

Научная статья

УДК 691

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-2/143-156>

Проектирование состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла

Елена Николаевна Пипко^{1,✉}, Роман Сергеевич Федюк^{1,2}, Егор Евгеньевич Помников¹,
Любовь Петровна Нагрузова³, Ольга Алексеевна Тюрикова¹,
Рустам Габтилфаритович Рамазанов⁴, Чжан Сюань⁴

¹ Дальневосточный федеральный университет,
Владивосток, Российская Федерация

² Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский
и технологический институт по строительству,
Владивосток, Российская Федерация

³ Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова,
Абакан, Российская Федерация

⁴ Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
Белгород, Российская Федерация

✉ pipko.en@dvfu.ru

Аннотация. Жизненный цикл объекта капитального строительства рассматривается как интегрированная замкнутая система, позволяющая решить такие проблемы строительной отрасли, как перерасходы времени и средств, ограничения производительности и нехватка рабочей силы. Особую сложность вызывает комплексное проектирование состава материала для специальных сооружений с учётом его жизненного цикла. Для проведения экспериментальных исследований по подбору оптимального состава бетона были использованы следующие сырьевые материалы: цемент сульфатостойкий марки ЦЕМ I 42,5 CC, щебень фракций 5–10 мм и 10–20 мм, песок, вода, суперпластификаторы Sika Plast-2500 LFC и Sika ViscoCrete 5-600-SK, воздухововлекающая добавка SikaControl-95 Aer, нанокремнезём. Рассчитаны бетоны для разных типов гидротехнических сооружений (платформы гравитационного типа и сухого дока), используя разные комбинации подбора по каждому из классов бетона (применение бетона одного, двух, трёх и более классов). Несмотря на экономическую выгоду в данном применении трёх классов бетона, выбор бетона классов В40 и В45 является более выгодным, оптимально-технологическим вариантом, так как уровень качества сооружения при данном подборе выше. При этом повышение эффективности бетонов возникает при замыкании их жизненного цикла – повторном использовании бетонного лома.

Возможными способами улучшения свойств бетона с применением вторичных заполнителей является применение термовлажностного отверждения, использование пуццолановых материалов и т.д. Для снижения негативного влияния на прочность композита необходимо определять химические примеси в применяемых материалах на основе бетонного лома.

Ключевые слова: состав бетона, гидротехнический бетон, жизненный цикл

Для цитирования: Пипко Е.Н., Федюк Р.С., Помников Е.Е., Нагрузова Л.П., Тюрикова О.А., Рамазанов Р.Г., Чжан Сюань. Проектирование состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 2(63). С. 143–156.

Original article

Design of the composition of hydraulic concrete taking into account its life cycle

Elena N. Pipko^{1,✉}, Roman S. Fedyuk^{1,2}, Egor E. Pomnikov¹, Lyubov P. Nagruzova³,
Olga A. Tyurikova¹, Rustam G. Ramazanov⁴, Zhang Xuan⁴

¹ Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction, Vladivostok, Russian Federation

³ Khakass State University named after N.F. Katanov, Abakan, Russian Federation

⁴ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

✉ pipko.en@dvfu.ru

Abstract. The life cycle of a capital construction project is considered as an integrated closed system that helps solve such construction industry problems as time and cost overruns, productivity limitations, and labor shortages. Of particular complexity is the integrated design of the material composition for special structures taking into account its life cycle. The following raw materials were used to conduct experimental studies to select the optimal concrete composition: sulfate-resistant cement grade CEM I 42.5 CC, crushed stone of fractions 5–10 mm and 10–20 mm, sand, water, superplasticizers Sika Plast-2500 LFC and Sika ViscoCrete 5-600-SK, air-entraining additive SikaControl-95 Aer, nanosilica. Concretes for different types of hydraulic structures (gravity-type platforms and dry docks) are calculated using different combinations of selection for each of the concrete classes (use of concrete of one, two, three or more classes). Despite the economic benefit in this application of three concrete classes, the choice of concrete classes C40 and C45 is a more advantageous optimal-technological option, since the quality level of the structure with this selection is higher. At the same time, the efficiency of concrete increases when closing their life cycle such reusing concrete scrap.

Possible ways to improve the properties of concrete using secondary fillers are the use of thermal and moisture curing, the use of pozzolanic materials, etc. To reduce the negative impact on the strength of the composite, it is necessary to determine the chemical impurities in the materials used based on concrete scrap.

Keywords: concrete composition, hydraulic concrete, life cycle

For citation: Pipko E.N., Fedyuk R.S., Pomnikov E.E., Nagruzova L.P., Tyurikova O.A., Ramazanov R.G., Zhang Xuan. Design of the composition of hydraulic concrete taking into account its life cycle. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 2(63), pp. 143–156. (In Russ.).

Введение

Строительная отрасль сталкивается со многими проблемами, включая перерасходы времени и средств, ограничения производительности и нехватку рабочей силы [1–2]. По сравнению с другими секторами она отстаёт в цифровизации на каждом этапе проекта [3–4]. Искусственный интеллект и машинное обучение появились как преобразующие технологии, революционизирующие строительный сектор [5–6]. Жизненный цикл объекта капитального строительства рассматривается как интегрированная замкнутая система (рис. 1) [7–8]. При этом рассматриваются все сферы жизнедеятельности населения, в том числе экологическая устойчивость, связанная с взаимовлиянием человека и окружающей среды [9–10].

