

Е.В. ТКАЧ¹, Г. ШУСЕВ², Г.М. РАХИМОВА³, М.А. РАХИМОВ³¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия³Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г.Караганда, Республика Казахстан

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация. В связи с постоянно растущими требованиями к качеству и надежности бетонных конструкций, в частности для строительства тоннелей, ставится задача разработки модифицированных бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В данном исследовании рассматриваются вопросы, связанные с модификацией состава тяжелого бетона с использованием комплексной химической добавки, включающей в своем составе суперпластификатор совместно с водорастворимой полимерной добавкой Полидон-А. Установлено, что процесс действия химической активации частиц метакеолина 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 (воластонит), являются актуальными. Целью исследования было установить положительное действие процесса активации метакеолина с комплексным модификатором совместно с микроармирующим компонентом на модифицирование структуры тяжелого бетона для повышения прочностных и гидрофизических свойств. Объектом исследования являлся модифицированный тяжелый бетон на основе активированного метакеолина с комплексным модификатором (суперпластификатор + Полидон-А) совместно с микроармирующим компонентом для бетонных конструкций тоннелей.

Результаты исследования: Установлено положительное влияние комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакеолином, предварительно активированным щелочной средой с $pH=10$ с модификатором и воластонитом, позволяющее повышать прочностные и гидрофизические характеристики: прочность на сжатие в возрасте 28 суток составила 68,6 МПа в сравнении с контрольным составом – 39,4 МПа; водопоглощение – 2,4%; марка по водонепроницаемости – W14, что дает возможность применять данный состав на практике для получения строительных изделий и конструкций с заданными характеристиками, эксплуатирующихся в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды, в частности, для конструкций тоннелей.

Ключевые слова: конструкции тоннелей, активация метакеолина, комплексный модификатор, физико-механические свойства, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации

E.V. TKACH¹, G. SHUSEV², G.M. RAKHIMOVA³, M.A. RAKHIMOV³¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia³Karaganda Technical University, Kazakhstan

MODIFIED HEAVY CONCRETE FOR TUNNEL STRUCTURES WITH INCREASED OPERATIONAL PROPERTIES

Abstract. The increasing demands for the quality and reliability of concrete structures, particularly in tunnel construction, necessitate the development of modified concretes with enhanced operational characteristics. This study examines the modification of heavy concrete using a complex chemical additive, comprising a superplasticizer and a water-soluble polymer additive (Polidon-A). The research reveals that the activation process of metakaolin particles is insufficiently studied. Therefore, the investigations presented here, which aim to improve operational characteristics through the pre-treatment of metakaolin in an alkaline environment (pH=10) with a micro-reinforcing component (wollastonite), are highly relevant. The study's objective is to establish the positive effect of metakaolin activation with a complex modifier and a micro-reinforcing component on the modification of heavy concrete's structure to enhance its strength and hydrophysical properties. Object: Modified heavy concrete based on activated metakaolin with a complex modifier (superplasticizer + Polidon-A) and a micro-reinforcing component for concrete tunnel structures.

Research results: The study demonstrates the positive impact of complex modification on the properties of heavy concrete. This is achieved by reducing the cement content (binder) and replacing it with metakaolin, which is pre-activated in an alkaline environment (pH=10) with a modifier and wollastonite. This allows for an increase in strength and hydrophysical characteristics: the compressive strength at 28 days was 68.6 MPa, compared to 39.4 MPa for the control mixture; water absorption was 2.4%; and the waterproofing grade was W14. This makes it possible to use this composition in practice for the production of building products and structures with specified characteristics, operating under conditions of increased load and aggressive environment, in particular, for tunnel structures.

Keywords: tunnel structures, metakaolin activation, complex modifier, physico-mechanical properties, hydrophysical properties, severe operating conditions.

