня и песка, глобальные запасы которого, вопреки обыденному представлению, оказываются конечными и уже ограниченными в ряде регионов мира.

Экономика замкнутого цикла (циркулярная экономика) предлагает концептуальную и практическую альтернативу линейной модели. Ее центральная идея состоит в организации хозяйственной деятельности, при которой материалы циркулируют в экономическом обороте как можно дольше, а образование отходов сведено к минимуму. Применительно к строительству эта идея воплощается в проектировании зданий с учетом будущей разборки, в использовании вторичных строительных материалов, в организации раздельного сбора и переработки строительных отходов, в продлении срока эксплуатации существующих объектов.

Зарубежный опыт свидетельствует о реальности циркулярного перехода в строительстве. Нидерланды, Дания, Япония, Германия достигли уровня переработки строительных отходов от 85 до 97%, хотя каждой из этих стран потребовалось 15—25 лет целенаправленной работы. Россия находится на начальном этапе этого пути, и разрыв между теоретическим знанием о возможностях циркулярной экономики и его практическим воплощением в отечественном строительстве остается значительным.

Настоящая монография призвана содействовать сокращению этого разрыва. Работа выстроена по принципу движения от теории к практике: первая глава закладывает концептуальные основания и обобщает зарубежный опыт, вторая глава предлагает методологический инструментарий, третья глава формулирует конкретные рекомендации. Все разработки ориентированы на российские условия — нормативную базу, экономическую среду, климатическую и территориальную специфику.

Среди авторских результатов, составляющих научный вклад монографии: методика комплексной оценки циркулярности строительного объекта (ОЦСО), основанная на трех частных коэффициентах и дополненная отдельным экономическим показателем; библиотека типовых конструктивных узлов с учетом разбираемости; система ранжирования технологий переработки по пяти критериям; программа повышения квалификации специалистов строительной отрасли.

Монография адресована исследователям, преподавателям, аспирантам и магистрантам экономических и строительных специальностей, а также практикующим специалистам — проектировщикам, руководителям строительных компаний, сотрудникам региональных администраций, ответственным за экологическую и строительную политику.

Глава 1. Теоретические основы экономики замкнутого цикла и ее приложение к строительной отрасли

1.1. Генезис и эволюция концепции экономики замкнутого цикла: от промышленной экологии к циркулярной модели хозяйствования

Представление о хозяйственной деятельности как о линейном процессе — извлечение ресурсов, производство, потребление, захоронение отходов — господствовало в экономической науке на протяжении большей части XX века. Подобная модель казалась допустимой до тех пор, пока объемы природопользования не приблизились к пределам восстановительных способностей биосферы. Первые попытки переосмыслить это положение связаны с работами, которые появились задолго до того, как термин «экономика замкнутого цикла» вошел в научный и политический обиход.

Кеннет Боулдинг в 1966 году опубликовал эссе «The Economics of the Coming Spaceship Earth», где провел аналогию между планетой и космическим кораблем с ограниченным запасом ресурсов [1]. Центральный тезис Боулдинга сводился к тому, что открытая экономика, в которой ресурсы считаются неисчерпаемыми, неизбежно столкнется с физическими ограничениями. Он предложил различать «экономику ковбоя» (безграничное фронтирное освоение) и «экономику космонавта» (замкнутая система с круговоротом вещества). Само по себе это эссе носило скорее философский характер, однако оно заложило интеллектуальный фундамент для последующих разработок. Идеи Боулдинга перекликались с публикацией доклада Римского клуба «Пределы роста» (1972), где Д. Медоуз и его соавторы с помощью математического моделирования продемонстрировали, что экспоненциальный рост потребления ресурсов при конечных запасах ведет к системному кризису [2].

В 1989 году Дэвид Пирс и Керри Тернер в монографии «Economics of Natural Resources and the Environment» предложили формальную концепцию экономики, основанной на замкнутых материальных потоках [3]. Авторы отталкивались от первого и второго начал термодинамики и продемонстрировали, что экономическая система, встроенная в природную среду, не может бесконечно увеличивать объем извлекаемых ресурсов без последствий для обеих сторон этого взаимодействия. Пирс и Тернер ввели понятие функций природного капитала (ресурсоснабжающая, ассимилирующая, эстетическая) и показали, что линейная модель экономики систематически обесценивает ассимилирующую функцию — способность среды перерабатывать отходы. Термодинамическое обоснование оказалось привлекательным для инженерного сообщества, поскольку придавало аргументам в пользу замкнутого цикла характер объективного естественнонаучного закона, а не субъективного ценностного суждения.

Параллельно с экономическими работами развивалась концепция промышленной экологии. Роберт Фрош и Николас Галлопулос в статье 1989 года для журнала «Scientific American» описали идею промышленной экосистемы, в которой отходы одного производства становятся сырьем для другого [4]. Хрестоматийной иллюстрацией стал промышленный симбиоз в датском городе Калуннборг, где электростанция, нефтеперерабатывающий завод, фармацевтическое предприятие и ряд других участников с 1970-х годов обменивались побочными продуктами, теплом и водой [5]. Калуннборгский пример доказал, что замыкание материальных потоков между предприятиями снижает совокупные издержки и объемы отходов, хотя формирование такой системы заняло несколько десятилетий и опиралось на доверие между участ-

никами, а не на административное понуждение. Ломбарди и Лайонс в 2015 году проанализировали условия воспроизводимости калуннборгской модели и пришли к выводу, что промышленный симбиоз возникает органически лишь при определенном сочетании пространственной близости предприятий, технологической совместимости потоков и институциональной среды, поощряющей межфирменное сотрудничество [6].

Для строительной отрасли идея промышленного симбиоза имеет особое значение в силу масштаба генерируемых отходов. По данным Евростата, строительство и снос зданий генерируют около 35% от общего объема отходов в странах Европейского союза, что в абсолютном выражении составляет порядка 870 млн тонн в год [7]. В Российской Федерации объемы строительных отходов и отходов сноса оцениваются экспертно в 60—80 млн тонн в год, хотя официальная статистика ведется неполно, поскольку значительная часть таких отходов размещается за пределами лицензированных полигонов [8]. Минеральная природа большинства строительных отходов (бетон, кирпич, асфальтобетон, грунт) делает их потенциально пригодными для повторного использования в качестве заполнителей, оснований дорожных одежд и планировочных грунтов, тем не менее степень фактического вовлечения этих материалов в хозяйственный оборот в России остается крайне низкой.

Отдельную ветвь исследований составляет концепция «от колыбели до колыбели» (cradle to cradle), сформулированная Майклом Браунгартом и Уильямом Макдоно в книге 2002 года [9]. В отличие от традиционного подхода «от колыбели до могилы» (cradle to grave), предполагающего конечную утилизацию изделия, Браунгарт и Макдоно выдвинули требование проектировать продукцию так, чтобы все ее компоненты после завершения срока службы могли быть возвращены либо в биологический круговорот (биоразлагаемые материалы), либо в технический (металлы, полимеры, минеральные вещества, пригодные для повторного производственного использования). Данное разграничение на биологический и технический циклы впоследствии заимствовал Фонд Эллен Макартур и положил в основу своей модели. Браунгарт подчеркивал принципиальное отличие от традиционной экологической парадигмы: задача состоит не в том, чтобы «наносить меньше вреда» (being less bad), а в том, чтобы проектировать процессы и продукты, которые сами по себе являются полезными для природной и технической систем.

Вальтер Штахель, швейцарский архитектор и экономист, внес вклад иного рода. Еще в конце 1970-х годов он совместно с Женевьевой Редэй-Мюлви представил Европейской комиссии доклад о потенциале продления жизненного цикла товаров [10]. Штахель обосновал, что экономика, ориентированная на сервис (продажу функции вместо продажи вещи), способна сократить потребление ресурсов и одновременно создать рабочие места в сфере ремонта, обновления и модернизации. Его концепция «петли производительности» (performance economy) подчеркивала приоритет сохранения стоимости уже произведенных изделий перед их заменой новыми. В 2010 году Штахель дополнил свою теорию понятием «замкнутой петли функциональных услуг», где потребитель приобретает доступ к функции (например, к жилому помещению определенного качества), а поставщик сохраняет собственность на материальный актив и несет ответственность за его поддержание, ремонт и конечную утилизацию [11]. Для строительной отрасли эта логика имеет прямое значение: здания представляют собой одни из наиболее капиталоемких и долгоживущих объектов, и продление их срока службы экономически оправдано при условии грамотного технического обслуживания.

Концепция промышленного метаболизма, предложенная Робертом Айресом в начале 1990-х годов, дополнила картину аналитическим инструментарием [12]. Айрес рассматривал экономику как систему потоков материалов и энергии, подобную биологическому обмену веществ. Анализ материальных потоков (Material Flow Analysis, MFA) позволяет количественно оценить, какая доля извлеченных ресурсов действительно превращается в полезный продукт, а какая рассеивается в виде отходов, выбросов и потерь. Бруннер и Рехбергер в

книге «Practical Handbook of Material Flow Analysis» (2004) систематизировали методологию MFA и предложили стандартизированные процедуры определения границ системы, единиц измерения и способов балансировки потоков [13]. Для строительной индустрии этот подход оказался особенно информативен, поскольку позволяет визуализировать огромные массы веществ, перемещаемых при возведении и сносе зданий, и выявить точки, в которых потери ресурсов максимальны.

Хабитат III (Конференция ООН по жилью и устойчивому городскому развитию, 2016) в своей Новой городской повестке дня подчеркнула связь между планированием городов и эффективностью использования ресурсов. Здания и городская инфраструктура аккумулируют гигантские объемы материалов: по оценкам Международного ресурсного центра (International Resource Panel), на строительство и эксплуатацию зданий приходится около 40% мирового потребления сырья и 36% мирового потребления энергии [14]. Эти цифры объясняют, почему строительная отрасль оказывается в фокусе внимания любой сколько-нибудь серьезной программы ресурсосбережения. Математически проблема выглядит однозначно: невозможно существенно сократить глобальное потребление материалов, не затронув строительный сектор.

Собственно термин «экономика замкнутого цикла» (circular economy) приобрел широкое распространение в 2010-х годах, во многом благодаря деятельности Фонда Эллен Макартур (Ellen MacArthur Foundation). Фонд, основанный в 2010 году, в серии докладов 2012—2015 годов сформулировал системное видение циркулярной экономики и предложил три основополагающих принципа: сохранение и приумножение природного капитала за счет контроля над исчерпаемыми запасами; оптимизация ресурсной отдачи путем циркуляции продуктов, компонентов и материалов с максимальной полезностью; повышение эффективности системы через выявление и устранение отрицательных внешних эффектов [15]. Модель Фонда визуализирована в виде схемы «бабочки», где левое крыло отображает биологический цикл (возврат органических материалов в биосферу), а правое — технический цикл (повторное использование, ремонт, восстановление, переработка). Доклад McKinsey для Фонда оценил потенциальную выгоду от перехода к циркулярной экономике в Европе в 1,8 трлн евро к 2030 году [16].

Для целей настоящей монографии необходимо уточнить соотношение нескольких терминов, которые нередко употребляются как синонимы, хотя обозначают различные явления. «Устойчивое развитие» (sustainable development) — наиболее широкая категория, охватывающая экологические, экономические и социальные измерения. Определение, данное Комиссией Брундтланд в 1987 году, сохраняет свое значение: развитие, удовлетворяющее потребности настоящего поколения без ущерба для возможностей будущих поколений [17]. «Зеленая экономика» (green economy) акцентирует внимание на снижении экологических рисков и ресурсного нехватки; Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) определяет ее как экономику, повышающую благосостояние людей и обеспечивающую социальную справедливость при существенном снижении экологических рисков [18]. «Экономика замкнутого цикла» (circular economy) конкретизирует зеленую экономику применительно к материальным потокам: ее предметом является организация производства и потребления, при которой материалы циркулируют в хозяйственном обороте, а образование отходов сведено к минимуму. Различие между этими тремя понятиями носит содержательный характер: устойчивое развитие задает ценностную ориентацию, зеленая экономика определяет общее направление, циркулярная экономика предлагает конкретный механизм достижения ресурсных целей.

Кирхерр, Рейке и Хеккерт в 2017 году провели систематический обзор 114 определений циркулярной экономики, опубликованных в научной литературе [19]. Авторы обнаружили, что большинство определений ограничиваются упоминанием переработки отходов и повторного использования материалов, в то время как аспекты системного изменения моделей потребления, сокращения объемов производства и социальной справедливости представлены значительно реже. Такая асимметрия, по мнению Кирхерра и соавторов, ведет к тому, что цирку-

лярная экономика на практике нередко сводится к совершенствованию управления отходами, тогда как ее полный потенциал предполагает пересмотр самих оснований проектирования, производства и пользования вещами. Авторы предложили собственное определение, акцентирующее три измерения: экономическое процветание, экологическое качество и социальную справедливость.