Особую сложность вызывает комплексное проектирование состава материала для специальных сооружений с учётом его жизненного цикла. Бетон гидротехнических сооружений (ГТС) сталкивается с рядом специфических проблем, связанных с воздействием морской среды, таких как:

1. Коррозия арматуры, образование трещин в бетоне:

– солевые растворы: морская вода содержит высокую концентрацию хлора, который вызывает коррозию стальной арматуры, используемой в бетоне. Это приводит к снижению прочности и долговечности конструкции [11];

– проникновение влаги: влага проникает в бетон, что ведёт к коррозии арматуры и образованию трещин [12].

2. Механические повреждения:

– волновое воздействие: сильные волны и штормы вызывают механические повреждения бетона, такие как эрозия и разрушение [13];

– ударные нагрузки: морские сооружения подвергаются ударным нагрузкам от судов или других объектов, что также приводит к повреждениям [14];

– ледовое воздействие: повторяющиеся циклы замораживания и оттаивания значительно сокращают срок службы бетонных конструкций, которые эксплуатируются в условиях сурового климата [15].

3. Устойчивость к биологическим воздействиям:

– биопоражение: морская среда способствует росту водорослей, мхов и других организмов на поверхности бетона, что ухудшает его характеристики [16];

– образование моллюсков: накопление моллюсков и других организмов увеличивает вес конструкции и вызывает дополнительные нагрузки [17].

4. Воздействие химических веществ:

– сульфатная коррозия: сульфаты, содержащиеся в морской воде, реагируют с компонентами бетона, вызывая его разрушение [18];

– проблемы со щелочными реакциями: взаимодействие щелочных компонентов бетона с определёнными минералами приводит к образованию гелей, которые увеличивают объём и вызывают трещины [19].

5. Долговечность и уход:

– необходимость регулярного обслуживания: морские сооружения требуют более частого мониторинга и ремонта по сравнению с аналогичными конструкциями на суше [20];

– высокие затраты на обслуживание: из-за специфики условий эксплуатации затраты на обслуживание и ремонт могут быть значительно выше [21].

6. Экологические факторы:

– изменение уровня моря: изменение уровня моря из-за климатических изменений влияет на устойчивость морских сооружений [22];

– загрязнение: загрязнённые воды ускоряют коррозионные процессы и ухудшают качество бетона [23].



Рис. 1. Управление жизненным циклом объектов строительства

Fig. 1. Lifecycle management of construction projects

Эти проблемы требуют тщательного проектирования, выбора материалов и технологий для обеспечения долговечности и надёжности морских сооружений [24].

К основным требованиям к гидротехническому бетону, эксплуатируемому в условиях влияния морской среды Дальнего Востока и Арктики, можно отнести:

- прочность класса В45 и выше [25];
- водонепроницаемость W16–W20 [26];
- морозостойкость от F₂₀₀ и выше [27];
- плотность 1800–2500 кг/м³ (тяжёлый бетон) или 500–1800 кг/м³ (лёгкий бетон) [28].

Достичь данных характеристик, используя стандартные цементы, крайне сложно; необходимо применять композиционные вяжущие, в том числе и с использованием кремнезёмсодержащих и алюмосиликатных отходов различных производств [29–30].

Таким образом, на гидротехнические сооружения действует целый комплекс нагрузок и воздействий. Использование специальных добавок в бетон, защитных покрытий и регулярный мониторинг состояния конструкций способствуют минимизации негативных воздействий морской среды на ГТС. Однако вопросы проектирования состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла остаются недостаточно изученными.

Материалы

Для проведения экспериментальных исследований по подбору оптимального состава бетона были использованы следующие сырьевые материалы:

1. Цемент сульфатостойкий марки ЦЕМ I 42,5 СС производства ОАО «Спасскцемент». Соответствует требованиям ГОСТ 31108 и ГОСТ Р 57293-2016. Данный вид цемента характеризуется высокой устойчивостью к агрессивному воздействию сульфатов, что делает его подходящим для эксплуатации в условиях повышенной влажности и агрессивной среды.

2. Щебень фракций 5–10 мм и 10–20 мм, соответствующий ГОСТ 8267-93. Щебень обладает высокой прочностью и морозостойкостью. Сочетание двух видов фракций щебня в соотношении 70/30 обеспечивает необходимую прочность бетона и устойчивость бетонной смеси благодаря высокому коэффициенту сцепления с цементом и плотной упаковке частиц.

3. Песок по ГОСТ 8736-2014 – это природный мелкодисперсный материал, который служит заполнителем и способствует улучшению удобоукладываемости бетонной смеси.

4. Для приготовления бетонной смеси использовалась вода, соответствующая требованиям 23732-2011.

