

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2022, №2, Том 9 / 2022, N 2, Vol. 9 <https://t-s.today/issue-2-2022.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/05SATS222.pdf>

DOI: 10.15862/05SATS222 (<https://doi.org/10.15862/05SATS222>)

Бетоны на основе побочных продуктов промышленности: оценка воздействия на окружающую среду

¹Смирнова О.М., ²Казанская Л.Ф.

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия

²ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора
Александра I», Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Смирнова Ольга Михайловна, e-mail: smirnovaolgam@rambler.ru

Аннотация. Улучшение экологической обстановки и получение композитов гидратационного твердения с новыми свойствами для различных условий эксплуатации возможно при использовании вторичных ресурсов. Работа посвящена изучению критериев оценки воздействия вяжущих гидратационного твердения на окружающую среду. Методологический подход к выбору функциональной единицы для сравнительной оценки углеродного следа цементов обосновывается в работе. Приведены результаты исследований свойств, определяющих долговечность бетона в транспортном строительстве и в агрессивной среде животноводческих ферм. Наименьшую стойкость в агрессивной среде животноводческих комплексов имеет бетон на основе портландцемента, прочность на изгиб которого уменьшается почти вдвое после 150 суток выдерживания. Несколько лучшие показатели коэффициента стойкости в агрессивной среде имеют составы вяжущего на шлакопортландцементе и техногенном сырье. При этом если процесс деструкции и снижения прочностных характеристик образцов вяжущего на портландцементе носит прогрессирующий характер до полного их разрушения, то в образцах

вяжущего на модифицированном техногенном сырье прочностные характеристики стабилизируются со временем, что свидетельствует о затухающем характере коррозионного процесса. Исследованный шлакощелочной бетон удовлетворяет требованиям для дорожных бетонов и бетонов подрельсовых конструкций, т. е. прочность на сжатие и морозостойкость составили 70 МПа и F600 для гранулированного доменного шлака с модулем основности 0.8; 78 МПа и F700 для гранулированного доменного шлака с модулем основности 0.9. Эти бетоны имели сопоставимые характеристики с бетоном на портландцементе СЕМ 52.5, для которого значения составили 60 МПа и F600. Представленные результаты способствуют развитию экологического подхода к принятию проектных решений в строительстве.

Ключевые слова: углеродный след; удельный выброс эквивалента углекислого газа; функциональная единица оценки воздействия цемента; многокомпонентные вяжущие; молотый гранулированный доменный шлак; активаторы твердения; долговечность; морозостойкость; устойчивое развитие

Industrial waste products based concrete: environmental impact assessment

Olga M. Smirnova, Liliya F. Kazanskaya

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia
Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia

Corresponding author: Olga M. Smirnova, e-mail: smirnovaolgam@rambler.ru

Abstract. Improving the environmental situation and obtaining hydration hardening composites with new properties for various operating conditions is possible with the use of secondary resources. The work is dedicated to the criteria study for assessing the hydration hardening binders impact on the environment. The methodological approach to the choice of a functional unit for a carbon footprint comparative assessment of cement is substantiated in the work. The study results of the properties that determine the concrete durability in transport construction and the aggressive environment of livestock farms are presented. Concrete based on Portland cement has the least resistance in the aggressive environment of livestock complexes, the cross-breaking strength of which is almost twice after 150 days of curing. Marginally better resistance coefficient indicators in an aggressive environment have binder compositions based on portland blast furnace slag cement and technogenic raw materials. At the same time, if the process of degradation and decrease in the strength properties of the binder samples on Portland cement is progressive until they

are completely destroyed, then in the binder samples on modified technogenic raw materials, the strength characteristics stabilize with time, which indicates the decaying nature of the corrosion process. The investigated slag-alkaline concrete satisfies the requirements for paving concrete and concretes for under-rail structures, since compressive strength and frost resistance were 70 MPa and F600 for granulated blast-furnace slag with a basicity modulus of 0.8; 78 MPa and F700 for granulated blast-furnace slag with alkali-lime index 0.9. These concretes had comparable characteristics to concrete on Portland cement CEM 52.5, for which the values were 60 MPa and F600. The presented results contribute to the development of an ecological approach to making design decisions in construction.

Keywords: carbon footprint; specific emission of carbon dioxide equivalent; functional unit for assessing the impact of cement; multicomponent binders; ground granulated blast-furnace slag; hardening activators; durability; frost resistance; sustainable development

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Вопросы охраны окружающей среды за счет разработки технологий с низкими выбросами углекислого газа при использовании вторичных ресурсов приобретают глобальный характер [1–3]. Производство вяжущих гидратационного твердения и строительных материалов на их основе является отраслью, которая может вносить значительный вклад в комплексную переработку вторичных ресурсов [4–6]. Цементные композиты составляют значительную долю в производстве строительных материалов, соответственно вовлечение вторичных ресурсов в их производство позволяет улучшать экологическую обстановку, а также получать композиты с новыми или улучшенными свойствами [7–9].

В настоящее время исследования направлены на получение многокомпонентных вяжущих с низкой долей портландцементного клинкера и бесклинкерных цементов на основе побочных продуктов промышленности [10–12]. Продукты гидратации этих вяжущих различаются химическим и минералогическим составом, а также структурой цементного камня на разных уровнях и, соответственно, свойствами [13–15]. Теоретически и практически обосновано получение новых составов на основе многокомпонентного минерального сырья вторичных ресурсов для долговечных цементирующих матриц за счет повышения реакционной способности вяжущих, снижения их водопотребности, направленного регулирования процессов фазо- и структурообразования и их взаимосвязи с процессами определяющими внутреннюю коррозию камня [16–18]. Это приводит к повышению не только прочности, но и других физико-механических свойств, определяющих долговечность цементного камня [19; 20]. Высокая прочность не является единственным условием обеспечения долговечности камня. Необходимо учитывать другие свойства, определяющие долговечность материала в требуемых условиях эксплуатации.

Следует отметить, что на сегодняшний день недостаточно опубликованных экспериментальных данных, подтверждающих высокую долговечность бетона на основе бесклинкерных цементов в сложных или специфических условиях эксплуатации. Имеется опыт применения бесклинкерных цементов на основе гранулированных доменных шлаков в сложных условиях эксплуатации, таких как подрельсовые конструкции,

напольные конструкции животноводческих ферм [21–24]¹. Это позволяет обсудить воздействие этих цементов на окружающую среду.

Технология многокомпонентных цементов и бетонов на их основе должна объединять такие вопросы, как экономия портландцементного клинкера, утилизация побочных продуктов промышленности и отходов, получение бетона с новыми и улучшенными свойствами [25–27].

Следует выделить три общих подхода к снижению воздействия цемента на окружающую среду за счет снижения углеродного следа: первый — на этапе производства самого цемента — за счет замены клинкера минеральными компонентами, использования альтернативных видов топлива и др. [28; 29]; второй — на этапе производства бетонной смеси — за счет снижения расхода портландцемента, оптимизации транспортирования компонентов для приготовления смеси и др. [30; 31]; третий подход — на этапе производства железобетонных конструкций за счет уменьшения размеров конструкции при увеличении прочностных характеристик бетона, замены стальной фибры на синтетическую и др. [32–34].

