

Научная статья

УДК 502.131.1

doi:10.37614/2220-802X.2.2024.84.007

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАКОВ В ЗЕЛЕНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АРКТИКИ

Дмитрий Олегович Скобелев¹, Екатерина Николаевна Потапова², Дмитрий Христофорович Михайлиди³,
Виктор Викторович Рудомазин⁴

^{1,3,4}Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Москва, Россия

²Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, Москва, Россия

¹dskobelev@eipc.center, ORCID 0000-0002-8067-7016

²potapova.e.n@muctr.ru, ORCID 0000-0002-5796-2265

³d.mikhailidi@eipc.center, ORCID 0009-0005-6491-0710

⁴v.rudomazin@eipc.center

Аннотация. В статье исследуется возможность применения бетона, изготовленного из цементной смеси с добавками доменного шлака, для строительства зданий и сооружений в Арктическом регионе Российской Федерации в контексте стратегии устойчивого развития территории. Вовлечение отходов производств в качестве вторичного сырья соответствует принципам зеленой экономики и экономики замкнутого цикла, в последнее время проявились локальные симбиотические эффекты снижения стоимости материалов и нагрузки на окружающую среду. Отмечено, что замена части клинкера на минеральные добавки при производстве цемента сокращает его углеродоемкость. Дополнительное снижение выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ достигается за счет длительного сохранения теплоизолирующих свойств объекта при относительно медленном разрушении его конструкций. Проведены сравнительные лабораторные испытания образцов бетона, изготовленных на основе цемента с добавлением 15 % (по массе) минеральных добавок шлаков и цемента без добавок. Оценены динамические показатели плотности и прочности образцов цементного камня при моделировании естественных природных условий. Включение минеральных добавок изменяет течение химических реакций при отвердевании камня и его последующем контакте с природной средой, при этом скорость процесса не удлиняется, а прочность повышается, в том числе при частых сменах режимов замораживания/оттаивания и гидратации/дегидратации, что повышает срок службы объекта. Полученные данные экстраполированы на эколого-экономические показатели строительства и эксплуатации, в качестве основных характеристик выбраны доступность, пригодность, долговечность, ресурсная эффективность. Сделан вывод о целесообразности использования цементов с минеральными добавками из доменного шлака в условиях Арктического региона.

Ключевые слова: устойчивое развитие, зеленая экономика, строительство в Арктике, ресурсная эффективность, цемент с минеральными добавками

Для цитирования: Возможности использования шлаков в зеленом строительстве в контексте устойчивого развития Арктики / Д. О. Скобелев [и др.] // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2024. № 2. С. 88–99. doi:10.37614/2220-802X.2.2024.84.007.

Original article

BLAST FURNACE SLAG AS A CONSTRUCTION MATERIAL FOR ARCTIC SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Dmitry O. Skobelev¹, Ekaterina N. Potapova², Dmitry Kh. Mikhailidi³, Victor V. Rudomazin⁴

^{1,3,4}Environmental Industrial Policy Center, Moscow, Russia

²Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

¹dskobelev@eipc.center, ORCID 0000-0002-8067-7016

²potapova.e.n@muctr.ru, ORCID 0000-0002-5796-2265

³d.mikhailidi@eipc.center, ORCID 0009-0005-6491-0710

⁴v.rudomazin@eipc.center

Abstract. This article explores the potential of using concrete made from a cement mixture with blast furnace slag additives for construction in the Russian Arctic to promote sustainable development in the region. Utilizing industrial waste as recycled raw materials aligns with the principles of green and circular economy. Recent observations have shown local symbiotic effects, such as reduced material costs and mitigated environmental impacts. Replacing clinkers with mineral additives during cement production has been noted to reduce the carbon intensity of the final product. Further reductions in greenhouse gas and pollutant emissions can be achieved due to the long-term preservation of thermal insulating properties and the relatively

slow degradation of the structure. Comparative laboratory tests were conducted on concrete samples made from cement with 15% (by weight) mineral slag and cement without additives. The dynamic indicators of density and hardness of the cement samples were assessed under simulated natural conditions. The inclusion of mineral additives alters the chemical reactions during the hardening of the concrete in contact with air and water, without prolonging the process, and increases hardness, even with frequent cycles of freezing/thawing and hydration/dehydration, thereby extending the service life of the structures. The obtained data were extrapolated to evaluate the environmental and economic indicators of construction and maintenance; accessibility, suitability, durability, and resource efficiency were identified as the key characteristics. The study concludes that using cement with mineral additives from blast furnace slag in the Arctic is feasible.

Keywords: sustainable development, green economy, construction in the Arctic, resource efficiency, cement with additives

For citation: Skobelev D. O., Potapova E. N., Mikhailidi D. Kh., Rudomazin V. V. Blast furnace slag as a construction material for Arctic sustainable development. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2024, no. 2, pp. 88–99. doi:10.37614/2220-802X.2.2024.84.007.

Введение

Арктический регион составляет пятую часть территории Российской Федерации, но проживает здесь лишь пятидесятая часть ее населения, которое, по сути, сосредоточено в нескольких городах европейской части страны. Степень интереса к региону возросла многократно благодаря актуальным государственным (обеспечение безопасности границ, судоходства и торговли) и экономическим (развитие территорий вдоль Северного морского пути) интересам. Технологическое развитие начала XXI в. позволило рентабельно добывать углеводороды на арктическом шельфе, изменение климата открывает короткий торговый путь из Дальнего Востока в Европу, который большую часть года будет свободен ото льда.

Особенности экономики Арктики связаны с гораздо более высокой долей транспортных издержек; длинным сроком финансового оборота из-за протяженного «мертвого сезона», когда деятельность невозможна; отсутствием значимого локального потребления как средства развития; существенным влиянием природных условий на хозяйственную деятельность; влиянием геополитических факторов [1].

Подчеркнем, что, к сожалению, многие проекты по освоению Арктики, осуществленные в советскую эпоху, фактически были прекращены, оставив после себя незаселенные и загрязненные территории и объекты, без восстановления функционала которых невозможно обеспечить развитие системы населенных пунктов вдоль Севморпути. Речь идет как о портах, с которых начинается проникновение вглубь материка и экономически оправданное снабжение, так и о небольших поселках в районах расположения месторождений и приисков, а также об инженерных и исследовательских станциях, позволяющих осуществлять комплексное развитие территории. Исследователи описывают, наряду с другими, эффект Джона Лондона, когда старая инфраструктура дает почву для развития новой [2]. Освоение Русского Севера хорошо продвигалось по древним поморским путям, деревням и рудникам.