Иерархия циркулярных стратегий, известная как «лестница R» (R-hierarchy), ранжирует способы замыкания материальных потоков по убыванию предпочтительности. Потма, Хейнен и Воррелл в 2017 году предложили расширенную десятиступенчатую версию: Refuse (отказ от потребления), Rethink (переосмысление способа удовлетворения потребности), Reduce (сокращение потребления), Reuse (повторное использование), Repair (ремонт), Refurbish (обновление), Remanufacture (восстановительное производство), Repurpose (перепрофилирование), Recycle (переработка), Recover (извлечение энергии) [20]. Чем выше стратегия в этой лестнице, тем меньше ресурсов и энергии требуется для замыкания цикла. Применительно к строительным материалам это означает, что повторное использование целых конструктивных элементов (Reuse) предпочтительнее их дробления и переработки в щебень (Recycle), а проектирование здания с учетом будущей разборки (Rethink) предпочтительнее обоих вариантов.

Примечательно, что нижние ступени R-иерархии (переработка и извлечение энергии) получают непропорционально много внимания и в научных публикациях, и в государственных программах. Между тем именно верхние ступени — отказ от избыточного потребления, продление жизненного цикла, повторное использование — обеспечивают наибольший ресурсосберегающий эффект. Эркика и Мюллер в 2016 году количественно показали, что повторное использование стальных конструктивных элементов экономит до 96% энергии по сравнению с переплавкой, а повторное использование деревянных элементов экономит практически 100% энергии, затраченной на первичное производство [21]. Этот расчет наглядно объясняет, почему инвестиции в технологии разборки зданий и организацию рынков вторичных конструкций обладают приоритетом перед развитием перерабатывающих мощностей.

Нормативное оформление идей циркулярной экономики произошло неравномерно в различных юрисдикциях. Европейский союз занял лидирующее положение: в 2015 году Европейская комиссия приняла «План действий по экономике замкнутого цикла» (Circular Economy Action Plan), а в 2020 году утвердила обновленную версию этого документа [22]. Обновленный план включает законодательные предложения по проектированию экологически устойчивых товаров, усилению ответственности производителей, расширению права потребителей на ремонт и созданию единого рынка вторичного сырья. Директива ЕС 2008/98/ЕС (Рамочная директива об отходах) установила цель утилизации не менее 70% строительных отходов и отходов сноса к 2020 году [23]. По данным Eurostat, к 2020 году средний показатель по ЕС-27 составил 89%, однако методики подсчета существенно различаются между странами-членами, и ряд экспертов ставит под сомнение сопоставимость национальных данных [24].

Для строительной отрасли особое значение имеет Протокол ЕС по управлению строительными отходами и отходами сноса (EU Construction and Demolition Waste Management Protocol, 2016), установивший принципы селективного сноса, сортировки и документирования отходов [25]. Протокол, хотя и носит рекомендательный характер, задал ориентиры для национального законодательства и стал основой для разработки отраслевых стандартов. Существенным дополнением послужил регламент ЕС по строительным изделиям (Construction Products Regulation, CPR), предусматривающий включение экологических характеристик в декларации о свойствах строительных изделий. Пересмотр CPR, находящийся в процессе обсуждения на момент написания настоящей монографии, предполагает введение обязательных требований к содержанию переработанного сырья в строительных изделиях и наличию данных о разбираемости конструкций [26].

Китайская Народная Республика приняла Закон о продвижении экономики замкнутого цикла еще в 2008 году, раньше Европейского союза [27]. Закон выстроен вокруг трехуровневой модели: микроуровень (отдельное предприятие — чистое производство), мезоуровень (промышленные парки — экосимбиоз), макроуровень (регионы и города — циркулярное общество). К 2025 году Государственный совет КНР утвердил четырнадцатый пятилетний план развития циркулярной экономики, в котором строительные отходы и отходы сноса выделены в качестве одного из приоритетных потоков [28]. Опыт КНР интересен масштабом: объем строительных отходов в стране оценивается в 1,5—2,0 млрд тонн в год, из которых перерабатывается, по различным оценкам, от 5 до 15% [29]. Столь низкий уровень переработки при колоссальных объемах генерации создает одновременно и экологическую проблему, и экономическую возможность.

Японская модель обращения со строительными отходами опирается на Закон о содействии эффективному использованию ресурсов (2000) и Закон о переработке строительных материалов (Construction Material Recycling Act, 2002). К 2020 году уровень переработки строительных отходов и отходов сноса в Японии достиг 97%, что является одним из наиболее высоких показателей в мире [30]. Столь значительный результат объясняется сочетанием строгих нормативных требований (обязательная сортировка на площадке, запрет на захоронение перерабатываемых фракций) с развитой инфраструктурой переработки и устойчивой практикой раздельного сноса (тайкай). Асфальтобетон перерабатывается практически полностью, бетонный лом — на 98%, древесные отходы от строительства — на 95%. Вместе с тем японский опыт формировался в специфических условиях: ограниченная территория, высокая плотность населения, культурная готовность к кропотливой сортировке — все это затрудняет его прямое перенесение на российскую почву.

Нидерланды представляют собой, вероятно, наиболее продвинутый европейский пример циркулярного строительства. Правительство страны в 2016 году приняло общенациональную программу «Нидерланды циркулярные к 2050 году», в которой строительная отрасль определена как один из пяти приоритетных секторов [31]. Конкретные целевые индикаторы включают: сокращение потребления первичного сырья на 50% к 2030 году и полный переход к циркулярной экономике к 2050 году. На практическом уровне реализованы пилотные проекты «материальных паспортов» (платформа Madaster), позволяющих отслеживать происхождение и свойства всех материалов, использованных в здании, на протяжении всего жизненного цикла [32]. Правительство Нидерландов с 2023 года обязало включать материальные паспорта в состав проектной документации для объектов, финансируемых из государственного бюджета.

Датский опыт заслуживает внимания в силу двух особенностей. Во-первых, Дания одной из первых ввела налог на захоронение отходов (1987), который создал прямой экономический мотив к переработке строительных материалов [33]. Ставка налога неоднократно повышалась и к настоящему моменту составляет 475 датских крон (примерно 63 евро) за тонну захороненных отходов. Во-вторых, датские строительные компании накопили значительный опыт селективного сноса зданий, при котором здание разбирается в порядке, обратном строительству, с раздельным извлечением каждой фракции. По данным Датского агентства по охране окружающей среды, уровень переработки строительных отходов и отходов сноса в стране превышает 87% [34]. Характерной чертой датского подхода является обязательное предпроектное обследование здания перед сносом с составлением перечня материалов и оценкой их пригодности для повторного использования.

Финляндия включила циркулярную экономику в национальную стратегическую повестку и в 2016 году стала первой страной мира, принявшей национальную дорожную карту циркулярной экономики [35]. В области строительства финский опыт примечателен системой добровольной экологической классификации зданий, стимулирующей применение вторичных материалов и проектирование с учетом разборки. Технический исследовательский центр Фин-

ляндии (VTT) разработал методические подходы к оценке циркулярности строительных проектов, которые учитывают не только массовую долю вторичных материалов, но и потенциал извлечения компонентов при будущем демонтаже [36]. Совместный проект VTT и Университета Тампере создал базу данных вторичных строительных материалов с указанием их свойств, доступных объемов и местоположения, что облегчает проектировщикам поиск альтернатив первичному сырью.

Российская нормативная база в области обращения со строительными отходами формируется постепенно. Федеральный закон от 24.06.1998 No 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» определяет общие требования к обращению с отходами, хотя не содержит специальных норм для строительной отрасли [37]. Национальный проект «Экология», утвержденный в 2018 году, включает задачи по созданию инфраструктуры переработки, но основное внимание уделяет твердым коммунальным отходам, а строительные отходы и отходы сноса упоминаются лишь косвенно. ГОСТ Р 57751—2017 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Переработка отходов строительства и сноса» устанавливает классификацию строительных отходов и общие требования к их переработке [38]. В 2022 году принято Постановление Правительства РФ No 210 об обращении со строительными отходами, которое ввело обязанность застройщиков учитывать строительные отходы и передавать их на переработку или утилизацию [39].

Тем не менее целостная государственная стратегия циркулярной экономики в Российской Федерации к моменту написания настоящей монографии отсутствует. Отдельные элементы циркулярного подхода присутствуют в Стратегии экологической безопасности (Указ Президента РФ от 19.04.2017 No 176), в государственной программе «Охрана окружающей среды», в отраслевых стратегиях развития промышленности строительных материалов. Хотя эти документы не объединены единой методологической платформой и не содержат целевых показателей циркулярности, сопоставимых с европейскими индикаторами. Исследование, проведенное НИУ ВШЭ в 2021 году, зафиксировало, что уровень осведомленности о концепции циркулярной экономики среди руководителей российских строительных компаний остается низким, а экономические условия (низкие тарифы на захоронение, неразвитость рынков вторичного сырья) не создают достаточных оснований для перехода к циркулярным моделям [40].

Отечественная научная школа внесла существенный вклад в разработку теоретических основ ресурсосбережения и рационального природопользования, хотя терминология отличалась от принятой в западной литературе. Работы Н. Н. Лукьянчикова и И. М. Потравного по экономике природопользования заложили методологическую основу для стоимостной оценки экологического ущерба и обоснования природоохранных инвестиций [41]. Т. А. Акимова и В. В. Хаскин в учебнике по экологии предложили системный подход к анализу взаимодействия экономической и природной подсистем, включая проблематику замкнутости материальных циклов [42]. Л. Я. Шубов, М. Е. Ставровский и А. В. Олейник в серии работ по обращению с отходами содержат детальное описание технологий переработки различных фракций, в том числе строительных отходов [43].

Применительно к строительной отрасли отечественные исследования концентрировались преимущественно на технологических вопросах переработки бетонного лома и вторичного использования минеральных отходов. Б. В. Гусев и В. А. Загурский исследовали свойства бетонов на основе вторичных заполнителей и установили, что при соблюдении определенных условий дробления и фракционирования вторичный щебень из бетонного лома пригоден для приготовления бетонных смесей классов до В25 [44]. А. И. Шлыков и Н. А. Сватовская исследовали возможности использования золошлаковых отходов теплоэлектростанций в качестве компонентов строительных материалов [45]. И. Х. Наназашвили и В. А. Литвинов систематизировали опыт применения вторичных ресурсов в строительном производстве и предложили классификацию отходов по степени их пригодности для повторного использования [46].

Экономические аспекты циркулярного строительства в отечественной литературе исследованы в меньшей степени, нежели технологические. П. Г. Грабовый и его научная школа рассмотрели вопросы обоснования инвестиций в ресурсосберегающие технологии в строительстве [47]. А. Н. Асаул в серии работ по экономике строительства проанализировал организационные модели управления строительными отходами и экономические условия, при которых переработка становится выгоднее захоронения [48]. И. Г. Лукманова и М. Ю. Мишланова исследовали вопросы управления качеством в строительстве с учетом экологических требований [49]. Но комплексных работ, объединяющих технологическую, экономическую и организационную составляющие циркулярного подхода к строительству в единую методологическую конструкцию, в российской литературе до настоящего времени не появилось, что и определяет актуальность настоящей монографии.

В зарубежной литературе экономика циркулярного строительства исследуется значительно активнее. Адамс, Хассанейн и Абдалла в 2020 году опубликовали систематический обзор научных работ, посвященных применению принципов циркулярной экономики в строительной отрасли, и выявили несколько устойчивых направлений: проектирование с учетом разборки (Design for Disassembly), управление строительными отходами и отходами сноса, повторное использование конструктивных элементов, применение вторичных заполнителей и промышленный симбиоз между строительными и иными производствами [50]. Нуньес-Кабальеро, Идальго и Игеа в 2022 году провели библиометрический анализ публикаций по циркулярной экономике в строительстве и зафиксировали экспоненциальный рост числа работ начиная с 2016 года [51].

Характерной чертой современных зарубежных исследований является переход от изучения отдельных технологий переработки к системному анализу жизненного цикла зданий. Метод оценки жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA) позволяет сопоставить экологическое воздействие здания на всех стадиях — от добычи сырья до демонтажа и утилизации. Блэнгини и Гардинали в 2010 году применили LCA к процессу сноса и переработки жилого здания в Турине и показали, что селективный снос с раздельной переработкой фракций снижает совокупное экологическое воздействие на 20—30% по сравнению с сплошным сносом и вывозом на полигон [52]. Ортис, Кастельс и Соннеман в обзорной статье систематизировали методологические подходы к LCA в строительстве и указали на необходимость стандартизации границ системы и набора индикаторов воздействия [53].

