

Научная статья
 УДК 666.972
 DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>
 EDN: TPXTRP



МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ АКТИВИРОВАННОГО МЕТАКАОЛИНА С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЕЙ

Е.В. Ткач¹, А.Ф. Бурьянов¹ ✉, Ю.С. Филимонова², Г.А. Шусев³

¹Московский государственный строительный университет,
 г. Москва, Россия

²Московский политехнический университет,
 г. Москва, Россия

³Московский автомобильно-дорожный государственный
 технический университет (МАДИ),
 г. Москва, Россия

✉ ответственный автор
 rga-service@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В связи с постоянно растущими требованиями к качеству и надежности бетонных конструкций для строительства тоннелей ставится задача разработки модифицированных бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Материалы и методы. В данном исследовании рассматриваются вопросы, связанные с модификацией состава тяжелого бетона комплексной химической добавкой, включающей в своем составе суперпластификатор Sunbo PC-1021, водорастворимую полимерную добавку Полидон-А совместно с активированным метакатионом. Установлено, что процесс действия химической активации частиц метакатиона изучен недостаточно. В связи с этим представленные исследования, заключающиеся в поиске решений повышения эксплуатационных характеристик за счет процесса его предварительной обработки щелочной средой pH=10 совместно с микроармирующим компонентом (волластонит) являются актуальными.

Результаты. Установлено положительное влияние комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакатионом, предварительно активированным щелочной средой с pH=10 с модификатором и волластонитом, позволяющее улучшить прочностные и гидрофизические характеристики: прочность на сжатие в возрасте 28 сут составила 68,6 МПа в сравнении с контрольным составом – 39,4 МПа; водопоглощение – 2,4%; марка по водонепроницаемости – W14.

Заключение. Решение проблемы получения эффективного бетона для конструкций тоннелей с улучшенными эксплуатационными свойствами может быть осуществлено за счет модифицирования вяжущего в составе с активированным метакатионом совместно с комплексным модификатором смеси (ПЦ + 5% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит). Предлагаемый состав дает возможность изготавливать в производственных условиях железобетонные конструкции для тоннелей с заданными характеристиками, эксплуатирующиеся в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: конструкции тоннелей, активация метакатиона, комплексный модификатор, физико-механические свойства, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации, агрессивная среда

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. А.Ф. Бурьянов – член редакционной коллегии журнала «Вестник СиБАДИ». Журнал «Вестник СиБАДИ» не освобождает от рецензирования рукописи ученых вне зависимости от их статуса.

© Ткач Е.В., Бурьянов А.Ф., Филимонова Ю.С., Шусев Г.А., 2025



Контент доступен под лицензией
 Creative Commons Attribution 4.0 License.

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 19.05.2025; принята к публикации 16.06.2025.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Ткач Е.В., Бурьянов А.Ф., Филимонова Ю.С., Шусев Г.А. Модифицированный бетон на основе активированного метакеолина с повышенными эксплуатационными свойствами для конструкций тоннелей // Вестник СибАДИ. 2025. Т. 22, № 3. С. 488-498. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>

Original article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>

EDN: TPXTPP

MODIFIED CONCRETE BASED ON ACTIVATED METAKAOLIN FOR TUNNEL STRUCTURES WITH INCREASED PERFORMANCE PROPERTIES

Evgeniya V. Tkach¹, Alexander F. Buryanov¹ ✉, Yulia S. Filimonova², Georgy A. Shusev³

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU),
Moscow, Russia

²Moscow Polytechnic University,
Moscow, Russia

³Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

✉ corresponding author
rga-service@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. Due to the ever-increasing demands for the quality and reliability of concrete structures for tunnel construction, the task is to develop modified concretes with improved performance characteristics.

Materials and methods. This study examines issues related to the modification of the composition of heavyweight concrete with a complex chemical additive, which includes the Sunbo PC-1021 superplasticizer, the water-soluble polymer additive Polidon-A together with activated metakaolin. It has been established that the process of chemical activation of metakaolin particles has not been sufficiently studied. In this regard, the presented studies, which consist of finding solutions to improve performance characteristics due to the process of its preliminary treatment with an alkaline medium pH = 10 together with a micro-reinforcing component (wollastonite), are relevant.

