

Е.В. ТКАЧ¹, Ю.С. ФИЛИМОНОВА², А.А. ЧЕРНЫХ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия²ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия

ИЗУЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Аннотация. Для создания эффективных условий использования мелиорируемых земель и их плодородия необходимо обеспечить строительство и эксплуатацию разветвленной системы оросительных систем (лотков) с высокой степенью долговечности и надежности на протяжении всего периода эксплуатации. В рамках данных исследований рассматриваются вопросы, связанные с повышением эксплуатационных характеристик модифицированного тяжелого бетона, работающего в суровых условиях эксплуатации. Целью исследования является установление возможности управления зерновым составом цементного вяжущего, модифицированного комплексным модификатором (суперпластификатор + полимер + микрокремнезем) за счет формирования пространственно-армированной мелкокристаллической структуры цементной матрицы с максимально плотной упаковкой, которая сохраняется во времени. Наличие в комплексном модификаторе микрокремнеземистого компонента способствует протеканию пуццолановой реакции с образованием химически стойких низкоосновных гидросиликатов кальция, что положительно влияет на коррозионную стойкость бетона. Объект исследования: тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором (суперпластификатор + полимер + микрокремнезем), армированный базальтовым волокном для гидромелиоративного строительства, в частности лотков оросительных систем. В работе использованы следующие методы исследования: лазерной гранулометрии, рентгенофазового, электронно-микроскопического и химического анализов; в целях формирования плотных упаковок тонкодисперсных фракций клинкерного компонента применялся метод математической обработки полученных экспериментальных данных. Результаты исследований: получены новые данные, дополняющие теоретические представления о процессе структурообразования тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с управляемым зерновым составом совместно с комплексным модификатором и армированным базальтовым волокном. Разработан состав и технологические решения получения эффективного тяжелого бетона для гидромелиоративного строительства с повышенными эксплуатационными характеристиками: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа; водопоглощение – 1,9%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость F1=600, повышенная стойкость к агрессивным средам.

Ключевые слова: гидромелиоративное строительство, полидисперсное вяжущее, комплексный модификатор, коррозионная стойкость.

E.V. TKACH¹, YU.S. FILIMONOVA², A.A. CHERNYKH¹¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

STUDY OF PERFORMANCE PROPERTIES OF MODIFIED CONCRETE BASED ON POLYDISPERSED BINDING AGENT FOR WATER RECLAMATION CONSTRUCTION

Abstract. *To effectively utilize reclaimed land and maintain its fertility, it is necessary to ensure the construction and operation of a comprehensive irrigation system (troughs) with a high degree of durability and reliability throughout the entire service life. This research examines issues related to improving the performance of modified heavy-duty concrete operating under harsh conditions. The objective of this study is to establish the feasibility of controlling the grain size distribution of a cement binder modified with a complex modifier (superplasticizer + polymer + microsilica) by forming a spatially reinforced, fine-crystalline structure of the cement matrix with the highest possible packing density, which is maintained over time. The presence of a microsilica component in the complex modifier promotes a pozzolanic reaction with the formation of chemically stable, low-basic calcium hydrosilicates, which positively impacts the corrosion resistance of concrete. Object of study: heavy-duty concrete based on a polydisperse binder with a complex modifier (superplasticizer + polymer + microsilica), reinforced with basalt fiber for irrigation and drainage construction, specifically irrigation system trays. The following research methods were used in the study: laser granulometry, X-ray phase analysis, electron microscopy, and chemical analysis. Mathematical processing of the obtained experimental data was used to form dense packings of finely dispersed fractions of the clinker component. Research results: new data were obtained that complement theoretical understanding of the structure formation process of heavy-duty concrete based on a polydisperse binder with a controlled grain size distribution, combined with a complex modifier and reinforced with basalt fiber. A composition and technological solutions have been developed for producing effective heavy concrete for irrigation and drainage construction with improved performance characteristics: compressive strength – 77.3 MPa; tensile strength in bending – 8.62 MPa; water absorption – 1.9%; water resistance grade – W14; frost resistance F1=600, increased resistance to aggressive environments.*

Keywords: *irrigation and drainage construction, polydisperse binder, complex modifier, corrosion resistance.*