Существующие исследования по оценке воздействия цемента на окружающую среду основаны на оценке жизненного цикла (ОЖЦ) со ссылкой на стандарты ISO14040, ISO14044. Позднее был разработан стандарт ISO14067 для количественной оценки углеродного следа (УС) продукции, который основан на выбросах парниковых газов, приведенных к эквиваленту углекислого газа и на методологии ОЖЦ.

Опубликованные результаты по количественной оценке углеродного следа цемента значительно различаются [35–37]. Экологическое преимущество в этих исследованиях отдается различным вяжущим: бесклинкерным цементам, малоклинкерным цементам, а также портландцементу. Это приводит к неоднозначным выводам, касающимся углеродного следа от использования минеральных компонентов в составах вяжущих. Как правило, это объясняется различием в технологии производства (например, использование альтернативных видов топлива) или необходимостью транспортирования компонентов с помощью транспорта с высоким углеродным следом. Несомненно, эти факторы вносят значительные изменения в углеродный след продукции.

Согласно ISO14067 оценка углеродного следа продукции проводится с целью сравнения экологического воздействия продукции на климат и принятия стратегических или проектных решений. В

¹ Патент N 2556563 Российская Федерация, МПК В02С 19/16 (2006.01), В02С 17/00 (2006.01). Вяжущее: N 2014129156: заявл. 15.07.2014; опубликовано 21.12.2015 / Петрова Т.М., Смирнова О.М.; заявитель ПГУПС. — 6 с.: ил. — Текст: непосредственный.

большинстве исследований по оценке углеродного следа цемента используется функциональная единица на основе единиц измерений массы (кг или тонна). Однако, исследователи показывают, что учет других характеристик является не менее важным подходом. Авторы [38; 39] показали, что учет предела прочности на сжатие цемента в функциональной единице влияет на результаты исследования ОЖЦ. Цементы с меньшим количеством клинкера всегда будут демонстрировать меньшее экологическое воздействие на окружающую среду при использовании массы в качестве функциональной единицы, хотя более низкие значения прочности или срока службы цементного бетона могут быть получены [37].

Следовательно, важно учитывать основные свойства цемента (то есть прочность на сжатие и долговечность бетона) для оценки и сравнения его экологических характеристик.

Таким образом, существует необходимость пересмотра функциональной единицы на основе единиц измерений массы для содержательного сравнения цементов и бетонов с учетом определенных свойств, таких как прочность на сжатие, срок службы, теплопроводность и др.

Авторы этой работы выдвигают **гипотезу**, согласно которой выбор функциональной единицы для количественной оценки углеродного следа продукции по ISO14067 с целью сравнения углеродного следа портландцемента и гибридного цемента необходимо выполнять с учетом свойств бетона для требуемых условий эксплуатации. Следует обратить внимание на важность обоснования цели этой оценки. Это должна быть сравнительная оценка по идентичной методике для обоснования выбора цемента (портландцемента, бесклинкерного цемента или др.) для конкретного строительного объекта. Этот выбор должен быть основан не только на технико-экономическом обосновании выбора цемента, но и на его экологическом воздействии.

В соответствии с этим основные направления по разработке гибридных цементов для повышения долговечности бетона, экспериментальные результаты для обоснования выбора функциональной единицы в методике оценки воздействия гибридного цемента на окружающую среду представлены в работе.

1. Материалы и методы

1. Materials and methods

Шлаки металлургических заводов Южного Урала были использованы (табл. 1). Шлаки представляют собой многокомпонентные

стекла, которые являются продуктами плавления железных руд, остатков горения кокса и добавок — плавней (известняка или доломита). Шлаки Южно-Уральского региона относятся к слабоокислым по модулю основности $M_0 = 0,8...0,91$ с повышенным содержанием глинозема (14...16 %) и степенью закристаллизованности 5...8 %.

Изучение отходов химической промышленности региона Южного Урала показало наличие ряда материалов, которые без существенной технологической обработки могут быть использованы в качестве известе- и сульфатосодержащих активаторов твердения бесклнкерных шлаковых вяжущих (табл. 2, 3). Химический состав известе-содержащих отходов (АО «Башкирская содовая компания», г. Стерлитамак) представлен в таблице 2. Фосфогипс АО «Мелеузовские минеральные удобрения», применяемый в экспериментах в качестве сульфатосодержащего активатора имеет следующий состав: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 94,6 %, CaHPO_4 — следы, Ca_3PO_4 — 1,31 %, H_3PO_4 и $\text{Ca}(\text{H}_3\text{PO}_4)_2$ — 0,47 %.

Таблица 1 / Table 1

Химический состав шлака, %

Slag chemistry, %

Шлак Slag	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SO_3	FeO	Fe_2O_3	MnO
								TiO_2
Белорецкий (№1) Beloretsky (No. 1)	37,00	16,00	39,30	3,00	0,62	1,00	—	1,00
Магнитогорский (№ 2) Magnitogorsk (№ 2)	35,68	14,32	40,09	5,54	1,17	—	0,84	0,80

Составлено авторами / Compiled by the authors

Таблица 2 / Table 2

Химический состав известе-содержащих отходов, %

Chemical composition of lime-containing waste, %

Отход Waste	SiO_2	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	Активные $\text{CaO} + \text{MgO}$ Actives	Cr
Твердый остаток содового производства (ТОС) The solid residue of soda production	5–12	40–50	1,8–2,6	0,2–1,0	2,8...4,7	1–3	1–5	5–12	3–12
Мелкие отходы гашения извести (МОГ) Fine lime slaking waste	2–4,5	58–62	1,0–2,5	0,15–0,25	2,0	1,3–4,0	2–3	22–35	0,3–0,5
Цементная пыль (ЦП) Cement Dust	13–15	42–45	2–3	1,0–1,5	3...6	2,5–4,0	0,7	6–7	0,3–0,5

Составлено авторами / Compiled by the authors

Таблица 3 / Table 3

Химический состав фосфогипса (ФГ)

Phosphogypsum chemistry

Содержание, % Content, %					
CaO	SO ₃	H ₂ C	P ₂ O ₅	R ₂ O ₃	R ₂ O
31,5	46,76	18,9	0,89	0,24	0,42

Составлено авторами / Compiled by the authors

Марки бетона по водонепроницаемости и морозостойкости были определены согласно действующим стандартам.

Химический состав жидкой среды, образующейся в процессе жизнедеятельности животных, зависит от вида и количества животных, а также способа их содержания и системы навозоудаления. Жидкая среда в данном исследовании имела состав: 96 % воды и 4 % сухих веществ, включая мочевины 2,2 %, мочевой кислоты 0,07 %, натрий-иона 0,4 %, калий-иона 0,2 %, магний-иона 0,07 %, кальций-ион 0,06 %, хлорид-ион 0,2 %, сульфат-ион 0,8 %. Насыщенность микрофлорой составляла $8,1 \cdot 10^7$ бактерий в 1 см³.

Исследование соответствует руководящим принципам ISO14067 по внедрению методики оценки углеродного следа продукции на основе оценки жизненного цикла продукции. Использование методики позволяет обосновывать принятие проектных решений в строительстве. Согласно ISO14067 углеродный след продукции (УСП) — сумма выбросов и удалений парниковых газов в производственной системе, выраженная как эквиваленты CO₂ (eCO₂) и основанная на оценке жизненного цикла продукции с использованием одной категории воздействия — изменения климата. Результаты количественного определения УСП выражаются в массе (eCO₂) на функциональную единицу.