5. Для повышения характеристик бетонной смеси применялись следующие химические добавки:

- суперпластификатор Sika Plast-2500 LFC – высокоэффективная пластифицирующая добавка, предназначенная для повышения подвижности и удобоукладываемости бетонной смеси без снижения прочности конечного продукта;
- суперпластификатор Sika Visco-Creete 5-600-SK – пластифицирующая добавка нового поколения, обеспечивающая высокую текучесть бетонной смеси при сохранении прочностных характеристик. Позволяет существенно снизить водоцементное соотношение;
- воздухововлекающая добавка SikaControl-95 Aer – используется для введения мелких воздушных пор в структуру бетона, повышая его устойчивость к циклам замораживания-оттаивания и увеличивая долговечность конструкции.

Нанокремнезём, полученный из гидротермальных вод Камчатских вулканов, – ультрадисперсный наполнитель, улучшающий микроструктуру бетона, способствующий повышению плотности и уменьшению проницаемости материала. Применение нанокремнезёма позволяет увеличить прочность бетона на сжатие и растяжение.

Выбранный набор исходных материалов обеспечивает возможность достижения высоких эксплуатационных свойств бетона, необходимых для конкретных условий эксплуатации.

Методы

Для расчёта экономической эффективности подбора оптимального состава бетона следует выполнить несколько задач, в которых требуется:

1. Провести зонирование сооружения по классам среды эксплуатации.
2. Установить требования к составу бетона.
3. Определить объём бетонов в каждом классе среды эксплуатации.
4. Рассчитать стоимость бетонов.
5. Рассчитать объём работ.

При расчёте бетонов для разных типов гидротехнических сооружений используют разные комбинации подбора по каждому из классов бетона, при этом рассматривают следующие варианты: применение бетона одного, двух, трёх и более классов.

После завершения подсчётов нескольких вариаций подборов класса бетона для гидротехнических сооружений можно посчитать затрачиваемый объём работ на строительство данных параметров конструкций, следовательно, определить оптимально выгодный вариант для строительства требуемых объектов.

Результаты и дискуссия

В качестве примера для расчётов были взяты средние значения объёмов платформ гравитационного типа и сухого дока. Учитывая все требования и нормы к гидротехническому бетону, а также данные по стоимости компонентов бетона, был проведён расчёт и анализ по двум гидротехническим сооружениям: платформе гравитационного типа и сухому доку.

Ниже приведены таблицы с данными по каждому из типов гидротехнических сооружений:

- 1) для платформы с основанием гравитационного типа в средних значениях (табл. 1);
- 2) для сухого дока в средних значениях (табл. 2).

Таблица 1 / Table 1

Данные платформы гравитационного типа для расчётов
Gravity platform data for calculations

Размеры основания, м	134,0 × 101,4 × 13,4
Высота колонн, м	54,6
Диаметр колонны, средний, м	25,6
Высота всей конструкции, м	144
Вес базы, т	20000
Вес платформы, т	200000
Вес всего, т	220000
Объём стенок основания, м ³	71000
Объём всех колонн, м ³	16870
Объём всех колонн + основание, м ³	81000
Объём всего, м ³	101000

Таблица 2 / Table 2

Данные сухого дока для расчётов
Dry dock data for calculations

Размер камеры сухого дока, м	491 × 114 × 14
Объём наполнения при среднем уровне моря, м ³	582 204
Отметка верха стен, м	+2,5
Размер днища, м	491 × 110
Размер зоны тяжёлых нагрузок, м	474,5 × 30
Отметка днища, м	-11,5
Размер зоны лёгких нагрузок, м	474,5 × 18/16,015
Размер плиты порога, м	114 × 19 × 2,5
Габариты западного устоя ворот, м	19 × 16,8 × 16,5

По имеющимся данным и климатическим условиям для Охотского моря можно подобрать оптимальный состав бетона для гидротехнических сооружений в местных условиях эксплуатации. По минимальной прочности на сжатие подходят бетоны классов В45, В40, В37. Средняя минимальная температура воздуха в году не опускается ниже -30°C , данным условиям соответствует морозостойкость не ниже F₂₃₀₀. Средняя солёность морской воды – 32,5 промилле, удовлетворяет условию водонепроницаемости бетона не ниже W8. Минимальный расход цемента – 340 кг/м³, исходя из определения технологического расчёта тепловыделения бетонной смеси. Содержание воздуха определено от 5% до 8%, для заполнителей – от 14 до 20 мм. Водоцементное отношение – 0,4.

По вышеуказанным данным, исходя из общих объёмов конструкции и максимально заданной высоты волны в 15 м для морской акватории Охотского моря, получены данные для каждого типа гидротехнического сооружения в процентном соотношении объёмов, для определённых зон воздействия на сооружение (табл. 3 и 4).