Results. A positive effect of complex modification on the properties of heavy concrete was established by reducing the content of binder (cement) and replacing it with metakaolin, pre-activated in an alkaline medium with pH = 10 with a modifier and wollastonite, which improves the strength and hydrophysical characteristics: compressive strength at the age of 28 days was 68.6 MPa compared to the control composition - 39.4 MPa; water absorption - 2.4%; water resistance grade - W14.

Discussion and conclusions. The problem of obtaining effective concrete for tunnel structures with improved performance properties can be solved by modifying the binder in the composition with activated metakaolin together with a complex modifier of the mixture (PC + 5% MTK_{akt} + 0.4% SP + 0.3% Polidon-A + 2% wollastonite). The proposed composition makes it possible to manufacture reinforced concrete structures for tunnels with specified characteristics in production conditions, operating under conditions of increased load and aggressive environment.

KEYWORDS: tunnel structures, metakaolin activation, complex modifier, physical and mechanical properties, hydrophysical properties, severe operating conditions, aggressive environment

CONFLICT OF INTEREST: The authors declare no conflict of interest. A.F. Buryanov member of the editorial board of The Russian Automobile and Highway Industry Journal. The Russian Automobile and Highway Industry Journal does not exempt scientists from reviewing the manuscript, regardless of their status.

© Tkach E.V., Buryanov A.F., Filimonova Y.S., Shusev G.A., 2025



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

The article was submitted: April 17, 2025; approved after reviewing: May 19, 2025; accepted for publication: June 16, 2025.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Tkach E.V., Buryanov A.F., Filimonova Y.S., Shusev G.A. Modified concrete based on activated metakaolin for tunnel structures with increased performance properties. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2025; 22 (3): 488-498. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2025-22-3-488-498>

ВВЕДЕНИЕ

Безопасность эксплуатации тоннелей характеризуется способностью их конструкций сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров при выполнении требуемых функций в заданных условиях работы и технического обслуживания. Данные обстоятельства обуславливают необходимость повышения срока службы и эксплуатационных характеристик конструкций из железобетона, таких как прочность, устойчивость к процессу трещинообразования и гидрофизических свойств [1, 2].

Одним из способов получения высокопрочных бетонов является применение эффективных суперпластификаторов, позволяющих снижать водопотребность бетонных смесей, следствием чего является возрастание прочности при ее уплотнении [3]. При добавлении оптимального количества минерального наполнителя структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем, что позволяет получать максимально плотную упаковку частиц в цементном тесте. На практике в качестве активных минеральных добавок широко применяют отходы или попутные продукты различных производств, такие как зола-унос, доменные гранулированные шлаки, микрокремнезём [4, 5]. В настоящее время, как показывают исследования [6], применение метакеолина до 5% от массы вяжущего позволяет ускорять процесс его гидратации и тем самым повышать прочностные характеристики отвердевшего бетона на его основе. Также было изучено использование и влияние электролизованной воды на улучшение прочностных характеристик бетона. Исследования [6, 7, 8] показали, что быстрая химическая реакция гидратации частиц цемента в присутствии электролизованной воды и образование более гидратированных продуктов в раннем возрасте приводит к развитию менее пористой и более плотной микроструктуры. Использование электролизованной воды обеспечивает более быстрое схватывание цемента, показывает более высокие значения прочности на сжатие по срав-

нению с обычным раствором на водной основе на ранней стадии отверждения. Химическая активация частиц метакеолина электролизованной водой, по нашему мнению, должна положительно повлиять на физико-механические свойства бетона.

Совместное использование активных минеральных добавок и суперпластификаторов представляет значительный научный интерес, так как оно позволяет заметно улучшить свойства тяжелого бетона [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Такой подход к модификации состава способствует увеличению прочности бетона при сжатии до 150 МПа, а также повышает его водонепроницаемость и стойкость к образованию трещин. Современные разработки акцентируют внимание на применении дисперсного армирования различными типами фибры [7], что дополнительно усиливает структуру и прочность бетона, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам и износу.

Таким образом, улучшение качественных характеристик тяжелого бетона остаётся актуальной задачей, требующей дальнейшего развития с учетом современных технологических направлений. Эти направления предполагают совместное использование цементного вяжущего с комплексными модификаторами, которые позволяют регулировать эксплуатационные свойства бетона для обеспечения долговечности и надежности конструкций на его основе.