Комплексное развитие является единственным

методом, который позволяет построить рентабельную транспортную модель в регионе. Чем больше населения будет охвачено каждым километром дорог, мостов, чем больше по ним перевезут грузов, тем лучше экономические показатели их строительства и эксплуатации. Естественно, что при отсутствии «точек опоры» стоимость тонно- или пассажиро-километра в десятки и сотни раз превышает аналогичные затраты любого региона РФ. Цена доставки тяжелых и габаритных грузов, без которых невозможны многие строительные работы, способна удорожить возведение объекта в 2–3 раза [3]. Специфические технологии строительства и использования дорог, сетей снабжения и коммуникаций в условиях вечной мерзлоты также вносят дополнительный вклад в инвестиционные и эксплуатационные затраты по каждому объекту при комплексном развитии территорий.

Вероятно, именно отсутствие комплексного подхода к развитию территорий, вкупе с недостаточной экономической проработанностью, привели к остановке проектов прошлого. С 1990 г. численность населения Арктики сократилась на 25–30 %, причем многие места покинуты полностью [4]. Возвращение людей связано с необходимостью обеспечить настолько комфортабельный уровень жизни, насколько это возможно в суровых условиях. Методы современного строительства позволяют возводить энергоэффективные и одновременно удобные для проживания объекты, без которых вряд ли доступно освоение Арктики, а долговечность материалов оказывает значимое влияние на показатели экономики основных фондов.

Бетон является основой строительства и, как следствие, вносит значительный вклад в его себестоимость [5].

Исследователи последовательно расширяют область понятий и явлений, которые могут быть «зелеными», — от химии в 1990-е гг. к строительству, сельскому хозяйству, регионам и экономике. При этом определение «зеленые» все чаще используется как синоним словосочетания «для устойчивого развития» [6]. Авторы работ, посвященных Арктике, подчеркивают,

что северные экосистемы весьма уязвимы, и глобальный «тройной экологический кризис» проявляется в Арктике более явно, чем в других регионах мира [7].

Считается, что внедрение принципов зеленой экономики — это неотъемлемая часть пути к устойчивому развитию [8]. В развитых странах наблюдается эффект декаплинга, сущность которого состоит в том, что наращивание инвестиций в зеленую экономику позволяет осуществлять экономический рост без экологического ущерба [9]. В России и других странах Евразийского экономического союза (ЕАЭС) для достижения эффекта декаплинга необходимы изменения в государственной промышленной и инновационной политике, трансформация моделей роста, поскольку основную долю составляют отрасли со значительным негативным воздействием на окружающую среду, а прирост ВВП достигается за счет добычи полезных ископаемых и низших технологических переделов, а не за счет выпуска высокотехнологичной продукции [10].

В зеленом строительстве не только повторно используются строительные материалы, но и утилизируются отходы, применяются новые изолирующие материалы и альтернативные источники энергии, отработанный теплый воздух идет на отопление и пр. Инвесторы акцентируют внимание на проектировании и строительстве зданий с применением зеленых технологий с целью снижения антропогенного воздействия на окружающую среду.

Важным направлением развития зеленых технологий является снижение остроты проблем урбанизации при сохранении устойчивого и комплексного развития территории. Наиболее простым методом повышения энергетической, а значит экономической, эффективности зданий есть и будет улучшение теплоизолирующей способности сооружений, что уменьшает углеродный след и снижает ресурсоемкость эксплуатации. Использование облегченных материалов обеспечивает меньшую нагрузку на грунт, контроль утечек воды, снижает потребление муниципальных систем — в сущности, любые меры по повышению ресурсной эффективности оказывают одновременное положительное влияние на экономику Арктического региона и на состояние окружающей среды [11].

По статистике, все существующие в мире здания в процессе своего жизненного цикла потребляют около 40 % мировой первичной энергии, 67 % электричества, 40 % сырья и примерно 14 % совокупных запасов питьевой воды. При этом они производят порядка 35 % мировых эмиссий углекислого газа и около 50 % твердых коммунальных отходов [12]. Если дополнить экономическое целеполагание снижением негативного воздействия на окружающую среду и ограничением выбросов парниковых газов, это описание будет близко к используемым на международном уровне определениям зеленого строительства и строительства для устойчивого развития [13].

В ГОСТ Р 70346–2022 включены понятие наилучшей доступной технологии (НДТ) и раздел «Материалы и ресурсоэффективность», в котором указаны критерии применительно к строительству. Например, экологичным считается использование материалов «с низкой эмиссией вредных веществ в воздух». Маркировка «экологически безопасный», однако, не имеет четко установленных критериев для ее присвоения¹. Более того, можно говорить только о сопоставлении решений, о более или менее экологичных решениях. При этом система критериев для оценки технологий производства тех или иных строительных материалов — это система критериев НДТ. Такие критерии разработаны и для производства цемента².

Несмотря на то что содержание цемента в бетоне кажется невысоким (10–15 % по массе) [14], его вклад в стоимость материалов превышает 50 %³, а свойства бетона (при соблюдении всех технологических правил) полностью зависят от вида и качества применяемого цемента [15]. В России все виды цемента, строительные изделия из бетона подлежат обязательной сертификации, а строительные смеси и растворы — декларированию соответствия. В соответствующих информационно-технических справочниках по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ) — «Производство строительной керамики»⁴, «Производство стекла»⁵ и «Производство цемента» — описаны аспекты ресурсной эффективности использования данных строительных материалов с учетом потенциальной ресурсоемкости и углеродного следа при эксплуатации будущих зданий. Углеродный след является проекцией ресурсной эффективности, выраженной в потреблении энергии

¹ Экологическая сертификация стройматериалов // ПрофРесурс. URL: <https://prof-resurs.ru/news/stroitelstvo/tpost/1rebol7451-ekologicheskay-a-sertifikatsiya-stroimate>.

² ИТС НДТ 6-2022 «Производство цемента» // Бюро НДТ. URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1843&etkstructure_id=1872.

³ Из чего складывается стоимость бетона? // Альфа-бетон. URL: <https://www.a-beton.com/stati/iz-chego-skladivaetsya-stoimost-betona>.

⁴ ИТС НДТ 4-2023 «Производство керамических изделий» // Бюро НДТ. URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2102&etkstructure_id=1872.

⁵ ИТС НДТ 5-2022 «Производство стекла» // Бюро НДТ. URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1838&etkstructure_id=1872.

РАЦИОНАЛЬНОЕ И ЭКОЛОГОСБАЛАНСИРОВАННОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ НА СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

в разных формах для отопления, освещения, водоснабжения, вентиляции.