1. Введение

В современном гидротехническом и гидромелиоративном строительстве используют преимущественно модифицированные бетоны [1-5], которые позволяют обеспечить заданный уровень качества. Анализ научных исследований показал, что основными положительными функциями введения модификаторов в цементные системы являются: снижение вязкости цементных систем для улучшения технологических свойств бетонных смесей, вследствие чего достигается увеличение удобоукладываемости бетонных смесей вплоть до достижения «литой», самоуплотняющейся консистенции при нормальных расходах исходных материалов [6-8]; сокращение расхода воды затворения более чем на 20% и получение бетонов повышенной прочности или высокопрочного бетона (В40 и выше) из удобоукладываемых бетонных смесей на основе обычных портландцементов [9-14]; изменение структуры цементного камня и бетона, направленное на увеличение их прочности до 40% и стойкости к многократным попеременным физическим воздействиям [15-18]; регулирование скорости процессов гидратации цемента и твердения бетонов [19-20]; снижение расхода цемента в пределах до 25% при обеспечении заданной удобоукладываемости бетонной смеси и прочности бетона [21]; комбинирование приведенных эффектов для получения бетонной смеси и бетона заданных свойств [22]. Таким образом, повышение качества бетона для гидротехнического строительства, в частности гидромелиоративного является проблемным вопросом и требует своего развития с учетом развиваемой на современном этапе технологической парадигмы, предусматривающей создание структуры бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем использования высокопрочных вяжущих веществ, обеспечивающих высокую плотность упаковки исходных частиц в каждом микрообъеме материала совместно с комплексным модификатором.

2. Модели и методы

Методологической основой исследований являются научные разработки в области получения тяжелых бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками, а также применение системно-структурного подхода строительного материаловедения «состав – структура – свойства». Для определения основных характеристик сырьевых материалов,

бетонных смесей в вязкопластичной стадии и затвердевшего бетона применялись общепринятые в строительной практике нормативные методы, дающие высокую точность, достоверность и воспроизводимость результатов. Эксперименты проводились в строгом соответствии с методикой, 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, основанного на рабочей гипотезе, непосредственного эксперимента с контролем характеристик на всех его стадиях, статистической обработки результатов эксперимента, анализа результатов и последующей оптимизации, проведения следующей подтверждающей серии экспериментов.

В работе использовали исходные материалы со следующими характеристиками. Минеральное вяжущее – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, ООО «Холсим (Рус) СМ» (ГОСТ 31108-2020); природный песок с модулем крупности 2,5 (Хромцовский карьер; ГОСТ 8736-2014); гранитный щебень, фр. от 5 до 15 мм, ООО «Богаевский карьер» (ГОСТ 8267-93); суперпластифицирующая добавка – «Melflux 5581F» (ГОСТ 24211-2008), полимерная добавка – «ПОЛИДОН-А» (ООО «Оргполимерсинтез»; ТУ 9365-002-46270704-2001); микрокремнезем марки МКУ-95 (ООО НТЦ "ЭВЕРЕСТ"; ГОСТ Р 58894-2020); рубленое базальтовое волокно (БВ) (ООО «ИнРес»; ТУ 5952-002-13307094-08).

Для тонкого помола клинкерного компонента использовалась планетарная шаровая мельница Fritsch Pulverisette 7. Последовательно были получены три серии образцов тонкоизмельчённого вяжущего с удельной поверхностью 150, 300 и 450 м²/кг соответственно. Тонкость помола вяжущего контролировалась путём рассева навески на стандартном наборе сит. Измерение получаемой удельной поверхности и последующий расчёт размера частиц тонкоизмельчённого вяжущего проводилось при помощи прибора ПСХ-11М. Прибор в своей работе использует метод газопроницаемости Козени-Кармана, заключающийся в определении времени прохождения фиксированного объема воздуха через слой образца, после чего производится расчёт удельной поверхности с коррекцией вязкости воздуха с учётом его температуры. Для проведения рентгенофазового анализа цементного камня был использован порошковый рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М. Исследование физико-механических характеристик, полученных цементных камней и бетонов контролировались при помощи автоматической испытательной прессовой системы Controls MCC8. Для определения морозостойкости использовался первый базовый метод. Образцы для испытания представляли собой серию бетонных кубиков с ребром 100 мм. 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. Определение водонепроницаемости проводилось при помощи установки для определения водонепроницаемости бетонных образцов методом «мокрого пятна» Form+Test WE 6 MMZ.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием нормативных документов, широкого спектра методов исследований с применением сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования, сходимостью теоретических и экспериментальных исследований и воспроизводимостью результатов с вероятностью 0,95 при большом объеме экспериментов; положительными результатами опытно-промышленного внедрения и практической апробации разработанного эффективного бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором, армированного базальтовым волокном для гидромелиоративного строительства. В целях получения оптимального состава полидисперсного вяжущего исследовались топологические

