

Е.В. ТКАЧ¹, Ю.С. ФИЛИМОНОВА², Г.А. ШУСЕВ³, А.Л.ШЕИН⁴^{1,3}ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,
г. Москва, Россия²ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия⁴ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва, Россия

УЛУЧШЕНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННОГО ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА, РАБОТАЮЩЕГО В СУРОВЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация. К бетону для изготовления конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации устанавливают требования, отличные от требований для бетонов, применяемых в промышленном и гражданском строительстве. Такие специальные требования обусловлены, прежде всего, сложными условиями эксплуатации, в частности для тоннельных конструкций. Под воздействием целого комплекса агрессивных факторов окружающей среды данный вид конструкций частично или полностью разрушается, что в свою очередь снижает их проектный срок службы. Поэтому необходимым условием для повышения их долговечности является создание модифицированной плотной структуры бетона с улучшенными гидрофизическими свойствами: низкие показатели водопоглощения, капиллярного подсоса, водонепроницаемости и высокие показатели морозостойкости. В настоящее время имеются разработки по усилению и защите таких конструкций материалами с повышенной степенью сопротивляемости агрессивным факторам, например, полимерными композициями. Однако, полимербетоны не нашли широкого распространения из-за их дефицитности и высокой стоимости, поэтому на сегодняшний день основным строительным материалом при возведении тоннельных конструкций остаются бетон и железобетон. Таким образом, получение тяжелых бетонов, работающих в суровых условиях с повышенными эксплуатационными свойствами путем модифицирования его структуры является актуальной задачей. Целью исследования является установить положительное действие комплексного модифицирования совместно с микроармирующим компонентом на гидрофизические свойства тяжелого бетона. Объект исследования представляет собой тяжелый бетон с комплексным модификатором (суперпластификатор+полимер+метакаолин), армированный волластонитом для тоннельных конструкций. Установлено положительное влияние комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакаолином, позволяющее повышать гидрофизические характеристики: водопоглощение – 1,8%; марка по водонепроницаемости – W14, с достаточным запасом прочности и морозостойкости (F более 600 циклов), что дает возможность применять данный состав на практике для получения строительных конструкций с заданными характеристиками, эксплуатирующихся в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды, в частности, для конструкций тоннелей.

Ключевые слова: конструкции тоннелей, агрессивные факторы окружающей среды, комплексный модификатор, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации.

E.V. TKACH¹, YU.S. FILIMONOVA², G.A. SHUSEV³, A.L. SHEIN⁴^{1,3}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia⁴D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

IMPROVEMENT OF HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF MODIFIED HEAVY-DUTY CONCRETE WORKING IN SEVERE OPERATING CONDITIONS

Abstract. Requirements for concrete used in the manufacture of structures operating in harsh operating conditions are different from those for concrete used in industrial and civil construction. Such special requirements are primarily due to difficult operating conditions, in particular for tunnel structures. Under the influence of a whole range of aggressive environmental factors, this type of structure is partially or completely destroyed, which in turn reduces their design service life. Therefore, a necessary condition for increasing their durability is the creation of a modified dense concrete structure with improved hydrophysical properties: low rates of water absorption, capillary suction, water resistance and high frost resistance. Currently, there are developments in strengthening and protecting such structures with materials with an increased degree of resistance to aggressive factors, for example, polymer compositions. However, polymer concretes have not found wide distribution due to their scarcity and high cost, so today the main building material in the construction of tunnel structures remains concrete and reinforced concrete. Thus, obtaining heavy concretes operating in harsh conditions with increased performance properties by modifying its structure is an urgent task. Objective: To establish the positive effect of complex modification together with a micro-reinforcing component on the hydrophysical properties of heavy concrete. Object: heavy concrete with a complex modifier (superplasticizer + polymer + metakaolin), reinforced with wollastonite for tunnel structures. Research 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, which allows improving the hydrophysical characteristics: water absorption - 1.8%; water resistance grade - W14, with a sufficient margin of safety and frost resistance (F more than 600 cycles), which makes it possible to use this composition in practice to obtain building structures with specified characteristics operating under high loads and an aggressive environment, in particular, for tunnel structures

Keywords: tunnel structures, aggressive environmental factors, complex modifier, hydrophysical properties, harsh operating conditions.