Применение минеральных добавок (доменного гранулированного шлака, золы-уноса, известняка, пуццоланов и др.) при помолу цемента позволяет сократить долю клинкера, что способствует повышению ресурсоэффективности строительства и дополнительному снижению углеродоемкости продукции [16]. Это происходит потому, что технологический процесс производства клинкера сопровождается выбросом парниковых газов за счет сжигания ископаемого топлива и разложения известняка. С другой стороны, введение ряда минеральных добавок изменяет скорость процессов гидратации и твердения цементного камня, что, в свою очередь, повышает морозостойкость и долговечность материалов на основе цемента и бетона [17].

Цель работы состоит в оценке целесообразности использования шлаковых отходов черной металлургии в качестве добавки в цементную смесь при ведении строительных работ в Арктическом регионе с точки зрения как экономических показателей, так и крайне важных экологических перспектив вовлечения вторичных ресурсов в хозяйственный оборот и тем самым формирования экономики замкнутого цикла для устойчивого развития Севера. Суждения опираются на установленные в результате научного эксперимента закономерности протекания процессов гидратации и твердения цементного камня с добавкой шлака в условиях имитации субарктического морского климата.

Материалы и методы

Авторы статьи экстраполируют результаты сравнительного исследования динамики показателей долговечности бетонов, а именно прочности и плотности, на экономические и экологические показатели эффективности строительства и эксплуатации зданий и иных инженерных сооружений в контексте устойчивого развития Арктического региона.

Используются методы критериального анализа эколого-экономической эффективности производства цемента с применением в качестве добавки шлаковых отходов металлургического производства. В качестве критериев выступают доступность, применимость, долговечность, ресурсная эффективность. Используются информационно-аналитические и научные материалы открытого доступа. В частности, проанализированы материалы отраслевых ИТС НДТ.

Результаты и обсуждение

Добавки шлаков дают возможность вовлекать в оборот вторичные ресурсы, которые могут заменять более дорогие первичные (природные) без снижения потребительских свойств продукта, что соответствует

принципам экономики замкнутого цикла и политики устойчивого развития. В качестве ключевых экономических и экологических характеристик соответствия строительных материалов на основе цемента с добавками шлаковых отходов выбраны следующие:

- доступность материала (по сравнению с цементной смесью без добавок);
- применимость при строительстве в условиях короткого сезона (обеспечение требуемой скорости твердения цементного камня);
- долговечность использования сооружений;
- ресурсная эффективность полного жизненного цикла сооружений [18].

Использование бетона в строительстве, как правило, комбинированное. Блочные железобетонные изделия (ЖБИ) производят на специальных заводах и доставляют до места строительства, монолитная технология подразумевает бетонирование и отверждение цементного камня непосредственно на объекте [19]. Блочные конструкции позволяют удешевить процесс создания стандартных конструкций, но в Арктике комбинаты ЖБИ есть только в крупных городах, а доставка блочных конструкций, в силу лимитированной транспортной и сезонной доступности, а также отсутствия на местах средств для монтажа тяжелых конструкций, не всегда возможна, но устройство фундамента в зоне вечной мерзлоты предполагает укрепление грунта железобетонными сваями и их использование в качестве опоры для зданий.

Рассмотрим **доступность** цементной смеси с добавками доменного шлака для строительства в северных широтах России. На Дальнем Востоке отсутствуют доменные металлургические производства, а мощности цементных производств крайне невелики (4,7 млн т в год) [20], поэтому экономически очевидно, что материал для изготовления бетона в азиатской части Арктики закупается в Китае и в какой-то степени может поступать с юга Сибири по рекам в период навигации. С развитием Северного морского пути доступность материалов, безусловно, увеличится. В европейской части достаточно предприятий для удовлетворения спроса, а транспортная доступность в разы лучше.

С экономической точки зрения, согласно анализу прямых затрат и выгод, снижение себестоимости цемента может быть обусловлено тем, что в производство вовлекаются как вновь образующиеся, так и уже имеющиеся в отвалах шлаки металлургических предприятий, находящихся в промышленном симбиозе [21] (рис. 1). Синергетический эффект возникнет от сокращения логистических плечей и нагрузки на окружающую среду за счет рекультивации нарушенных ландшафтов.



Рис. 1. Структура промышленного симбиоза в г. Новотроицке [21]

Однако вместе с появлением у металлургов технологических возможностей по извлечению полезных компонентов из доменного шлака [22] разница стоимости одной тонны цемента без добавок и с добавкой 15–20 % шлака сократилась до 400 руб., что составляет менее 8 %, а необходимость дополнительного помола шлака на трубчатой мельнице до уровня тонкости 3800–4000 см²/г сокращает потенциальный доход еще приблизительно на 50 руб/т. С учетом объемов производства цемента в 63 млн т, экономический потенциал аспекта в настоящее время составляет 22 млрд руб. в текущих ценах.

Вместе с тем значительное влияние на экономику цементной и строительной отраслей окажет ожидаемое введение платы за выбросы парниковых газов; эксперимент по квотированию выбросов парниковых газов осуществляется в настоящее время в Сахалинской области. Замещение шлаком клинкер-цемента в смеси уменьшит плату за выбросы углекислого газа практически на эквивалентную величину, поскольку шлаковые компоненты уже декарбонизированы в ходе реализации металлургических процессов.

В настоящее время стоимость углеродной единицы (1 т CO₂-эквивалента) на биржевых торгах

составляет всего 700 руб.⁶, что составляет примерно 15 % от текущей оптовой цены цемента. Но к 2040 г. прогнозируется ее увеличение до 15 тыс. руб. (300 % от текущей оптовой цены). Легко подсчитать, что при средних удельных выбросах в 628 кг CO₂-экв/т при введении углеродного регулирования замена 15 % смеси доменным шлаком сэкономит 65 руб/т в 2024 г. и до 1 400 руб/т в перспективе 15 лет, то есть в проекции на текущие объемы производства цемента экономический потенциал может составить 4 и 88 млрд руб. соответственно.

При оценке **применимости** основной акцент сделан на том, что введение добавок не увеличивает время твердения цементного камня, а значит, не удлиняет соответствующий этап строительства, что очень важно в условиях короткого строительного сезона, который оценивается в 4–5 месяцев в европейской части и в 2,5–4 месяца в азиатской части Арктического региона России [23]. Сравнение характеристик прочности, плотности и времени твердения бездобавочного цемента (рис. 2, а) и смеси, включающей в себя 15 % (мас.) доменного шлака (рис. 2, б), показывает, что вышеуказанные параметры к достижению 28-дневного срока выдержки полностью соответствует строительным нормативам.

⁶ ПАО «Сибур». URL: <https://www.sibur.ru/press-center/news-and-press/na-rossiyskom-uglerodnom-rynke-sostoyalis-pervye-krupnye-birzhevye-sdelki/>.