2. Обоснование выбора функциональной единицы для оценки экологического воздействия бетона

2. The rationale for choosing the functional unit for assessing the environmental impact of concrete

Общая функциональная единица требуется для сравнения двух продуктов (бетона на основе портландцемента и на основе бесклнкерного цемента). Большинство исследователей сосредотачиваются на сравнении углеродного следа получения компонентов только для цементной матрицы обоих бетонов, поскольку оба вида равнопрочного бетона имеют один и тот же тип заполнителей в рамках строительного объекта. Масса цемента,

необходимая для обеспечения одинаковой прочности на сжатие в возрасте 28 суток для бетона на портландцементе и на бесклнкерном цементе принимается за функциональную единицу. Выбор функциональной единицы существенно влияет на результаты количественной оценки углеродного следа [38; 39].

Анализ эквивалента CO_2 , нормированного на прочность при сжатии в возрасте 28 суток в зависимости от состава смеси на основе портландцементов СЕМ I 52.5 и СЕМ I 42.5, показал, что оптимальная прочность бетона существует (обычно около 60 МПа), при которой значение $e\text{CO}_2$ на 1 МПа прочности является минимальным [40]. Необходимо повышать расход портландцемента, а также использовать суперпластификатор для увеличения прочности бетона. Это ведет к значительному росту $e\text{CO}_2$ на 1 МПа прочности бетона. Отсюда необходимо искать технологические приемы для повышения прочности бетона без увеличения $e\text{CO}_2$ на 1 МПа, например использование микрокремнезема.

Авторы работы [39] рассматривают экологическое воздействие прочности на сжатие бетона путем введения критерия b_i , представляющего собой отношение массы цемента на кубический метр бетона к 28-дневной прочности на сжатие. Однако только одно функциональное свойство цемента (прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток) рассматривается в этом случае.

Таким образом, необходимо обосновать выбор функциональной единицы для сравнительного анализа углеродного следа производства и применения многокомпонентных цементов, поскольку оценка углеродного следа на 1 кг цемента и 1 МПа прочности является недостаточной для принятия стратегических или проектных решений.

Авторы этой работы предлагают следующий методологический подход к выбору функциональной единицы для сравнительной оценки экологического следа продукции, который представлен на рисунке 1.

Согласно предлагаемому подходу необходимо оценивать экологический след продукции отдельно для каждого этапа производства: цемента, бетонной смеси и железобетонного изделия или конструкции. Для рассматриваемых этапов производства сравниваемой продукцией будут равнопрочные цементы, равнопрочные бетонные смеси и железобетонные конструкции, соответственно. Функциональными единицами для рассматриваемых этапов производства будут масса цемента (кг), ступень марки бетона по морозостойкости (или другое требуемое свойство бетона при одинаковом классе прочности на сжатие), изделие или конструкция (шт.).

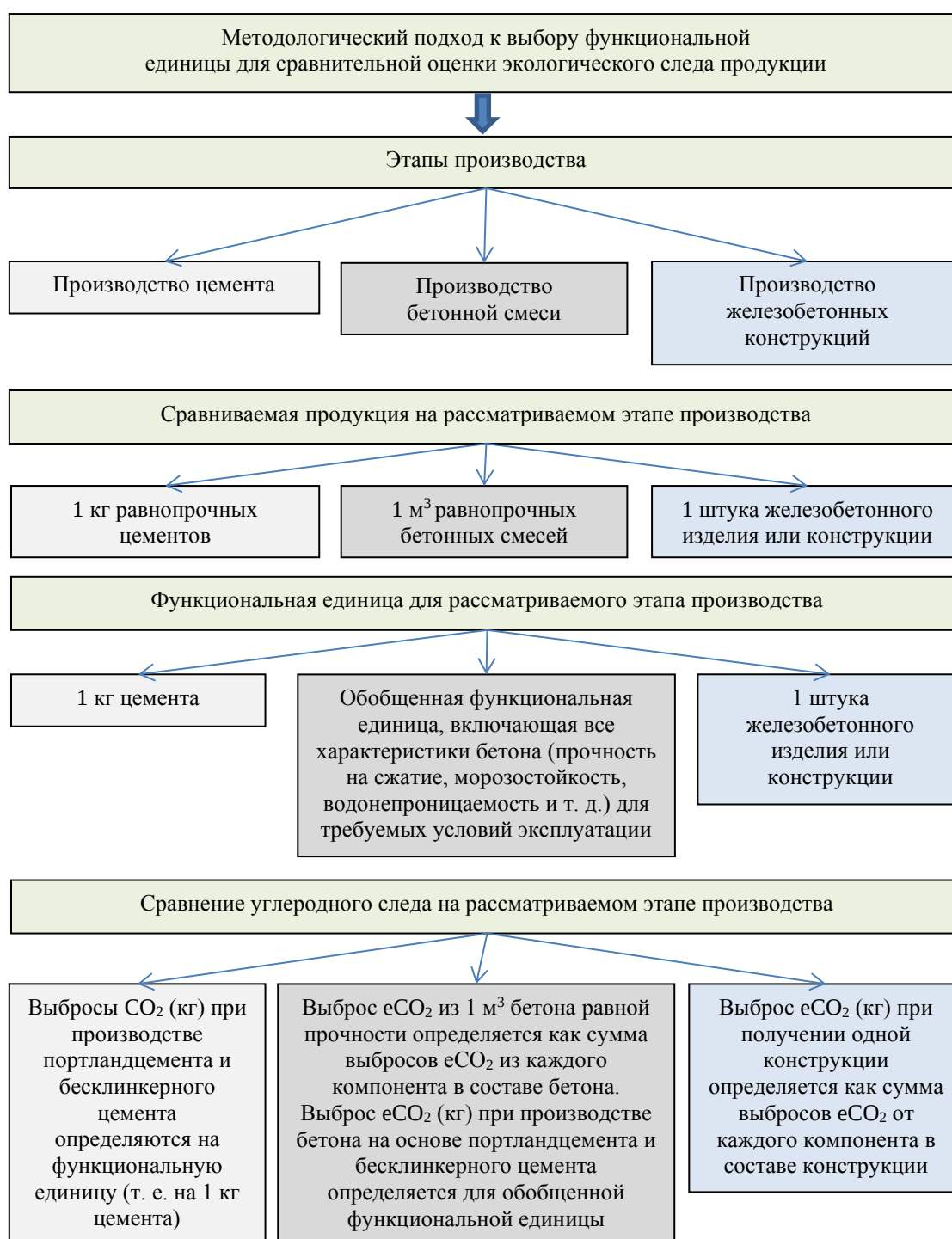


Рисунок 1. Методологический подход к выбору функциональной единицы для сравнительной оценки экологического следа продукции (разработано авторами)

Figure 1. Methodological approach to the selection of a functional unit for a comparative assessment of the product ecological footprint (developed by the authors)

Для сравнения углеродного следа портландцемента (ПЦ) и гибридного цемента выброс эквивалента углекислого газа (кг) при производстве цемента на функциональную единицу (т. е. на 1 кг цемента) определяется по методике ОЖЦ. Для сравнения углеродного следа бетона на ПЦ и гибридном цементе состав бетона в кг/м³ (состав, который

необходим для получения требуемого класса прочности на сжатие) рассматривается; выброс эквивалента углекислого газа от 1 м³ равнопрочного бетона определяется как сумма выбросов эквивалента углекислого газа от каждого компонента в составе бетона.