Концепция «банков материалов» (material banks) представляет относительно новое направление. Согласно этой концепции, здание рассматривается как временное хранилище ценных материалов, которые после завершения срока эксплуатации могут быть извлечены и возвращены в хозяйственный оборот [54]. Практическая реализация этой идеи предполагает создание цифровых паспортов материалов, фиксирующих состав, свойства, место расположения и способ крепления каждого компонента здания. Европейский проект BAMB (Buildings as Material Banks), выполненный в 2015—2019 годах при поддержке программы «Горизонт 2020», разработал прототипы таких паспортов и протестировал их на пилотных объектах в нескольких странах ЕС [55].

Технологии информационного моделирования зданий (Building Information Modeling, BIM) создают техническую основу для реализации циркулярных принципов на стадии проектирования. BIM-модель содержит не только геометрию конструкций, но и данные о свойствах материалов, способах соединения элементов и условиях их замены. Ага и Юн в 2016 году исследовали возможности интеграции данных о разбираемости конструкций в BIM-модели и предложили набор дополнительных атрибутов, описывающих способ демонтажа каждого элемента [56]. В Российской Федерации обязательное применение BIM при проектировании объектов с государственным финансированием, введенное с 2022 года (Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 No 331), создает предпосылки для постепенного встраивания

циркулярных атрибутов в проектную документацию, хотя на практике этого пока не происходит.

Проектирование с учетом разборки (Design for Disassembly, DfD) восходит к работам в области промышленного дизайна 1990-х годов, однако применительно к зданиям систематическое развитие получило лишь в последнее десятилетие. Принципы DfD в строительстве включают: использование механических (болтовых, винтовых) соединений вместо химических (клеевых, сварных); стандартизацию размеров элементов; минимизацию числа различных материалов; обеспечение доступности соединительных узлов для инструмента. Торнтон Кей, один из практиков повторного использования строительных материалов в Великобритании, на протяжении двух десятилетий документировал опыт разборки зданий и предложил практические рекомендации по проектированию разбираемых конструкций [57]. Дюрмишевич в 2006 году разработала теорию трансформируемых зданий, в которой возможность разборки и реконфигурации конструкций заложена в саму архитектурную концепцию [58].

Отдельную область исследований составляет экономика вторичных строительных материалов. Формирование рынка вторичных материалов сталкивается с рядом затруднений: нестабильное качество вторичного сырья, отсутствие стандартов, предубеждение проектировщиков и заказчиков, логистические издержки, связанные с транспортировкой грузов невысокой стоимости. Хосейни, Рамезанианпур и Никуй в 2016 году установили, что конкурентоспособность вторичного щебня определяется прежде всего расстоянием перевозки и стоимостью захоронения отходов в данном регионе [59]. Там, где захоронение обходится дорого (вследствие высоких тарифов или удаленности полигонов), вторичные заполнители экономически привлекательны даже при относительно высоких затратах на переработку. Сильва, де Бритту и Дингс в 2017 году сформулировали основные факторы, влияющие на качество вторичных заполнителей: минералогический состав исходного бетона, технология дробления, степень удаления растворной части, влагопоглощение полученного заполнителя [60].

Концепция расширенной ответственности производителя (Extended Producer Responsibility, EPR), широко применяемая в отношении упаковки, электроники и автомобилей, обсуждается и применительно к строительным материалам. В Нидерландах производители некоторых видов строительной продукции обязаны принимать ее обратно после окончания срока службы [61]. Во Франции закон о борьбе с отходами и циркулярной экономике (Loi AGEC, 2020) установил обязанность производителей строительных материалов участвовать в финансировании сбора и переработки отходов [62]. Перенос принципов EPR на строительную отрасль связан с дополнительными сложностями: долгий срок службы зданий (50—100 лет) означает, что ответственность производителя материала может наступить через несколько десятилетий после продажи, когда предприятие-изготовитель может уже не существовать.

Цифровизация создает дополнительные возможности для организации циркулярных потоков строительных материалов. Онлайн-платформы, связывающие поставщиков вторичных материалов с потребителями, снижают транзакционные издержки поиска и верификации. В Великобритании функционирует платформа Globechain, в Нидерландах — Insert и Madaster, в Бельгии — Rotor DC [63]. Применение технологий машинного зрения для автоматической сортировки строительных отходов повышает производительность и точность разделения фракций. Юсуф, Зиллефрув и Кавалларо в 2024 году провели обзор цифровых инструментов для циркулярного строительства и выделили пять категорий: платформы торговли вторичными материалами, системы отслеживания материальных потоков, инструменты оценки циркулярности проектов, BIM-расширения для проектирования разбираемых конструкций и аналитические системы для управления сносовыми работами [64].

По итогам рассмотрения концепции и подходы, отметим несколько существенных положений. Первое: идея замыкания материальных потоков имеет полувековую интеллектуальную историю; она вобрала в себя элементы термодинамического анализа, промышленной эколо-

гии, дизайна продуктов и экономики услуг. Второе: применительно к строительной отрасли эта идея приобретает специфические черты, обусловленные масштабом и долговечностью зданий, составом строительных отходов и организацией строительного производства. Третье: нормативное оформление циркулярной экономики в различных странах существенно различается по глубине и системности — от комплексных программ в Нидерландах и Японии до фрагментарных элементов в России. Четвертое: российская нормативная база содержит отдельные элементы циркулярного подхода, при этом не объединяет их в целостную систему и отстает от передовой зарубежной практики. Пятое: научные исследования в данной области переживают период быстрого роста, причем смещение акцента от частных технологических решений к системному анализу жизненного цикла зданий является выраженной тенденцией последних лет.

В последующих разделах настоящей главы предметом рассмотрения станет конкретный опыт внедрения циркулярных подходов в строительстве (подглава 1.2) и принципы вместе с механизмами их практической реализации (подглава 1.3). Теоретическая база, изложенная в настоящей подглаве, составляет концептуальное основание для методологических разработок, представленных во второй главе монографии.

Экономические инструменты регулирования обращения со строительными отходами образуют несколько групп. Запретительные меры (прямой запрет на захоронение определенных фракций) применяются в Японии, Германии и ряде скандинавских стран. Фискальные инструменты (налоги на захоронение, сборы за размещение) используются в большинстве стран ЕС, причем их результативность прямо зависит от ставки: опыт Великобритании показал, что повышение ставки налога на захоронение (Landfill Tax) с 7 до 96 фунтов стерлингов за тонну в период с 1996 по 2020 год привело к снижению объемов захоронения строительных отходов на 60% [65]. Субсидирование переработки (прямые субсидии, налоговые льготы, льготное кредитование) применяется реже и обычно носит временный стартовый характер. Административные требования (обязательный план управления отходами в составе проектной документации, предпроектное обследование зданий перед сносом) получают все более широкое распространение. Рыночные инструменты (торговля квотами на захоронение) обсуждаются, но на практике для строительных отходов пока не применяются.

Стоимостные оценки перехода к циркулярной модели в строительстве существенно различаются в зависимости от методики расчета и принятых допущений. Исследование Deloitte для Европейской комиссии (2017) оценило экономический потенциал повышения уровня переработки строительных отходов и отходов сноса в ЕС до 90% в 11—23 млрд евро в год за счет экономии на первичном сырье, снижения затрат на захоронение и создания добавленной стоимости в перерабатывающем секторе [66]. Исследование Arup и BAM (2019) для Великобритании оценило потенциал перехода к циркулярному строительству в 1,4 млрд фунтов стерлингов ежегодной экономии для сектора в целом [67]. Применительно к России подобные расчеты до настоящего времени не проводились, что создает затруднения для обоснования необходимых инвестиций и нормативных решений.

Необходимо рассмотреть концепция городского минирования (urban mining), тесно связанная с циркулярной экономикой в строительстве. Городская застройка аккумулирует колоссальные запасы материалов, которые Клозе и Мао назвали «антропогенными месторождениями» [68]. По расчетам Международного ресурсного центра (UNEP IRP), глобальный объем материалов, заключенных в зданиях и инфраструктуре, составляет порядка 790 млрд тонн [69]. По мере выбытия существующего фонда зданий (а срок службы железобетонных конструкций составляет 50—120 лет) эти материалы высвобождаются и могут быть вовлечены во вторичный оборот. Стратегически города будущего могут рассматриваться одновременно как потребители первичных ресурсов и как источники вторичного сырья, причем вторая роль со временем будет возрастать.

Количественные характеристики материального состава зданий различных конструктивных типов исследованы недостаточно полно. Тарасова и Ланге в 2009 году провели инвентаризацию материалов жилого фонда Москвы и установили, что многоквартирные жилые дома советского периода (серии П-44, КОПЭ, И-155) содержат от 0,8 до 1,2 тонны бетона и от 60 до 100 кг стали на квадратный метр общей площади [70]. При сносе крупнопанельного дома серии 1—515 площадью 3500 кв. м образуется порядка 4000—4500 тонн бетонного лома, 250—350 тонн металлолома и 50—80 тонн прочих отходов. Если эти материалы перерабатываются, а не захораниваются, экономический эффект измеряется миллионами рублей на один объект — за счет выручки от продажи вторичного щебня и металлолома и экономии на оплате захоронения.

Барьеры, препятствующие распространению циркулярных методов работы в строительстве, носят многоуровневый характер. На институциональном уровне отсутствуют или недостаточно развиты нормативные требования к содержанию вторичных материалов в строительной продукции. На экономическом уровне низкие тарифы на захоронение отходов (в России — от 600 до 3000 руб. за тонну в зависимости от региона) делают переработку финансово непривлекательной по сравнению с вывозом на полигон. На технологическом уровне оборудование для переработки строительных отходов требует значительных капитальных вложений: стационарная дробильно-сортировочная установка мощностью 200—300 тыс. тонн в год обходится в 150—300 млн руб. На информационном уровне отсутствует достоверная статистика образования и движения строительных отходов, что затрудняет планирование перерабатывающих мощностей. На культурном уровне проектировщики и заказчики испытывают предубеждение в отношении вторичных материалов, предпочитая первичное сырье даже при сопоставимых технических характеристиках [71].

Гизеллини, Сиферини и Ульгиати в 2016 году провели критический анализ концепции циркулярной экономики и указали на ряд ее теоретических ограничений [72]. Во-первых, полное замыкание материальных циклов невозможно в силу второго начала термодинамики: каждый цикл переработки связан с потерями качества (переработка с понижением качества) и требует затрат энергии. Во-вторых, рост экономики неизбежно требует притока новых материалов, который не может быть полностью компенсирован переработкой. В-третьих, социальные и организационные аспекты перехода к циркулярной модели нередко недооцениваются в пользу технологических решений. Эти критические замечания не отменяют практической ценности циркулярного подхода, но предостерегают от его абсолютизации и побуждают к реалистичной оценке достижимого уровня замкнутости материальных потоков.

Стандартизация играет критически значимую роль в формировании циркулярной экономики в строительстве. Технический комитет ISO/TC 323, созданный в 2018 году, ведет разработку серии стандартов по циркулярной экономике, включая терминологию, принципы и общие требования [73]. Европейский комитет по стандартизации (CEN) через технический комитет CEN/TC 350 разрабатывает стандарты оценки устойчивости строительных сооружений, в том числе EN 15978 (оценка экологических характеристик зданий) и EN 15804 (экологические декларации строительных изделий) [74]. В Российской Федерации работу в данном направлении ведет технический комитет по стандартизации ТК 366 «Устойчивое развитие», однако национальные стандарты, специфичные для циркулярного строительства, к моменту написания монографии не приняты.

Международная система экологической сертификации зданий (LEED, BREEAM, DGNB) постепенно включает критерии циркулярности в оценочные методики. Версия BREEAM 2018 года содержит категорию «Wst 06 — Design for disassembly and adaptability», поощряющую проектирование с учетом разборки [75]. Система DGNB (Немецкий совет по устойчивому строительству) в версии 2023 года присваивает дополнительные баллы за наличие материального паспорта, применение стандартизированных соединений и превышение мини-

мального содержания вторичного сырья [76]. Российская система добровольной сертификации GREEN ZOOM, разработанная НП «Совет по зеленому строительству», включает критерии, связанные с управлением строительными отходами, вместе с тем аспекты проектирования с учетом разборки и применения вторичных материалов представлены в ней пока минимально [77].