РАЦИОНАЛЬНОЕ И ЭКОЛОГОСБАЛАНСИРОВАННОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ НА СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

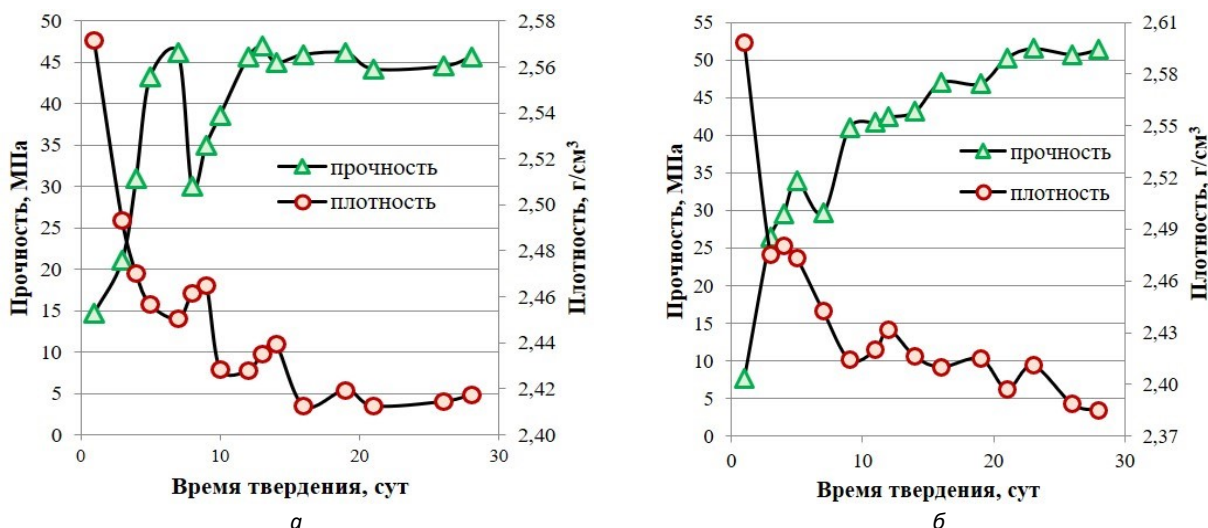


Рис. 2. Взаимосвязь истинной плотности и прочности цементов. Твердение при нормальных условиях:
 а — бездобавочный цемент; б — цемент с добавкой 15 % (мас.) доменного шлака.
 Составлено авторами на основе экспериментальных результатов

Экономический эффект от долговечности потребительских свойств бетона неразрывно связан с ожидаемым сроком службы. Долговечность бетона означает, что строительные элементы на его основе при достаточном уходе в течение предусмотренного срока службы устойчивы ко всем воздействиям [24]. В отличие от показателей прочности и плотности, долговечность бетона сложно оцифровать. В структуре бетона под воздействием окружающей среды происходит стремление к энергетической оптимизации связей между молекулами, что приводит к поглощению или высвобождению воды (химическая реакция гидратации/дегидратации). Чем более интенсивно протекают эти процессы, тем быстрее разрушается бетон. Скорость и глубину протекания реакций пытаются уменьшить с помощью специальных технологий строительства [25; 26].

Сменяющие друг друга циклы замораживания и оттаивания также могут приводить к нарушениям структуры, понижению прочности, а затем и к разрушению материала. В особенно жестких условиях эксплуатируются сооружения, расположенные вдоль береговой линии, где соленый ветер добавляет мощный негативный эффект [15]. Замена части цементного клинкера минеральными добавками позволяет уменьшить эффекты от перепадов температур (особенно проходящих через 0 °С от 35 до 100 раз за год), а также от соленой среды вследствие изменения последовательности происходящих химических реакций (рис. 3). Результаты показывают, что чередование процессов замораживания и оттаивания в любом случае ведет к снижению прочностных показателей, однако для цемента с добавками шлака эта деградация меньше —

до 39,9 МПа против 30,0 МПа у бездобавочного цемента.

С экономической точки зрения увеличение нормативного срока эксплуатации, например с 20 до 25 лет, приведет к снижению ежегодной бухгалтерской амортизации и скорости деградации основных фондов на 1 % от стоимости объекта, что позволит предприятию более эффективно потратить инвестиции и тем самым повысить потенциал собственного экономического развития. Кроме того, меньшая скорость деградации теплоизолирующих свойств обеспечит меньшие эксплуатационные затраты на объекте.

Проведение экономической оценки эксплуатации объектов, построенных с применением доменных шлаков, может стать предметом отдельного исследования, но, исходя из принципов, применяемых при оценке эффективности строительства [27], продление срока эксплуатации приносит дополнительный вклад в чистый дисконтируемый доход (далее — ЧДД), интегрирующий все без исключения как доходы (прибыли, эффекты), так и затраты, обуславливающие их получение:

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T (Rt - 3t) * (1 + E)^{-t},$$

где Rt — результаты от осуществления проекта в год t ; $3t$ — затраты на реализацию проекта в том же году; E — норма дисконта; T — горизонт расчета, лет; t — номер годового шага расчета.

Очевидно, что каждый год эксплуатации сверх расчетного норматива дает дополнительный доход до тех пор, пока затраты на текущую эксплуатацию не начнут превышать доход от функционирования объекта.

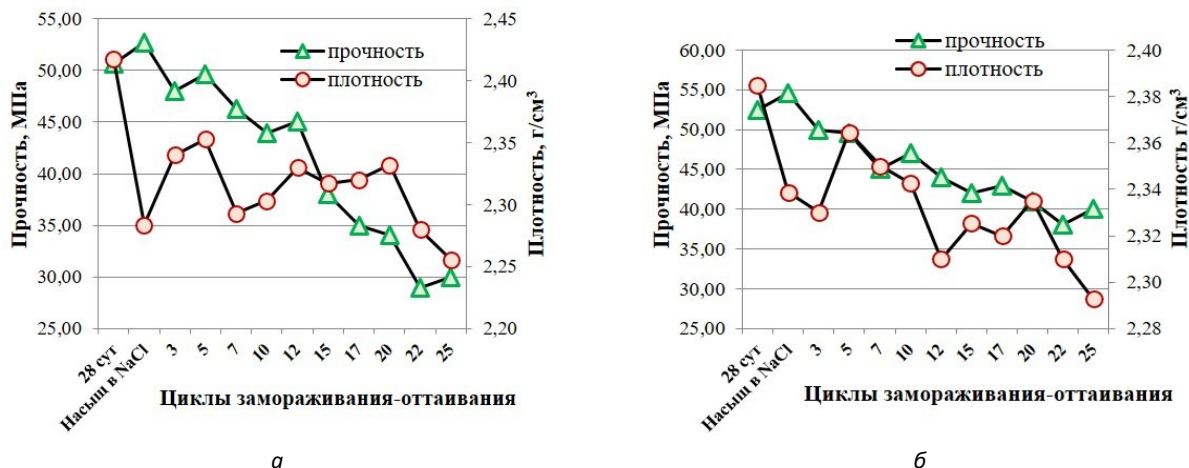


Рис. 3. Прочность и плотность цементного камня в условиях чередования суточных циклов замораживания и оттаивания в 5 %-м растворе хлорида натрия. Составы цементов: а — бездобавочный цемент; б — цемент с добавкой 15 % (по массе) доменного шлака. Составлено авторами на основе экспериментальных результатов