Выброс эквивалента углекислого газа (кг) при производстве 1 м³ бетонной смеси на функциональную единицу (например, на 1 ступень марки по морозостойкости) определяется по методике ОЖЦ. Для сравнения углеродного следа от двух конструкций состав бетона и расход арматуры в кг/шт. рассматривается (поскольку при более прочном бетоне размер конструкции может быть меньше, часть стального армирования можно заменить полимерной фиброй или композитной арматурой и т. п.); выброс эквивалента углекислого газа от 1 шт. конструкции определяется как сумма выбросов эквивалента углекислого газа от каждого компонента в составе конструкции.

3. Результаты исследования и обсуждение

3. Research results and discussion

Составы и технические характеристики бетонов на основе портландцемента, шлакопортландцемента и шлакощелочных вяжущих представлены в таблице 5. Исследованные бетоны применяются в транспортном строительстве. Например, требования по морозостойкости наравне с прочностью на сжатие предъявляются для подрельсовых конструкций, дополнительно марка по водонепроницаемости — для дорожных плит.

Таблица 5 / Table 5

Составы и свойства бетонов на основе различных вяжущих

Content and properties of concretes based on various binders

№	Вид вяжущего Binder type	Прочность, МПа Strength, MPa	Морозостойкость, цикл Frost resistance, cycle	Водонепроницаемость, МПа Water resistance, MPa
1	CEM 32.5	40	300	1,5
2	CEM 52.5	60	600	2,1
3	ШПЦ300	37	300	2,0
4	ШПЦ400	41	400	2,0
Шлак доменный № 1 (M ₀ = 0,8) Blast furnace slag				
5	только шлак only slag	2	25	0,5
6	шлак + Na ₂ CO ₃ * slag	40	300	1,5
7	шлак + NaOH* slag	35	150	1,5
8	шлак + Na ₂ SiO ₃ * slag	70	600	2,2
9	шлак + K ₂ CO ₃ * slag	40	180	1,7

№	Вид вяжущего Binder type	Прочность, МПа Strength, MPa	Морозостойкость, цикл Frost resistance, cycle	Водонепроницаемость, МПа Water resistance, MPa
Шлак доменный № 2 ($M_o = 0,9$) Blast furnace slag				
10	только шлак only slag	3	30	0,3
11	шлак+ $Na_2CO_3^*$ slag	50	400	2,0
12	шлак + $NaOH^*$ slag	40	200	1,0
13	шлак + $Na_2SiO_3^*$ slag	78	700	2,5

M_o — модуль основности шлака; * — щелочная добавка принимается в количестве 1–1,5 %. Разработано авторами / M_o — slag basicity modulus; * — alkaline additive is taken in the amount of 1–1,5 %. Developed by the authors

Шлакощелочной бетон (составы 8 и 13) удовлетворяет требованиям для бетонов подрельсовых конструкций, т.к. прочность на сжатие и морозостойкость составили 70 МПа и F600 для гранулированного доменного шлака с модулем основности 0.8; 78 МПа и F700 для гранулированного доменного шлака с модулем основности 0.9. Эти бетоны имели сопоставимые характеристики с бетоном на портландцементе СЕМ 52.5 (состав 2) для которого значения составили 60 МПа и F600.

Составы 4, 6, 11 удовлетворяют требованиям для дорожных бетонов и имеют сопоставимые характеристики с составом 1 на портландцементе. Используя подход из таблицы 4, и выбирая для равнопрочных бетонов марку бетона по морозостойкости (или оба показателя как морозостойкость и водонепроницаемость) в качестве функциональной единицы, можно утверждать, что бесклинкерные цементы могут иметь углеродный след ниже, чем у ПЦ.

Местные природные заполнители используются для производства железобетонных подрельсовых конструкций, в том числе шпал. Выбор заполнителей для бетона на портландцементе должен быть осуществлен с учетом исключения щелочной коррозии бетона. Однако, доступность таких природных заполнителей ограничена во многих регионах России. Этот факт указывает на необходимость использования цементов щелочной активации. Щелочная коррозия, а именно образование веществ большего объема в результате реакций, приводит к растрескиванию бетона. Она менее интенсивна в цементах щелочной активации, чем в портландцементе, поскольку все щелочи расходуются на активацию алюмосиликатов в шлаке или золе. Такие преимущества цементов щелочной активации перед портландцементом как высокая морозостойкость, ударная прочность, стойкость к щелоче-силикатному расширению на местных заполнителях подтверждены опытом эксплуатации железобетонных подрельсовых конструкций на основе шлакощелочного бетона [22–24].

Второй пример — применение сульфатношлакового цемента для устройства полов в животноводческих комплексах показывает, что срок службы полов в агрессивной среде повышается значительно по сравнению с бетоном на основе портландцемента [21]. Составы и свойства бетона на основе бесклнкерных вяжущих представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6 / Table 6

Составы бетона на основе бесклнкерных вяжущих

Content of concrete based on clinker-free binders

№ состава composition	Состав вяжущего Binder content							
	шлак Slag			сульфатный компонент Sulfate component			активатор Activator	
	тип type	уд. пов., см ² /г specific surface area	мас. % weight	тип type	уд. пов., см ² /г specific surface area	мас. % weight	тип type	мас. % weight
6.1	№ 2	3200	80	ФГ	6000	20	ЦП	10
6.2	№ 2	3200	80	ФГ	6000	20	МОГ	5
6.3	№ 2	3200	80	ФГ	6000	20	ТОС	10
6.4	Портландцемент ПЦ 400 Portland cement 400							
6.5	Шлакопортландцемент ШПЦ 300 Portland slag cement 300							

Разработано авторами / Developed by the authors

Таблица 7 / Table 7

Свойства бетона на основе бесклнкерных вяжущих

Concrete properties based on clinker-free binders

	Сроки схватывания Setting time		В/В Water- binding ratio	Прочность в 28 суточном возрасте, МПа Strength at 28 days of age, MPa		Морозостойкость, циклы Frost resistance, cycles
№ состава composition				изгиб bend	сжатие compression	
	начало, час start, hour	конец, час end, hour				
6.1	2-40	7-00	0,48	5,1	36,2	70
6.2	2-20	6-10	0,47	4,8	35,0	65
6.3	3-30	9-10	0,47	4,4	28,0	60
6.4	2-20	5-20	0,38	5,6	42,0	150
6.5	2-40	6-10	0,41	4,6	31,7	110

Разработано авторами / Developed by the authors

Следующие исследования были проведены для получения данных об изменении прочностных свойств цементных бетонов и сульфатно-шлаковых композиций при эксплуатации в животноводческих комплексах. Образцы-призмы с размером 25×25×100 мм были изготовлены из раствора 1:3 с мелким заполнителем фракции < 2,5 мм. Образцы помещали питьевую воду и в агрессивную среду животноводческих помещений по истечении 28-дневного срока твердения в нормальных условиях.

Стойкость образцов к агрессивному воздействию сред определялась по коэффициенту стойкости $K_{ст}$, как отношение величины среднего предела прочности при изгибе образцов после 105 и 150-суточного

хранения в агрессивном растворе к величине среднего предела прочности при изгибе при хранении в питьевой воде. Результаты исследования представлены в таблице 8. Агрессивная среда животноводческих помещений значительно ухудшает прочностные показатели бетона на основе портландцемента.