Введение

Тяжелый бетон является ключевым материалом при возведении тоннелей, обеспечивая высокую надежность и длительный срок эксплуатации сооружений. Для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик — таких как прочность от 50 МПа и выше, плотность до 2500 кг/м³, водонепроницаемость W10 и стойкость к агрессивным средам — применяют различные модификаторы, усиливающие структуру и долговечность бетона [1-3]. Одним из важнейших направлений совершенствования бетонных смесей является введение химико-минеральных добавок, которые позволяют улучшить физико-механические показатели бетона [4-7] и сократить расход ресурсов, что особенно актуально в современных технологических условиях. Существенное внимание уделяется использованию активных минеральных добавок [7-12], таких как микрокремнезем, зола и метакраолин, которые способствуют формированию более плотной и устойчивой структуры бетона. Исследования показывают, что добавление метакраолина в количестве 10-15% от массы вяжущего улучшает характеристики бетона, ускоряя гидратацию и повышая его прочность. Современные разработки также акцентируют внимание на применении дисперсного армирования различными типами фибры [13-16], что дополнительно усиливает структуру и прочность бетона, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам и износу. Совместное использование активных минеральных добавок и суперпластификаторов представляет значительный научный интерес, так как оно позволяет заметно улучшить свойства тяжелого бетона. Такой подход к модификации состава способствует увеличению прочности бетона при сжатии до 150 МПа, а также повышает его водонепроницаемость и стойкость к образованию трещин.

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 для обеспечения долговечности и надежности конструкций.

Модели и методы исследований

Экспериментальные исследования проводились в строгом соответствии с общепринятыми стандартными методиками, образцы подготавливались посерийно с соблюдением всех параметров выдержки и хранения до испытания. Общая схема исследования включала в себя логически взаимосвязанные этапы современного научного метода, в частности, концептуального планирования эксперимента с выделением наиболее важных исследуемых характеристик, определения необходимых свойств исходных компонентов, расчёта требуемых дозировок каждого компонента.

Химический и минеральный состав цемента определяли при помощи рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализов, результаты которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический и минеральный состав портландцемента

Марка цемента	Химический состав, мас. %						
	Na ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂
ЦЕМ I 42,5Н	0,83	0,6	0,88	3,9	64,1	5,89	23,8
	Содержание кристаллических фаз в клинкере, мас. %						
	C ₄ AF (4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)		C ₃ A (3CaO·Al ₂ O ₃)		C ₂ S (2CaO·SiO ₂)		C ₃ S (3CaO·SiO ₂)
	11,46		6,97		11,5		60,92

Дисперсный состав, технологические и прочностные характеристики цемента определяли с использованием ситового анализа, пикнометрического метода, определения прочности на изгиб и сжатие в соответствии со стандартными методиками. Для определения механической прочности изготавливали образцы-балочки размером 4×4×16см из цементно-песчаного раствора с водоцементным отношением В/Ц=0,4. После изготовления образцы в формах содержали 1 сутки в ванне с гидравлическим затвором, в которой обеспечивался режим: относительная влажность воздуха не менее 90% и температура среды (20±2)°С. Через сутки образцы расформовали и затем 27 суток хранили в ванне с водой, температуру в которой контролировали в пределах (20±2)°С. По истечении срока хранения образцы-балочки вынимали из ванны с водой и не позднее, чем через 30 мин испытывали на прочность. Полученные результаты приведены в таблице 2. По результатам испытаний установлено, что цемент соответствует требованиям стандарта по нормируемым показателям: тест на равномерность изменения объема, начало схватывания цементного теста, прочности при сжатии через 2 и 28 суток.