Обеспечение **ресурсной эффективности жизненного цикла** зданий — задача, которую начинают решать уже на стадии проектирования. Более чем на 60 % территории России среднегодовая температура воздуха составляет $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ [27]. В среднем те же 60 % денежных средств, затрачиваемых на эксплуатацию зданий, приходится на создание в них комфортной температуры и подогрев воды [28], то есть на снижение теплового энергопотребления на 5 % эквивалентно снижению общих расходов на 3 %. В дополнение к этому тепловая энергетика имеет значительный углеродный след вследствие массового применения органического ископаемого топлива для генерации.

Различия в теплопроводности и теплоемкости бетонов, состоящих из цемента с минеральными добавками и без таковых, не обнаружено, соответственно, теплоизолирующие свойства зданий на протяжении жизненного цикла в большей степени зависят от разрушения структуры бетона. Поэтому при планировании строительства зданий и сооружений необходимо учитывать значительное увеличение (в условиях изменения климата) количества циклов замораживания/оттаивания, которое способен выдержать строительный материал без ухудшения потребительских характеристик. В XXI в. в Арктике все чаще наблюдаются аномально высокие для региона температуры, достигшие в 2020 г. $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Верхоянск, Республика Саха). Исследователи отмечают, что наблюдаемые в Арктике в настоящее время климатические явления свидетельствуют о достижении определенного критического уровня регионального

и глобального потепления [29]; озвучиваются прогнозы снижения уровня жизни, в том числе по причине ускоренного разрушения жилой и прочей инфраструктуры [30].

Эти обстоятельства обуславливают актуальность новых требований к составу строительных материалов и определению их проектного срока службы. Показано (см. рис. 3), что для бездобавочного цемента значение плотности изменяется в пределах 6,7 %, тогда как для цемента с добавлением 15 % (мас.) доменного шлака варибельность составляет 3,8 % [15], что говорит о большей стабильности второго состава в долгосрочном периоде.

Полученные авторами результаты показали, что введение в цемент до 15 % (мас.) доменного гранулированного шлака приводит к повышению прочностных показателей бетона и положительно влияет на морозостойкость затвердевшего цементного камня. Новизной исследования является проецирование физико-химических закономерностей процессов гидратации и твердения цементного камня с добавкой шлака в условиях переменного замораживания и оттаивания на эколого-экономическую эффективность строительства зданий и сооружений в регионах с субарктическим климатом. Исследование позволяет рекомендовать применение цемента с пониженным клинкер-фактором и бетона на его основе, что расширяет возможности их практического использования. Преимущества цементной смеси с содержанием добавок шлаковых отходов отражены в таблице.

Экономическая и экологическая эффективность при использовании цементной смеси с добавками 15 % (мас.) доменного шлака

Критерий	Описание
Доступность	Экономический эффект может выражаться в снижении стоимости качественной смеси (до 8 %) при добавлении шлаковых отходов, особенно в условиях производства в рамках промышленного симбиоза. Такая продукция более доступна в европейской части России. Удорожание шлака вследствие внедрения утилизации на металлургических заводах отчасти нивелирует потенциал эффекта, который оценивается в 22 млрд руб. в текущих ценах. При введении углеродного регулирования может возникнуть дополнительный положительный эффект, потенциал которого оценивается от 4 млрд руб. в текущих ценах до 88 млрд руб. в проекции 2040 г. Получение эколого-климатического эффекта предполагается посредством снижения углеродоемкости цементной смеси на 15 % за счет замены клинкера вторичным сырьем, создания замкнутого цикла использования ресурсов
Применимость	Введение добавок шлаковых отходов в цементную смесь не увеличивает сроки твердения цементного камня, а значит, и нормативные сроки строительства. Рыночные марки цемента содержат до 35 % (мас.) добавок шлака. Экономические и экологические показатели как минимум не ухудшаются
Долговечность	Экстраполяция данных эксперимента позволяет сделать вывод о возможности повышения срока службы возводимых объектов при применении смеси с добавками доменного шлака. Экономический эффект состоит в росте классического показателя ЧДД за счет получения дополнительных притоков денежных средств, привносимых каждым сверхнормативным годом эксплуатации. Экологический эффект состоит в сохранении и восстановлении ландшафтов (на территориях, где размещаются шлаки металлургических производств)
Ресурсная эффективность	Ощутимого изменения теплопроводности и теплоемкости бетонов при добавлении минеральных добавок в цемент не зафиксировано. Однако прочность к концу испытаний отличалась на 33 % в пользу цемента с добавками шлака, то есть бетон на такой основе медленнее разрушается, а значит, дольше сохраняет теплоизолирующие свойства и способен к более продолжительной эксплуатации. Эксплуатационные затраты жизненного цикла условного здания в среднем в 5 раз превосходят капитальные [31]. Более продолжительная эксплуатация приводит к получению дополнительных доходов. Экологический эффект может определяться, например, снижением потребления топлива, необходимого для отопления зданий, а следовательно, снижением выбросов загрязняющих веществ, поступающих в воздух при сжигании топлива

Заключение

Стремление к развитию зеленого строительства подразумевает вовлечение вторичных ресурсов в хозяйственный оборот и применение ресурсоэффективных технологий, равно как и последовательный отказ от использования опасных для человека и окружающей среды веществ.

Применение повышающих морозостойкость материалов способно обеспечивать большую долговечность сооружений в субарктическом климате, что, при сохранении потребительских свойств объекта в течение всего жизненного цикла, делает его эксплуатацию более длительной, а следовательно, экономически более выгодной.

Сохранение теплоизолирующих свойств зданий в процессе эксплуатации улучшает ресурсную, а значит, и экономическую эффективность и снижает углеродный след. Строительство объектов из материалов со сниженной углеродоемкостью (замещение минеральными добавками клинкера в цементной смеси) соответствует целям устойчивого развития.