1. Введение

Постоянное увеличение нагрузки на тоннельные конструкции, интенсивное движение автотранспортных средств через них, а также проблема, связанная с короткими межремонтными сроками, влияет на их износ и повреждения. В связи с этим целесообразно использовать железобетонные конструкции, которые обладают повышенными эксплуатационными характеристиками: по прочности, гидрофизическим свойствам, трещиностойкости, что в конечном счете позволяет увеличивать срок их службы [1, 2].

Одним из методов увеличения срока службы конструкций тоннелей является увеличение прочности бетона, которого можно достичь с помощью применения химических современных добавок, наполнителей специального назначения, пропитки и обработки готовых изделий полимерными растворами. При этом необходимо проводить анализ применяемых материалов и конструкций, применять ресурсосберегающие технологии строительства [3-10].

Использование добавок является обязательным для получения высокопрочного бетона. В частности, минеральные наполнители улучшают зерновой состав и микроструктуру цементного камня, повышают трещиностойкость бетона, а пластифицирующие добавки снижают водопотребность.

В цементных бетонах различного назначения применяют высокодисперсные тонкомолотые минеральные добавки, содержащие SiO_2 . К таким добавкам можно отнести микрокремнезем, золу, метакеолин и т.д. Авторы статьи отмечают [11], что метакеолин является более перспективным материалом в сравнении с дорогостоящим микрокремнеземом. Исследования на прочность с использованием метакеолина показали улучшение механических характеристик бетона, а также устойчивость к химическим воздействиям. Оптимальной дозировкой авторы считают диапазон от 10 до 15% для достижения высокой скорости развития прочности на сжатие, что является следствием более высокой скорости гидратации [12]. Опытными исследованиями [13] установлен оптимальный диапазон содержания метакеолина в количестве 5-20% от массы цемента. При этом известно, что добавки минерального происхождения необходимо использовать в комплексе с водоредуцирующими добавками для снижения водоцементного отношения и обеспечения необходимой подвижности смеси [14-17].

Также на данный момент активно исследуется вопрос применения дисперсного армирования в бетоне. В качестве дисперсного материала используются различные виды фибр с разными размерами и формами. Авторы утверждают, что при использовании фибр и различных волокон возможно увеличение прочности бетона [18, 19]. В одной из работ было исследовано взаимодействие метаксаолина со стальной фиброй, где авторы заявляют о повышении прочности на сжатие и растяжение от 12,5% до 28,6% в зависимости от количества вводимой добавки [20]. Нами был проведен поиск и анализ информации по использованию более дешевого варианта фибры. Одним из таких вариантов является волластонитовая фибра, которая является природным материалом с волокнистой структурой. Установлено, что при замене цемента волластонитом до 15% повышается прочность и долговечность, а также ведет к снижению пористости и уплотнению микроструктуры бетона [21].

Также было изучено использование и влияние электролизованной воды на улучшение прочностных характеристик бетона. Исследования [22] 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 сравнению с обычным раствором на водной основе на ранней стадии отверждения.

2. Модели и методы

К смеси для железобетонных конструкций тоннелей предъявляются высокие требования. Согласно рекомендациям СП 122.13330.2023 «СНиП 32-04-97 Тоннели железнодорожные и автодорожные» по рациональным составам для бетона конструкций тоннелей использовался портландцемент, в котором суммарное содержание трехкальциевого и двухкальциевого силикатов ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) составляло не менее 2/3 массы клинкера, а массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния (CaO/SiO_2) - не менее 2,0. Содержание оксида магния (MgO) в клинкере не более 5% массы клинкера. Допускается содержание оксида магния до 6% массы клинкера при условии положительных результатов испытаний цемента из данного клинкера на равномерность изменения объема по ГОСТ 30744. В качестве крупного заполнителя применялся щебень из плотных горных пород со средней плотностью до 3000 кг/м^3 в соответствии с требованиями по ГОСТ 8267. В качестве мелкого заполнителя применялся природный песок с истинной плотностью 2560 кг/м^3 в соответствии с требованиями ГОСТ 8736. Вода, применяемая при изготовлении бетонных образцов соответствовала требованиям ГОСТ 23732. В таблице 1 представлены материалы, которые использовались для дальнейших исследований.