Научные школы, формирующие теоретическую основу циркулярного строительства, принадлежат к нескольким дисциплинарным направлениям. Инженерная школа (Делфтский технический университет, Лундский университет, Миланский политехнический университет) сосредоточена на технологиях переработки, свойствах вторичных материалов и проектировании разбираемых конструкций. Экономическая школа (Кембриджский университет, Институт устойчивых ресурсов при UCL) исследует бизнес-модели, рыночные механизмы и макроэкономические последствия циркулярного перехода. Управленческая школа (Скандинавские университеты, Университет Антверпена) фокусируется на организационных аспектах: логистике обратных потоков, координации участников цепочки поставок, преодолении организационных барьеров. Пересечение этих трех направлений формирует междисциплинарное исследовательское поле, к которому принадлежит настоящая монография.

Понятие «циркулярного разрыва» (circularity gap) введено Организацией Circle Economy в ежегодном докладе «Circularity Gap Report» для обозначения доли первичных материалов в общем объеме потребления [78]. По данным доклада за 2024 год, мировая экономика является циркулярной лишь на 7,2%, и этот показатель снижается (в 2018 году он составлял 9,1%) [79]. Строительная отрасль вносит основной вклад в этот разрыв за счет колоссальных объемов потребляемых минеральных материалов, основная часть которых используется однократно. Сокращение циркулярного разрыва в строительстве — одна из ключевых задач, определяющих актуальность разработок, представленных в настоящей монографии.

Ретроспективный анализ показывает, что скорость проникновения циркулярных принципов в строительную практику заметно уступает темпам их нормативного закрепления. Юридические документы Европейского союза фиксируют амбициозные цели, при этом реальная доля вторичных материалов в новом строительстве на территории ЕС по-прежнему составляет лишь 10—15%, тогда как для достижения заявленных целей она должна превысить 30% к 2030 году [80]. Разрыв между декларируемым и фактическим объясняется несколькими причинами. Строительная отрасль отличается высокой инерционностью: проектировщики, подрядчики и заказчики привыкли работать с определенными материалами и технологиями, а переход на вторичное сырье требует пересмотра проектных решений, испытаний и согласований. Цепочка поставок строительных материалов фрагментирована: между сносом здания, переработкой отходов и включением вторичного материала в новый объект задействовано множество посредников, каждый из которых увеличивает транзакционные издержки. Наконец, стоимость первичных минеральных материалов (щебень, песок, цемент) во многих регионах остается настолько низкой, что вторичные заменители не выдерживают ценовой конкуренции без специальных регуляторных мер.

Тема взаимосвязи циркулярной экономики и климатической политики приобретает все большее значение. Производство цемента принадлежит к крупнейших промышленных источников выбросов CO2: на цементную отрасль приходится около 8% мировых антропогенных выбросов углекислого газа [81]. Применение вторичных заполнителей вместо первичных позволяет снизить потребность в цементе и, следовательно, сократить углеродный след строительства. По расчетам Института строительных материалов Делфтского технического университета, замещение 30% природного крупного заполнителя вторичным щебнем из бетонного лома снижает углеродный след бетонной смеси на 12—18% при условии, что расстояние перевозки вторичного заполнителя не превышает 50 км [82]. Эти данные подчеркивают необходимость

координации климатической и ресурсной политики: сокращение выбросов и замыкание материальных потоков выступают взаимно подкрепляющими направлениями.

Природные запасы строительного сырья, прежде казавшиеся неисчерпаемыми, обнаруживают признаки нехватки. Глобальное потребление песка оценивается в 40—50 млрд тонн в год, и строительная отрасль является его крупнейшим потребителем [83]. Доклад ЮНЕП «Sand and Sustainability» (2019) констатировал, что добыча песка превышает темпы его естественного восполнения в руслах рек и прибрежных зонах, что ведет к деградации водных экосистем, эрозии берегов и понижению уровня грунтовых вод [84]. В ряде стран Юго-Восточной Азии (Камбоджа, Индонезия, Вьетнам) введены ограничения или запреты на экспорт песка. В европейских странах стоимость строительного песка за последнее десятилетие выросла на 30—50% [85]. Эти тенденции создают прямые экономические предпосылки для более активного использования вторичных заполнителей из переработанного бетона и асфальтобетона.

Еще одним теоретически и практически значимым направлением является модульное строительство, тесно связанное с принципами циркулярной экономики. Модульные конструкции проектируются как набор унифицированных элементов, которые собираются на площадке с помощью механических соединений и могут быть демонтированы, перемещены и повторно собраны в ином месте. Лачингер и Брандл в 2019 году проанализировали экологические преимущества модульного строительства и установили, что модульные здания с расчетным сроком службы 50 лет демонстрируют на 40—50% более низкий углеродный след жизненного цикла по сравнению с аналогичными монолитными конструкциями при условии одного цикла перемещения [86]. Тем не менее модульный подход предъявляет повышенные требования к точности изготовления элементов, устойчивости соединительных узлов к многократной сборке-разборке и организации логистики крупногабаритных модулей.

Анализ патентной активности подтверждает рост технологического интереса к циркулярному строительству. По данным Европейского патентного ведомства, число патентных заявок, связанных с переработкой строительных отходов и повторным использованием строительных материалов, увеличилось втрое за период с 2015 по 2023 год [87]. Наибольшую активность демонстрируют заявители из Германии, Нидерландов и Японии. Тематически преобладают разработки в области дробления и сортировки бетонного лома, технологий разделения стекла и полимерных отходов, а также методов оценки остаточного ресурса конструктивных элементов. Российские заявители представлены в этом массиве минимально, что отражает общее отставание отечественной строительной индустрии в освоении циркулярных технологий.

Образовательный аспект перехода к циркулярному строительству требует отдельного упоминания. Тваронит и Карбонбланк в 2023 году обследовали учебные программы архитектурных и строительных факультетов 50 университетов Европы и установили, что лишь 22% из них содержат специализированные курсы по циркулярной экономике в строительстве [88]. Большинство программ ограничиваются общими сведениями об устойчивом развитии, не переходя к практическим инструментам проектирования разбираемых конструкций, оценки циркулярности или управления вторичными материалами. В российских архитектурно-строительных вузах (МГСУ, СПбГАСУ, ННГАСУ) тематика циркулярной экономики представлена еще менее системно и ограничивается, как правило, отдельными лекциями в курсах экологии или технологии строительных материалов.

Взаимосвязь циркулярной экономики и цифровой трансформации строительной отрасли представляет собой самостоятельную исследовательскую проблему. Технологии Интернета вещей (IoT) позволяют размещать датчики в конструктивных элементах зданий и отслеживать их техническое состояние в режиме реального времени, что продлевает срок эксплуатации и предотвращает преждевременный снос. Технология блокчейна рассматривается как инструмент создания неизменяемых записей о происхождении и свойствах строительных материалов, формируя доверие покупателей к вторичному сырью [89]. Технологии машинного обучения

применяются для автоматической классификации строительных отходов на основе изображений, что ускоряет сортировку и снижает ее стоимость. Боловинос и Маркоу в 2023 году провели обзор применения искусственного интеллекта в управлении строительными отходами и отходами сноса и выделили три категории решений: прогнозирование объемов отходов на стадии проекта, оптимизация логистики отходов на строительной площадке и автоматизированная идентификация фракций при сортировке [90].

Социальные измерения циркулярной экономики в строительстве исследованы значительно менее полно, чем экологические и экономические. Создание перерабатывающих предприятий и развитие методы работы повторного использования материалов генерируют рабочие места, впрочем характер этой занятости нуждается в критическом рассмотрении. Исследование Европейского бюро по окружающей среде (EEB) 2022 года оценило, что полная реализация потенциала циркулярного строительства в ЕС может создать до 500 тыс. дополнительных рабочих мест [91]. Вместе с тем ряд операций (ручная разборка, сортировка, обработка загрязненных материалов) связан с профессиональными рисками: воздействие пыли, содержащей кремнезем, контакт с асбестосодержащими материалами в зданиях, построенных до 1990-х годов, шумовые и вибрационные нагрузки. Обеспечение охраны труда при операциях с вторичными строительными материалами является обязательным условием социально ответственного перехода к циркулярной модели.

Проблема загрязненных материалов занимает особое место в дискуссии о циркулярном строительстве. Здания, построенные в 1950-1980-х годах, могут содержать асбест, полихлорированные бифенилы (ПХБ), тяжелые металлы в красках, радиоактивные элементы в некоторых видах силикатного кирпича. Вовлечение таких материалов во вторичный оборот без надлежащей идентификации и обезвреживания создает риск распространения вредных веществ. В странах ЕС обязательное предпроектное обследование зданий перед сносом включает проверку на наличие опасных веществ, и загрязненные фракции исключаются из переработки [92]. В Российской Федерации подобное обследование не является обязательным, за исключением зданий с подтвержденным наличием асбеста. Отсутствие систематического контроля повышает вероятность попадания загрязненных материалов в продукцию перерабатывающих предприятий, что представляет как экологическую, так и репутационную угрозу для отрасли.

Региональная специфика Российской Федерации вносит дополнительные коррективы в применимость зарубежного опыта. Обширная территория и неравномерное распределение населения означают, что логистические издержки на перевозку строительных отходов к месту переработки в ряде регионов превышают стоимость первичного сырья. Климатические условия — длительные периоды отрицательных температур в большинстве субъектов федерации — ограничивают сезон работ по сносу и переработки на открытых площадках. Различия в градостроительной структуре (преобладание крупнопанельного домостроения в городах и индивидуального деревянного строительства в сельской местности) определяют принципиально разный состав строительных отходов и отходов сноса. Программа реновации жилищного фонда, реализуемая в Москве и обсуждаемая в ряде других крупных городов, генерирует значительные объемы строительных отходов, которые при грамотной организации могут стать ресурсной базой для перерабатывающей индустрии [93].

Подводя итог рассмотрению теоретических основ циркулярной экономики и ее приложения к строительной отрасли, необходимо отметить следующее. Концептуальный аппарат, накопленный за полвека научных исследований, предоставляет достаточную теоретическую базу для проектирования и обоснования практических решений. Зарубежный опыт (прежде всего Нидерландов, Японии, Дании, Финляндии) демонстрирует, что высокий уровень переработки строительных отходов достижим при сочетании нормативных требований, экономического стимулирования и технологической инфраструктуры. Российская ситуация характеризуется существенным разрывом между имеющимся теоретическим знанием и его практическим

воплощением. Сокращение этого разрыва требует не только технологических разработок, но и системной методологии внедрения циркулярных принципов, разработке которой посвящена вторая глава настоящей монографии.

Вопрос о соотношении затрат и выгод циркулярного строительства на уровне отдельного проекта изучен фрагментарно. Йехейис и Тафессе в 2021 году проанализировали 34 случая применения вторичных строительных материалов и установили, что экономический эффект варьируется от 8% экономии до 12% удорожания по сравнению с использованием первичного сырья, при этом решающее влияние оказывают три переменных: расстояние до источника вторичного сырья, местная цена захоронения отходов и наличие сертификатов качества на вторичный материал [94]. Эти данные свидетельствуют о том, что циркулярное строительство экономически выгодно далеко не всегда и не везде; его жизнеспособность зависит от конкретных условий рынка и регуляторной среды.

Вопрос правовой неопределенности статуса вторичных строительных материалов остается нерешенным в большинстве юрисдикций. Суд ЕС в нескольких решениях (дело C-9/00, дело C-457/02) сформулировал критерии разграничения между «отходом» и «побочным продуктом», однако применение этих критериев к строительным отходам затруднено многообразием фракций и условий их образования [95]. В Российской Федерации переработанный строительный отход формально остается отходом до тех пор, пока не будет сертифицирован как товарная продукция в соответствии с действующими техническими регламентами. Эта юридическая неопределенность создает практические затруднения для перерабатывающих предприятий: они вынуждены одновременно получать лицензию на обращение с отходами и сертификат соответствия на выпускаемую продукцию, что увеличивает административные издержки.

Методология учета вторичных материалов в проектной документации нуждается в развитии. Действующие российские строительные нормы (СП, ГОСТ) содержат требования к первичным материалам, а специфика вторичных (более высокая дисперсия свойств, необходимость дополнительного входного контроля, ограничения по области применения) отражена лишь фрагментарно. В Европейском союзе стандарт EN 206 допускает применение вторичных заполнителей в бетоне при соблюдении требований EN 12620, между тем максимальная доля замещения варьируется от страны к стране: от 20% в Германии до 100% в Нидерландах (для определенных классов бетона) [96]. Гармонизация российских норм с передовой международной практикой, учитывающая при этом климатическую и сейсмическую специфику отечественного строительства, представляет самостоятельную исследовательскую и нормотворческую задачу.