характеристики получаемых цементных композиций с применением программно-расчетного комплекса, основанного на использовании алгоритма «Drop and Roll». Анализ научных литературных источников показал [23, 24], что для уменьшения влияния «пристенного эффекта», отношение диаметра частицы к размеру упаковки должно быть > 20 . В связи с тем, что расчёт упаковки в 20 диаметров наибольшей сферы займет очень продолжительное время, было принято решение изучать единичную ячейку, с отношением большего диаметра сферы к стороне 1 к 14. В нашем случае наибольший диаметр равен 12 мкм, что согласуется с данными гранулометрического состава используемых порошков, следовательно размер ячейки будет 168х168х168 мкм. Исходные данные для расчета топологических характеристик и влияния зернового состава, вяжущего на плотность упаковки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета топологических характеристик

№	Дисперсные составы цементных частиц						Прочность цементного камня на сжатие МПа, в возрасте, сут.	
							7	28
	Удел. поверхность составов, м²/кг			Состав, %				
1	ЦЕМ 42,5 Н контр.						28,4	43,5
2	150	0	0	100	0	0	20,3	25,2
3	0	300	0	0	100	0	26,2	39,4
4	0	0	450	0	0	100	38,6	49,7
5	150	300	0	20	80	0	24,1	39,6
6	150	300	0	25	75	0	20,7	31,3
7	150	300	0	30	70	0	19,0	28,6
8	0	300	450	0	80	20	41,2	58,5
9	0	300	450	0	75	25	47,4	60,7
10	0	300	450	0	70	30	50,6	63,2
11	150	300	450	15	80	5	40,2	52,0
12	150	300	450	15	75	10	44,6	56,4
13	150	300	450	15	70	15	48,5	57,8

Учитывая факт повышения энергозатрат при получении тонкодисперсного порошка с удельной поверхностью 450 м²/кг, было принято решение взять за оптимальную упаковку состав 12 (таблица 1) с соотношением цементных частиц в %: 15 – со средним диаметром $d_{ср}=12$ мкм и удельной поверхностью $S_{уд}=150$ м²/кг; 75 – $d_{ср}=6,6$ мкм, $S_{уд}=300$ м²/кг; 10 – $d_{ср}=4,9$ мкм, $S_{уд}=450$ м²/кг. С помощью метода планирования эксперимента установлены зависимости влияния управляющих факторов на выделенные параметры качества бетона. Получены регрессионные уравнения второго порядка, которые адекватно описывают зависимость прочности на сжатие, условного коэффициента интенсивности напряжений в возрасте 28 суток нормального твердения и водопоглощения модифицированного тяжелого бетона в возрасте 28 суток нормального твердения от переменных X_1 – расход полимерной добавки Полидон-А и X_2 – расход базальтового волокна, % от массы вяжущего. В качестве управляющих факторов целевых функций экспериментальной модели были выбраны: Y_1 – прочность на сжатие ($R_{сж}$, МПа), Y_2 – условный коэффициент интенсивности напряжений (K^* , МПа \times м^{0.5}), Y_3 – водопоглощение (W_m , %). Входные факторы, влияющие на исследуемые характеристики, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Интервалы и уровни варьирования входных факторов для планирования эксперимента второго порядка

Варьируемые факторы		Основные уровни	Интервалы варьирования
X ₁	Содержание полимерной добавки Полидон-А	0,2	0,1
X ₂	Содержание волокна	0,7	0,15

Уравнения регрессии для модифицированного тяжелого бетона имеют следующий вид:

$$Y_1 = 77,3 + 1,62X_1 + 1,13X_2 + 2,15X_1X_2 - 7,37X_1^2 - 6,44X_2^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,074 + 0,002X_1 + 0,001X_2^2 + 0,003X_1X_2 - 0,005X_1^2 - 0,004X_2^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 1,9 - 0,2X_1 - 0,11X_2 - 0,25X_1X_2 + 0,65X_1^2 + 0,45X_2^2 \quad (3)$$