Таблица 1 – Материалы для получения модифицированного тяжелого бетона

№	Наименование материалов	Вид (марка, фракция)	Производитель
1	Портландцемент	ЦЕМ I 42,5Н	АО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп»
2	Песок		ООО «Агат»
3	Щебень	фр.5-20	ООО «ДорНерудРесурс»
4	Щебень	фр.20-40	ООО «ДорНерудРесурс»
5	Добавка метаксаолин	ВМК-45	ООО "СИНЕРГО"
6	Добавка суперпластификатор	Поликарбоксилатный	«Sunbo PC-1021» (Китай)
7	Полимерная добавка	Полидон-А	ООО «Оргполимерсинтез»
8	Добавка коротковолокнистого волластонита		Тырныаузское месторождение (Кабардино-Балкария)

В качестве активной минеральной добавки использовали метаксаолин (МТК), особенностью которого является его способность связывать большое количество свободной

известны в форме стабильных кристаллогидратов. Элементный анализ частичек образца МТК представлен на рисунке 1.

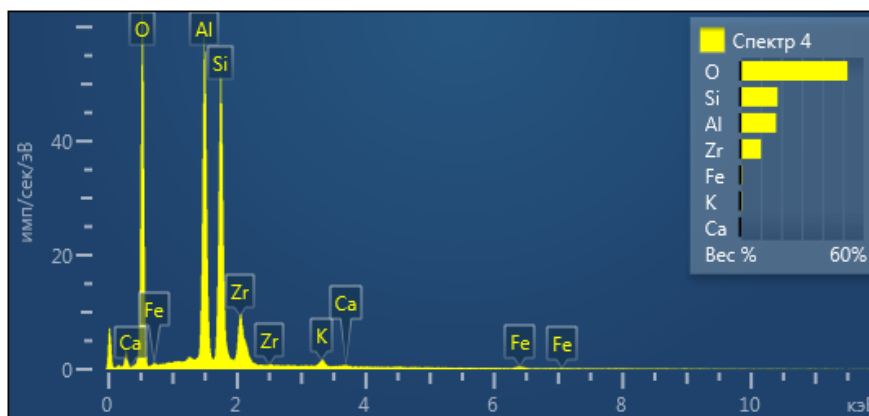


Рисунок 1 – Элементный анализ метаксаолина

Элементный анализ добавки показал преобладание в ее составе SiO_2 и Al_2O_3 в количестве 52-54% и 40-43% соответственно. Также установлено незначительное содержание химических соединений от 0,1 до 2%, таких как Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O . Высокое содержание оксида кремния позволяет сделать вывод, что метаксаолин обладает высокой химической активностью. В таблице 2 представлены основные физические характеристики метаксаолина.

Таблица 2 – Физические характеристики метаксаолина

№	Физические характеристики	Показатель
1	Плотность	2,6 кг/см ³
2	Распределение частиц d_{50} d_{95}	3,4-4,5 мк 12-18 мк
3	Удельная поверхность (Blaine)	23000 см ² /г
4	Удельная поверхность (BET)	18 м ² /г
5	Цвет	Кремевый

Были проведены исследования микроструктуры МТК, ниже на рисунке 2 изображены фотографии микроструктуры МТК, проведенные на микроскопе Tescan MIRA. Слоистая микроструктура метаксаолина придает материалам на его основе свойство пластичности. Светлые участки содержат более тяжелые элементы по сравнению с основной матрицей. Как показал спектр рентгеноспектрального анализа, в этих участках (светлых) наряду с указанными элементами обнаруживается цирконий.

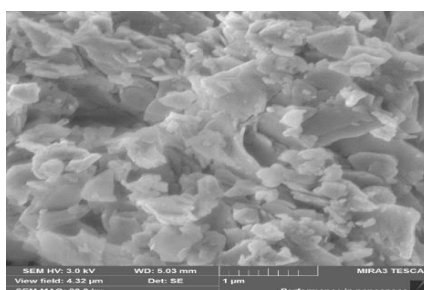


Рисунок 2 – Микроструктура метаксаолина

Совместно с метаксаолином использовалась суперпластифицирующая добавка (таблица 3) на основе эфира поликарбоксилата «Sunbo PC-1021». Добавление пластификатора позволяет увеличить подвижность бетонной смеси, снизить количество воды, сэкономить количество цемента без потери прочности бетона, увеличить адгезию.