Таблица 3 / Table 3

Типы зон воздействия для гравитационной платформы
Impact zone types for the gravity platform

Тип зоны воздействия	Процентное соотношение	Объём зоны конструкции
XS3	12%	12150 м ³
XS2	52%	52850 м ³
XA2	16%	16000 м ³
XF4	8%	8000 м ³
XS1	12%	12000 м ³

Таблица 4 / Table 4

Типы зон воздействия для сухого дока
Impact zone types for the dry dock

Тип зоны воздействия	Процентное соотношение	Объём зоны конструкции
XS3	18%	36600 м ³
XS2	28%	55000 м ³
XA2	46%	91800 м ³
XS1	8%	16600 м ³

Для платформы гравитационного типа был проведён расчёт с использованием исходных данных, в которых выявлены минимальные допустимые требования к гидротехническому бетону по каждой зоне воздействия на сооружение. Соответственно, можно выявить из данных параметров объём каждой из этих зон для пересчёта общей стоимости бетона на данную конструкцию. Ниже рассмотрены три варианта использования классов гидротехнического бетона (табл. 5).

Таблица 5 / Table 5

Расчёт стоимости классов бетона для гравитационной платформы
Calculation of concrete grades for the gravity platform

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				В45	В45 + В40	В45+В40+В37
XS3	В45	12%	12150 м ³	75,087	75,087	75,087
XS2	В45	52%	52850 м ³	326,613	326,613	326,613
XA2	В40	16%	16000 м ³	98,88	96,192	96,192
XF4	В40	8%	8000 м ³	49,44	48,096	48,096
XS1	В37	12%	12000 м ³	74,16	72,144	69,984
Замесы				5	10	15
Всего				629,2	628,1	631,0

Путём анализа выявлено, что стоимость подбора состава на каждый дополнительный класс бетона для сооружения составляет около 5 млн руб. На каждый последующий вариант расчёта подбирались дополнительные классы бетона по минимальным требованиям на каждую зону воздействия путём умножения объёма каждой зоны на среднюю стоимость бетона. Полученные стоимости по каждой зоне суммировались вместе, также учитывается увеличение стоимости лабораторных разработок в зависимости от количества используемых классов бетона. Наиболее выгодный вариант выявился с применением бетонов класса В45 и В40.

Аналогичный анализ стоимости был произведён для сухого дока (табл. 6). Несмотря на разные пропорции соотношения объёмов разных классов бетона и типов сооружения, результат оказался наиболее выгодным при применении бетона классов В45 и В40.

Таблица 6 / Table 6

Расчёт стоимости классов бетона для сухого дока
Calculation of concrete grades for the dry dock

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				В45	В45 + В40	В45+В40+В37
XS3	В45	18,3%	36600 м ³	226,188	226,188	226,188
XS2	В45	27,5%	55000 м ³	339,9	339,9	339,9
XA2	В40	45,9%	91800 м ³	567,324	551,9	551,9
XF4	В40	8,3%	16600 м ³	102,588	99,799	96,811
Замесы				5	10	15
Всего				1241,0	1227,8	1229,8

Далее рассмотрены варианты расчётов с учётом затрат на выполнение строительных работ по данным объектам. В среднем на стоимость строительных материалов, в данном случае бетона, ориентировочная стоимость работ оценивается в соотношении 1:3, что отображено для платформы гравитационного типа в табл. 7.

Таблица 7 / Table 7

Расчёт стоимости классов бетона, с учётом строительных работ, для гравитационной платформы
Costs of concrete grades including civil works for gravity platform

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				В45	В45 + В40	В45+В40+В37
XS3	В45	12%	12150 м ³	225,261	225,261	225,261
XS2	В45	52%	52850 м ³	979,839	979,839	979,839
XA2	В40	16%	16000 м ³	296,64	288,576	288,576
XF4	В40	8%	8000 м ³	148,32	144,288	144,288
XS1	В37	12%	12000 м ³	222,48	216,432	209,952
Замесы				5	10	15
Всего				1877,5	1864,4	1862,9

Аналогичный расчёт проведён для сухого дока (табл. 8).

Из анализа стоимостей, проведённого выше, для двух типов сооружений видим, что результат выбора класса бетона при использовании В45, В40 и В37 получился одинаковым. Разница в стоимостях каждого класса бетона составила менее 1%.

Несмотря на экономическую выгоду в данном применении трёх классов бетона, выбор бетона классов В40 и В45 является более выгодным, оптимально-технологическим вариантом, так как уровень качества сооружения при данном подборе выше. При этом повышение эффективности бетонов возникает при замыкании их жизненного цикла – повторном использовании бетонного лома.

Таблица 8 / Table 8

Расчёт стоимости классов бетона, с учётом строительных работ, для сухого дока
Costs of concrete grades including civil works for dry dock

Тип зоны воздействия	Минимально допустимый класс бетона	% зон воздействия	Объём зоны воздействия	Стоимость бетона по классам, млн руб.		
				B45	B45 + B40	B45+B40+B37
XS3	B45	18,3%	36600 м3	678,564	678,564	678,564
XS2	B45	27,5%	55000 м3	1019,7	1019,7	1019,7
XA2	B40	45,9%	91800 м3	1701,972	1655,7048	1655,7048
XF4	B40	8,3%	16600 м3	307,764	299,398	290,434
Замесы				5	10	15
Всего				3713	3663,4	3659,4

Определённые препятствия на пути масштабного использования бетонного лома приведены на рис. 2. Основная проблема – нестабильность характеристик вторичного сырья и низкая осведомлённость подрядчиков об их преимуществах.