Адекватность уравнений регрессии проверялась автоматически по критериям Стьюдента и Фишера. Ошибка при аппроксимации находилась в пределах 1...2 %. Используя инструменты компьютерной программы Matlab R2015b найдено максимальное значение целевой функции регрессионного уравнения второго порядка: MAX $Y_{1\max} = 77,3538$ при $X_1 = 0,0244$, $X_2 = 0,0918$, что в натуральных значениях составляет 0,202% и 0,714%, соответственно. MAX $Y_{2\max} = 0,0744$ при $X_1 = 0,2676$, $X_2 = 0,2254$, что в натуральных значениях составляет 0,227% и 0,734%, соответственно. MIN $Y_{3\min} = 2,352$ при $X_1 = 0,380$, $X_2 = 0,120$, что в натуральных значениях составляет 0,238% и 0,718%, соответственно. Установлены оптимальные значения $X_{1\text{опт}} = 0,2$; $X_{2\text{опт}} = 0,7$ в натуральном виде, при которых функция Y_1 – прочность на сжатие ($R_{сж}$) принимает максимальное значение, а Y_3 (водопоглощение, W_m) – минимальное. После подстановки найденных значений в уравнения 2-4 были определены прочность на сжатие $R_{сж} = 77,3$ МПа, $K_c^* = 0,074169$ МПа \times м^{0,5}; водопоглощение $W_m = 1,9$ %.

3. Результаты исследования и их анализ

Для оценки влияния комплексного модификатора (Melflux 5581F + Полидон-А + микрокремнезем) на качество модифицированного цементного камня были изготовлены образцы различных составов из теста нормальной густоты (таблица 3).

Таблица 3 – Составы цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения, изготовленных из цементного теста нормальной густоты

Материалы	Расход материалов для получения цементного теста нормальной густоты, г					
	1	2	3	4	5	6
ЦЕМ I 42,5 Н (заводской)	400	-	-	-	-	-
Полидис. вяжущее ПВ (контр.) фр. м ² /кг: 150 (15%) + 300 (75%) + 450 (10%) контр.	-	400	400	400	400	340
МК (15%)	-	-	-	-	-	60
Гипс. камень (3%)	-	12	12	12	12	12
Melflux 5581 F (0,3%)	-	-	1,2	-	1,2	1,2
Полидон-А (0,2%)	-	-	-	0,8	0,8	0,8
В/Ц	0,3	0,26	0,18	0,21	0,17	0,20
Сроки схват. цем. теста, ч-мин нач. схв. / кон. схв.	2-55 8-20	1-32 6-15	2-05 7-10	2-15 7-25	2-10 7-20	2-20 7-30
$R_{сж}$ 3 сут., МПа	18,4	23,2	24,8	24,0	25,8	26,5
$R_{сж}$ 28 сут., МПа	43,5	52,4	60,8	59,2	65,5	82,5

Анализ данных таблицы 3 показал, что в составе 2 снизилось В/Ц на 13,3% и сократились сроки схватывания; прочность на сжатие в возрасте 3 и 28 сут. увеличились на 26,1 и 20,5% в сравнении с составом 1. При добавлении к ПВ Melflux 5581F (состав 3) снизилось В/Ц на 30,8%; при этом сроки схватывания увеличились, а прочность в возрасте 3 и 28 сут. повысилась на 6,9 и 16% в сравнении с составом 2. В составе 4 ПВ+Полидон-А повысилось В/Ц на 16,7% и увеличились сроки схватывания; прочность в возрасте 3 и 28 сут. незначительно снизилась с 24,8 до 24,0 и 60,8 до 59,2 МПа в сравнении с составом 3. Совместное введение в ПВ (суперпластификатора Melflux 5581F + Полидон-А) положительно повлияло на водопотребность и прочность: В/Ц снизилось на 34,6%, прочность в возрасте 3 и 28 сут. увеличилась на 11,2 и 25% в сравнении с контр. (состав 2). Максимальную прочность 82,5 МПа показал состав 6, содержащий активную минеральную добавку микрокремнезем марки МКУ-95, наличие которого позволит решить задачу коррозионной стойкости. Фазовый состав образцов цементного камня, рассчитанный на основе полученных данных РФА, представлен на рисунке 1.