Таблица 8 / Table 8

**Изменение прочности на изгиб цементных
и бесцементных образцов под воздействием агрессивной среды**

**Change in cement flexural strength and non-cement
samples under the influence of an aggressive environment**

Состав Compound	Прочность на изгиб, МПа при испытании после хранения в течение времени: Bending strength, MPa when tested after storage for a period of time:					
	105 суток			150 суток		
	в воде in water	в агрессивной среде in an aggressive environment	коэффициент стойкости $K_{ст}$ resistance coefficient K_{st}	в воде in water	в агрессивной среде in an aggressive environment	коэффициент стойкости $K_{ст}$ resistance coefficient K_{st}
6.1	7,2	6,8	0,94	8,4	7,5	0,90
6.2	6,8	6,1	0,90	7,7	6,7	0,87
6.3	6,1	5,1	0,83	7,0	5,6	0,80
6.4	8,8	5,8	0,66	9,7	5,1	0,53
6.5	6,9	5,4	0,78	7,6	5,7	0,75

Разработано авторами / Developed by the authors

Как следует из данных таблицы 8, наименьшую стойкость в агрессивной среде животноводческих комплексов имеет бетон на основе портландцемента, поскольку прочность на изгиб уменьшается почти вдвое после 150 суток выдерживания. Составы вяжущего на шлакопортландцементе и техногенном сырье, содержащем в качестве щелочного активатора ТОС, имеют несколько лучшие показатели коэффициента стойкости в агрессивной среде. Наибольшую стойкость $K_{ст} = 0,90$ имеет опытное вяжущее состава 6.1, содержащее в качестве щелочного активатора 10 % цементной пыли. Следует отметить, что процесс деструкции и снижения прочностных характеристик образцов на портландцементе носит прогрессирующий характер до полного их разрушения. И наоборот, прочностные характеристики стабилизируются со временем в образцах на техногенном сырье, что свидетельствует о затухающем характере коррозионного процесса. Это наглядный пример, в котором исключение портландцементного клинкера позволяет улучшить технические свойства бетона и повысить его срок службы в конкретных условиях эксплуатации.

Таким образом, для оценки углеродного следа бетона на основе побочных продуктов промышленности необходимо выполнять сравнительный расчет в рамках конкретного строительного объекта с учетом условий эксплуатации.

Заключение

Conclusion

Оценка сравнительного экологического воздействия бетонов может быть предусмотрена в нормативной документации. В перспективе следует проводить оценку строительных проектов не только на основе экономических показателей, но и по углеродному следу. При такой обязательной экологической оценке проекты, в которых применяются бетоны на основе побочных продуктов промышленности, могут получить преимущество для многих эксплуатационных условий.

Следует выделить три общих подхода к снижению воздействия цемента и бетона на окружающую среду за счет снижения углеродного следа: (1) на этапе производства самого цемента — за счет замещения клинкера минеральными компонентами, использования альтернативных видов топлива и др.; (2) на этапе производства бетонной смеси — за счет снижения потребления портландцемента, оптимизации транспортирования компонентов для приготовления смеси и др.; (3) на этапе производства железобетонных конструкций за счет уменьшения размеров конструкции при увеличении прочностных характеристик бетона, замены стальной фибры на синтетическую и др.

Свойства бетона, определяющие его долговечность в агрессивной среде животноводческих ферм и в транспортном строительстве были исследованы.

Наименьшую стойкость в агрессивной среде животноводческих комплексов имеет бетон на основе портландцемента, прочность на изгиб которого уменьшается почти вдвое после 150 суток выдерживания. Несколько лучшие показатели коэффициента стойкости в агрессивной среде имеют составы вяжущего на шлакопортландцементе и техногенном сырье, содержащем в качестве щелочного активатора цементную пыль. Наибольшую коррозионную стойкость имеет вяжущее, содержащее в качестве щелочного активатора 10 % цементной пыли. При этом если процесс деструкции и снижения прочностных характеристик образцов вяжущего на портландцементе носит прогрессирующий характер до полного их разрушения, то в образцах вяжущего на модифицированном техногенном сырье прочностные характеристики стабилизируются со временем, что свидетельствует о затухающем характере коррозионного процесса.

Шлакощелочной бетон удовлетворяет требованиям для бетонов подрельсовых конструкций, т. к. прочность на сжатие и морозостойкость составили 70 МПа и F600 для гранулированного доменного шлака с модулем основности 0.8; 78 МПа и F700 для гранулированного доменного

шлака с модулем основности 0.9. Эти бетоны имели сопоставимые характеристики с бетоном на портландцементе СЕМ 52.5 для которого значения составили 60 МПа и F600.

Это доказывает, что выбор функциональной единицы для количественной оценки углеродного следа продукции по ISO14067 с целью сравнения углеродного следа портландцемента и гибридного цемента необходимо выполнять с учетом всех требуемых свойств бетона для заданных условий эксплуатации. Методологический подход к выбору функциональной единицы для сравнительной оценки углеродного следа цемента представлен на этапах производства цемента, производства бетона и производства бетонной или железобетонной конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rakhimova, N.R.** Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.01.025> // Journal of Non-Crystalline Solids. — 2019. — Т 509. — С. 31–41. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022309319300407> (дата обращения: 24.03.2022).
2. **Scrivener, K.L.** Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry / K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015> // Cement and Concrete Research. — 2018. — Т 114. — С. 2–26. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480> (дата обращения: 24.03.2022).
3. **Bazhenov, Y.** The use of finely ground slag in portland cement with mineral additives / Y. Bazhenov, I. Kozlova, K. Nechaev, A. Kryuchkova. — DOI <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102044> // Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018), Moscow, Russia, December 3–5, 2018 / Под ред. А. Zheltenkov М.: E3S Web of Conferences, 2019. — С. 2044. — URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/17/e3sconf_tpacee2019_02044/e3sconf_tpacee2019_02044.html (дата обращения: 24.03.2022).
4. **Федюк, Р.С.** Свойства композиционных вяжущих на основе техногенных отходов Дальнего Востока / Р.С. Федюк // Вестник гражданских инженеров. — 2016. — № 2. — С. 132–136. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26366412> (дата обращения: 24.03.2022).
5. **Федюк, Р.С.** Повышение ударной вязкости фиброзобетона / Р.С. Федюк, Ю.Л. Лисейцев, А.В. Таскин [и др.] // Строительные материалы и изделия. — 2020. — Т 3. — № 6. — С. 5–16. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44697807> (дата обращения: 24.03.2022).
6. **Федюк, Р.С.** Вопросы управления структурообразованием композиционного вяжущего / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. — 2018. — № 2. — С. 2–10. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42316456> (дата обращения: 24.03.2022).
7. **Крамар, Л.Я.** Быстротвердеющий, высокопрочный и морозостойкий бетон на основе шлакопортландцемента / Л.Я. Крамар, И.М. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2021. — Т 21. — № 1. — С. 48–53. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44754473> (дата обращения: 24.03.2022).
8. **Мясникова, А.А.** Высокофункциональные бетоны модифицированные доменным гранулированным шлаком / А.А. Мясникова, И.М. Иванов, Л.Я. Крамар // Архитектура, градостроительство и дизайн. — 2021. — № 3. — С. 8–15. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46705672> (дата обращения: 24.03.2022).