Цель работы – формирование научно обоснованного технологического решения получения тяжелого бетона с метакеолином, активированного водой, обработанной методом электролиза, совместно с пластификатором и армированного волластонитом для конструкций тоннелей.

Для достижения поставленной цели решалась задача по разработке состава бетонной смеси и установлению технологических решений для получения эффективного бетона с повышенными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками на основе модифицированного вяжущего с комплексным полимерным модификатором.

Таблица 1

Характеристики добавки суперпластификатора Sunbo PC-1021

Источник: составлено авторами.

Table 1

Characteristics of the superplasticizer additive "Sunbo PC-1021"

Source: compiled by the authors.

Внешний вид	Серый, белый или светло-желтый порошок
Содержание воды (порошок) (%):	≤ %
Вес единицы (г/л):	500 ~ 600
Значение pH (20) (20% жидкий):	7–8
Содержание SO ₄ (%):	2,6
Cl (%):	≤ 0,3%
Рекомендуемая дозировка (в отношении веса binder)	0,16% ~ 0,3%
Воды передаточное отношение	≥ %

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно нормативным требованиям СП 122.13330.2023 «СНиП 32-04-97 Тоннели железнодорожные и автодорожные» к вяжущим для бетонных смесей предъявляются следующие требования: суммарное содержание (3CaO·SiO₂+2CaO·SiO₂) – не менее 2/3 массы клинкера; соотношение (CaO/SiO₂) – не менее 2,0; содержание (MgO) в клинкере – не более 5% массы клинкера. В исследованиях применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н, производитель АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп» (ГОСТ 31108–2016). В качестве заполнителей использовали природный песок с истинной плотностью 2560 кг/м³ и модулем крупности 2,4 (поставщик ООО «Агат», Владимирская область; соответствует требованиям ГОСТ 8736–2014) и гранитный щебень средней плотностью до 3000 кг/м³ фракции от 5 до 20 мм (поставщик ООО «ДорНерудРесурс», Саратовская область; соответствует требованиям ГОСТ 8267–93). Для затворения бетонной смеси использовалась вода. Вода не содержит сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO₄), всех солей более 5000 мг/л с pH 7,8, цвет отсутствует.

В качестве пластифицирующей добавки использовалась добавка-суперпластификатор Sunbo PC-1021 производства Sunbo (Китай) (таблица 1), расход которой составлял 0,4% от массы вяжущего вещества, рекомендованный производителем. Добавление пластификатора позволяет увеличить подвижность бетонной смеси, снизить количество воды затворения, сэкономить количество цемента без потери прочности бетона и увеличить адгезию.

В качестве водорастворимой полимерной добавки использовали добавку Полидон-А производства ООО «Оргполимерсинтез»

(Санкт-Петербург), соответствующую требованиям ТУ 9365-002-46270704–2001. Расход данной добавки составлял 0,3% от массы вяжущего. Полидон-А представляет собой водный раствор поливинилпирролидона C₆H₉NO плотностью 1200 кг/м³, вязкостью от 3000 до 6000 МПа при 25 °С, температурой плавления: 150–180 °С.

В качестве активной минеральной добавки применялся метакеолин марки ВМК-45. Метакеолин был произведен ООО «СИНЕРГО» (Челябинская обл., пос. Желтинский, ул. Степная). В таблице 2 представлены основные физические характеристики метакеолина.

Таблица 2

Физические характеристики метакеолина

Источник: составлено авторами.

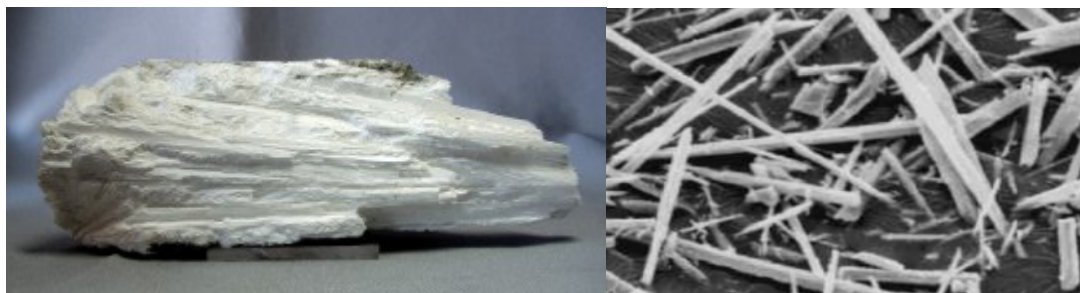
Table 2

Physical characteristics of metakaolin

Source: compiled by the authors.