Рис. 2. Комплекс препятствий повторного использования строительных отходов

Fig. 2. Complex of obstacles to the reuse of construction waste

Расстояние между перерабатывающими заводами и строительными площадками легко нивелировать. На месте снесённых зданий и сооружений можно без дополнительных затрат возвести новые объекты с помощью простейших дробилок и мельниц. Низкий спрос и предложение объясняется незнанием этого вопроса участниками широкомасштабного строительства. Как только малые и крупные строительные компании начнут использовать отходы сноса в качестве вторичного заполнителя, спрос и предложение начнут расти лавинообразно. Восприятие клиента начнёт меняться столь же интенсивно. Низкое качество заполнителей из бетонного лома можно значительно улучшить путём тщательной сортировки и измельчения.

Учёные и практики сталкиваются с проблемой подготовки стандартов и спецификаций для использования различных типов переработанных заполнителей. Имея это в виду, можно предположить, что скоро в ряде стран будут введены налоговые льготы для строителей, которые перерабатывают отходы сноса. Один из вариантов технологии вовлечения в повторный оборот бетонного лома приведён на рис. 3.



Рис. 3. Процесс переработки бетонного лома

Fig. 3. Concrete scrap recycling process

Бетоны, изготовленные с полной заменой природного заполнителя на вторичный, обладают высоким качеством. Использование вторичных заполнителей в бетонах даёт около 80% показателей физико-механических свойств по сравнению с бетоном, изготовленным с применением природных заполнителей. Одна из основных причин снижения прочности связана с низкой прочностью контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. Возможными способами улучшения свойств бетона с применением вторичных заполнителей является применение термовлажностного отверждения, использование пуццолановых материалов и т.д. Для снижения негативного влияния на прочность композита необходимо определять химические примеси в применяемых материалах на основе бетонного лома.

Выводы

Проведено проектирование состава гидротехнического бетона с учётом его жизненного цикла. В ходе всесторонних исследований получены и доказаны следующие результаты:

1. Учитывая все требования и нормы к гидротехническому бетону, а также данные по стоимости компонентов бетона, проведён расчёт и анализ по двум гидротехническим сооружениям: платформе гравитационного типа и сухому доку.

2. Несмотря на экономическую выгоду в данном применении бетона трёх классов, выбор бетона классов В40 и В45 является более выгодным, оптимально-технологическим вариантом, так как уровень качества сооружения при данном подборе выше. При этом повышение эффективности бетонов возникает при замыкании их жизненного цикла – повторном использовании бетонного лома.

3. Возможными способами улучшения свойств бетона с применением вторичных заполнителей является применение термовлажностного отверждения, использование пуццолановых материалов и т.д. Для снижения негативного влияния на прочность композита необходимо определять химические примеси в применяемых материалах на основе бетонного лома.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Е.Н. Пипко, Е.Е. Помников – разработка концепции и дизайна исследования; О.А. Тюрикова, Р.Г. Рамазанов, Чжан Сюань – сбор данных, проведение исследований, интерпретация результатов; Р.С. Федюк, Л.П. Нагрузова – анализ и интерпретация результатов; подготовка и редактирование текста. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

E.N. Pipko, E.E. Pomnikov – development of the concept and design of the study; O.A. Tyurikova, R.G. Ramazanov, Zhang Xuan – data collection, research, interpretation of results; R.S. Fediuk, L.P. Nagruzova – analysis and interpretation of the results; preparation and editing of the text. All the authors have read and approved the final version of the manuscript.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Datta Dip S., Islam M., Sobuz Rahman Md. H., Ahmed S., Kar M. Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Iss. 5. P. e26888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>.
2. Waqar A., Houda M., Ahsan M., Nisar S. Enhancing project performance through sustainable supply chain management: A comprehensive analysis of residential construction practices // *Environmental Challenges*. 2025. Vol. 18. P. 101075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101075>.
3. Yuan L., Yang B., Lu W., Peng Z. Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research // *Environmental Impact Assessment Review*. 2024. Vol. 107. P. 107551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107551>.
4. León-Romero L.P., Aguilar-Fernández M., Luque-Sendra A., Zamora-Polo F., Francisco-Márquez M. Characterization of the information system integrated to the construction project management systems // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Iss. 11. P. e31886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31886>.
5. Celik Y., Petri I., Rezgui Y. Integrating BIM and Blockchain across construction lifecycle and supply chains // *Computers in Industry*. 2023. Vol. 148. P. 103886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103886>.
6. Larbi Amo J., Tang L.C.M., Larbi Amo R., Abankwa D.A., Danquah Darko R. Developing an integrated digital delivery framework and workflow guideline for construction safety management in a project delivery system // *Safety Science*. 2024. Vol. 175. P. 106486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106486>.
7. Ninan J., Yadav R. Megaproject and the city: Theorizing social media discourses across the lifecycle of an infrastructure project // *City and Environment Interactions*. 2023. Vol. 20. P. 100123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100123>.
8. Abuhussain Awad M., Waqar A., Khan Mateen A., Othman I., Alotaibi Saad B., Althoey F., Abuhussain M. Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures // *Structures*. 2024. Vol. 60. P. 105831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105831>.
9. Saradara Mohamed S., Khalfan Ali M.M., Jaya Venu S., Swarnakar V., Rauf A., Fadel M. El. Advancing building construction: A novel conceptual framework integrating circularity with modified lean project delivery systems // *Developments in the Built Environment*. 2024. Vol. 20. P. 100531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100531>.
10. Adu-Amankwa N.A.N., Rahimian F. Pour, Dawood N., Park C. Digital Twins and Blockchain technologies for building lifecycle management // *Automation in Construction*. 2023. Vol. 155. P. 105064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105064>.
11. Huaizhi Su, Nan Zhang, Hao Li. Concrete piezoceramic smart module pairs-based damage diagnosis of hydraulic structure // *Composite Structures*. 2018. Vol. 183. P. 582–593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.010>
12. Flavien Vulliet, Mahdi Ben Ftima, Pierre Léger. Stability of cracked concrete hydraulic structures by nonlinear quasi-static explicit finite element and 3D limit equilibrium methods // *Computers & Structures*. 2017. Vol. 184. P. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.02.007>