9. **Зайцева, Л.Р.** Влияние вида заполнителя из отходов производств на коррозионную стойкость бетона / Л.Р. Зайцева, Е.В. Луцык, Т.В. Латыпова, В.М. Латыпов, П.А. Федоров, В.П. Попов. — DOI <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29> // Строительные материалы. — 2021. — № 11. — С. 23–29. — URL: <https://journal-cm.ru/index.php/ru/zhurnaly/2021/vse-stat-i-za-2021/vliyanie-vida-zapolnitelya-iz-otkhodov-proizvodstv-na-korroziionnuyu-stojkost-betona> (дата обращения: 24.03.2022).
10. **Харченко, А.И.** Применение шлакощелочных вяжущих в технологии струйной цементации для усиления грунтов / В.А. Алексеев, И.Я. Харченко, А.А. Алексеев. — DOI <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.6.680-689> // Вестник МГСУ. — 2019. — Т 14. — № 6. — С. 680–689. — URL: <http://vestnikmgusu.ru/ru/component/sjarchive/issue/article.display/2019/6/680-689> (дата обращения: 24.03.2022).
11. **Хохряков, О.В.** Цементы низкой водопотребности — путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах / О.В. Хохряков, В.Г. Хозин, И.Я. Харченко, Д.В. Газданов. — DOI <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152> // Вестник МГСУ. — 2017. — Т 12. — № 10. — С. 1145–1152. — URL: <http://vestnikmgusu.ru/ru/component/sjarchive/issue/article.display/2017/10/1145-1152> (дата обращения: 24.03.2022).
12. **Рахимова, Н.Р.** Влияние содержания добавок термоактивированной глины на свойства и состав продуктов твердения композиционного шлакощелочного вяжущего с низким содержанием щелочного активатора / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов. — DOI https://doi.org/10.52409/20731523_2021_2_50 // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2021. — № 2. — С. 50–59. — URL: https://izvestija.kgasu.ru/files/2_2021/50_59_Rakhimovy.pdf (дата обращения: 24.03.2022).
13. **Ивашенко, Ю.Г.** Структурообразование строительных композиционных материалов на основе местного сырья модифицированных добавками полифункционального назначения / Ю.Г. Ивашенко, Р.Т. Мамешов, Р.Н. Эминов, Ш.М. Магомедов // Техническое регулирование в транспортном строительстве. — 2019. — № 6. — С. 306–311. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38196148> (дата обращения: 02.04.2022).
14. **Шошин, Е.А.** Формирование нанофазы в смеси опока — известь в присутствии сахарозы / Е.А. Шошин, Ю.Г. Ивашенко // Региональная архитектура и строительство. — 2016. — № 1. — С. 24–28. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25814720> (дата обращения: 02.04.2022).
15. **Королёв, Е.** Перспективы развития строительного материаловедения / Е. Королёв. — DOI <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-3-143-159> // Academia. Архитектура и строительство. — 2020. — № 3. — С. 143–159. — URL: <https://aac.raasn.ru/article/view/249> (дата обращения: 02.04.2022).
16. **Лесовик, В.С.** Повышение эксплуатационных характеристик защитных композитов / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк, А.М. Гридчин, Г. Муралли. — DOI <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40> // Строительные материалы. — 2021. — № 9. — С. 32–40. — URL: <https://journal-cm.ru/index.php/ru/zhurnaly/2021/vse-stat-i-za-2021/povyshenie-ekspluatatsionnykh-kharakteristik-zashchitnykh-kompozitov> (дата обращения: 02.04.2022).
17. **Лесовик, В.С.** Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк. — DOI <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356> // Вестник МГСУ. — 2021. — Т 16. — № 10. — С. 1346–1356. — URL: <http://vestnikmgusu.ru/ru/component/sjarchive/issue/article.display/2021/10/1346-1356> (дата обращения: 02.04.2022).
18. **Рахимова, Н.Р.** Активированные щелочами цементы с добавкой мергеля / Н.Р. Рахимова, Р.З. Рахимов, А.Р. Бикмухаметов, Л.И. Потапова // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2019. — № 4. — С. 5–19. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38591056> (дата обращения: 02.04.2022).
19. **Ахметов, Д.А.** Влияние мелкодисперсных наполнителей из техногенных отходов и низко модульного фиброволокна на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонов / Д.А. Ахметов, Ю.В. Пухаренко, Е.Н. Роот, С.Б. Ахажанов. — DOI <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-5-102-108> // Вестник гражданских инженеров. — 2021. — № 5. — С. 102–108. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47285396> (дата обращения: 02.04.2022).

20. **Низина, Т.А.** Влияние комплексных модификаторов на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок различного состава на технологические и физико-механические свойства цементных систем / Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин, С.В. Володин, В.В. Володин. — DOI https://doi.org/10.54734/20722958_2022_1_28 // Региональная архитектура и строительство. — 2022. — № 1. — С. 28–36. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48166159> (дата обращения: 02.04.2022).
21. **Kazanskaya, L.F.** Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete / L.F. Kazanskaya, O.M. Smirnova, Á. Palomo, I.M. Pidal, M. Romana. — DOI <https://doi.org/10.3390/ma14020403> // Materials. — 2021. — Т 14. — № 2. — С. 403. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/2/403> (дата обращения: 02.04.2022).
22. **Петрова, Т.М.** Взаимосвязь структуры и долговечности шлакощелочных бетонов на основе доменных и сталеплавильных шлаков / Т.М. Петрова // Вестник гражданских инженеров. — 2012. — № 4. — С. 167–173. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18793375> (дата обращения: 02.04.2022).
23. **Амелин, С.В.** Переводные брусья из преднапряженного шлакощелочного бетона / С.В. Амелин, П.Г. Комохов, Т.М. Петрова, В.М. Ермаков // Путь и путевое хозяйство. — 1991. — № 5. — С. 2–14. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22751286> (дата обращения: 02.04.2022).
24. **Казанская, Л.Ф.** Вяжущие щелочной активации: стремление к альтернативе портландцементу / Л.Ф. Казанская, О.М. Смирнова // Цемент и его применение. — 2015. — № 2. — С. 137–140. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23877465> (дата обращения: 12.04.2022).
25. **Stel'makh, S.A.** Development of High-Tech Self-Compacting Concrete Mixtures Based on Nano-Modifiers of Various Types / S.A. Stel'makh, E.M. Shcherban', A. Beskopylny, L.R. Mailyan, B. Meskhi, N. Beskopylny, Yu. Zhrebtsov. — DOI <https://doi.org/10.3390/ma15082739> // Materials. — 2022. — Т 15. — № 8. — С. 2739. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/8/2739/html> (дата обращения: 12.04.2022).
26. **Smirnova, O.M.** Low-Clinker Cements with Low Water Demand / O.M. Smirnova. — DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003241) // Journal of Materials in Civil Engineering. — 2020. — Т 32. — № 7. — С. 6020008. — URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1.1943-5533.0003241> (дата обращения: 12.04.2022).
27. **Shcherban', E.M.** Nanomodification of Lightweight Fiber Reinforced Concrete with Micro Silica and Its Influence on the Constructive Quality Coefficient / E.M. Shcherban', S.A. Stel'makh, A. Beskopylny, L.R. Mailyan, B. Meskhi, V. Varavka. — DOI <https://doi.org/10.3390/ma14237347> // Materials. — 2021. — Т 14. — № 23. — С. 7347. — URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/23/7347> (дата обращения: 12.04.2022).
28. **Попов, В.М.** Оценка влияния значения предельных деформаций бетона при сжатии на обеспеченность результатов расчета прочности внецентренно сжатого железобетонного элемента по нормальному сечению с использованием нелинейной деформационной модели / В.М. Попов, Ю.В. Пухаренко, М.Г. Плюснин, В.В. Белов. — DOI <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-6-42-50> // Вестник гражданских инженеров. — 2021. — № 6. — С. 42–50. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47873482> (дата обращения: 12.04.2022).
29. **Klyuev, S.V.** Fiber concrete for the construction industry / S.V. Klyuev, A.V. Klyuev, N.I. Vatin. — DOI <https://doi.org/10.18720/MCE.84.4> // Magazine of Civil Engineering. — 2018. — № 8. — С. 41–47. — URL: <https://engstroy.spbstu.ru/en/article/2018.84.4/> (дата обращения: 12.04.2022).
30. **Amran, M.** Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review / M. Amran, R. Fediuk, H.S. Abdelgader, G. Murali, T. Ozbakkaloglu, Y.H. Lee., Y.Y. Lee. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103638> // Journal of Building Engineering. — 2022. — Т 45. — С. 103638. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710221014960> (дата обращения: 12.04.2022).
31. **Федюк, Р.С.** Самоуплотняющиеся бетоны с применением отходов растениеводства / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов, Д.Н. Пезин, Р.А. Тимохин. — DOI <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-294-304> // Научный рецензируемый журнал "Вестник СибАДИ". — 2018. — Т 15. — № 2. — С. 294–304. — URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/645> (дата обращения: 12.04.2022).