№	Физические характеристики	Показатель
1	Плотность	2,6 кг/см ³
2	Распределение частиц d ₅₀ d ₉₅	3,4–4,5 мкм 12–18 мкм
3	Удельная поверхность (Blaine)	23 м ² /г
4	Удельная поверхность (BET)	18 м ² /г
5	Цвет	Кремовый

Элементный анализ добавки показал преобладание в ее составе SiO₂ и Al₂O₃ в количестве 52–54% и 40–43% соответственно. Также установлено незначительное содержание химических соединений от 0,1 до 2%, таких как Fe₂O₃, TiO₂, CaO, MgO, Na₂O, K₂O. Высокое содержание оксида кремния позволяет сделать вывод, что метакеолин обладает высокой химической активностью.



а

б

Рисунок 1 – Волластонит:
а – внешний вид; б – игольчатая микроструктура
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Wollastonite:
а – appearance, б – acicular microstructure
Source: compiled by the authors.

Таблица 3
Составы бетонных смесей модифицированного тяжелого бетона с расходом компонентов
Источник: составлено авторами.

Table 3
Compositions of concrete mixtures of modified heavy concrete with component consumption
Source: compiled by the authors.

Материалы	Составы бетонной смеси, кг/м ³				
	1 конт.	2	3	4	5
Портландцемент	416	395	395	395	395
Метакаолин ВМК-45	-	21	21	21	21
Песок	846	846	846	846	846
Щебень	967	967	967	967	967
Суперпластификатор Sunbo PC-1021	-	-	1,7	1,7	1,7
Полидон-А	-	-	-	1,25	1,25
Волластонит	-	-	-	-	8,3
Вода pH7	165				
Вода pH10		165	165	165	165

Для дисперсного армирования бетонного камня был выбран волластонит, который представляет собой минерал из класса силикатов, природный силикат кальция подкласса пироксеноидов группы цепочечных силикатов с формулой $\text{Ca}[\text{SiO}_2]$. Цвет волластонита белый с сероватым или буроватым оттенком. Волластонит в зависимости от длины волокон делится на длинно- и коротковолокнистый, обладающий микроармирующим эффектом.

На рисунке представлены внешний вид волластонита с шероховатой поверхностью (рисунок 1, а) и его игольчатая микроструктура

(рисунок 1, б), которая обладает хемосорбционными свойствами.

Далее были разработаны составы бетонных смесей модифицированного тяжелого бетона с расходом компонентов, представленные в таблице 3.

Следует отметить, что воду активировали в электролизере «Мелеста», который позволял увеличить pH воды с 7,1 до pH щелочной среды, равной 10. Предполагаем на основе работ [7, 13], что процессы гидролиза и гидратации будут происходить интенсивнее за счет введения предварительно активированной воды.

Таблица 4
Результаты исследований бетонных смесей и бетонов
Источник: составлено авторами.

Table 4
Results of studies on concrete mixtures and concretes
Source: compiled by the authors.

Показатели	Маркировка состава				
	1 контр.	2	3	4	5
Марка подвижности бетонной смеси (ОК, см)	П1 (2)	П1 (3)	П2 (4)	П2 (5)	П2(5)
Средняя плотность бетонной смеси, кг/м ³	2394	2394	2396	2397	2405
Водоотделение бетонной смеси, %	0,43	0,36	0,3	0,26	0,25
Прочность бетона на сжатие, МПа, $R_{сж}$	39,4	43,8	54,7	60,5	68,6
Прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа, $R_{и}$	5,2	5,4	6,0	6,5	6,9
Средняя плотность бетона, кг/м ³	2362	2388	2389	2392	2416

Для дальнейших исследований из полученных составов бетонных смесей были изготовлены образцы: кубы с размером ребра 10x10x10 см и балочки для испытания на изгиб 30x10x10 см. Образцы твердели при нормальных условиях 28 сут, затем были проведены испытания в аккредитованной лаборатории на сертифицированном современном оборудовании.