Цементные смеси с добавками металлургических шлаков доступны в европейской части и мало распространены в азиатской части Арктического региона России в силу географии размещения источников сырья. Европейская часть российской Арктики, очевидно, намного доступнее азиатской. Развитие Северного морского пути и использование иных традиционных маршрутов освоения даст импульс устойчивому развитию и облегчит проникновение зеленых материалов в строительство в регионе.

Внедрение модульного строительства зданий в Арктическом регионе позволяет частично отказаться от применения бетона, а также использовать материалы и технологии, обеспечивающие лучшие теплоизолирующие свойства без ущерба для долговечности, а стоимость жизненного цикла и углеродный след становятся ощутимо меньше по сравнению с традиционными материалами.

Список источников

1. Пилясов А. Н., Путилова Е. С. Новые проекты освоения российской Арктики: пространство значимо! // Арктика и Север. 2020. № 38. С. 20–42. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.38.21.
2. Huskey L. Alaska's Economy: The First World War, Frontier Fragility, and Jack London // The Northern Review. 2017. No. 44. Pp. 327–346. DOI: 10.22584/nr44.2017.014.

3. Гизатуллина О. М., Ушанов И. Г. Способы оптимизации логистических затрат в Арктической зоне РФ // Экономические науки. 2020. № 9 (192). С. 280–285. DOI: 10.14451/1.192.280.
4. Шабает Ю. П., Садохин А. П., Кузнецова А. Ю. Российская идентичность Русского Севера: история и проблемная современность // Вестник Санкт-Петербургского университета. Социология. 2016. № 1. С. 127–140. DOI: 10.21638/11701/spbu12.2016.112.
5. Гимадиева Л. Ш. Моделирование стоимости строительства жилья на примере Республики Татарстан // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 2, С. 46–59. URL: <https://esj.today/PDF/46ECVN222.pdf> (дата посещения: 21.03.2024).
6. Houssam N., Ibrahim D. M., Sucharita S., El-Aasar K. M., Esily R. R., Sethi N. Assessing the Role of Green Economy on Sustainable Development in Developing Countries // Heliyon. 2023. Vol. 9, Is. 6. Pap. e17306. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17306.
7. Лексин В. Н., Порфирьев Б. Н. Другая Арктика: опыт системной диагностики // Проблемы прогнозирования. 2022. № 1 (190). С. 34–44. DOI: 10.47711/0868-6351-190-34-44.
8. Зеленая экономика и цели устойчивого развития для России: коллективная монография / под науч. ред. С. Н. Бобылева, П. А. Кирюшина, О. В. Кудрявцевой. М.: Экономический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова, 2019. 284 с. ISBN 978-5-906932-32-7.
9. Селищева Т. А. «Зеленая» экономика как модель устойчивого развития стран ЕАЭС // Проблемы современной экономики. 2018. № 3 (67). С. 6–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenaya-ekonomika-kak-model-ustoychivogo-razvitiya-stran-eaes> (дата обращения: 21.03.2024).
10. Орлова Л. Н., Кузнецов В. В. К вопросу об устойчивом развитии экономических систем // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2018. № 6. С. 16–23. DOI:10.21686/2413-2829-2018-6-16-23.
11. Li M., Li Z., Xing X. The Dilemma of Sustainable Development of Russian Arctic Development Based on ANP-SWOT Model Theory Perspective (англ.) // Systems. 2023. Is. 11 (7). P. 334. DOI: 10.3390/systems11070334.
12. Ingraio C., Messineo A., Beltramo R., Yigitcanlar T., Ioppolo G. et al. How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 201. Pap. 556–569. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.080.
13. Ebolor A., Agarwal N., Brem A. Sustainable Development in the Construction Industry: The Role of Frugal Innovation // Journal of Cleaner Production, 2022. Vol. 380, Part 2. Pap. 134922. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134922.
14. Потапова Е. Н., Волосатова М. А. Производство цемента / Энциклопедия технологий 2,0: Производство неметаллов / гл. ред. Д. О. Скобелев. М.; СПб.: ФГАУ «НИИ ЦЭПП», 2022. С. 207–318. ISBN: 9785001256076.
15. Корчунов И. В. Влияние фазового состава и структуры цементного камня на его морозостойкость: автореф. дис. ... канд. наук / БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. 22 с.
16. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC3) // Cement and Concrete Research. 2018. Vol. 114. Pp. 49–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017.
17. Скобелев Д. О., Федосеев С. В. Политика повышения ресурсоэффективности и формирование экономики замкнутого цикла // Компетентность. 2021. № 3. С. 5–15. DOI: 10.24412/1993-8780-2021-3-05-14.
18. Тихонова И. О., Потапова Е. Н., Волосатова А. А., Гусева Т. В. Использование металлургических шлаков в производстве строительных материалов как направление формирования экономики замкнутого цикла // Черные металлы. 2023. № 8. С. 12–25. DOI: 10.17580/chm.2023.08.12.
19. Татевосян А. Г. Современные технологии в архитектуре Арктики // Актуальные исследования. 2023. № 15 (145), ч. I. С. 43–48. DOI: 10.51635/27131513_2023_15_1_43.
20. Гузь В. А., Высоцкий Е. В. Цементная промышленность России в 2022 году // Цемент и его применение. 2023. № 6, С. 16–18. URL: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-6-2022/tsementnaya-promyshlennost-rossii-v-2022-godu/> (дата обращения: 21.03.2024).
21. Петросян В. С., Тихонова И. О., Епифанцев А. С., Щелчков К. А., Цветкова Е. А. Опыт создания промышленного симбиоза предприятий химической промышленности // Экология и промышленность России. 2021. № 25 (8). С. 28–33. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-8-28-33.
22. Бондаренко Г. В. Обоснование необходимости внедрения технологий по производству шлаковых вяжущих на примере ПАО «Северсталь» // Черные металлы. 2019. № 7. С. 67–74.
23. Костик Е. П., Кости, Е. В. Особенности реализации принципов «зеленой» экономики в условиях устойчивого развития региона // Тенденции экономического развития в XXI веке: материалы II Междунар. науч. конф. 28 февр. 2020 г. Минск: БГУ, 2020. С. 168–170. ISBN 9789855669358.
24. Potapova E., Sivkov S., Korchunov I. Effect of hardening conditions on the structure of cement // American Concrete Institute. An ACI Technical Publication. Symposium Volumes. SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018), 2018. Pp. 82.1–82.9.