32. **Иноземцев, А.С.** Реологические особенности цементно-минеральных систем, пластифицированных поликарбонатным пластификатором / А.С. Иноземцев, Е.В. Королёв, Т.К. Зыонг // Региональная архитектура и строительство. — 2019. — № 3. — С. 24–34. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41330285> (дата обращения: 12.04.2022).
33. **Ибрагимов, Р.А.** Прочность композитов на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя / Р.А. Ибрагимов, Е.В. Королёв. — DOI <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.01.35-41> // Промышленное и гражданское строительство. — 2021. — № 1. — С. 35–41. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44620718> (дата обращения: 12.04.2022).
34. **Селяев, В.П.** Дисперсионный анализ влияния содержания минерального наполнителя МКУ-85 и суперпластификатора ХИДЕТАЛ-ГП-9? На однородность и прочность цементной композиции / В.П. Селяев, А.В. Неякин, Т.Н. Маврушкина, Е.Л. Кечуткина // Региональная архитектура и строительство. — 2020. — № 4. — С. 12–21. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44387666> (дата обращения: 12.04.2022).
35. **Teh, S.H.** Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia / S.H. Teh, T. Wiedmann, A. Castel, J. Burgh. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.122> // Journal of Cleaner Production. — 2017. — Т 152. — С. 312–320. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617305668> (дата обращения: 12.04.2022).
36. **Habert, G.** Ouellet-Plamondon, C. Recent Update on the Environmental Impact of Geopolymers / G. Habert. — DOI <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.6> // RILEM Tech Lett. — 2016. — № 1. — С. 17–23. — URL: <https://letters.rilem.net/index.php/rilem/article/view/6> (дата обращения: 12.04.2022).
37. **Gursel, A.P.** Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review / A.P. Gursel, E. Masanet, A. Horvath, A. Stadel. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005> // Cement and Concrete Composites. — 2014. — Т 51. — С. 38–48. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946514000511> (дата обращения: 12.04.2022).
38. **Li, C.** The LCA of portland cement production in China / C. Li, S. Cui, Z. Nie, X. Gong, Z. Wang, N. Itsubo. — DOI <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0804-4> // The International Journal of Life Cycle Assessment. — 2015. — Т 20. — № 1. — С. 117–127. — URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-014-0804-4?error=cookies_not_supported&code=43c9fc11-46c8-465d-8099-be0f9ec9c5b7 (дата обращения: 12.04.2022).
39. **Damineli, B.L.** Measuring the eco-efficiency of cement use / B.L. Damineli, F.M. Kemeid, P.S. Aguiar, V.M. John. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009> // Cement and Concrete Composites. — 2010. — Т 32. — № 8. — С. 555–562. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946510000958> (дата обращения: 12.04.2022).
40. **Purnell, P.** Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters / P. Purnell, L. Black. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.005> // Cement and Concrete Research. — 2012. — Т 42. — № 6. — С. 874–877. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884612000221> (дата обращения: 12.04.2022).

Сведения об авторах:

Смирнова Ольга Михайловна — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство горных предприятий и подземных сооружений», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: smirnovaolgam@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7220-1851>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=724151
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56789573200>
Личная страница: http://personalii.spmi.ru/ru/glossary/s/smirnova_olga_mihaylovna

Казанская Лилия Фаатовна — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии», ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», Санкт-Петербург, Россия, e-mail: yalifa@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8734-1064>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=685153
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205125533>

Статья получена: 01.06.2022. Принята к публикации: 02.08.2022. Опубликовано онлайн: 16.08.2022.

REFERENCES

1. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019; 509: 31–41. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.01.025>.
2. Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*. 2018; 114: 2–26. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
3. Bazhenov Y., Kozlova I., Nechaev K., Kryuchkova A. The use of finely ground slag in portland cement with mineral additives. In: A. Zheltenkov (Ed.). *Topical Problems of Architecture, Civil Engineering and Environmental Economics (TPACEE 2018), Moscow, Russia, December 3–5, 2018*. Moscow: E3S Web of Conferences; 2019. p.2044. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/17/e3sconf_tpacee2019_02044/e3sconf_tpacee2019_02044.html (accessed 24th March 2022). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199102044>.
4. Fedyuk R.S. The Properties of Composite Binders Based on Applying Technogenic Industrial Waste in The Far East. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*. 2016; (2): 132–136. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26366412> (accessed 24th March 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
5. Fedyuk R.S., Liseyev Yu.L., Taskin A.V., Timokhin R.A., Klyuev S.V., Casagrande C. Increasing in impact viscosity of fiber-ash-concrete. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(6): 5–16. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44697807> (accessed 24th March 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
6. Fedyuk R.S., Mochalov A.V. Issues Related to Management of The Structure Formation of a Composite Binder. *ALITinform: Cement, Concrete, Dry Mixtures*. 2018;(2): 2–10. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42316456> (accessed 24th March 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
7. Kramar L.Ya., Ivanov I.M. Fast-Hardening, High Strength and Frost Resistant Concrete Based on Slag Portland Cement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2021; 21(1): 48–53. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44754473> (accessed 24th March 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
8. Myasnikova A.A., Ivanov I.M., Kramar L.Ya. High Performance Concrete Modified Blast Furnace Slag. *Architecture, Urbanism and Design*. 2021; (3): 8–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46705672> (accessed 24th March 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Zaitseva L.R., Lutsyk E.V., Latypova T.V., Latypov V.M., Fedorov P.A., Popov V.P. Influence of the Type of Filler from Production Waste on the Corrosion Resistance of Concrete. *Construction Materials*. 2021; (11): 23–29. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>.