Для определения водопоглощения был применен метод последовательного насыщения образцов водой до постоянной массы согласно ГОСТ 12730.3–2020 «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Использованные образцы-кубы имели ребро 100 мм, изготавливались из бетонных смесей разработанных составов. Образцы твердели в нормальных условиях на протяжении 28 сут. Серия образцов для испытания составляла 3 куба плюс контрольный для каждого из составов. Водопоглощение серии образцов каждого состава определялось как среднее арифметическое значение водопоглощений каждого образца серии. Пористость образцов разработанных составов определялась путем оценки кинетики водопоглощения методом дискретного взвешивания в соответствии с ГОСТ 12730.4–2020 «Бетоны. Методы определения параметров пористости». Образцы-кубы имели ребро 70 мм, серии испытаний включали в себя два образца каждого состава. Значение пористо-

сти рассчитывалось как среднее арифметическое. Водонепроницаемость разработанных бетонных изделий определялась при помощи метода «мокрого пятна» согласно требованиям ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Для определения водонепроницаемости из разработанных составов изготавливались образцы-цилиндры диаметром 150 мм и высотой 150 мм. Было подготовлено по 6 образцов каждого состава в серии. Образцы до испытания выдерживались в камере нормального твердения в нормальных условиях в течение суток перед проведением испытаний. Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки Form+Test WE 6 MMZ (Германия). Образцы устанавливались в посадочные устройства установки, манжеты которой предварительно смазывались водонепроницаемой смазкой. Давление воды поднималось ступенчато с последующей выдержкой (0,2 МПа в течение 1–5 мин) и длительностью воздействия воды под давлением, равной 12 ч на каждой ступени. При появлении «мокрого пятна», равно как и иных признаков проникновения воды в различные места образца, испытание прекращалось. Значение максимального давления воды, при котором не менее чем на четырех образцах из шести не наблюдалась фильтрация воды, было принято показателем водонепроницаемости образца.

Таблица 5

Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость
Источник: составлено авторами.

Table 5

Results of water absorption and water resistance tests
Source: compiled by the authors.

Маркировка образца	Плотность кг/м ³ /пористость, %	Водопоглощение по массе, %	Марка бетона по водонепроницаемости
Состав 1 контрольный	2290/12,2	4,6	W6
Состав 2 ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021	2292/11,3	3,2	W8
Состав 3 ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А)	2293/10,3	2,2	W12
Состав 4 ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45)	2293/10,1	1,9	W14
Состав 5 ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021+ 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) + 2% Волластонит	2300/8,7	1,8	W14

Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром 100 мм, шесть из которых были приняты в качестве контрольных, а двенадцать имели в своем составе введенные добавки в соответствии с разработанным планом эксперимента. Время выдержки образцов составило 24 ч при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 ч при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 ч при полном погружении. Процесс испытания шел до появления структурных дефектов образцов – трещин, сколов и шелушения, потери массы и потери прочности образцов более чем на 5% от требуемого значения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты физико-механических испытаний модифицированных бетонных смесей и бетонов на их основе представлены в таблице 4.

Анализ результатов исследований (см. таблицу 4) показал, что при замене в составе 2-й части бездобавочного портландцемента на активированный метакаолин (5%) + (активированная вода, предварительно обработанная в электролизере) происходит увеличение проч-

ности с 39,4 МПа до 43,8 МПа. При добавлении суперпластификатора Sunbo PC-1021 (0,4% от массы вяжущего) возросла прочность бетона (состав 3: ПЦ + 5 МТКакт + 0,4% СП) на сжатие с 43,8 до 54,7 МПа и на растяжение при изгибе – с 5,4 до 6,0 МПа в сравнении с составом 2. Далее при добавлении 0,3% от массы вяжущего Полидон-А (состав 4: ПЦ + 5% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А) наблюдается увеличение прочности бетона на сжатие с 54,7 до 60,5 МПа и на растяжение при изгибе – с 6,0 до 6,5 МПа в сравнении с составом 3. Наличие в составе 5 (ПЦ + 5% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит) дисперсного наполнителя – волластонита привело к росту показателя прочности бетона на сжатие с 60,5 до 68,6 МПа и на растяжение при изгибе – с 6,5 до 6,9 МПа в сравнении с составом 4. Это связано с тем, что волластонит обладает хорошим сцеплением с цементным камнем, снижая его пористость и тем самым обеспечивая эффективное микроармирование бетона.