Таблица 3 – Характеристики добавки суперпластификатора «Sunbo PC-1021»

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 So4 (%):	2.6
CI (%):	≤ 03%
Рекомендуемая дозировка: (в отношении веса binder)	0.16% ~ 0.3%
Воды Передаточное отношение	≥ %

Для повышения гидрофобных свойств в исследованиях использовалась полимерная добавка Полидон-А, характеристики которой представлены в таблице 4. Добавка Полидон-А представляет собой водный раствор поливинилпирролидона, применяющийся в пищевой промышленности как загуститель, осветлитель, стабилизатор, а также диспергирующий агент. Это обусловлено свойствами поливинилпирролидона и его структурой. Внешне она является порошкообразным соединением белого или желтоватого цвета и отличается гигроскопичностью. По своей природе это синтетический полимер, то есть не природного происхождения. Растворяется в воде и полярных растворах.

Таблица 4 – Характеристики добавки «Полидон-А»

Молекулярная формула:	C_6H_9NO
Масса молярная:	2.500 – 2.500.000 г/моль
Плотность:	1200 кг/м ³
Температура плавления:	150-180 °C

В качестве дисперсного наполнителя применяли волластонит, который представляет собой минерал из класса силикатов, природный силикат кальция подкласса пироксеноидов группы цепочечных силикатов с формулой $Ca[SiO_2]$. Цвет волластонита белый с сероватым или буроватым оттенком. Волластонит в зависимости от длины волокон делится на: длинно- и коротковолокнистый, обладающий микроармирующим эффектом. На рисунке 3 представлены внешний вид волластонита с шероховатой поверхностью (рис. 3а) и его игольчатая микроструктура (рис. 3б), которая обладает хемосорбционными свойствами.

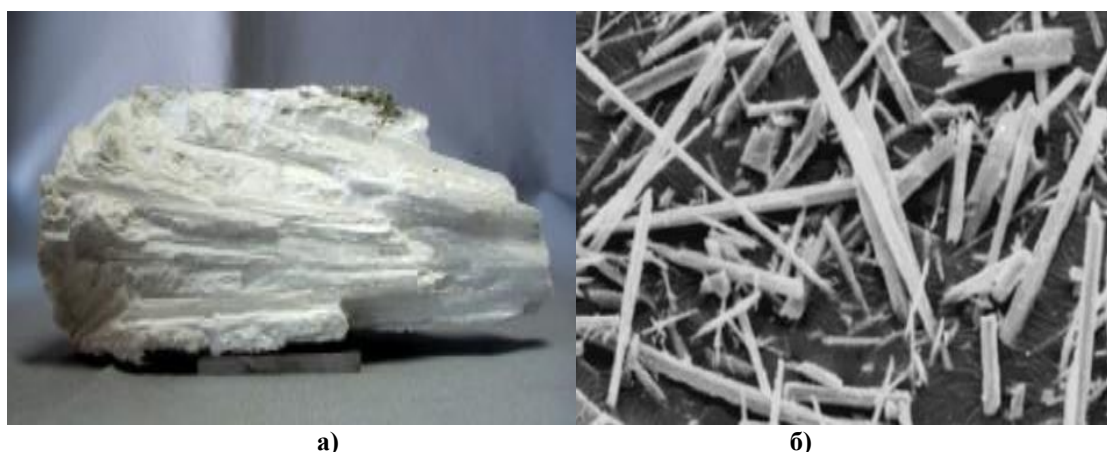


Рисунок 3 – Волластонит: а) внешний вид, б) игольчатая микроструктура

Далее были разработаны составы бетонных смесей модифицированного тяжелого бетона с расходом компонентов, представленные в таблице 5.