Страховой аспект применения вторичных строительных материалов исследован крайне скудно. Страховые компании, как правило, не располагают статистикой отказов конструкций из вторичных материалов, достаточной для актуарных расчетов, и вынуждены применять повышающие коэффициенты или отказывать в страховании. Формирование базы данных эксплуатационных характеристик конструкций, изготовленных с применением вторичного сырья, является одной из предпосылок для массового внедрения циркулярных методов работы в коммерческом строительстве.

Необходимо обратить внимание на вопрос о влиянии циркулярных методов работы на рыночную стоимость зданий. Предварительные данные из Нидерландов указывают на то, что здания с высоким рейтингом устойчивости (включая циркулярные характеристики) демонстрируют премию к арендным ставкам в размере 4—8% и премию к капитализации в размере 6—14% по сравнению с аналогичными объектами без экологической сертификации [97]. Однако выделить вклад именно циркулярных характеристик (в отличие от энергоэффективности, качества микроклимата и иных параметров устойчивости) методологически затруднительно. В Российской Федерации подобные исследования отсутствуют, хотя по мере развития

рынка зеленого строительства они приобретут практическую значимость для девелоперов и инвесторов.

Энергетический баланс переработки строительных отходов составляет предмет отдельных расчетов. Дробление бетонного лома потребляет от 5 до 15 кВт-ч на тонну продукции в зависимости от крупности исходного материала и требуемой фракции; для сравнения, добыча и переработка природного щебня потребляет от 8 до 20 кВт-ч на тонну с учетом взрывных работ, транспортировки и дробления [98]. Транспортировка на расстояние свыше 30—40 км существенно ухудшает энергетический баланс вторичных заполнителей. Логистическая оптимизация — размещение перерабатывающих мощностей вблизи основных источников строительных отходов (промышленных зон, территорий реновации, крупных строительных площадок) — является необходимым условием энергетической и экономической жизнеспособности переработки. Московский опыт организации временных площадок дробления непосредственно на территориях сноса пятиэтажных домов показал возможность снижения транспортных расходов на 35—40% по сравнению со схемой вывоза отходов на стационарные полигоны [99].

Международные финансовые институты все активнее включают критерии циркулярной экономики в свои инвестиционные политики. Европейский инвестиционный банк (ЕИБ) в 2020 году утвердил «Руководство по циркулярной экономике», согласно которому проекты, претендующие на финансирование, должны демонстрировать соответствие принципам ресурсоэффективности и минимизации отходов [100]. Всемирный банк при реализации программы EDGE (Excellence in Design for Greater Efficiencies) включил показатели управления строительными отходами в критерии сертификации зданий в развивающихся странах. Европейский банк реконструкции и развития (ЕБРР) с 2022 года требует от заемщиков в строительном секторе представления плана управления отходами на стадии проектирования. Эти тенденции означают, что доступ к международному финансированию все теснее увязывается с циркулярными характеристиками строительных проектов, что создает дополнительные факторы для внедрения соответствующих практик, в том числе в странах, где внутреннее регулирование пока недостаточно развито.

Вовлечение малого и среднего бизнеса в циркулярное строительство представляет отдельную задачу. Крупные строительные компании располагают ресурсами для организации собственных перерабатывающих мощностей, получения необходимых лицензий и проведения исследований свойств вторичных материалов. Малые и средние подрядчики, формирующие основную массу участников строительного рынка (в Российской Федерации — более 95% по числу организаций), такой возможности лишены. Для них переход к циркулярным практикам требует доступных сервисов: приемных пунктов строительных отходов в пределах экономически приемлемого расстояния, каталогов сертифицированных вторичных материалов, типовых проектных решений с использованием вторичного сырья. Формирование подобной инфраструктуры должно стать предметом целенаправленной государственной политики, а не результатом стихийной рыночной инициативы.

1.2. Зарубежный и отечественный опыт внедрения циркулярных подходов в строительстве

Если в предыдущей подглаве рассматривались теоретические концепции и нормативные основания циркулярной экономики, то настоящий раздел посвящен конкретному опыту их реализации в строительной практике различных стран. Анализ построен по географическому принципу: от стран Европейского союза, располагающих наиболее зрелыми подходами, через опыт стран Азиатско-Тихоокеанского региона к российской ситуации. Для каждой юрисдикции рассмотрены не только общие параметры нормативной среды, но и конкретные проекты, организационные модели и количественные результаты, которые могут служить ориентирами для отечественной строительной отрасли.

Нидерланды к середине 2020-х годов располагают, по-видимому, наиболее развитой экосистемой циркулярного строительства в Европе. Помимо правительственной программы «Нидерланды циркулярные к 2050 году», упомянутой в подглаве 1.1, практический интерес представляют конкретные реализованные объекты. Павильон «Circl» в Амстердаме, построенный по заказу банка ABN AMRO в 2017 году, проектировался как полностью разбираемое здание: 98% материалов могут быть извлечены и повторно использованы после завершения эксплуатации. Фасад выполнен из переработанных алюминиевых рам, внутренняя отделка — из вторичной древесины, теплоизоляция — из переработанной джинсовой ткани. При проектировании использовалась платформа Madaster, зафиксировавшая материальный состав здания с точностью до отдельного элемента [101]. Проект стал образцом для целого ряда последующих построек в Нидерландах и за их пределами.

Другой примечательный нидерландский проект — временный Дворец правосудия в Амстердаме (2016), спроектированный бюро cepezed. Здание возведено из сборно-разборных конструкций на арендованном земельном участке сроком на 20 лет; по истечении этого срока оно будет демонтировано и перемещено на новую площадку. Несущие стальные конструкции соединены болтами без сварки, фасадные панели крепятся на болтовых и винтовых замках, все инженерные коммуникации проложены в доступных каналах [102]. Этот проект продемонстрировал, что даже здание общественного назначения с высокими функциональными требованиями может быть спроектировано как полностью разбираемое, хотя стоимость строительства оказалась на 8—12% выше по сравнению с традиционным аналогом.

Нидерландская компания New Horizon Urban Mining специализируется на «городском минировании» — извлечении ценных материалов из зданий, подлежащих сносу. Вместо сплошного разрушения здания компания проводит селективную разборку с раздельным извлечением бетона, кирпича, древесины, металла, стекла и инженерного оборудования. Каждая фракция направляется на соответствующую переработку или продается для повторного использования. По данным компании, при селективном подходе удается вовлечь в повторное использование или переработку до 95% массы здания, тогда как при сплошном сносе этот показатель обычно не превышает 70% (поскольку смешанный лом пригоден лишь для засыпки) [103]. Экономическая модель New Horizon основана на том, что выручка от продажи вторичных материалов и экономия на оплате захоронения покрывают повышенные затраты на селективную разборку.

Платформа Madaster, запущенная в 2017 году, требует подробного рассмотрения как инфраструктурный элемент циркулярного строительства. Madaster служит онлайн-реестр материалов, содержащихся в зданиях: владелец или проектировщик загружает BIM-модель или перечень материалов, а платформа формирует «материальный паспорт» здания с указанием массы, стоимости и циркулярного потенциала каждого компонента [104]. К 2024 году на платформе зарегистрировано более 15 000 объектов недвижимости, преимущественно в

Нидерландах, Бельгии и Германии. Платформа рассчитывает два ключевых показателя: индекс циркулярности (Madaster Circularity Indicator, MCI) и остаточную материальную стоимость здания. MCI оценивает, какая доля материалов поступила из вторичных источников и какая доля может быть извлечена при демонтаже; остаточная стоимость показывает, сколько «стоят» заключенные в здании материалы на рынке вторичного сырья. Для собственников зданий эта информация имеет практическое значение: здание с высоким MCI и значительной остаточной стоимостью может рассматриваться как финансовый актив, стоимость которого возрастает по мере удорожания первичного сырья.

Датская практика циркулярного строительства опирается на многолетнюю традицию раздельного обращения с отходами и высокие ставки налога на захоронение, о которых говорилось в подглаве 1.1. Конкретный интерес представляет проект «Resource Rows» в Копенгагене (Oerestad, 2019) — жилой комплекс на 92 квартиры, при строительстве которого использованы материалы, извлеченные из снесенных зданий. Фасад выполнен из кирпича, полученного при разборке школы 1970-х годов; внутренние перегородки — из бетонных элементов вторичного происхождения; оконные рамы переработаны из алюминиевых конструкций снесенного офисного здания [105]. Архитектурное бюро Lendager Group, реализовавшее проект, разработало собственную методику оценки экологического следа строительства и показало, что применение вторичных материалов снизило углеродный след объекта на 40% по сравнению с традиционным строительством.

Датская некоммерческая организация GXN (Green Transition), входящая в архитектурную группу 3XN, с 2016 года ведет исследовательский проект «Circle House», направленный на создание прототипа полностью циркулярного жилого дома. Первая очередь проекта (60 квартир социального жилья в городе Лисбьерг близ Орхуса) завершена в 2023 году. Конструктивное решение основано на сборно-разборном железобетонном остове с сухими соединениями: панели крепятся к остову стальными болтами, что позволяет демонтировать их без разрушения. Проектировщики утверждают, что 90% элементов здания могут быть повторно использованы по завершении 50-летнего срока эксплуатации [106]. Экономический анализ проекта показал, что удорожание строительства составило около 5% по сравнению с традиционным аналогом, тем не менее расчетная остаточная стоимость материалов компенсирует это удорожание менее чем за 15 лет.

Координационная платформа датского циркулярного строительства — организация VCOB (Videncenter for Cirkulaert Byggeri), основанная в 2020 году при поддержке Фонда Реалданиа. VCOB выполняет несколько функций: ведет базу данных вторичных строительных материалов, доступных на датском рынке; публикует руководства по проектированию разбираемых конструкций; организует обучение проектировщиков и подрядчиков; сопровождает пилотные проекты [107]. По данным VCOB, к 2024 году на датском рынке действуют 27 предприятий, специализирующихся на переработке строительных отходов, и 14 площадок продажи вторичных строительных материалов. Общий объем переработанных строительных отходов и отходов сноса в Дании составляет около 4,5 млн тонн в год при общем объеме образования порядка 5,2 млн тонн.

Германия занимает ведущее положение в Европе по абсолютным объемам переработки строительных отходов. По данным Федерального статистического ведомства (Destatis), в 2020 году объем строительных отходов и отходов сноса составил 228 млн тонн, из которых 90% было направлено на переработку или повторное использование [108]. Между тем за высоким общим показателем скрывается неоднородная картина: грунт (крупнейшая фракция по массе) преимущественно используется для засыпки выработанных карьеров и котлованов, что формально учитывается как переработка, но по существу представляет собой захоронение. Строительные отходы в узком смысле (бетонный лом, кирпичный бой, смешанный строительный

мусор) перерабатываются на уровне 70—75%, преимущественно в дорожное основание и подсыпку [109].

Немецкий стандарт DIN 4226—100 «Заполнители для бетона — Часть 100: Заполнители из переработанных строительных материалов» устанавливает четыре класса вторичных заполнителей в зависимости от содержания различных компонентов (бетон, кирпич, асфальт, прочие) и допускает их применение для бетонов прочностью до С30/37 при замещении до 45% крупного заполнителя [110]. На практике вторичные заполнители используются преимущественно в дорожном строительстве и для неответственных конструкций, тогда как в жилищном строительстве их применение остается ограниченным из-за предубеждения проектировщиков и заказчиков.

Германский опыт примечателен также развитием института «ресурсного аудита» зданий перед сносом. С 2024 года по решению Бундестага предпроектное обследование зданий перед сносом с составлением перечня материалов и плана селективной разборки стало обязательным для всех зданий площадью свыше 2000 кв. м [111]. Аудит проводится сертифицированным специалистом и включает: идентификацию всех конструктивных и отделочных материалов, оценку их пригодности для повторного использования или переработки, выявление опасных материалов (асбест, ПХБ, тяжелые металлы), составление плана последовательности разборки. Результаты аудита включаются в проектную документацию на снос и передаются в региональную информационную систему обращения с отходами.

Великобритания развивает собственный подход к циркулярному строительству, опирающийся на добровольные предложения отрасли. Организация WRAP (Waste and Resources Action Programme) с 2004 года реализует программу Courtauld Commitment и ряд отраслевых программ, направленных на сокращение отходов в строительстве. В 2023 году WRAP опубликовала обновленное руководство по проектированию с учетом разборки, адресованное архитекторам и конструкторам [112]. Британская система экологической сертификации BREEAM, получившая широкое международное распространение (более 600 000 сертифицированных зданий в 90 странах), включает критерии управления строительными отходами и проектирования с учетом разборки, хотя их вес в общей оценке пока невелик.