10. Kharchenko A.I., Alekseev V.A., Kharchenko I.Ya., Alekseev A.A. Application of slag-alkali binders in jet cement grouting for soil consolidation. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2019; 14(6): 680–689. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.6.680-689>.
11. Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Kharchenko I.Ya., Gazdanov D.V. Low Water Demand Cements — Way of Efficient Use of Clinker and Mineral Fillers in Concretes. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017; 12(10): 1145–1152. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.10.1145-1152>.
12. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Influence of calcined clays additions on the composition of reaction products and properties of compositional alkali-activated slag cements with low content of alkali reactant. *Izvestiya KGASU*. 2021; (2): 50–59. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.52409/20731523_2021_2_50.
13. Ivaschenko Yu.G., Mameshov R.T., Eminov R.N., Magomedov Sh.M. Structuration of Building Composite Materials Based on Local Raw Materials by Modifying Polyfunctional Assignment Additives. *Technical regulation in transport construction*. 2019; (6): 306–311. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38196148> (accessed 2nd April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
14. Shoshin E.A., Ivashchenko Y.G. Formation of Nano-Phase in Flask — Lime Mixture in Presence of Sucrose. *Regional Architecture and Engineering*. 2016; (1): 24–28. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25814720> (accessed 2nd April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
15. Korolev E. Prospects for the Development of Construction Materials Science. *Scientific Journal "ACADEMIA. ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION"*. 2020; (3): 143–159. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2020-3-143-159>.
16. Lesovik V.S., Fediuk R.S., Gridchin A.M., Murali G. Improving the operational characteristics of protective composites. *Construction Materials*. 2021; (9): 32–40. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-32-40>.
17. Lesovik V.S., Fediuk R.S. Increasing the performances of low permeable cement composites. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2021; 16(10): 1346–1356. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <http://doi.org/10.22227/1997-0935.2021.10.1346-1356>.
18. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z., Bikmukhametov A.R., Potapova L.I. Alkali-Activated Cements Incorporated with Marl. News of higher educational institutions. *Construction*. 2019; (4): 5–19. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38591056> (accessed 2nd April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
19. Akhmetov D.A., Pukharensky Yu.V., Root Ye.N., Akhazhanov S.B. The Effect of Fine Aggregates Produced from Anthropogenic Waste and Low-Modulus Fiber on The Workability of Self-Compacting Concrete (Scc). *Vestnik Grahdanskikh Inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*. 2021; (5): 102–108. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-5-102-108>.
20. Nizina T.A., Balykov A.S., Korovkin D.I., Volodin S.V., Volodin V.V. The Effect of Complex Modifiers on The Basis of Polycarboxylate Superplasticizer and Mineral Additives of Different Compositions on Technological and Physical-Mechanical Properties of Cement Systems. *Regional Architecture and Engineering*. 2022; (1): 28–36. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: https://doi.org/10.54734/20722958_2022_1_28.
21. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M., Palomo Á., Pidal I.M., Romana M. Supersulfated Cement Applied to Produce Lightweight Concrete. *Materials*. 2021; 14(2): 403. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14020403>.
22. Petrova T.M. Interrelation of Structure and Durability of Slag Alkaline Concrete on The Basis of Blast-Furnace and Steel-Smelting Slags. *Vestnik grahdanskikh inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*. 2012; (4): 167–173. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18793375> (accessed 2nd April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
23. Amelin S.V., Komokhov P.G., Petrova T.M., Ermakov V.M. [Transfer bars made of prestressed slag-alkali concrete]. *Railway Track and Facilities*. 1991; (5): 2–14. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22751286> (accessed 2nd April 2022). (In Russ.).

24. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Alkali-Activated Binders: An Alternative to Portland Cement. *The Journal Cement and its Applications*. 2015; (2): 137–140. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23877465> (accessed 12th April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
25. Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Beskopylny N., Zhrebtsov Yu. Development of High-Tech Self-Compacting Concrete Mixtures Based on Nano-Modifiers of Various Types. *Materials*. 2022; 15(8): 2739. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15082739>.
26. Smirnova O.M. Low-Clinker Cements with Low Water Demand. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020; 32(7): 6020008. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003241](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003241).
27. Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Beskopylny A., Mailyan L.R., Meskhi B., Varavka V. Nanomodification of Lightweight Fiber Reinforced Concrete with Micro Silica and Its Influence on the Constructive Quality Coefficient. *Materials*. 2021; 14(23): 7347. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14237347>.
28. Popov V.M., Pukharensko Yu.V., Plyusnin M.G., Belov V.V. Evaluation of the Influence of The Maximum Deformation Value of Concrete Under Compression on The Security of The Results of Calculating the Strength of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Element with A Normal Cross-Section Using a Nonlinear Deformation Model. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov — Bulletin of Civil Engineers*. 2021; (6): 42–50. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2021-18-6-42-50>.
29. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Vatin N.I. Fiber concrete for the construction industry. *Magazine of Civil Engineering*. 2018; (8): 41–47. (In Eng., abstract in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18720/MCE.84.4>.
30. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. *Journal of Building Engineering*. 2022; 45: 103638. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103638>.
31. Fediuk R.S., Mochalov A.V., Pezin D.N., Timokhin R.A. Self-Compacting Concrete with The Use of Plant Waste. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2018; 15(2): 294–304. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2018-2-294-304>.
32. Inozemtcev A.S., Korolev E.V., Duong T.Q. Rheological Features of Cement-Mineral Systems with a Polycarboxylate Plasticizer. *Regional Architecture and Engineering*. 2019; (3): 24–34. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41330285> (accessed 12th April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
33. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Strength of Composites on Portland Cement Modified with Carbon Nano-Tubes and Processed in A Vortex Layer Apparatus. *Industrial And Civil Engineering*. 2021; (1): 35–41. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2021.01.35-41>.
34. Selyaev V.P., Neyaskin A.V., Mavrushkina T.N., Kechytchina E.L. Dispersion analysis of the influence of the content of mineral filler Mku-85 and superplasticizer hidetal-GP-9? On the uniformity and strength of the cement composition. *Regional Architecture and Engineering*. 2020; (4): 12–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44387666> (accessed 12th April 2022). (In Russ., abstract in Eng.).
35. Teh S.H., Wiedmann T., Castel A., Burgh J. Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymer concrete in Australia. *Journal of Cleaner Production*. 2017;152: 312–320. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.122>.
36. Habert G. Ouellet-Plamondon, C. Recent Update on the Environmental Impact of Geopolymers. *RILEM Tech Lett*. 2016; (1): 17–23. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.6>.
37. Gursel A.P., Masanet E., Horvath A., Stadel A. Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*. 2014; 51: 38–48. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>.
38. Li C., Cui S., Nie Z., Gong X., Wang Z., Itsubo N. The LCA of portland cement production in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2015; 20(1): 117–127. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0804-4>.
39. Damineli B.L., Kemeid F.M., Aguiar P.S., John V.M. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*. 2010; 32(8): 555–562. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>.

40. Purnell P., Black L. Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters. *Cement and Concrete Research*. 2012; 42(6): 874–877. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.005>.
-

Information about the authors:

Olga M. Smirnova — Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,

e-mail: smirnovaolga@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7220-1851>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=724151

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56789573200>

Personal page: http://personalii.spmi.ru/ru/glossary/s/smirnova_olga_mihaylovna

Liliya F. Kazanskaya — Emperor Alexander I Saint Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: yalifa@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8734-1064>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=685153

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57205125533>

Submitted: 1st June 2022. Revised: 2nd August 2022. Published online: 16th August 2022.