Установлено также положительное влияние комплексного модифицирования на гидрофизические свойства. Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в таблице 5.

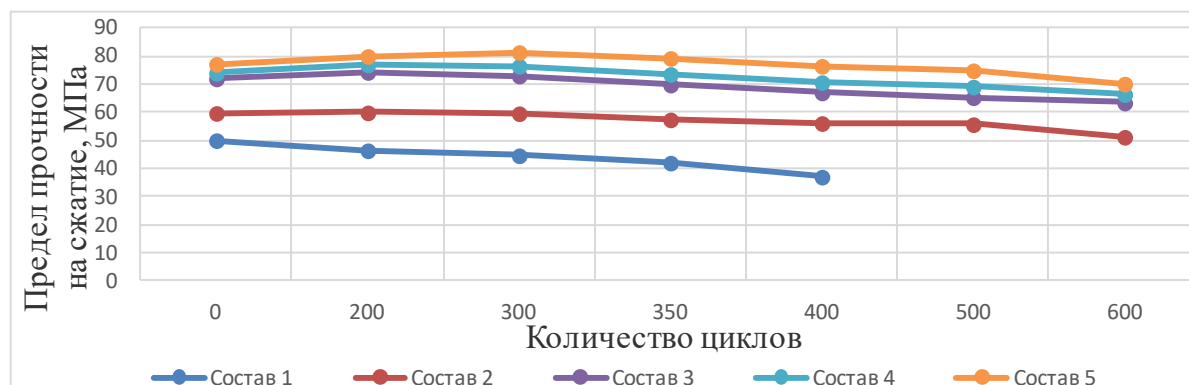


Рисунок 2 – Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании: контрольный ПЦ; ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021; ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А); ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45); ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) + 2% волластонит
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Graphical interpretation of the results of testing heavy concrete samples under cyclic alternating freezing and thawing: control PC; PC + 0.4% Sunbo PC-1021; PC + (0.4% Sunbo PC-1021 + 0.3% Polydon-A); PC + (0.4% Sunbo PC-1021 + 0.3% Polydon-A + 5% VMK-45); PC + (0.4% Sunbo PC-1021 + 0.3% Polydon-A + 5% VMK-45) + 2% Wollastonite
Source: compiled by the authors.

Анализ полученных данных (см. таблицу 5) показал, что введение комплексного модификатора совместно с волластонитом (состав 5, ПЦ + (0,4% Sunbo PC -1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) + 2% волластонит снизило показатель водопоглощения на – 57,8%; на 37,8% снизил 2-й состав ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021); на 48,9 % – 3-й состав ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А); на 53,3% – 4-й состав ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) в сравнении с контрольным (состав 1). Водонепроницаемость модифицированного бетона в 4-м составе ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом 1. При этом наличие в составе 5 волластонита ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 5% ВМК-45) +2% волластонит не повлияло на его водонепроницаемость.

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании отображены на рисунке 2.

Анализ полученных данных при циклическом попеременном замораживании и оттаивании образцов-кубов из бетона различного состава показал:

- максимальное снижение массы до 4,36% и кубиковой прочности на 32% в контрольном

составе 1 после 400 циклов испытаний попеременного замораживания и оттаивания, что превышает установленные показатели требования ГОСТ10060–2012 (потеря массы и прочности бетона не более 2 и 15% соответственно);

- составы, содержащие комплексный модификатор, показали высокие характеристики морозостойкости, при 600 циклов испытаний потеря массы в составах 4 и 5 составила 1,82% и 1,6%, при снижении прочности на 10 и 8% соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости предлагаемых составов модифицированного бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан состав бетонной смеси и установлены технологические решения для получения эффективного бетона на основе модифицированного вяжущего с комплексным полимерным модификатором для конструкций тоннелей с повышенными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками: предел прочности на сжатие – 68,6 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 6,9 МПа; водопоглощение – 2,4% масс.; марка по водонепроницаемости – W14.