Таблица 2 – Результаты определения характеристик портландцемента марки ЦЕМ I 42,5Н

Показатель	Требование ГОСТ 31108-2020	Фактическое значение
Остаток на сите 45 мкм, %	-	3,15
Остаток на сите 80 мкм, %	-	0,45
Нормальная густота цементного теста, %	-	26,0
Тест на равномерность изменения объема (Кольцо Ле-Шателье), расширение, мм	10	8
Удельная поверхность (по Блейну), см ² /г	-	3540
Начало схватывания, мин	не ранее 60	168
Конец схватывания, мин	-	542
Наличие признаков ложного схватывания, да/нет	нет	нет
Средняя прочность на сжатие в возрасте 2 сут., МПа	не менее 10	23,0
Средняя прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа	не менее 42,5	46,8
	не более 62,5	
Истинная плотность, кг/м ³	-	3162
Насыпная плотность, кг/м ³	-	1256

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок с модулем крупности 2,5 с размером частиц от 0,16 мм до 2,5 мм производства ООО «Агат», расположенного в Александровском районе Владимирской области.

В качестве крупного заполнителя использовали гранитный щебень производства ООО «ДорНерудРесурс», г. Саратов, соответствующий требованиям по содержанию зерен пластинчатой и игольчатой формы – 11,0 %; пылевидных, илистых и глинистых частиц – 0,8 %; марка щебня по дробимости – 1400; марка щебня по морозостойкости – 300; насыпная плотность – 1420 кг/м³; удельная эффективная активность радионуклидов ($A_{эфф}$) – 92 Бк/кг; марка щебня по истираемости И-1. Максимум в распределении щебня по размерам приходился на 20 мм. Исследуемый заполнитель относится к среднезернистому типу кристаллической структуры. Для затворения бетонной смеси использовалась вода. Вода не содержит сульфатов более 2700 мг/л (в пересчете на SO₄), всех солей более 5000 мг/л, нефтяной шлам и накипь, содержание органических веществ менее 15 мг/л, pH 7,8, цвет отсутствует.

В качестве пластифицирующей добавки использовалась добавка-суперпластификатор Sunbo PC-1021 производства Sunbo (Китай), расход которой составлял 0,4% от массы вяжущего вещества, рекомендованный производителем.

В качестве водорастворимой полимерной добавки использовали добавку «Полидон-А» производства ООО «Оргполимерсинтез», г. 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·с при 25 °С, температурой плавления: 150-180 °С.

В качестве активной минеральной добавки применялся метакраолин марки ВМК-45. Метакраолин был произведен ООО «СИНЕРГО», Челябинская обл., пос. Желтинский, ул. Степная.

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 Ca[SiO₂]. Цвет волластонита белый с сероватым или буроватым оттенком. Волластонит в зависимости от длины волокон делится на: длинно- и коротковолокнистый, обладающий микроармирующим эффектом.

В табл. 3 приведены составы тяжелого бетона на которых проводились дальнейшие исследования.

Таблица 3 – Исследуемые составы модифицированного тяжелого бетона

Материалы	Расход на 1 м ³ бетонной смеси, кг/м ³				
	1 контр	2	3	4	5
ЦЕМ I 42,5Н	365	365	365	321	321
Метакраолин ВМК-45 (12%)	-	-	-	44	44
Вода	182	182	182	182	182
Щебень	987	987	987	987	987
Песок	756	756	756	756	756
Суперпластификатор Sunbo PC-1021 (0,4%)		1,46	1,46	1,46	1,46
Полидон-А (0,3 %)	-	-	1,09	1,09	1,09
Волластонит (2 %)	-	-	-	-	7,3