13. Shenhua Liu, Weizhong Chen, Jingqiang Yuan. A coupled hydraulic-mechanical-chemical peridynamic model for simulating corrosion-induced failure of unsaturated reinforced concrete under hydraulic pressure // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2025. Vol. 174. P. 106177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106177>
14. Liu Zimei, Ge Xueliang, Lu Cairong, Zhang Zhengnan, Duan Yuwei, Jiang Yuanyuan. A novel damage constitutive model for high air-content hydraulic concrete in ultra-low temperature freeze-thaw and load coupling // *Journal of Building Engineering*. 2025. Vol. 104. P. 112385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112385>
15. Chi Zhang, Shuaixiao Gao, Ye Wang, Xin Zhang, Hongqiang Chu, Huajie Huang, Fanrun Huang, Hainan Wu, Xinyan Xiong. A novel metal-free fluorine-free self-cleaning coating with photocatalytic activity and superhydrophobicity based on RP/HTCC@PDMS for hydraulic concrete // *Separation and Purification Technology*. 2025. Vol. 363, Part 2. P. 132142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132142>
16. Jie-jing Chen, Khant Swe Hein, Guanghua Lyu, Long Xiao, Wei-Liang Jin, Jin Xia. Influence of frequency condition of dynamic hydraulic pressure on chloride transport in concrete // *Construction and Building Materials*. 2025. Vol. 458. P. 139529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139529>
17. Shaolun He, Jing Cao, Junrui Chai, Yi Yang, Shuai Liu, Yuan Qin, Zengguang Xu. Meso-damage of concrete hydraulic fracturing considering the temperature difference effect // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 456. P. 139203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139203>
18. Zimei Liu, Xueliang Ge, Cairong Lu, Zhengnan Zhang, Yuwei Duan, Yuanyuan Jiang. Performance evolution and damage constitutive model of high air content hydraulic concrete coupled freeze-thaw and loads // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 453. P. 139015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139015>
19. Riccardo Stucchi. Hydromechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: transient // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*. 2025. Vol. 178, Iss. 1. P. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.1680/jencm.24.00067>
20. Mingyue Chen, Xin Kang, Yongqing Chen, Renpeng Chen. Unveiling the synergistic effects of stray current and high hydraulic pressure on chloride transport in ultra-high-performance concrete // *Cement and Concrete Composites*. 2025. Vol. 157. P. 105957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105957>
21. Jian-Tao Wang, Kai-Lin Yang, Yang Yang. Influence of internal and external hydraulic pressures on torsional resistance of steel-concrete double skin composite tubes // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2025. Vol. 214. P. 105424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105424>
22. Jin Xia, Jie-jing Chen, Xiaoyu He, Keyu Chen, Wei-liang Jin. Comparative analysis of microdamage-affected chloride transport in concrete under static and dynamic hydraulic pressure // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110184>
23. Zhe Huang, Jiazhang Cao, Fuyuan Gong, Ding Nie, Wenwei Li, Peng Lin, He Zhang. Multi-scale thermo-poro-mechanical simulation of the frost resistance of low-heat and moderate-heat hydraulic concrete considering the aging microstructure // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 453. P. 139062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139062>
24. Yanlong Li, Yaofei Liu, Hanyu Guo, Yang Li. Investigation of the freeze-thaw deterioration behavior of hydraulic concrete under various curing temperatures // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. P. 110247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110247>
25. Riccardo Stucchi. Hydro-mechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: steady state // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*. Vol. 177, Iss. 3–4. P. 70–82. DOI: <https://doi.org/10.1680/jencm.24.00020>
26. Kun Wang, Jinjun Guo, Juan Wang, Yuanxun Zheng, Peng Zhang, Hongjian Du. Numerical and experimental analysis of the effect of multi-ion electrical coupling on the sulfate convection zone in hydraulic concrete // *Construction and Building Materials*. 2024. Vol. 449. P. 138340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138340>
27. Jie-jing Chen, Qing-feng Liu, Wei-liang Jin, Jin Xia. Experiment and simulation on the coupled effects of calcium leaching and chloride transport in concrete under hydraulic pressure // *Cement and Concrete Composites*. 2025. Vol. 155. P. 105834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105834>
28. Павленко А.Д., Ким Л.В. Применение лёгкого бетона в гидротехническом строительстве в