Полученные результаты исследований позволяют рекомендовать предлагаемый состав модифицированного бетона для производства строительных конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации, в частности для автодорожных тоннелей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // Строительные материалы. 2010. № 11. С. 6–8.

2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы // Вестник НИЦ. Строительство. 2024. № 1 (40). С. 92–104. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104). EDN: NIYJLR

3. Крутских А.В., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Модифицированные цементные бетоны с дискретным армированием // Строительство и реконструкция. 2023. № 3 (107). С. 131–139. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-131-139>

4. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С., Бурьянов А.Ф. Перспективы применения переработанных топливных золошлаковых отходов гидроудаления в сухих строительных смесях. Часть 1 // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 73–79. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

5. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.235-243>

6. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // Строительство и реконструкция. 2021. №4 (96). С. 107–109. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112>

7. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойства модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // Строительство и реконструкция. 2020. №2 (88). С. 123–135. DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-123-135>

8. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Мамаев Н.А. Влияние добавки «микрокремнезем-поликарбоксилатный суперпластификатор – 2 на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня // Цемент и его применение. 2013. № 2. С. 114–118.

9. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Иванов А.А. Оптимизация состава гидротехнического бетона с применением композиционных вяжущих // Техника и технология силикатов. 2023. Т. 30, № 4. С. 350–356.

10. Александрова О.В., Нгуен Д.В.К., Булгаков Б.И., Петропавловская В.Б. Влияние кварце-

вого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 3. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.7>

11. Урханова Л.А., Иванов А.А., Лхасаранов С.А. Исследование влияния тонкодисперсных добавок на свойства композиционных вяжущих для гидротехнического бетона // Вестник ВСГУТУ. 2023. №2 (89). С. 80–89.

12. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Данзанов Д.В. Синтез ультрадисперсной добавки, полученной при гидролизе портландцемента, для модификации цементного камня // Цемент и его применение. 2022. № 4. С. 52–56.

13. Томилов А.П. Электрохимическая активация – новое направление прикладной электрохимии // Жизнь и безопасность. 2002. № 3. С. 302–307.

14. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., Leon, N., Sanchez-Espinosa, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete // Construction and Building Materials. 2018. №. 165. P. 93-103.

15. Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems // Cement and Concrete Research. 1990. Vol. 20. №5. P.783-794.

16. Roberts L.R., Grace W.R. Microsilica in concrete // Materials Science of Concrete. 1989. №3. P.197-222.

REFERENCES

1. Oreshkin D.V. Problems of construction materials science and production of construction materials. *Stroitel'nye Materialy* (Construction Materials). 2010; 11: 6-8. (in Russ.)

2. Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Chilin I.A., Dondukov V.G., Selyutin N.M. Modified concrete: reality and prospects. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024; 40(1): 92–104. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104). EDN: NIYJLR

3. Krutskikh A.V., Petropavlovskaya V.B., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. Modified cement concrete with discrete reinforcement. *Building and Reconstruction*. 2023; (3): 131–139. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-131-139>

4. Petropavlovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S., Buryanov A.F. Assessment of the possibility of using hydraulic ash as a component of dry building mixtures. Part 1. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023; 4: 73–79. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-73-79>

5. Velichko E.G., Shumilina Yu.S. To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2): 235–243. DOI:10.22227/1997-0935.2020.2.235-243 (Rus.).

6. Filimonova Yu.S., Velichko E.G. Research of complex modification of heavy concrete. *Building and Reconstruction*. 2021; (4): 107–112. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112>

7. Tkach E.V., Temirkanov R.I. Improving the physico-mechanical properties of modified concrete based on the use of chemically activated micro-silica with micro-reinforcing fiber. *Building and Reconstruction*. 2020; (2): 123–135. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-88-2-123-135>

8. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A. Influence of the additive “microsilica-polycarboxylate superplasticizer” on cement hydration, structure and properties of cement stone. *Cement and its Applications*. 2013; 2: 114–118. (In Russ.)

9. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Ivanov A.A. Optimization of the composition of hydraulic concrete using composite binders. *Engineering and technology of silicates*. 2023; V. 30. No. 4: 350–356. (In Russ.)