Результаты исследования и их анализ

Для определения эффективности взаимодействия воды с матрицей разработанного бетона и, как следствие, эффективности диффузионных процессов внутри матрицы, влияющих на разрушение структуры бетонного камня, проводилось определение пористости бетона, его водопоглощение и водонепроницаемость. 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 суток. Серия образцов для испытания составляла 3 куба плюс контрольный для каждого из составов. Водопоглощение серии образцов каждого состава определялось как среднее арифметическое значений 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 пористости 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 минут) и длительностью воздействия воды под давлением, равной 12 часам 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. 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 составила 24 часа при погружении на 1/3 высоты образцов, 24 часа при погружении на 2/3 высоты образцов и 48 часов 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 испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость бетона представлены в таблице 4. Анализ полученных данных (табл.4) показывает, что введение комплексного модификатора совместно с волластонитом (состав 5, ПЦ+(0,4%SunboPC-1021+0,3% Полидон-А+12%ВМК-45)+2%Волластонит снизило показатель водопоглощения на – 57,8%; на 37,8% снизил 2 состав ПЦ+0,4% Sunbo PC-1021); на 48,9 % – 3 состав ПЦ+ (0,4%Sunbo PC-1021+ 0,3%Полидон-А); на 53,3% – 4 состав ПЦ+(0,4%SunboPC-1021+ 0,3% Полидон-А+12%ВМК-45) в сравнении с контрольным (состав 1). Водонепроницаемость модифицированного бетона в 4 составе ПЦ+(0,4%Sunbo PC-1021+0,3%Полидон-А+ 12%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 + 12%ВМК-45)+2%Волластонит не повлияло на его водонепроницаемость.

Таблица 4 – Результаты испытаний на водопоглощение и водонепроницаемость

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

Таблица 5 – Результаты испытания бетонов при циклическом попеременном замораживании и оттаивании

Маркировка образца	Потеря массы образца, %, после циклов					K _{мрз} после циклов				
	200	300	400	500	600	200	300	400	500	600
Состав 1	1,19	2,2	4,36	-	-	0,95	0,92	0,68	-	-
Состав 2 ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021	0,36	1,09	2,1	3,3	4,88	1,02	0,98	0,95	0,87	0,84
Состав 3 ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А)	0,25	0,99	1,87	3,1	3,9	1,02	1,00	0,97	0,93	0,87
Состав 4 ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 12% ВМК-45)	0,15	0,97	1,5	1,7	1,82	1,01	1,04	0,93	0,92	0,9
Состав 5 ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021+ 0,3% Полидон-А + 12% ВМК-45) + 2% Волластонит	0,1	0,2	0,38	1,00	1,6	1,09	1,01	0,99	0,98	0,92
Примечание. K _{мрз} – отношение показателя прочности образца после испытания его морозостойкости к прочности образца материала в водонасыщенном состоянии до определения морозостойкости.										

На следующем этапе исследований определяли морозостойкость, которая зависит от структуры материала. Известно, что наличие открытых пор доступных для проникновения воды негативно сказывается на морозостойкости и долговечности строительных материалов [17-20]. Для проведения испытаний на морозостойкость применялся первый базовый метод по требованиям ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании отображены в таблице 5 и рисунке 1.