25. Зырянова Е. Е. Особенности эксплуатации зданий и сооружений на основе применения инновационного подхода // Экономинфо. 2015. № 24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ekspluatatsii-zdaniy-i-sooruzheniy-na-osnove-primeneniya-innovatsionnogo-podhoda> (дата обращения: 21.03.2024).
26. Vasilev Y., Eremin V., Gorky D. Innovative sulfur-containing materials for transport construction in the Arctic region // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 57. Pp. 728–734. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.106.
27. Доможилов Ю. Н., Монастырев П. В., Никитина Н. С., Кауппила В., Кайвонен Ю. А., Аро Т. Технико-экономические основы эксплуатации, реконструкции и реновации зданий: Учебное пособие. М.: Ассоциация строительных ВУЗов, 2007. 192 с. ISBN: 9785930935165.
28. Кошкина Н. Государственная политика Российской Федерации в области борьбы с изменением климата // *Искусство управления*. 2020. № 12 (3). С. 441–454. DOI: 10.17072/2218-9173-2020-3-441-454.
29. Мохов И. И. Особенности современных изменений климата в Арктике и их последствий // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66 (4). С. 446–462. DOI:10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
30. Фомин М. В., Безвербный В. А., Селезнев И. А., Шушпанова И. С., Лукашенко Е. А., Мирязов Т. Р. Проблемы пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России: социологический анализ // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66, № 2. С. 217–233. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-217-233.
31. Воеводина А. И. Повышение эффективности организации реконструкции зданий // *Актуальные исследования*. 2019. № 3 (3). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-organizatsii-rekonstruktsii-zdaniy> (дата обращения: 30.05.2024).

References

1. Pilyasov A. N., Putilova E. S. Novye proekty osvoeniya rossiiskoi Arktiki: prostranstvo znachimo! [New projects for the development of Russian Arctic: Space matters!]. *Arktika i Sever* [Arctic and North], 2020, No. 38, pp. 20–42. (In Russ.). DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.38.21.
2. Huskey L. Alaska's Economy: The First World War, Frontier Fragility, and Jack London. *The Northern Review*, 2017, No. 44, pp. 327–346. DOI: 10.22584/nr44.2017.014.
3. Gizatullina O. M., Ushanov I. G. Sposoby optimizatsii logisticheskikh zatrat v Arkticheskoi zone RF [Ways to optimize logistics costs in the Arctic zone of the Russian Federation]. *Ekonomicheskie nauki* [Economic Sciences], 2020, No. 9 (192), pp. 280–285. (In Russ.). DOI: 10.14451/1.192.280.
4. Shabaev J. P., Sadohin A. P., Kuznetsova A. Yu. Rossiiskaya identichnost' Russkogo severa: istoriya i problemnaya sovremennost' [Russian identity of the Russian North: History and modernity problem]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Sotsiologiya* [Bulletin of St. Petersburg University. Sociology], 2016, No. 1, pp. 127–140. (In Russ.). DOI: 10.21638/11701/spbu12.2016.112.
5. Gimadieva L. Sh. Modelirovanie stoimosti stroitel'stva zhil'ya na primere respubliky Tatarstan [Modeling the cost of housing construction]. *Vestnik evraziiskoj nauki* [The Eurasian Scientific Journal], 2022. Vol. 14, No. 2, pp. 46–59. (In Russ.). Available at: <https://esj.today/PDF/46ECVN222.pdf> (accessed 03.21.2024).
6. Houssam N., Ibrahim D. M., Sucharita S., El-Aasar K. M., Esily R. R., Sethi N. Assessing the Role of Green Economy on Sustainable Development in Developing Countries. *Heliyon*, 2023, Vol. 9, Is. 6, pap. e17306. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e17306.
7. Laksin V. N., Porfiriev B. N. Drugaya Arktika: opyt sistemnoi diagnostiki [The other Arctic: Experience in system diagnostics]. *Problemy prognozirovaniya* [Studies on Russian Economic Development], 2022, No. 1 (190), pp. 34–44. (In Russ.). DOI: 10.47711/0868-6351-190-34-44.
8. Bobylev S. N., Kiryushina P. A., Kudryavtseva O. V. *Zelenaya ekonomika i tseli ustoichivogo razvitiya dlya Rossii* [Green economy and sustainable development goals for Russia]. Moscow, Ekonomicheskii fakul'tet MGU imeni M. V. Lomonosova [M. V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Economics], 2019, 284 p. (In Russ.). ISBN 978-5-906932-32-7.
9. Selishcheva T. A. "Zelenaya" ekonomika kak model' ustoichivogo razvitiya stran EAES [Green economy as a model of sustainable development in the EAEU countries]. *Problemy sovremennoi ekonomiki* [Problems of modern economics], 2018, No. 3 (67), pp. 6–12, (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/zelenaya-ekonomika-kak-model-ustoychivogo-razvitiya-stran-eaes> (accessed 03.21.2024).
10. Orlova L. N., Kuznetsov V. V. K voprosu ob ustoichivom razvitiie ekonomicheskikh sistem [Concerning sustainable development of economic systems]. *Vestnik Rossiiskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G. V. Plekhanova* [Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics], 2018, No. 6, pp. 16–23. (In Russ.). DOI:10.21686/2413-2829-2018-6-16-23.
11. Li M., Li Z., Xing X. The Dilemma of Sustainable Development of Russian Arctic Development Based on ANP-SWOT Model Theory Perspective. *Systems*, 2023, Is. 11 (7), pap. 334. DOI: 10.3390/systems11070334.