- условиях Крайнего Севера // Трибуна учёного. 2024. Вып. 5. С. 1–5.
29. Алексейко Л.Н., Таскин А.В. О комплексной переработке золошлаковых отходов энергетики // Экология и развитие общества. Труды IX Международной конференции. Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы (МАНЭБ). 2005. С. 12–21.
 30. Алексейко Л.Н., Таскин А.В., Черепанов А.А. Технологическая линия для переработки золошлаковых отходов – продуктов сжигания угольного топлива // Патент на изобретение RU 2489214 C1, 10.08.2013. Заявка № 2012123064/03 от 04.06.2012.

REFERENCES

1. Datta Dip S., Islam M., Sobuz Rahman Md. H., Ahmed S., Kar M. Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 5, p. e26888. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26888>.
2. Waqar A., Houda M., Ahsan M., Nisar S. Enhancing project performance through sustainable supply chain management: A comprehensive analysis of residential construction practices. *Environmental Challenges*, 2025, vol. 18, p. 101075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101075>.
3. Yuan L., Yang B., Lu W., Peng Z. Carbon footprint accounting across the construction waste lifecycle: A critical review of research. *Environmental Impact Assessment Review*, 2024, vol. 107, p. 107551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107551>.
4. León-Romero L.P., Aguilar-Fernández M., Luque-Sendra A., Zamora-Polo F., Francisco-Márquez M. Characterization of the information system integrated to the construction project management systems. *Heliyon*, 2024, vol. 10, iss. 11, p. e31886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31886>.
5. Celik Y., Petri I., Rezgui Y. Integrating BIM and Blockchain across construction lifecycle and supply chains. *Computers in Industry*, 2023, vol. 148, p. 103886. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103886>.
6. Larbi Amo J., Tang L.C.M., Larbi Amo R., Abankwa D.A., Danquah Darko R. Developing an integrated digital delivery framework and workflow guideline for construction safety management in a project delivery system. *Safety Science*, 2024, vol. 175, p. 106486. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106486>.
7. Ninan J., Yadav R. Megaproject and the city: Theorizing social media discourses across the lifecycle of an infrastructure project. *City and Environment Interactions*, 2023, vol. 20, p. 100123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100123>.
8. Abuhussain Awad M., Waqar A., Khan Mateen A., Othman I., Alotaibi Saad B., Althoey F., Abuhussain M. Integrating Building Information Modeling (BIM) for optimal lifecycle management of complex structures. *Structures*, 2024, vol. 60, p. 105831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105831>.
9. Saradara Mohamed S., Khalfan Ali M.M., Jaya Venu S., Swarnakar V., Rauf A., Fadel M. El. Advancing building construction: A novel conceptual framework integrating circularity with modified lean project delivery systems. *Developments in the Built Environment*, 2024, vol. 20, p. 100531. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100531>.
10. Adu-Amankwa N.A.N., Rahimian F. Pour, Dawood N., Park C. Digital Twins and Blockchain technologies for building lifecycle management. *Automation in Construction*, 2023, vol. 155, p. 105064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105064>.
11. Huaizhi Su, Nan Zhang, Hao Li. Concrete piezoceramic smart module pairs-based damage diagnosis of hydraulic structure. *Composite Structures*, 2018, vol. 183, pp. 582–593. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.07.010>
12. Flavien Vulliet, Mahdi Ben Ftima, Pierre Léger. Stability of cracked concrete hydraulic structures by nonlinear quasi-static explicit finite element and 3D limit equilibrium methods. *Computers & Structures*, 2017, vol. 184, pp. 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.02.007>
13. Shenhua Liu, Weizhong Chen, Jingqiang Yuan. A coupled hydraulic-mechanical-chemical peridynamic model for simulating corrosion-induced failure of unsaturated reinforced concrete under hydraulic pressure. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2025, vol. 174, p. 106177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106177>
14. Liu Zimei, Ge Xueliang, Lu Cairong, Zhang Zhengnan, Duan Yuwei, Jiang Yuanyuan. A novel damage constitutive model for high air-content hydraulic concrete in ultra-low temperature freeze-thaw and load coupling. *Journal of Building Engineering*, 2025, vol. 104, p. 112385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2025.112385>