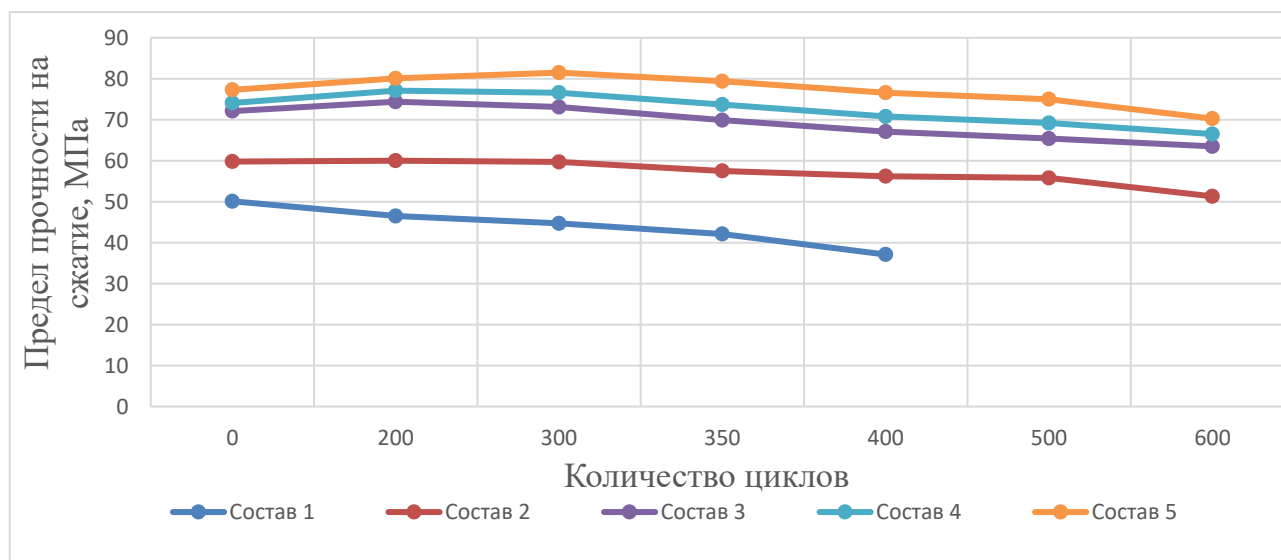


Рисунок 1 – Графическая интерпретация результатов испытаний образцов тяжелого бетона при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:

- 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 + 12% ВМК-45);
- ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021 + 0,3% Полидон-А + 12% ВМК-45) + 2% Волластонит

Результаты испытаний при циклическом попеременном замораживании и оттаивании образцов-кубов из бетона различного состава, представленных в таблице 5 и рисунке 1 показали:

- 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.

Косвенным доказательством, что комплексное модифицирование (состав 5 таблица) способствует повышению морозостойкости бетона, могут быть результаты испытания бетонов на водопоглощение до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании (рисунок 2).

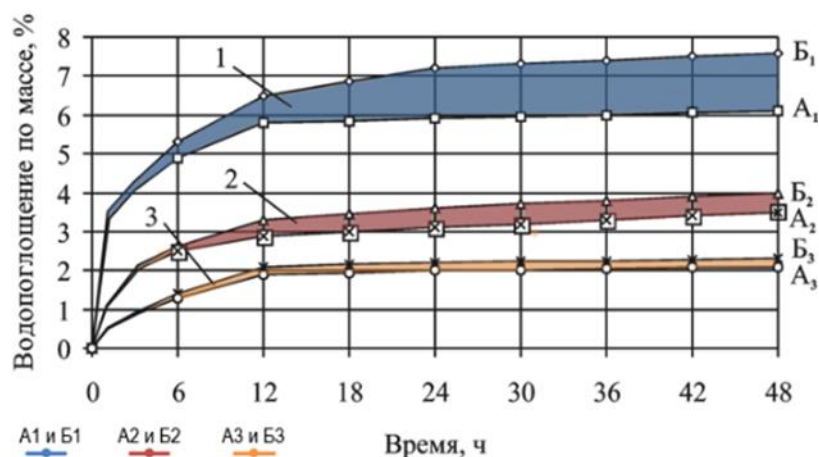


Рисунок 2 – Водопоглощение бетонов до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании:

1 – A1 и B1 – контрольный состав соответственно до и после испытания при циклическом попеременном замораживании и оттаивании;

2 – A2 и B2 – состав 2 ПЦ 0,4%Sunbo PC-1021

3 – A3 и B3 – состав 5 ПЦ+(0,4%SunboPC-1021+ 0,3%Полидон-А+12% ВМК-45)+ 2% Волластонит

Из рисунка 2 видно, что после испытания на морозостойкость (300 циклов попеременного замораживания и оттаивания) исследуемые составы бетонов имеют разное увеличение водопоглощения: прирост водопоглощения контрольного состава составил $\square$ 26%, ПЦ + 0,4% Sunbo PC-1021 $\square$ 12%, а с комплексным модификатором ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021+0,3%Полидон-А+12% ВМК-45)+2%Волластонит $\square$ 5-7%.