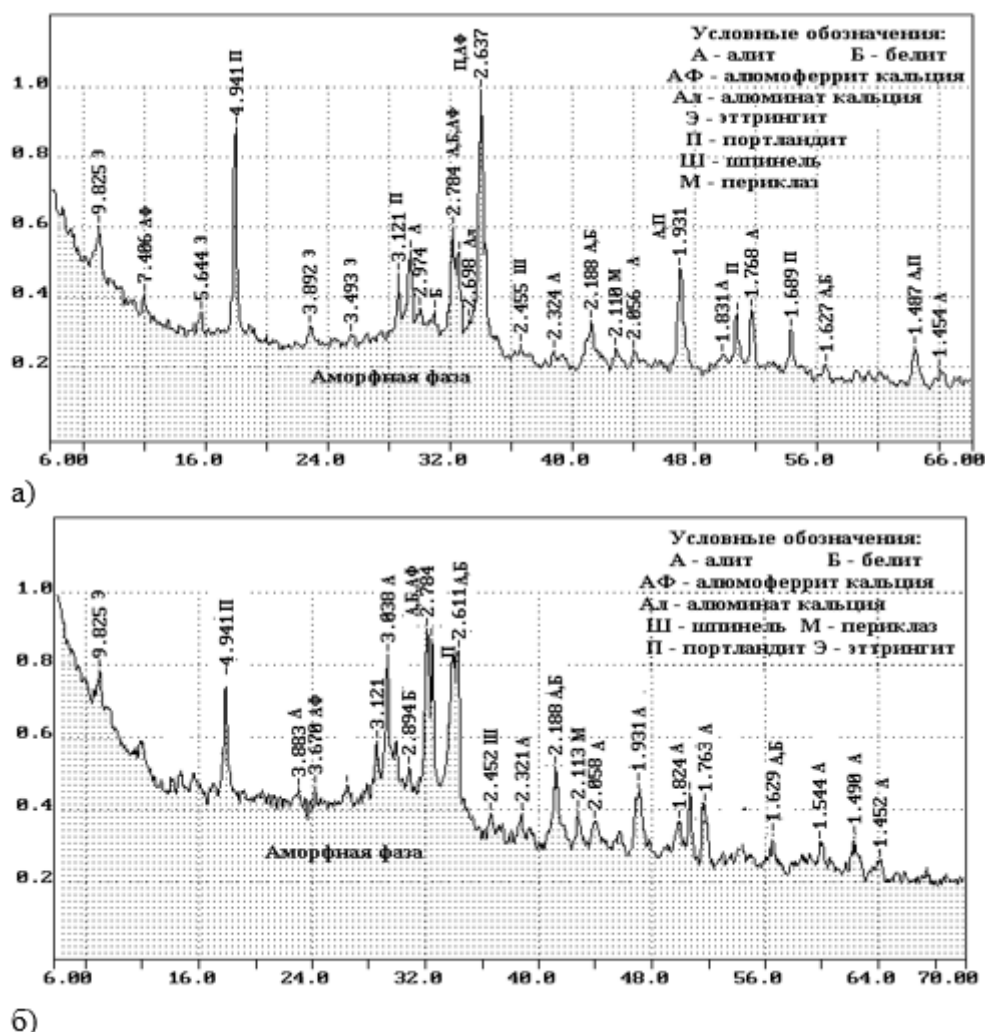


Рисунок 1 – Рентгенофазовый анализ гидратированных образцов цементного камня в возрасте 28 суток твердения: а) 1 состав – ЦЕМ I 42,5Н б) ПВ+CaSO₄•2H₂O+Melflux+Полидон-А+МК

Результаты рентгенофазового анализа показали, что в составе 2 (ПВ) увеличилось содержание C₃S и C₂S в сравнении с составом 1, а степень гидратации снизилась с 70 до 52% соответственно. Уменьшение степени гидратации объясняется наличием в составе 2 крупных негидратированных зерен вяжущего (фракция 150 м²/кг), которые образуют запас клинкерного фонда. При добавлении к ПВ отдельно Melflux и Полидон-А (составы 3 и 4,

таблица 3) наблюдалось незначительное снижение C_3S и C_2S на 2-3% в сравнении с контрольным (состав 2). Совместное их введение в ПВ (состав 5, табл. 3) показало незначительное снижение основных клинкерных минералов, при этом степень гидратации увеличилась до 57% в сравнении 3 и 4 составом. Для повышения стойкости цементного камня против коррозии выщелачивания в состав 6 добавили (15% МКУ-95). При этом содержание остаточных клинкерных минералов снизилось незначительно, а количество $Ca(OH)_2$ уменьшилось более чем на 26,6% в сравнении с контрольным. Этот факт является свидетельством протекания пуццолановой реакции, сопровождающейся связыванием $Ca(OH)_2$ микрокремнеземом в менее растворимые и более химически стойкие низкоосновные гидросиликаты кальция. Исследования микроструктуры цементного камня показали (рисунок 2), что наличие в составе комплексного модификатора (рисунок 2, в) позволило получить плотный цементный камень упорядоченной структуры с равномерно распределенными порами по всему объему при скоплении игольчатых кристаллов этtringита в зоне образования микропор. Установлено, что в составе 5 (таблица 3) уменьшаются размеры кристаллов – от 70 до 90 нм (рисунок 2, б), и составе 6 (таблица 3) – от 60 до 75 нм (рисунок 2, в), что значительно ниже, чем в контрольном 2 (таблица 4) – от 100 до 120 нм (рисунок 2, а).