10. Aleksandrova O.V., Nguyen D.V.K., Bulgakov B.I., Petropavlovskaya V.B. The influence of quartz powder and mineral additives on the properties of high strength concrete. *Bulletin of the Volga State Technological University. series: materials. designs. technologies*. 2020; 3: 7–15. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.7>

11. Urkhanova L.A., Ivanov A.A., Lhasaranov S.A. Study of the influence of finely dispersed additives on the properties of composite binders for hydraulic concrete. *ESSUTM Bulletin*. 2023; 2 (89): 80–89. (In Russ.)

12. Urkhanova L.A., Lhasaranov S.A., Danzanov D.V. Synthesis of an ultradispersed additive obtained by hydrolysis of Portland cement for modification of cement stone. *Cement and its Applications*. 2022; 4: 52–56. (In Russ.)

13. Tomilov A.P. Electrochemical activation – a new direction in applied electrochemistry. *Life and Safety*. 2002; 3: 302–307.

14. Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., Leon, N., Sanchez-Espinosa, E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2018; 165: 93–103.

15. Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems. *Cement and Concrete Research*. 1990; 20. no 5: 783–794.

16. Roberts L.R., Grace W.R. Microsilica in concrete. *Materials Science of Concrete*. 1989; 3: 197–222.

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Ткач Е.В. Концептуализация, валидация. Методология, ресурсы. Редактирование.

Бурьянов А.Ф. Методология, исследования, ресурсы, подготовка первоначального проекта, обзор и редактирование.

Филимонова Ю.С. Методология, исследования, ресурсы, курирование данных, подготовка первоначального проекта, обзор и редактирование.

Шусев Г.А. Выполнение эксперимента и обработка его результатов, выполнение обзора литературных источников.

CONTRIBUTIONS CO-AUTHORS

E.V. Tkach Conceptualization, validation. Methodology, resources. Editing.

A.F. Buryanov Methodology, research, resources, preparation of the initial draft, review and editing.

Filimonova Yu.S. Methodology, research, resources, data curation, preparation of the initial draft, review and editing.

G.A. Shusev Carrying out the experiment and processing its results, conducting a review of literary sources.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ткач Евгения Владимировна – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры «Градостроительство» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, г. Москва, Ярославское ш., д.26.)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>,

SPIN-код: 4298-0045,

e-mail: ev_tkach@mail.ru

Бурьянов Александр Федорович – д-р техн. наук, доц., проф.-конс. кафедры «Строительное материаловедение» Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, г. Москва, Ярославское ш., д.26.)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>,

SPIN-код: 8551-8324,

e-mail: rga-service@mail.ru

Филимонова Юлия Сергеевна – канд. техн. наук, доц. кафедры «Промышленное, гражданское и подземное строительство» Московского политехнического университета (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38.)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3793-8433>,

SPIN-код: 3217-1850,

e-mail: JuliaS06@mail.ru

Шусев Георгий Александрович – аспирант кафедры «Дорожно-строительные материалы» Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ) (125319, г. Москва, Ленинградский пр., 64.)

SPIN-код: 8294-1047,

e-mail: shusev.madi@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Evgenia V. Tkach – Dr. of Sci. (Eng.), Professor Department of “Urban Planning” of the National Research Moscow State Construction University (Yaroslavlsh, 26, Moscow, 129337).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2132-4971>,

SPIN-code: 4298-0045,

e-mail: ev_tkach@mail.ru

Alexander F. Burjanov – Dr. of Sci. (Eng.), Professor of the Department of “Construction Materials Science” of the National Research Moscow State Construction University (Yaroslavskoe sh, 26, Moscow, 129337).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>,

SPIN-code: 8551-8324,

e-mail: rga-service@mail.ru

Yulia S. Filimonova – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Industrial, Civil and Underground Construction Department of Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, 107023).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3793-8433>,

SPIN-code: 3217-1850,

e-mail: JuliaS06@mail.ru

Georgiy A. Shusev – postgraduate student of the department “Road-building materials” of Moscow Automobile and Road Engineering University. Materials Department of Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI) (Leningradsky pr., 64, Moscow, 125319).

SPIN-code: 8294-1047,

e-mail: shusev.madi@yandex.ru