Экспериментально доказано улучшение гидрофизических свойств: 5 состав ПЦ + (0,4% Sunbo PC-1021+0,3%Полидон-А+12% ВМК-45)+ 2% Волластонит снизил показатель водопоглощения на – 60,9% в сравнении с контрольным (состав 1). Водонепроницаемость модифицированного бетона в 4 составе ПЦ+(0,4% SunboPC-102 + 0,3%Полидон-А+12% 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 + 12% ВМК-45)+2%Волластонит не повлияло на его водонепроницаемость. Высокую морозостойкость показали составы 4 и 5, содержащие комплексный модификатор (ПЦ + (0,4%Sunbo PC-1021+ 0,3% Полидон-А+12% ВМК-45)). При 600 циклов испытания потеря массы в составе 4 составила 1,82% и 1,6% в 5 составе соответственно. При 600 циклах испытаний снижение прочности в 4 составе на 10% и в 5 составе на 8% соответственно.

Выводы

Предлагаемое модифицирование комплексной добавкой совместно с волластонитом (ПЦ + (0,4%SunboPC-1021+0,3% Полидон-А+12% ВМК-45)+2%Волластонит)) позволяет получить тяжелый бетон высокого качества с улучшенными гидрофизическими свойствами: водопоглощение, водонепроницаемость и морозостойкость, что дает возможность рекомендовать его для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации.

Установлено улучшение гидрофизических свойств модифицированного бетона: водопоглощение снизилось на 60,9%; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным составом. После 600 циклов испытания на морозостойкость потеря массы составила только 1,5-1,8% и снижение прочности 9,1%-10,2%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Isaeva YU.V., Velichko E.G., Kasumov A.SH. Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physicaland mechanical characteristics of components, Construction Materials, 8, 84-87(2015) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88>.
5. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinieich O., Kizinieich 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.
6. Величко Е.Г., Шумилиа Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона// Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235-243. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.2.235-243>.
7. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // Строительство и реконструкция. 2021. №4 (96). С.107-109. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112>.
8. 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.
9. .Xu S.Q. The Comprehensive Utilization of Fly Ash. Applied Mechanics and Materials, 459, 82-86(2013) <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.459.82>.
10. Feng N., Peng G. High Performance Concrete with High Volume Fly Ash. Key Engineering Materials. 302-303, (470-478) 2006. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.470>.
11. Nai-Qian Feng, Gai-Fei PengA Development of the Research on High Performance Concrete Incorporated with High Volume Fly Ash. Key Engineering Materials. 302-302, 26-34(2006). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156>.
12. Reiterman Comparative Investigations of some Properties Related to Durability of Cement Concretes Containing Different Fly Ashes. Advanced Materials Research. 1054, 154-161(2014). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.154>.
13. 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.
14. Александрова О.В., Нгуен Д.В.К., Булгаков Б.И., Петропавловская В.Б. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов//Вестник поволжского государственного технологического университета. серия: материалы. конструкции. технологии. 2020. № 3. с. 7-15.
15. 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.
16. 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.
17. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Хан М.А., Тоимбаева Б.М. разработка состава комплексной добавки полифункционального действия сс-3тн // Фундаментальные исследования. 2017. № 1. С. 112-116.
18. Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Рахимов А.М., Садирбаева А.М., Иманов Е.К. исследование влияния комплексных гидрофобизирующих органоминеральных модификаторов на эксплуатационные свойства тяжелого бетона // Фундаментальные исследования. 2016. № 2-2. С. 294-298.
19. Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В. Применение фотокаталитических бетонов в дорожном строительстве. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 12. С. 16-26.
20. Мухаметрахимов Р.Х. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсцементно-песчаноцементного вяжущего / Р.Х. Мухаметрахимов, А.Р. Галаутдинов // Вестник технологического университета. - 2017. № 6(20). - С. 60-63.