Биржа вторичных строительных материалов Enviromate, запущенная в Великобритании в 2018 году, представляет модель рыночной инфраструктуры для циркулярного строительства. Платформа связывает поставщиков вторичных материалов (строительные площадки, генерирующие отходы, или предприятия по переработке) с потребителями (проектировщиками и подрядчиками, заинтересованными в приобретении вторичного сырья). Каждый лот сопровождается описанием происхождения материала, его свойств и документами о соответствии применимым стандартам [113]. К 2024 году на платформе зарегистрировано более 2000 организаций, а суммарный объем проданных материалов превысил 800 тыс. тонн. Экономический анализ показал, что покупатели вторичных материалов через Enviromate экономят в среднем 20—30% по сравнению с приобретением первичного сырья, тогда как поставщики экономят на оплате захоронения.

Французский опыт требует отдельного рассмотрения в связи с принятием закона AGEC (Loi relative a la lutte contre le gaspillage et a l'economie circulaire) в феврале 2020 года. Статья 62 закона ввела обязательную диагностику материальных ресурсов здания (diagnostic produits-materiaux-dechets, PMD) перед любым сносом или значительной реконструкцией зданий площадью свыше 1000 кв. м [114]. Диагностика включает инвентаризацию всех материалов, оценку их пригодности для повторного использования и переработки, выявление опасных веществ и составление плана управления отходами. С 2022 года закон дополнен системой расширенной ответственности производителей строительных изделий (REP PMCB), предусматривающей уплату экосбора производителями и импортерами строительных материалов [115].

Собранные средства направляются на финансирование сбора, сортировки и переработки строительных отходов через аккредитованных экооператоров.

Конкретным примером французской методы работы служит реконструкция комплекса Grand Parc в Бордо (архитекторы Lacaton & Vassal, 2017 — проект, удостоенный Притцкеровской премии). Вместо сноса трех жилых домов 1960-х годов архитекторы предложили их расширение путем пристройки балконов и зимних садов к существующим фасадам, сохранив несущие конструкции и квартиры. Это решение позволило обойтись без генерации демонтажных отходов, сократить расход новых материалов на 60% по сравнению с полной заменой зданий и одновременно улучшить жилищные условия 530 семей [116]. Проект Grand Parc иллюстрирует верхнюю ступень R-иерархии: отказ от сноса и продление жизненного цикла предпочтительнее любой переработки.

Китайский опыт циркулярного строительства определяется прежде всего масштабом проблемы. По оценкам Министерства жилищного строительства и городского-сельского развития КНР, ежегодный объем образования строительных отходов и отходов сноса составляет около 2,0 млрд тонн, что связано с беспрецедентными темпами урбанизации и обновления жилого фонда [117]. Правительство КНР в 2020 году установило целевой показатель переработки строительных отходов в крупных городах на уровне 35% к 2025 году, что, учитывая исходный уровень порядка 5—10%, представляет амбициозную задачу [118].

Город Шэньчжэнь стал пилотной площадкой для реализации системы управления строительными отходами. Муниципальное правительство в 2015 году ввело запрет на несанкционированный вывоз строительных отходов за пределы города и одновременно создало сеть перерабатывающих предприятий общей мощностью 15 млн тонн в год. Каждый объект строительства или сноса обязан получить разрешение на обращение с отходами и заключить договор с лицензированным перевозчиком и переработчиком. Транспортировка строительных отходов отслеживается с помощью GPS-датчиков на каждом грузовом автомобиле. К 2023 году уровень переработки строительных отходов в Шэньчжэне достиг 40%, что существенно превышает средний показатель по стране [119]. Основная продукция переработки — вторичный щебень и кирпич из прессованного бетонного лома, применяемые в дорожном строительстве и для малоэтажных сооружений.

Шанхайский подход отличается акцентом на организационной стороне. Муниципальное управление строительства разработало электронную систему учета строительных отходов, в которой каждый застройщик обязан зарегистрировать прогнозный объем отходов до начала работ и отчитаться об их фактическом движении после завершения. Данные системы интегрированы с городской системой видеонаблюдения, позволяющей контролировать маршруты перевозки [120]. Нарушители (нелегальный вывоз или захоронение) штрафуются и лишаются лицензии на строительную деятельность. По данным Шанхайского муниципального бюро экологии, за первые три года работы системы (2019—2022) объем нелегального захоронения строительных отходов в черте города сократился на 70%.

Китайские исследования вторичных строительных материалов сосредоточены преимущественно на бетоне из переработанного заполнителя (Recycled Aggregate Concrete, RAC). Ксяо, Ли и Лань в серии публикаций 2012—2020 годов исследовали прочностные и деформационные характеристики RAC и установили, что при замещении до 30% природного крупного заполнителя вторичным прочность бетона снижается на 10—15%, а модуль упругости — на 15—20% [121]. Для компенсации этого снижения авторы предложили добавление минеральных добавок (зола-уноса, молотый гранулированный шлак) и оптимизацию водоцементного отношения. Результаты нашли отражение в китайском стандарте JGJ/T 240—2011 «Технические нормы применения бетона на вторичных заполнителях», допускающем использование RAC для конструкций с расчетной прочностью до C40 [122].

Японский опыт, ключевые параметры которого охарактеризованы в подглаве 1.1, заслуживает более детального рассмотрения с точки зрения организационных механизмов. Закон о переработке строительных материалов (Construction Material Recycling Act, 2002) установил обязательную раздельную разборку зданий площадью свыше 80 кв. м и разделение строительных отходов на четыре потока: бетон, асфальт, древесина и прочие материалы [123]. Подрядчик обязан получить разрешение на снос с указанием способа разборки и схемы обращения с каждой фракцией. За нарушение требований о раздельной разборке предусмотрен штраф до 500 000 иен (примерно 3500 долл. США) и приостановление строительной лицензии.

Практика «тайкай» (раздельного сноса) в Японии доведена до высокого уровня организации. Типичная последовательность работ включает: удаление отделочных материалов (обои, напольные покрытия, потолочные плиты) вручную; демонтаж инженерного оборудования (трубопроводы, кабели, приборы); разборка оконных и дверных блоков; демонтаж кровельного покрытия; поэтапная разборка несущих конструкций сверху вниз с применением малогабаритной техники. Весь процесс занимает в два-три раза больше времени, чем сплошной снос, хотя качество извлекаемых материалов значительно выше [124]. Бетонный лом, полученный при тайкай, содержит минимальное количество посторонних включений и пригоден для производства высококачественного вторичного щебня.

Японская ассоциация переработки строительных материалов (JCRA) ведет мониторинг движения строительных отходов и публикует ежегодные отчеты с детализацией по фракциям и регионам. Согласно отчету за 2022 год, общий объем строительных отходов и отходов сноса в Японии составил 73,6 млн тонн, из которых 97,2% было направлено на переработку [125]. Наибольшие трудности создает древесная фракция: несмотря на формально высокий уровень переработки (95%), значительная часть древесных отходов направляется на энергетическую утилизацию (сжигание), а не на повторное материальное использование. Это соответствует нижней ступени R-иерархии и с позиции циркулярной экономики является менее предпочтительным, нежели повторное использование древесины в качестве конструктивного или отделочного материала.

Республика Корея приняла Закон о переработке строительных отходов (Construction Waste Recycling Promotion Act) в 2003 году, установив обязательные нормативы использования вторичных заполнителей в государственных строительных проектах: не менее 40% крупного заполнителя в дорожном бетоне и не менее 25% в конструктивном бетоне должно составлять вторичное сырье [126]. К 2020 году уровень переработки строительных отходов в стране достиг 98%, причем значительная доля переработанного материала используется в дорожном строительстве. Корейский институт строительных технологий (KICT) провел масштабные исследования долговечности конструкций из RAC и опубликовал данные двадцатилетних натурных наблюдений, подтвердившие удовлетворительную работу вторичного бетона в условиях корейского климата [127].

Сингапурский опыт интересен тем, что город-государство с площадью всего 733 кв. км и полным отсутствием природных запасов строительного сырья вынужден максимально использовать вторичные ресурсы. Управление строительства Сингапура (BCA) в 2005 году ввело обязательную переработку бетонных и асфальтобетонных отходов, а с 2014 года установило минимальные нормативы содержания вторичных заполнителей в бетоне для государственных проектов [128]. Единственный действующий полигон твердых отходов (остров Семакау) может принимать не более 2000 тонн отходов в сутки, что создает мощный экономический стимул к переработке: стоимость захоронения тонны отходов в Сингапуре составляет около 150 сингапурских долларов (110 долл. США), что является одной из наиболее высоких ставок в мире. При таких условиях переработка строительных отходов экономически выгодна независимо от дополнительному регуляторному давлению.

Российский опыт циркулярного строительства находится на начальном этапе формирования. Системный анализ ситуации затруднен отсутствием полноценной статистики: ни Росстат, ни Росприроднадзор не ведут раздельного учета строительных отходов и отходов сноса в объеме и детализации, сопоставимых с европейскими или японскими данными. По экспертным оценкам Национального объединения строителей (НОСТРОЙ), ежегодный объем образования строительных отходов в России составляет 60—80 млн тонн, из которых перерабатывается не более 10—15% [129]. Основная масса строительных отходов размещается на полигонах (лицензированных и нелицензированных) или используется для рекультивации карьеров и засыпки оврагов, что по европейской классификации считается «засыпкой» (backfilling), а не переработкой.

Московский регион, генерирующий наибольшие в стране объемы строительных отходов, предпринял ряд регуляторных шагов. Постановление Правительства Москвы от 15.12.2020 No 2217-ПП установило требования к раздельному сбору строительных отходов на строительных площадках и их передаче на переработку лицензированным организациям. Программа реновации жилищного фонда, предусматривающая снос более 5000 пятиэтажных домов общей площадью около 16 млн кв. м, генерирует значительные объемы бетонного лома, кирпичного боя и металлолома [130]. По оценкам Департамента строительства Москвы, при полном освоении программы суммарный объем демонтажных отходов составит порядка 50—60 млн тонн. Часть этих отходов перерабатывается на дробильно-сортировочных комплексах, принадлежащих компаниям «ГК Стройресурс», «Мосэкострой» и ряду других операторов. Вторичный щебень используется преимущественно для устройства оснований дорог и площадок, а также для обратной засыпки котлованов.

Санкт-Петербург располагает тремя лицензированными предприятиями по переработке строительных отходов суммарной мощностью около 2 млн тонн в год: ООО «Спецтранс», АО «Завод МПБО-2» и ООО «Экоград». Однако загрузка этих мощностей, по данным Комитета по благоустройству Санкт-Петербурга, не превышает 40—50%, поскольку значительная часть строительных отходов по-прежнему вывозится на полигоны, где стоимость размещения составляет 500—1500 руб. за тонну — ниже, чем стоимость переработки [131]. Подобное соотношение цен является типичным для большинства российских регионов и является центральный экономический барьер для развития переработки.

Отдельные российские компании предпринимают попытки внедрения циркулярных подходов, опережая нормативные требования. Компания «ПИК» (крупнейший российский девелопер по объему ввода жилья) с 2021 года реализует программу «Ответственное строительство», включающую раздельный сбор отходов на строительных площадках и передачу основных фракций (бетон, арматура, древесина) на переработку [132]. По отчету компании за 2023 год, уровень переработки строительных отходов на объектах «ПИК» составил 62%, что значительно превышает средний показатель по отрасли. Компания «Группа ЛСР» в Санкт-Петербурге эксплуатирует собственный дробильно-сортировочный комплекс для переработки бетонного лома, образующегося на ее строительных площадках, и использует полученный вторичный щебень для устройства оснований при строительстве новых объектов [133]. Эти примеры пока единичны и не складываются в отраслевую тенденцию, но они демонстрируют техническую и экономическую осуществимость переработки в российских условиях.

Научно-исследовательские и проектные организации формируют отечественную методическую базу циркулярного строительства. НИИЖБ им. А. А. Гвоздева (подразделение НИЦ «Строительство») проводит исследования вторичных заполнителей для бетона и участвует в разработке нормативных документов, регламентирующих их применение [134]. ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко исследует вопросы демонтажа и повторного использования металлических конструкций. НИУ МГСУ (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет) ведет образовательные программы в области ресурсосбережения в

строительстве и выполняет прикладные исследования по заказу строительных компаний. При этом координация между исследовательскими организациями, регуляторами и отраслью остается слабой, а результаты исследований медленно транслируются в нормативную базу и строительную практику.