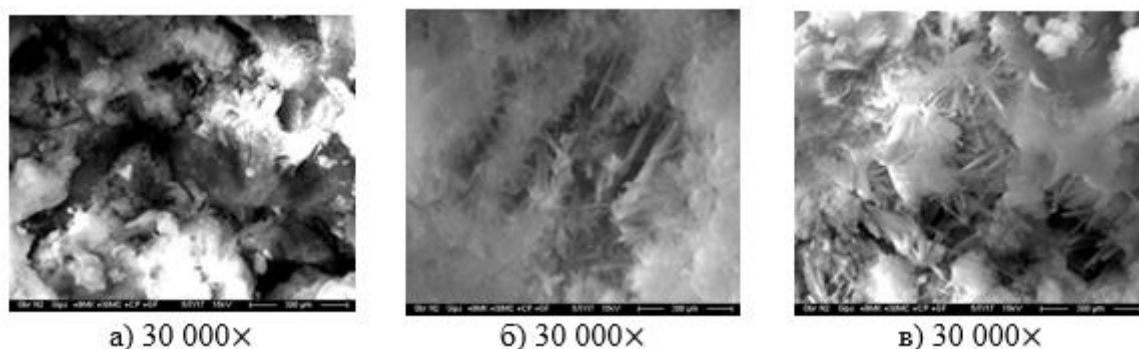


Рисунок 2 – Микроструктура цементного камня в возрасте 28 суток нормального твердения : а) Полидисперсное вяжущее - ПВ (контрольный); б) ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А); в) ПВ+(0,3% Melflux+ 0,2%Полидон-А+15% МК)

Модифицированный цементный камень (состав 6, таблица 3) имеет более плотную и однородную мелкопористую структуру с размером микропор от 0,1 до 0,6 мкм (рисунок 2, в); в составе 5 основной диапазон от 0,5 мкм до 2 мкм (рисунок 3, б); в контрольном образце состав 2 (таблица 3) – от 1 до 5 мкм (рисунок 3, а), с присутствием пор до 50 мкм. Положительные изменения в предлагаемом составе 6 обусловлены совместным влиянием комплексного модифицирования (0,3%Melflux+ 0,2%Полидон-А+15%МК), сопровождающегося водоредуцирующим эффектом и образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция. Результаты исследований модифицированного цементного камня легли в основу разработки состава тяжелого бетона с заданным комплексом эксплуатационных свойств. Анализ исследований (таблица 4) свойств бетонных смесей показал, что предлагаемый состав 6 снизил в 2,1 и 2,2 раза показатели водоотделение и раствооротделения в сравнении с контрольным. Этот факт имеет положительную роль при снижении негативных последствий: расслоение бетонной смеси, оседания крупного заполнителя и снижение неоднородности бетона. Анализ результатов свойств модифицированных бетонов показал повышение показателей: на сжатие в составе ПВ+(0,3%Melflux+0,2%Полидон-А+15%МК) на 47,9% относительно контрольного (ПЦ+0,3%Melflux) и на 19,5% относительно состава (ПВ+0,3%Melflux), что составляет в абсолютном выражении на 24 и 12 МПа соответственно.

Таблица 4 – Свойства модифицированных бетонных смесей и бетонов

Показатели	Составы					
	1 контр. ПЦ+ 0,3% Melflux	2 ПВ +0,3% Melflux	3 ПВ +0,2% Полидон-А	4 ПВ+ 0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А	5 ПВ+ (0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А + 15%МК)	6 ПВ+(0,3% Melflux+ 0,2% Полидон-А +15%МК) +0,7%БВ
Удобоукладываемость Марка/ОК, см	П2/5	П2/6	П2/5	П2/6	П2/7	П2/5
Водоотделение бет.см., %	0,45	0,31	0,24	0,20	0,19	0,22
Раствороотделение Пр, %	2,8	1,44	1,37	1,34	1,32	1,28
Средняя плотность бетона, кг/м ³	2401	2408	2406	2411	2420	2417
Пористость, %	14,52	11,67	10,54	10,12	9,2	8,6
R _{сж} (ср.), МПа,	50,1	62,0	59,8	62,1	74,1	77,3
R _{тб} (ср.), МПа,	5,78	6,54	6,27	6,93	7,73	8,62