REFERENCES

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A., Dondukov V.G., Selyutin N. Modified concrete: reality and prospects // Bulletin of the Research Center Construction. 2024. No. 1 (40). pp. 92-104.
2. Krutskikh A.V., Petropavlovskaya V.B., Petropavlovsky K.S., Novichenkova T.B. Modified cement concretes with discrete reinforcement // Construction and reconstruction. 2023. No. 3 (107). pp. 131-139.
3. Petropavlovskaya V.B., Zavadko M.Yu., Novichenkova T.B., Petropavlovsky K.S., Buryanov A.F. Prospects for the use of processed fuel ash and slag waste from hydraulic removal in dry building mixtures // part 1 building materials. 2023. No. 4. pp. 73-79.
4. 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) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88>.
5. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinievich O., Kizinievich 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.
6. Velichko E.G., Shumilina Yu.S. On the problem of formation of dispersed composition and properties of high-strength concrete// Bulletin of MGSU. 2020. Vol. 15. Issue. 2. P. 235-243. <https://doi.org/10.2227/1997-0935.2020.2.235-243>.
7. Filimonova Yu.S., Velichko E.G. Study of complex modification of heavy concrete // Construction and reconstruction. 2021. No. 4 (96). P.107-109. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112>.
8. Tkach E.V., Temirkanov R.I. Improving the physical and mechanical properties of modified concrete based on the use of chemically activated microsilica with micro-reinforcing fiber // Construction and reconstruction. 2020. No. 2 (88). P. 123-135.
9. Xu S.Q. The Comprehensive Utilization of Fly Ash. Applied Mechanics and Materials, 459, 82-86(2013) <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.459.82>.
10. Feng N., Peng G. High Performance Concrete with High Volume Fly Ash. Key Engineering Materials. 302-303, (470-478) 2006. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.470>.
11. Nai-Qian Feng, Gai-Fei Peng A Development of the Research on High Performance Concrete Incorporated with High Volume Fly Ash. Key Engineering Materials. 302-302, 26-34(2006). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.302-303.26156>.
12. Reiterman Comparative Investigations of some Properties Related to Durability of Cement Concretes Containing Different Fly Ashes. Advanced Materials Research. 1054, 154-161(2014). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.154>.
13. 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. pp. 350-356.
14. Aleksandrova O.V., Nguyen D.V.K., Bulgakov B.I., Petropavlovskaya V.B. 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. No. 3. pp. 7-15.
15. Urkhanova L.A., Ivanov A.A., Lkhasaranov S.A. Study of the influence of finely dispersed additives on the properties of composite binders for hydraulic concrete// Bulletin of VSGUTU. - 2023.- No. 2 (89). pp. 80-89.
16. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Danzanov D.V. Synthesis of an ultrafine additive obtained by hydrolysis of Portland cement for modification of cement stone // Cement and its application. - 2022. - No. 4. P. 52-56.
17. Rakhimov M.A., Rakhimova G.M., Khan M.A., Toimbaeva B.M. development of the composition of the complex additive of multifunctional action ss-3tn // Fundamental research. 2017. No. 1. P. 112-116.
18. Rakhimov M.A., Rakhimova G.M., Rakhimov A.M., Sadirbaeva A.M., Imanov E.K. study of the influence of complex hydrophobic organomineral modifiers on the performance properties of heavy concrete // Fundamental research. 2016. No. 2-2. P. 294-298.
19. Shestakov N.I., Alekseeva D.S., Polosina D.V. Application of photocatalytic concretes in road construction. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2021. No. 12. P. 16-26.
20. Mukhametrahimov R.Kh. The role of active mineral additives of natural origin in the formation of the structure and properties of gypsum-cement-pozzolan binder / R.Kh. Mukhametrahimov, A.R. Galautdinov // Bulletin of the Technological University. - 2017. No. 6 (20). - P. 60-63.

Информация об авторах:

Ткач Евгения Владимировна

ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Дорожно-строительных материалов

E-mail: ev_tkach@mail.ru

Филимонова Юлия Сергеевна

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленное, гражданское и подземное строительство»
E-mail: JuliaS06@mail.ru

Шусев Георгий Александрович

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

Шейн Александр Леонидович

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва, Россия
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Химической технологии композиционных и вяжущих материалов
E-mail: shein.a.l@muctr.ru

Information about authors:

Tkach Evgeniya V.

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia, doctor of technical sciences,
professor, professor of the department of Road Construction Materials.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Filimonova Yulia S.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction.
E-mail: JuliaS06@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

Shein Alexander Leonidovich

D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department of Chemical Technology of Composite and Binding Materials
E-mail: shein.a.l@muctr.ru