Таблица 5 – Составы бетонных смесей модифицированного тяжелого бетона с расходом компонентов

Материалы	Составы бетонной смеси, кг/м ³				
	1 конт	2	3	4	5
Портландцемент	416	366	366	366	366
Метакаолин ВМК-45	-	50	50	50	50
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

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 [19-20,22], что процессы гидролиза и гидратации будут происходить интенсивнее за счет введения предварительно активированной воды.

3. Результаты исследования и их анализ

Для дальнейших исследований из полученных составов бетонных смесей были изготовлены образцы: кубы с размером ребра 10х10х10см и балочки для испытания на изгиб 30х10х10 см. Образцы твердели при нормальных условиях 28 суток, затем были проведены испытания в аккредитованной лаборатории на сертифицированном современном оборудовании.

Результаты физико-механических испытаний модифицированных бетонных смесей и бетонов на их основе представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты исследований бетонных смесей и бетонов

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

Продолжение таблицы 6

Средняя плотность бетона, кг/м ³	2362	2388	2389	2392	2416
Водопоглощение по массе, %	3,5	3,1	2,9	2,65	2,4
Гидрофизические свойства, МПа/ Марка	0,8/W8	1,0/W10	1,2/W12	1,2/W12	1,4/W14

Анализ результатов исследований (таблица 6) показал, что при замене во 2 составе части бездобавочного портландцемента на активированный метакраолин (12%) (активированная вода, предварительно обработанная в электролизере) происходит увеличение прочности 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+12%МТКакт+0,4%СП) на сжатие с 43,8 МПа до 54,7 МПа и на растяжение при изгибе – с 5,4 МПа до 6,0 МПа в сравнении с составом 2. Далее при добавлении 0,3% от массы вяжущего Полидон-А (состав 4: ПЦ + 12% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А) наблюдается увеличение прочности бетона на сжатие с 54,7 МПа до 60,5 МПа и на растяжение при изгибе – с 6,0 МПа до 6,5 МПа в сравнении с составом 3. Наличие в составе 5 (ПЦ + 12% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит) дисперсного наполнителя – волластонита привело росту показателя прочности бетона на сжатие с 60,5 МПа до 68,6 МПа и на растяжение при изгибе – с 6,5 МПа до 6,9 МПа в сравнении с составом 4. Это связано с тем, что волластонит обладает хорошим сцеплением с цементным камнем, снижая пористость цементного камня и тем самым обеспечивая эффективное микроармирование бетона.

Установлено также положительное влияние комплексного модифицирования на гидрофизические свойства. Состав бетона с активированным метакраолином (состав 2: ПЦ + 12% МТКакт) снижает водопоглощение с 3,5% до 3,1% и повышает марку водонепроницаемости на 1 ступень в сравнении с бездобавочным (состав 1). При добавлении суперпластификатора «Sunbo PC-1021» (состав 3: ПЦ+12%МТКакт+0,4%СП) показатель водопоглощения снижается с 3,1% до 2,9% и повышается марка водонепроницаемости на 1 ступень. При добавлении Полидон-А (состав 4: ПЦ + 12% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А) водопоглощение снижается с 2,9% до 2,65%. Добавление дисперсного наполнителя – волластонита (состав 5: ПЦ + 12% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит), также привело к снижению водопоглощения с 2,65% до 2,4% и повышению марки водонепроницаемости на одну ступень в сравнении с составом 4. Комплексное модифицирование (состав 5) снизило водопоглощение с 3,5% до 2,4% и повысило марку водонепроницаемости на 3 ступени в сравнении с контрольным (состав 1).

Полученные результаты комплексного модифицирования бетонной смеси (ПЦ + 12% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит) согласуются с данными работ [16-22] и свидетельствуют о возможности проектирования высокопрочных бетонов, в том числе и для конструкций тоннелей, где одним из главных показателей являются прочностные и гидрофизические свойства.