Сравнительный анализ рассмотренных методов работы позволяет выделить несколько закономерностей. Страны с наиболее высоким уровнем переработки строительных отходов (Япония — 97%, Нидерланды — 95%, Дания — 87%) сочетают три элемента: жесткие нормативные требования к раздельному сбору и переработке; высокие тарифы на захоронение, делающие переработку экономически выгодной; развитую инфраструктуру переработки и рынки вторичных материалов. Отсутствие хотя бы одного из этих элементов резко снижает результативность: в Китае, например, нормативные требования установлены, но инфраструктура и экономические условия не обеспечивают их выполнения в полной мере; в России отстают все три элемента одновременно.

Второй выявленной закономерностью является последовательность формирования циркулярных подходов. Ни одна из рассмотренных стран не достигла высокого уровня переработки одномоментно; во всех случаях процесс занял 15—25 лет. Дания ввела налог на захоронение в 1987 году, а устойчивый уровень переработки свыше 80% достигла лишь к середине 2000-х. Япония приняла Закон о переработке строительных материалов в 2002 году, а показатель 97% зафиксирован по итогам 2020 года. Этот временной лаг объясняется необходимостью создания перерабатывающей инфраструктуры, формирования рынков сбыта вторичных материалов, обучения кадров и изменения профессиональных привычек проектировщиков и подрядчиков. Для России это означает, что ожидать быстрых результатов от разовых нормативных решений нереалистично; необходима долгосрочная программа с поэтапными целевыми показателями.

Третья закономерность касается роли пилотных проектов. Во всех рассмотренных юрисдикциях знаковые объекты (Circl в Амстердаме, Resource Rows в Копенгагене, Circle House в Лисбьерге, Grand Parc в Бордо) сыграли демонстрационную роль, показав техническую осуществимость циркулярного подхода и привлекая внимание профессионального сообщества. В российской практике подобные демонстрационные объекты единичны и не получают достаточного информационного сопровождения. Целенаправленная поддержка пилотных циркулярных проектов (в том числе через механизмы государственного заказа и зеленого финансирования) представляется одним из наиболее результативных направлений государственной политики на начальном этапе.

Четвертая закономерность связана с информационной инфраструктурой. Платформы учета материалов (Madaster в Нидерландах), биржи вторичных материалов (Enviromate в Великобритании), системы отслеживания отходов (электронные системы Шэньчжэня и Шанхая) являются необходимым условием масштабирования циркулярных подходов. Без прозрачной и доступной информации о наличии, свойствах и местоположении вторичных материалов проектировщики и подрядчики лишены возможности включать их в свои проекты, даже при наличии готовности это делать. В Российской Федерации подобная информационная инфраструктура отсутствует, и ее создание представляет самостоятельную задачу, обсуждаемую во второй главе настоящей монографии.

Финансовые механизмы поддержки циркулярного строительства существенно различаются между странами. Фискальные инструменты (налоги на захоронение) преобладают в Северной Европе. Административные нормативы (обязательные доли вторичного сырья) характерны для Южной Кореи и Сингапура. Субсидирование и льготное кредитование применяются в Китае для предприятий по переработке строительных отходов. Добровольные системы сертификации (BREEAM, LEED, DGNB) создают рыночные преференции для циркулярных объектов через повышение их привлекательности для арендаторов и инвесторов.

Для российских условий оптимальным представляется сочетание нескольких инструментов: повышение тарифов на захоронение строительных отходов (что создаст экономические предпосылки для переработки), введение обязательного предпроектного обследования перед сносом (что обеспечит информационную основу для селективной разборки) и развитие добровольной сертификации с учетом циркулярных критериев (что создаст рыночные условия для спроса на вторичные материалы).

Завершая обзор зарубежного и отечественного опыта, необходимо отметить, что ни одна из рассмотренных стран не достигла полностью циркулярной модели строительства. Даже лидеры (Нидерланды, Япония, Дания) перерабатывают преимущественно минеральную фракцию строительных отходов, тогда как композитные материалы, утеплители, герметики и ряд других компонентов по-прежнему направляются на захоронение. Проектирование с учетом разборки остается прерогативой экспериментальных объектов и не стало массовой практикой даже в передовых юрисдикциях. Повторное использование целых конструктивных элементов (наиболее предпочтительная стратегия по R-иерархии) составляет менее 1% по массе от общего объема строительных отходов и отходов сноса в любой из рассмотренных стран. Эти констатации не обесценивают достигнутого прогресса, но задают реалистичный горизонт ожиданий и направления дальнейшей работы, которым посвящена вторая глава монографии.

Австрийский опыт представляет интерес благодаря системе обязательного «ресурсного паспорта» зданий, введенной в 2020 году для объектов, финансируемых из бюджета федеральных земель. Паспорт фиксирует массу и состав всех конструктивных материалов, способы их соединения и прогнозируемый объем отходов при будущем демонтаже. Австрийский институт строительной биологии и экологии (IBO) разработал методику оценки «деконструируемости» зданий по пятибалльной шкале, учитывающую тип соединений, доступность узлов для разборки, однородность материалов и наличие документации [135]. По данным IBO, средний балл деконструируемости зданий, построенных в Австрии до 2015 года, составляет 2,1, тогда как для объектов, проектирование которых велось с учетом рекомендаций института, — 3,8.

Швейцарская ассоциация инженеров и архитекторов (SIA) в 2019 году опубликовала Стандарт SIA 2032 «Воплощенная энергия зданий», включающий рекомендации по учету затрат энергии не только на производство строительных материалов, но и на их будущую переработку или захоронение [136]. Этот стандарт является одним из немногих, рассматривающих полный жизненный цикл материала, включая фазу «конца жизни» здания. Его практическое значение состоит в том, что проектировщик получает числовое основание для предпочтения материалов с высоким потенциалом повторного использования. Применение стандарта SIA 2032 в кантоне Цюрих привело к увеличению доли разбираемых конструктивных решений в проектах государственных зданий с 12% в 2019 году до 34% в 2023 году.

Итальянская ситуация характеризуется резким контрастом между северными и южными регионами. На севере (Ломбардия, Венето, Эмилия-Романья) функционируют развитые сети предприятий по переработке строительных отходов, а уровень переработки превышает 80%. На юге (Кампания, Калабрия, Сицилия) перерабатывающая инфраструктура практически отсутствует, а основная масса строительных отходов направляется на нелицензированные полигоны или используется для нелегальной засыпки [137]. Итальянское агентство по охране окружающей среды (ISPRA) оценивает общий уровень переработки строительных отходов и отходов сноса в стране в 78%, однако этот средний показатель маскирует колоссальные региональные различия. Для Российской Федерации итальянский опыт поучителен именно в части региональной дифференциации: различия между Москвой и отдаленными регионами по инфраструктуре переработки строительных отходов, вероятно, не уступают различиям между Миланом и Неаполем.

Региональная дифференциация российского опыта требует подробного рассмотрения. Помимо Москвы и Санкт-Петербурга, определенную активность в области переработки строи-

тельных отходов проявляют Свердловская, Новосибирская и Самарская области. В Екатеринбурге компания «Уральский щебень» с 2017 года эксплуатирует мобильный дробильно-сортировочный комплекс мощностью 150 тыс. тонн в год, перерабатывающий бетонный лом со строительных площадок города [138]. В Новосибирске предприятие «СибЭкоСтрой» специализируется на переработке асфальтобетонного лома, образующегося при ремонте городских дорог: полученная асфальтобетонная крошка используется для устройства временных проездов и площадок. При этом масштаб этих предложений остается незначительным по сравнению с общим объемом образующихся отходов.

Особый случай представляют регионы Дальнего Востока. Низкая плотность населения, значительные расстояния перевозки и ограниченная номенклатура строительных проектов делают создание стационарных перерабатывающих мощностей экономически нецелесообразным. Вместе с тем строительство и реконструкция объектов в ходе государственных программ развития Дальнего Востока генерируют растущие объемы строительных отходов. Применение мобильных дробильно-сортировочных установок (финского или немецкого производства), перемещаемых от объекта к объекту, рассматривается как потенциальное решение для территорий с низкой концентрацией строительства [139]. Опыт использования подобных установок на объектах компании «Транснефть» в Восточной Сибири подтвердил их техническую работоспособность, хотя экономический эффект ограничивается экономией на транспортировке первичного щебня из удаленных карьеров.

Сопоставление барьеров, препятствующих внедрению циркулярных методов работы в различных странах, выявляет ряд универсальных затруднений. Все без исключения рассмотренные юрисдикции указывают на проблему нестабильного качества вторичных строительных материалов как на основное препятствие для их широкого применения. Вторичный щебень из бетонного лома характеризуется более высокой дисперсией свойств (прочность, влагопоглощение, плотность) по сравнению с природным щебнем, что затрудняет проектирование и требует усиленного входного контроля [140]. Решение этой проблемы видится в стандартизации процессов переработки и создании систем сертификации вторичных материалов, аналогичных тем, что уже функционируют для первичного сырья.

Другим универсальным барьером является правовая неопределенность момента, когда отход перестает быть отходом и становится вторичным сырьем (продуктом). Европейский регламент об отходах (Directive 2008/98/EC) устанавливает критерии «прекращения статуса отхода» (окончание статуса отхода criteria), впрочем для строительных отходов конкретные критерии разработаны лишь для нескольких фракций (металлолом, стекло), а для бетонного и кирпичного лома они отсутствуют или различаются между странами-членами ЕС [141]. В России этот вопрос решается на уровне отдельных технических условий (ТУ), разрабатываемых каждым перерабатывающим предприятием самостоятельно, что создает фрагментарную и непрозрачную нормативную среду.

Культурный барьер — предубеждение в отношении вторичных материалов — фиксируется исследователями во всех рассмотренных странах, хотя его выраженность различается. Опрос, проведенный Делфтским техническим университетом среди 340 нидерландских архитекторов и конструкторов в 2022 году, показал, что 68% респондентов готовы применять вторичные заполнители в ненесущих конструкциях, вместе с тем лишь 23% — в несущих [142]. Среди российских проектировщиков, по данным отраслевых опросов, готовность применять вторичные материалы выразили только 18% респондентов, причем основными мотивами отказа названы неуверенность в качестве (54%), отсутствие нормативной базы (31%) и давление заказчика (15%) [143].

Технологические инновации в области вторичных строительных материалов открывают дополнительные возможности. Технология «сухой карбонизации» бетонного лома, разработанная исследователями Университета Гента (Бельгия), позволяет насыщать вторичный запол-

нитель углекислым газом, что повышает его плотность и прочность, одновременно связывая CO2 [144]. По данным разработчиков, карбонизированный вторичный заполнитель демонстрирует свойства, сопоставимые с природным щебнем, при условии выдерживания в атмосфере повышенной концентрации CO2 в течение 24—48 часов. Коммерческая реализация технологии начата канадской компанией CarbonCure Technologies, которая поставляет оборудование для бетонных заводов, позволяющее вводить CO2 в бетонную смесь на стадии затворения [145].

Геополимерные вяжущие, получаемые активацией алюмосиликатного сырья (золы-уноса, молотого шлака, метакаолина) щелочными растворами, представляют альтернативу портландцементу с существенно меньшим углеродным следом. Давидовитс, предложивший термин «геополимер» в 1978 году, показал, что геополимерные бетоны могут достигать прочности, сопоставимой с традиционными, при сокращении выбросов CO2 на 60—80% [146]. Возможность использования вторичных заполнителей в геополимерных бетонах исследована группой Гурнея и Шарма (Университет Мельбурна) и подтверждена для конструкций с расчетной прочностью до 40 МПа [147]. Для российских условий геополимерные вяжущие особенно перспективны, учитывая наличие значительных запасов золошлаковых отходов ТЭС (по оценкам Минэнерго, около 1,5 млрд тонн накопленных золошлаков).

Международное сотрудничество в области циркулярного строительства реализуется через несколько каналов. Программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) в ходе Глобального альянса по зданиям и строительству (GlobalABC) координирует обмен опытом между странами в области ресурсоэффективного строительства [148]. Европейский институт инноваций и технологий (EIT) через свое подразделение EIT Climate-KIC финансирует проекты, направленные на ускорение перехода к циркулярному строительству в странах-членах ЕС. Международный совет по исследованиям в строительстве (CIB) через рабочие комиссии W115 (Construction Materials Stewardship) и W119 (Customised Industrial Construction) поддерживает обмен результатами исследований между научными группами разных стран [149].