Максимальный прирост прочности $R_{тб}$ имеет бетон с базальтовым волокном (состав 6). Показатель $R_{тб}$ повысился на 49,1% в сравнении с контрольным и на 11,5% в сравнении с составом 5 (без фибры). По результатам гидрофизических испытаний модифицированного бетона (состав 6, таблица 4) установлено: водопоглощение снизилось на 57,8%; марка по водонепроницаемости повысилась на 4 ступени нагружения в сравнении с контрольным. Результаты испытаний на морозостойкость показали: максимальное снижение массы до 6,32% и кубиковой прочности на 26% в контрольном составе 1 после 400 циклов испытаний, что превышает установленные показатели требования ГОСТ 10060-2012; высокую морозостойкость составы, содержащие комплексный модификатор. При 600 циклов испытаний потеря массы в составах 5 и 6 составила 1,8% и 1,5% при снижении прочности на 10,2% и 9,1% соответственно, что подтверждает достаточный запас прочности и морозостойкости.

4. Заключение

1. Обосновано и экспериментально доказано создание структуры тяжелого бетона высокой плотности, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем оптимизации состава цементного, вяжущего различной дисперсности с комплексным модификатором (суперпластификатор +полимер +микрокремнезем) + базальтовое волокно.

2. Модифицированный бетон обладает следующими показателями: предел прочности на сжатие – 77,3 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 8,62 МПа; водопоглощение – 1,9%; марка по водонепроницаемости – W14; морозостойкость F1 = 600, повышенная стойкость к агрессивным средам.

3. Перспективы и рекомендации дальнейшей разработки темы исследования заключаются в совершенствовании состава модифицированного тяжелого бетона на основе полидисперсного вяжущего с комплексным модификатором путем поиска новых видов модификаторов и микроармирующих наполнителей с целью снижения себестоимости продукции и исследовании возможностей его применения в гидротехнических сооружениях зоны переменного уровня воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хозин В.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Разработка строительных материалов на основе поливинилхлорида и эпоксидных полимеров, *Строительные материалы*. 2024. № 11. С. 55-62
2. Mukhametrakhimov R.Kh., Garafiev A.M., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Structure and properties of modified shungite concrete during electrode heating, // *Construction Materials and Products*. 2023. 6 (6). 1. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-1
3. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer, // *Magazine of Civil Engineering*. 2021, 102. 10206. DOI: 10.34910/MCE.102.6
4. Asmatulayev B., Asmatulayev R., Asmatulayev N., Bakirbayeva A., Construction of Durable Roads from Rolled Concrete Based on Belite Slag Cement And Binders // *International Journal of GEOMATE*, Vol. 24, Issue 104, 2023, pp.27-35.
5. Es-samlali L., Yassine El Haloui, Fahd Oudrhiri-Hassani, Abdelmonaim Tlidi, & Abderrahman Bekri, Natural Aggregate Substitution by Steel Slag Waste for Concrete Manufacturing, // *International Journal of GEOMATE*, Vol. 26, Issue 115, pp. 61–72.
6. Bulgakov, B.I., Nguyen, V.Q.D., Aleksandrova, A.V., Larsen, O.A., Galtseva, N.A. High-performance concrete produced with locally available materials. // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Magazine of Civil Engineering. 117(1). Article no. 11702. DOI: 10.34910/MCE.117.2
7. Ларсен О.А., Наруть В.В., Бахрах А.М. Пуццолановая активность минеральных добавок для гидротехнических бетонов // *Техника и технология силикатов*. 2022. Т. 29. №3. С. 250 – 260.
8. Nguyen Binh Ha, Le Ba Danh, Pham Duy Hoa, & Nguyen Ngoc Tuyen, Research on the Application of Geopolymer Concrete for Prestressed Girder Structures of Bridges Towards Sustainable Development, // *International Journal of GEOMATE*, Vol. 25, Issue 110, 2023, pp. 21–28.
9. 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.
10. 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. № 3. С. 153-172.
11. 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. № 1(9). С. 31-39.
12. Урханова Л.А., Иванов А.И., Лхасаранов С.А. Hydraulic Engineering concrete based on a Composite Binder using dispersed perlite and a colloidal additive // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*/ 2025/ Issue 1. Volume 21. PP. 69-78.
13. Урханова Л.А. Saidova, Z.; Yakovlev, G.; Orbán, Z.; Grakhov, V. Cement Compositions Modified with Dispersed Magnesium Silicate Dihydrate- and Carbon-Based Additives // *Construction Materials*. – 2022. №2. PP. 101-113. <https://doi.org/10.3390/constrmater2020008>.
14. Танг Л.В., Нгуен З.Ч., Булгаков Б.И., Александрова О.В. Строительные материалы с низким углеродным следом с использованием промышленных отходов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2025. Т. 17. № 1. с. 83-94
15. Fediuk R., Makarova N., Qader D.N., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation // *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23, С. 2642–2657. DOI10.1016/j.jmrt.2023.01.179
16. Fediuk R., Makarova N., Kozin A., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Nanomodified Basalt Fiber Cement Composite with Bottom Ash // *Journal of Composites Science*, 2023, 7(3), 96. DOI10.3390/jcs7030096
17. 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.
18. M. B. Kaddo, Yu.S. Filimonova Hydrophysical properties of heavy-duty concrete with a complex modifier for hydromeliorative construction // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 20(4) 72–80 (2024). DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-72-80>.
19. Ткач Е.В., Temirkanov R. I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilicon together with micro-reinforcing fiber to improve performance // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. – 2021. – Vol. 332. – No. 5. – P. 215–226. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3204
20. Rauza Serova, Evgeniya Stasilovich, Yedil Imanov, Tatyana Bogoyavlenskaya, Maksim Khan, Ткач Е.В. Modified aerated concrete based on man-made waste // *International Journal of GEOMATE*, Sept. 2022, Vol.23, Issue 97, pp.131-138 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2022.97.3334>
21. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol–gel method // *Journal of sol-gel science and technology*. 2019. № 3. С. 820-829.