15. Chi Zhang, Shuaixiao Gao, Ye Wang, Xin Zhang, Hongqiang Chu, Huajie Huang, Fanrun Huang, Hainan Wu, Xinyan Xiong. A novel metal-free fluorine-free self-cleaning coating with photocatalytic activity and superhydrophobicity based on RP/HTCC@PDMS for hydraulic concrete. *Separation and Purification Technology*, 2025, vol. 363, part 2, p. 132142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.132142>
16. Jie-jing Chen, Khant Swe Hein, Guanghua Lyu, Long Xiao, Wei-Liang Jin, Jin Xia. Influence of frequency condition of dynamic hydraulic pressure on chloride transport in concrete. *Construction and Building Materials*, 2025, vol. 458, p. 139529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139529>
17. Shaolun He, Jing Cao, Junrui Chai, Yi Yang, Shuai Liu, Yuan Qin, Zengguang Xu. Meso-damage of concrete hydraulic fracturing considering the temperature difference effect. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 456, p. 139203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139203>
18. Zimei Liu, Xueliang Ge, Cairong Lu, Zhengnan Zhang, Yuwei Duan, Yuanyuan Jiang. Performance evolution and damage constitutive model of high air content hydraulic concrete coupled freeze-thaw and loads. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 453, p. 139015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139015>
19. Riccardo Stucchi. Hydromechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: transient. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*, 2025, vol. 178, iss. 1, p. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenm.24.00067>
20. Mingyue Chen, Xin Kang, Yongqing Chen, Renpeng Chen. Unveiling the synergistic effects of stray current and high hydraulic pressure on chloride transport in ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2025, vol. 157, p. 105957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.105957>
21. Jian-Tao Wang, Kai-Lin Yang, Yang Yang. Influence of internal and external hydraulic pressures on torsional resistance of steel-concrete double skin composite tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2025, vol. 214, p. 105424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105424>
22. Jin Xia, Jie-jing Chen, Xiaoyu He, Keyu Chen, Wei-liang Jin. Comparative analysis of microdamage-affected chloride transport in concrete under static and dynamic hydraulic pressure. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 95, p. 110184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110184>
23. Zhe Huang, Jiazhang Cao, Fuyuan Gong, Ding Nie, Wenwei Li, Peng Lin, He Zhang. Multi-scale thermo-poro-mechanical simulation of the frost resistance of low-heat and moderate-heat hydraulic concrete considering the aging microstructure. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 453, p. 139062. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139062>
24. Yanlong Li, Yaofei Liu, Hanyu Guo, Yang Li. Investigation of the freeze-thaw deterioration behavior of hydraulic concrete under various curing temperatures. *Journal of Building Engineering*, 2024, vol. 95, p. 110247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110247>
25. Riccardo Stucchi. Hydro-mechanical behaviour of reinforced concrete linings in hydraulic tunnels: steady state. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering and Computational Mechanics*, vol. 177, iss. 3–4, pp. 70–82. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenm.24.00020>
26. Kun Wang, Jinjun Guo, Juan Wang, Yuanxun Zheng, Peng Zhang, Hongjian Du. Numerical and experimental analysis of the effect of multi-ion electrical coupling on the sulfate convection zone in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials*, 2024, vol. 449, p. 138340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138340>
27. Jie-jing Chen, Qing-feng Liu, Wei-liang Jin, Jin Xia. Experiment and simulation on the coupled effects of calcium leaching and chloride transport in concrete under hydraulic pressure. *Cement and Concrete Composites*, 2025, vol. 155, p. 105834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105834>
28. Pavlenko A.D., Kim L.V. Application of lightweight concrete in hydraulic engineering in the Far North. *Tribune of the scientist*, 2024, iss. 5, pp. 1–5. (In Russ.).
29. Alekseiko L.N., Taskin A.V. On the complex processing of ash and slag waste from the energy sector. *Ecology and development of society. Proceedings of the IX International Conference. International Academy of Sciences of Ecology, Human and Nature Safety (MANEB)*, 2005, p. 12–21. (In Russ.).
30. Alekseiko L.N., Taskin A.V., Cherepanov A.A. Technological line for processing ash and slag waste – products of coal fuel combustion. Patent for invention RU 2489214 C1, 10.08.2013. Application No. 2012123064/03 dated 04.06.2012. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Пипко Елена Николаевна – старший преподаватель, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ pipko.en@dvfu.ru, <https://orcid.org/0009-0000-2725-9643>

Elena N. Pipko, Senior Lecturer, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Федюк Роман Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор военного учебного центра, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация); главный научный сотрудник, Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству (Владивосток, Российская Федерация),

✉ roman44@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2279-1240>

Roman S. Fediuk, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation); Chief Researcher, Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction (Vladivostok, Russian Federation).

Помников Егор Евгеньевич – кандидат технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ pomnikov.ee@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2165-3038>

Egor E. Pomnikov, Candidate of Technical Sciences, Professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Нагрузова Любовь Петровна – доктор технических наук, доцент, профессор, Хакасский государственный университет имени Н.Ф. Катанова (Абакан, Российская Федерация),

✉ l_nag@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7295-6557>

Lyubov P. Nagruzova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, N.F. Katanov Khakass State University (Abakan, Russian Federation).

Тюрикова Ольга Алексеевна – ассистент, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация),

✉ tyurikova.oa@dvfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0249-4844>

Olga A. Tyurikova, Assistant, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation).

Рамазанов Рустам Габтиларифович – аспирант, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация),

✉ ramazanov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5501-3755>

Rustam G. Ramazanov, Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation).

Чжан Сюань – аспирант, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация),

✉ Zhang@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9245-2028>

Zhang Xuan, Postgraduate Student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию / Received: 18.04.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 23.04.2025.

Принята к публикации / Accepted: 23.06.2025.