12. Ingrao S., Messineo A., Beltramo R., Yigitcanlar T., Ioppolo G. et al. How can life cycle thinking support sustainability of buildings? Investigating life cycle assessment applications for energy efficiency and environmental performance. *Journal of Cleaner Production*, 2018, Vol. 201, pp. 556–569. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.080.
13. Eboror A., Agarwal N., Brem A. Sustainable Development in the Construction Industry: The Role of Frugal Innovation. *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 380, part 2, pap. 134922. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134922.
14. Potapova E. N., Volosatova M. A. *Proizvodstvo tsementa. Etsiklopediya tekhnologii 2,0: Proizvodstvo nemetallov* [Cement production. Encyclopedia of technology 2.0: Production of non-metals]. Moscow, Saint Petersburg, FGAIU "NII CEPP" [Environmental Industrial Policy Center], 2022, pp. 207–318. (In Russ.). ISBN: 9785001256076.
15. Korchunov I. V. *Vliyanie fazovogo sostava i struktury tsementnogo kamnya na ego morozostoikost': avtoref. dis. ... kand. nauk* [The influence of the phase composition and structure of hydrated cement on its frost resistance. Abstract of a PhD dissertation]. BGU im. V. G. Shuhova [V. G. Shukhov Belgorod State University], 2023, 22 p. (In Russ.).
16. Scrivener K., Martirena F., Bishnoi S., Maity S. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 2018, Vol. 114, pp. 49–56. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.017.
17. Skobelev D. O., Fedoseev S. V. Politika povysheniya resursoeffektivnosti i formirovanie ekonomiki zamknutogo tsikla [Resource efficiency policy and circular economy development]. *Kompetentnost'* [Competence], 2021, No. 3, pp. 5–15. (In Russ.). DOI: 10.24412/1993-8780-2021-3-05-14.
18. Tkhonova I. O., Potapova E. N., Volosatova A. A., Guseva T. V. Ispol'zovanie metallurgicheskikh shlakov v proizvodstve stroitel'nykh materialov kak napravlenie formirovaniya ekonomiki zamknutogo tsikla [The use of metallurgical slag in the production of building materials as a direction for the formation of a circular economy]. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2023, No. 8, pp. 12–25. (In Russ.). DOI: 10.17580/chm.2023.08.12.
19. Tatevosyan A. G. Sovremennye tekhnologii v arkhitekture Arktiki [Modern technologies in Arctic architecture]. *Aktual'nye issledovaniya* [Current Research], 2023, No. 15 (145), part I, pp. 43–48. (In Russ.). DOI: 10.51635/27131513_2023_15_1_43.
20. Guz' V. A., Vysotskii E. V. Tsementnaya promyshlennost' Rossii v 2022 godu [The Russian cement industry in 2022]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its application], 2023, No. 6, pp. 16–18. (In Russ.). Available at: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-6-2022/tsementnaya-promyshlennost-rossii-v-2022-godu/> (accessed 03.21.2024).
21. Petrosyan V. S., Tikhonova I. O., Epifantsev A. S., Shchelchikov K. A., Tsvetkova E. A. Opyt sozdaniya promyshlennogo simbioza predpriyatii khimicheskoi promyshlennosti [Developing an industrial symbiosis of chemical industries: A case study]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2021, No. 25 (8), pp. 28–33. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2021-8-28-33.
22. Bondarenko G. V. Obosnovanie neobkhodimosti vnedreniya tekhnologii po proizvodstvu shlakovykh vyazhushchikh na primere PAO "Severstal'" [Justification of the need to introduce technologies for the production of slag binders: A case study of Severstal]. *Chernye metally* [Ferrous metals], 2019, No. 7, pp. 67–74. (In Russ.).
23. Kostik E. P., Kostik, E. V. *Osobennosti realizatsii printsipov "zelenoi" ekonomiki v usloviyakh ustoichivogo razvitiya regiona / Tendentsii ekonomicheskogo razvitiya v XXI veke. Materialy II Mezhdunar. nauch. konf. 28 fevr. 2020 g.* [Implementing the green economy principles under the conditions of sustainable region development / Trends in economic development in the 21st century. Proceedings of the II International Scientific Conference at Belarus State University]. Minsk, BGU, 2020, pp. 168–170. (In Russ.). ISBN 9789855669358.
24. Potapova E. Effect of hardening conditions on the structure of cement. American Concrete Institute. An ACI Technical Publication. Symposium Volumes. SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018), 2018, pp. 82.1–82.9.
25. Zyryanova E. E. Osobennosti ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy na osnove primeneniya innovatsionnogo podhoda [Features of buildings and structures on the basis of application of innovative approach]. *Ekonominfo* [Economics], 2015, No. 24. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-ekspluatatsii-zdaniy-i-sooruzheniy-na-osnove-primeneniya-innovatsionnogo-podhoda> (accessed 03.21.2024).
26. Vasilev Y., Eremin V., Gorky D. Innovative sulfur-containing materials for transport construction in the Arctic region. *Transportation Research Procedia*, 2021, Vol. 57, pp. 728–734. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.106.
27. Domozhilov Yu. N., Monastirev P. V., Nikitina N. S., Kauppila V., Kaivonen Yu. A., Aro T. *Tekhniko-ekonomicheskie osnovy ekspluatatsii, rekonstruktsii i renovatsii zdaniy* [Technical and economic principles of operation, reconstruction and renovation of buildings]. Moscow, Assotsiatsiya stroitel'nykh VUZov [Association of Construction Institutions], 2007, 192 p. (In Russ.). ISBN: 9785930935165.

28. Koshkina N. Gosudarstvennaya politika Rossiiskoi Federatsii v oblasti bor'by s izmeneniiem klimata [The Russian Federation state policy in combating climate change]. *Ars Administrandi (Iskusstvo upravleniya)* [Ars Administrandi (Art of Management)], 2020, No. 12 (3), pp. 441–454. (In Russ.). DOI: 10.17072/2218-9173-2020-3-441-454.
29. Mokhov I. I. Osobennosti sovremennykh izmenenii klimata v Arktike i ikh posledstviy [Features of modern climate changes in the Arctic and their consequences]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Problems of the Arctic and Antarctic], 2020, Vol. 66 (4), pp. 446–462. (In Russ.). DOI:10.30758/0555-2648-2020-66-4-446-462.
30. Fomin M. V., Bezverbny V. A., Seleznev I. A., Shushpanova I. S., Lukashenko E. A., Miriazov T. R. Problemy prostranstvennogo razvitiya regionov severa Dal'nego Vostoka Rossii: sotsiologicheskii analiz [Regions spatial development of the Russian Far East North: Sociological analysis]. *Problemy Arktiki i Antarktiki* [Arctic and Antarctic Research], 2020, vol. 66, No. 2, pp. 217–233. (In Russ.). DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-217-233.
31. Voevodina A. I. Povyshenie effektivnosti organizatsii rekonstruktsii zdaniy [Improving the efficiency organization of buildings renovation]. *Aktual'nye issledovaniya* [Current research], 2019, No. 3 (3). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-effektivnosti-organizatsii-rekonstruktsii-zdaniy> (accessed 05.30.2024).

Об авторах:

Д. О. Скобелев — докт. экон. наук, директор;

Е. Н. Потапова — докт. тех. наук, проф.;

Д. Х. Михайлиди — канд. экон. наук, научный сотрудник отдела методологии ресурсосбережения;

В. В. Рудомазин — начальник департамента специальных проектов реального сектора экономики.

About the authors:

D. O. Skobelev — DSc (Economics), Director;

E. N. Potapova — DSc (Engineering), Professor;

D. Kh. Mikhailidi — PhD (Economics), Researcher at the Department of Resource Conservation Methodology;

V. V. Rudomazin — Head of the Department for Real Economy Projects.

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2024 года.

Статья принята к публикации 6 июня 2024 года.

The article was submitted on April 11, 2024.

Accepted for publication on June 6, 2024.