4.Выводы

Решение проблемы получения эффективного бетона для конструкций тоннелей с улучшенными эксплуатационными свойствами может быть осуществлено за счет модифицирования вяжущего в составе с активированным метакраолином совместно с комплексным модификатором смеси (ПЦ +12% МТКакт + 0,4% СП + 0,3% Полидон-А + 2% волластонит).

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // *Строительные материалы*. – 2010. – № 11. – С. 6-8.
2. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // *Magazine of civil engineering*. – 2020. – № 1 (93). – С. 27-34.
3. Томилов А. П. Электрохимическая активация — новое направление прикладной электрохимии // *Жизнь и безопасность*. – 2002. – №3. – С. 302-307
4. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete // *Advances in civil engineering materials*. – 2019. – N. 3. – P. 153-172.
5. Kherraf L., Abdelouehed A., Belachia M., Hebhouh H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes // *International review of civil engineering*. – 2018. – N. 1(9). – P. 31-39.
6. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // *Строительные материалы*. – 2011. – №2. – С.47-51.
7. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TiO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites // *Displays*. – 2014. – V. 35. – N. 4. – P. 220-226.
8. Isaeva YU.V., Velichko E.G., Kasumov A.SH. Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components, *Construction Materials*, 8, 84-87(2015) DOI: 10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88.
9. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kiziniyevich O., Kiziniyevich V., Gordina A.F. Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramics, *Construction Materials*. 2016. № 8. С. 20-29.
10. 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: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.
11. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // *Фундаментальные исследования*. 2014. №8-3. С. 590-595.
12. Хозин В.Г., Красникова Н.М., Морозов И.М., Хохряков О.В. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // *Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2014. – №2(28). – С.166-172.
13. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete // *Construction and building materials*. – 2019. – №. 202. – С. 58-72.
14. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Цементный бетон с улучшенными физико-механическими свойствами на основе применения активированного микрокремнезема // *Инновации и инвестиции*. 2019. №10. С. 289-292.
15. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. №4 (96). С.107-109. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112.
16. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Мамаев Н.А. Влияние добавки "микрокремнезем-поликарбоксилатный суперпластификатор" на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня // *Цемент и его применение*. – 2013. – №2. – С. 114-118.
17. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and gfrp bars // *Composite structures*. – 2019. – N. 211. – P. 1-12.
18. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium // *Construction and building materials*. – 2017. – V. 154. – P.191-203.
19. Бахир В.М., Задорожний Ю.Г., Леонов Б.И., Паничева С.А., Прилуцкий В.И. Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии. - М.: «Маркетинг Саппорт Сервисиз». – 2005. – 176 с.
20. Петрушанко И. Ю., Лобышев В. И. Физико-химические свойства водных растворов, полученных в мембранном электролизере // *Биофизика*. – 2004. – №1 (49). – С. 22 – 31.

21. Козин А.В., Федюк Р.С., Ильинский Ю.Ю., Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Мохаммад Али Мосаберпанах Влияние волластонита на механические свойства бетона // Строительные материалы и изделия. 2020, Том 3, №5. С. 34-42.
22. 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.