Россия участвует в международном сотрудничестве по линии двусторонних соглашений, хотя масштаб участия в последние годы сократился. Российско-германский проект «Переработка строительных отходов в городах Российской Федерации» (реализован при поддержке GIZ в 2016—2019 годах) включал передачу немецких технологий сортировки и переработки и обучение российских специалистов на предприятиях Германии [150]. По итогам проекта разработаны рекомендации по созданию региональных систем обращения со строительными отходами, однако их практическое внедрение ограничилось тремя пилотными регионами (Калининградская область, Республика Татарстан, Свердловская область). Российско-финское сотрудничество в области строительных технологий, хотя и сохраняется, фокусируется преимущественно на энергоэффективности, а не на циркулярности.

Потенциал сотрудничества со странами ЕАЭС и СНГ в области циркулярного строительства остается практически неиспользованным. Казахстан, Узбекистан и Беларусь переживают строительный бум и сталкиваются с растущими объемами строительных отходов, впрочем системы их переработки в этих странах практически не развиты. Совместная разработка нормативной базы, обмен технологическим опытом и координация подготовки кадров могли бы принести взаимную пользу. Евразийская экономическая комиссия (ЕЭК) включила ресурсосбережение в перечень приоритетных направлений промышленной кооперации, однако конкретные программы в области обращения со строительными отходами пока не сформированы.

Роль местного самоуправления в организации обращения со строительными отходами требует отдельного анализа. В большинстве европейских стран муниципалитеты наделены полномочиями по регулированию условий сноса зданий, выдаче разрешений на строительство и контролю за движением отходов. Амстердам, Копенгаген, Хельсинки используют механизм муниципального земельного контроля: при предоставлении земельного участка под застройку

муниципалитет включает в условия договора требования к применению вторичных материалов и проектированию с учетом разборки [151]. В Российской Федерации подобная практика пока не получила распространения, хотя Градостроительный кодекс РФ предоставляет муниципалитетам достаточно широкие полномочия в области регулирования строительной деятельности.

Экономическое моделирование перехода к циркулярному строительству на макроуровне проведено несколькими исследовательскими группами. Кембриджский институт устойчивого лидерства (CISL) оценил, что полная реализация потенциала циркулярного строительства в ЕС к 2050 году позволила бы сократить потребление первичных минеральных ресурсов в строительном секторе на 80%, снизить выбросы CO2 от производства строительных материалов на 60% и создать дополнительно 700 тыс. рабочих мест в сферах переработки, ремонта и обслуживания [152]. Применительно к России аналогичные расчеты отсутствуют, что представляет пробел в обосновании государственной политики. Одной из задач настоящей монографии является разработка методологического аппарата, позволяющего проводить подобные оценки с учетом российской специфики.

Институциональная среда циркулярного строительства в каждой из рассмотренных стран складывалась в тесном взаимодействии государственных органов, профессиональных объединений, научных организаций и частного бизнеса. В Нидерландах координирующую роль выполняет «Платформа циркулярного строительства» (Platform CB'23), объединяющая более 200 участников строительной цепочки. В Великобритании аналогичную функцию исполняет «Совет зеленого строительства» (UKGBC). В Германии — Немецкий совет по устойчивому строительству (DGNB). В России институциональная структура, координирующая переход к циркулярному строительству, не сформирована: НОСТРОЙ, НОПРИЗ, Российская гильдия управляющих и девелоперов и другие профессиональные объединения пока не выделяют циркулярную экономику в самостоятельное направление работы.

Профессиональное образование и повышение квалификации являются необходимым условием распространения циркулярных подходов. Делфтский технический университет с 2018 года предлагает магистерскую программу «Circular Built Environment», которая ежегодно выпускает 25—30 специалистов, обладающих компетенциями в области проектирования разбираемых конструкций, оценки циркулярности и управления вторичными материалами [153]. Датская королевская академия архитектуры включила курс «Circular Design» в обязательную программу бакалавриата. В российских строительных вузах потребность в аналогичных образовательных программах очевидна, но их разработка сдерживается отсутствием систематизированного отечественного опыта и методических материалов. Разработка учебно-методических рекомендаций является одной из прикладных задач, решаемых в третьей главе настоящей монографии.

Анализ временной динамики выявляет ускорение развития циркулярного строительства в 2020-х годах. Если в первой половине 2010-х годов тематика ограничивалась преимущественно академическими публикациями и пилотными проектами, то во второй половине десятилетия она проникла в нормативные акты, отраслевые стандарты и коммерческую практику. Европейский зеленый курс (European Green Deal, 2019), Новая индустриальная стратегия Европы (2020), Стратегия устойчивой и интеллектуальной мобильности (2020) и ряд других программных документов ЕС последовательно расширяют нормативное пространство циркулярной экономики. Пересмотр Регламента ЕС по строительным изделиям (CPR), ожидаемый к 2026 году, предусматривает введение обязательных экологических деклараций для строительных изделий, включающих информацию о содержании вторичного сырья и потенциале повторного использования [154]. Для российских производителей строительных материалов, экспортирующих продукцию на европейский рынок, соответствие этим требованиям станет условием доступа к рынку.

Подводя итог обзору зарубежного и отечественного опыта, отметим несколько выводов, значимых для дальнейших разделов монографии. Во-первых, результативная система циркулярного строительства формируется как комплекс взаимосвязанных элементов: нормативное регулирование, экономическое стимулирование, технологическая инфраструктура, информационные системы, кадровое обеспечение. Изъятие любого элемента резко снижает результативность остальных. Во-вторых, начальный этап перехода требует существенного государственного участия (пилотные проекты, субсидирование инфраструктуры, повышение тарифов на захоронение), тогда как на зрелом этапе система способна функционировать преимущественно на рыночных основаниях. В-третьих, российская ситуация характеризуется одновременным отставанием по всем перечисленным элементам, что означает необходимость комплексного — а не точечного — воздействия. Методологические подходы к такому комплексному воздействию составляют предмет второй главы настоящей монографии.

Европейский союз выстроил многоуровневую систему регулирования обращения со строительными отходами. Основополагающая директива об отходах (2008/98/ЕС) установила целевой показатель переработки строительных отходов и отходов сноса на уровне 70% к 2020 году, а Директива о полигонах (1999/31/ЕС) последовательно ужесточала требования к захоронению перерабатываемых фракций [85]. Регламент ЕС о строительных изделиях (EU 305/2011) включил базовое требование No 7 «Устойчивое использование природных ресурсов», обязывающее учитывать возможность повторного использования и переработки строительных конструкций при проектировании [86]. Статистика достижения целевого показателя 70% демонстрирует значительный разброс по странам: от 97—99% в Нидерландах и Японии до 10—15% в России и 5—15% в Китае. Между тем прямое сопоставление затруднено различиями в методологии учета: ряд стран включают в переработку засыпку грунтом и укрепление оснований, что формально является утилизацией, но содержательно представляет простейшую форму повторного применения без прироста стоимости.

Германия занимает среди европейских стран особое положение благодаря детальности технических стандартов для вторичных строительных материалов. Закон о замкнутых циклах (Kreislaufwirtschaftsgesetz, 2012) установил общие принципы, а Постановление о переработке коммерческих отходов (Gewerbeabfallverordnung, 2017) конкретизировало требования к раздельному сбору и переработке строительных отходов [87]. Объем строительных отходов и отходов сноса в Германии составляет около 220 млн тонн в год (включая грунт). Если исключить грунт, собственно строительные отходы (бетон, кирпич, асфальтобетон, гипс, дерево, металлы) составляют порядка 60—70 млн тонн, из которых перерабатывается около 88% [88]. Стандарт DIN 4226—100 регламентирует требования к вторичным заполнителям для бетона и допускает замещение до 45% крупного заполнителя вторичным щебнем для бетонов классов до С30/37 [89]. Это один из наиболее проработанных стандартов в мире, задающий образец для других юрисдикций.

Проект «Urban Mining Design» (Берлин, 2019) стал одним из первых в Германии примеров проектирования общественного здания с полным учетом материального состава и возможности будущей разборки. Здание детского сада площадью 1200 кв. м спроектировано с применением деревянной стоечно-балочной системы на болтовых соединениях, модульных фасадных панелей и разъемных инженерных подключений [90]. Каждому элементу конструкции присвоен цифровой идентификатор, включенный в BIM-модель с указанием материала, производителя, способа демонтажа и ожидаемого остаточного ресурса. По расчетам проектировщиков, 85% материалов здания пригодны для повторного использования после завершения расчетного срока службы в 60 лет.

Великобритания, несмотря на выход из Европейского союза, сохраняет высокие стандарты обращения со строительными отходами. Налог на захоронение (Landfill Tax), введенный в 1996 году и последовательно повышавшийся до 102,10 фунтов стерлингов за тонну к

2024 году, относится к числу наиболее высоких в Европе и создает мощный экономический фактор переработки [91]. Протокол WRAP (Waste and Resources Action Programme) по управлению строительными отходами стал отраслевым стандартом и применяется на большинстве крупных строительных площадок [92]. Организация Salvo поддерживает крупнейшую в стране онлайн-платформу торговли вторичными строительными материалами, объединяющую около 700 поставщиков [93].

Французский закон о борьбе с расточительством и о циркулярной экономике (Loi AGEC, 2020) ввел систему расширенной ответственности производителя для строительных материалов, обязав их финансировать сбор, сортировку и переработку отходов через отчисления в специализированный фонд [94]. С 2023 года действует организация Valobat, созданная производителями для реализации этой обязанности. Диагностика состава отходов (Diagnostic PEMD) стала обязательной перед сносом зданий площадью свыше 1000 кв. м [95]. Австрийская директива по строительным отходам (Recycling-Baustoffverordnung, 2015) установила четыре класса качества вторичных заполнителей (U-A, U-B, U-E, U-G), различающихся по содержанию примесей и допустимым областям применения [96]. Подобная дифференциация создает понятные правила для проектировщиков и строителей.

Китайская Народная Республика сталкивается с проблемой строительных отходов масштаба, не имеющего аналогов. Ежегодный объем строительных отходов и отходов сноса оценивается в 1,5—2,3 млрд тонн, из которых перерабатывается от 5 до 15% [97]. Четырнадцатый пятилетний план развития циркулярной экономики КНР (2021—2025) установил цель повышения уровня комплексной утилизации строительных отходов до 60% в крупных городах к 2025 году [98]. Для достижения этой цели введен ряд мер: обязательная раздельная сортировка строительных отходов на площадке, субсидирование строительства перерабатывающих предприятий, налоговые льготы для компаний, использующих вторичные заполнители. Города Шэньчжэнь, Шанхай и Пекин выступили пилотными площадками: к 2024 году в Шэньчжэне действовало 18 перерабатывающих предприятий совокупной мощностью 30 млн тонн в год [99]. Однако барьеры (нестабильное качество вторичных материалов, недостаточная информированность проектировщиков, конкуренция с дешевым первичным сырьем) практически полностью совпадают с российскими.

Японская система обращения со строительными отходами достигает одних из наиболее высоких показателей переработки в мире. Закон о переработке строительных материалов (2002) обязывает подрядчика при сносе здания площадью свыше 80 кв. м проводить раздельный демонтаж с обязательным выделением четырех фракций: бетон, асфальтобетон, дерево, смешанные отходы [100]. К 2020 году показатели переработки достигли: асфальтобетон — 99,5%, бетонный лом — 97,7%, древесные отходы — 96,2% [101]. Высокая стоимость захоронения (150—250 долларов за тонну), развитая сеть перерабатывающих предприятий (более 3000 по стране) и культурная традиция бережного обращения с ресурсами объясняют столь значительный результат.

Практика «тайкай» (раздельного сноса) предполагает демонтаж здания в порядке, обратном строительству: сначала удаляются внутренняя отделка и инженерные коммуникации, затем кровля, далее — несущие конструкции. Каждый этап сопровождается раздельным сбором материалов. Продолжительность раздельного сноса превышает сплошной в 2—3 раза, тем не менее качество получаемого вторичного сырья значительно выше [102]. Южная Корея, заимствовавшая ряд элементов японской модели, к 2022 году достигла уровня переработки строительных отходов в 98,6% [103].

Опыт стран Персидского залива показателен для регионов с масштабным строительством в аридном климате. Муниципалитет Дубая в 2018 году установил требование о переработке не менее 75% строительных отходов и построил четыре крупных перерабатывающих предприятия совокупной мощностью 10 млн тонн в год [104]. Сингапур достиг уровня переработки

строительных отходов свыше 99%, используя бетонный лом для намыва новых территорий [105]. Бразильский опыт (резолюция CONAMA No 307, 2002) демонстрирует затруднения, типичные для развивающихся стран: в крупных городах (Сан-Паулу, Куритиба) переработка достигает 40—50%, тогда как в малых городах она близка к нулю из-за обширной методы работы нелегального сброса отходов [106].

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.