REFERENCES

1. Oreshkin D.V. Problems of Building Materiology and Production of Building Materials. *Construction materials*. – 2010. no. 11. pp. 6-8.
2. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of civil engineering*, 2020, vol. 93, no. 1, pp. 27-34.
3. Tomilov AP Elektrohimicheskaya aktivaciya — novoe napravlenie prikladnoj elektrohimii [Electrochemical activation - a new direction of applied electrochemistry]. *ZHizn' i bezopasnost'*, 2002, no. 3, pp. 302-307.
4. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete. *Advances in civil engineering materials*, 2019, no. 3, pp. 153-172.
5. Kherraf L., Abdelouehed A., Belachia M., Hebhouh H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes. *International review of civil engineering*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 31-39.
6. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Buryanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikaciya cementnyh betonov mnogoslojnymi uglerodnymi nanotrubkami [Modification of cement concretes with multilayer carbon nanotubes] . *Stroitel'nye materialy*, 2011, no. 2, pp. 47-51.
7. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TIO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites. *Displays*, 2014, vol. 35, no. 4, pp. 220-226.
8. Isaeva YU.V., Velichko E.G., Kasumov A.SH. Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components. *Construction Materials*, 8, 84-87(2015) DOI: 10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88.
9. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kiziniyevich O., Kiziniyevich V., Gordina A.F. Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramics. *Construction Materials*. 2016. no. 8. pp. 20-29.
10. Velichko E.G., SHumilina YU.S. To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties. *Vestnik MGSU*, 15(2), 235-243(2020). DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.
11. Soloviev V.I., Tkach E.V., Serova R.F., Tkach S.A., Toimbaeva B.M., Seydinova G.A. Research of cement stone porosity modified by complex organic mineral modifiers. *Fundamental research*. 2014, no. 8-3, pp. 590-595. In Rus.
12. Khozin V.G., Krasnikova N.M., Morozov I.M., Khokhryakov O.V. Optimization of composition of cement concrete for airfield coverings. *News of the KSUAE*, 2014, vol. 28, no. 2. pp. 166-172. In Rus.
13. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and building materials*. – 2019. – N. 202. – P. 58-72.
14. Tkach E.V., Temirkanov R.I. Cement concrete with improved physical and mechanical properties based on the use of activated silica fume. *Innovations and investments*. 2019 N. 10, 289-292.
15. Filimonova YU.S., Velichko E.G. Study of the complex modification of heavy concrete // *Construction and reconstruction*. 4 (96), 107-109(2021). DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112.
16. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A. Influence of the polycarboxylate superplasticizer - microsilica additive on the hydration, structure and properties of cement. *Cement and its application*, 2013, no. 2, pp. 114-118. In Rus.
17. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. *Composite structures*, 2019, no. 211, pp. 1-12.
18. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and building materials*, 2017, vol. 154, pp. 191-203.
19. Bakhir V.M., Zadorozhny Yu.G., Leonov B.I., Panicheva S.A., Prilutsky V.I. Elektrohimicheskaya aktivaciya: universal'nyj instrument zelenoj himii [Electrochemical activation: a versatile tool for green chemistry]. Moscow, Marketing Support Services Publ., 2005, 176 p.
20. Petrushanko I. Yu., Lobyshev V.I. Physical and chemical properties of aqueous solutions obtained in a membrane electrolyzer. *Biophysics*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 22 -31. In Rus.

21. Kozin A.V., Feduk R.S., Ilinskiy Yu.Yu., Yarusova S.B., Gordienko P.S. Mohammad Ali Mosaberpanah Effect of wollastonite on the mechanical characteristics of concrete. *Construction materials and products*. 2020, 3 (5). pp. 34-42.
22. 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. *Construction and reconstruction*. 2020. N. 2 (88). pp. 123-135.

Информация об авторах:

Ткач Евгения Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Градостроительства
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Шусев Георгий

ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
г. Москва, Россия,
аспирант кафедры Дорожно-строительных материалов
E-mail: shusev.madi@yandex.ru

Рахимова Галия Мухамедиевна

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» г. Караганда, Республика Казахстан,
Кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры Строительные материалы и технологии
E-mail: g.rakhimova@kstu.rz

Рахимов Мурат Аманжолович

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» г.Караганда, Республика Казахстан,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Строительные материалы и технологии
E-mail: m.rakhimov@kstu.rz

Information about authors:

Tkach Evgeniya V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor of technical sciences, professor, professor of the department urban planning.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Shusev Georgy A.

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia,
Postgraduate student of the Department of Road Construction Materials
E-mail: shusev.madi@yandex.ru

Rakhimova Galia M.

Non-profit joint stock company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University» Karaganda, Republic of Kazakhstan,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technology
E-mail: g.rakhimova@kstu.rz

Rakhimov Murat A.

Non-profit joint stock company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University» Karaganda, Republic of Kazakhstan,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technologies
E-mail: m.rakhimov@kstu.rz