22. Kalmagambetova A.Sh., Bogoyavlenskaya T.A., Effekt of physical of samplec on the mechanical charakterictiks, An International Journal "Advances in Materials Research", Vol. 10, No. 1, 2021, pp. 67-76
23. Довгань И.В. Топологические аспекты структурообразования в дисперсных системах и вяжущих материалах / И.В. Довгань, А.В. Колесников, С.В. Семенова, Г.А. Кириленко // Строительные материалы. 2011. №3. С.100-102.
24. Королев Е.В. Композиционные материалы как полидисперсные системы. Эффективные модели / Е. В. Королев, А. Н. Гришина, А. М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 3(48). – С. 16-25.

REFERENCES

1. Khozin V.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. Razrabotka stroitel'nykh materialov na os-nove polivinilkhlorida i epoksidnykh polimerov, Stroitel'nyye materialy. 2024. № 11. S. 55-62
2. Mukhametrakhimov R.Kh., Garafiev A.M., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Structure and properties of modified shungite concrete during electrode heating, //Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). 1. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-1
3. Mukhametrakhimov R.Kh., Lukmanova L.V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer, // Magazine of Civil Engineering. 2021, 102. 10206. DOI: 10.34910/MCE.102.6
4. Asmatulayev B., Asmatulayev R., Asmatulayev N., Bakirbayeva A., Construction of Durable Roads from Rolled Concrete Based on Belite Slag Cement And Binders //International Journal of GEOMATE, Vol. 24, Issue 104, 2023, pp.27-35.
5. Es-samlali L., Yassine El Haloui, Fahd Oudrhiri-Hassani, Abdelmonaim Tlidi, & Abderrahman Bekri, Natural Aggregate Substitution by Steel Slag Waste for Concrete Manufacturing, //International Journal of GEOMATE, Vol. 26, Issue 115, pp. 61–72.
6. Bulgakov, B.I., Nguyen, V.Q.D., Aleksandrova, A.V., Larsen, O.A., Galtseva, N.A. High-performance concrete produced with locally available materials // Magazine of Civil Engineering. 2023. Magazine of Civil Engineering. 117(1). Article no. 11702. DOI: 10.34910/MCE.117.2
7. Larsen O.A., Narut' V.V., Bakhrakh A.M. Putstsolanovaya aktivnost' mineral'nykh dobavok dlya gidrotekhnicheskikh betonov // Tekhnika i tekhnologiya silikatov. 2022. T. 29. No3. S. 250 – 260.
8. Nguyen Binh Ha, Le Ba Danh, Pham Duy Hoa, & Nguyen Ngoc Tuyen, Research on the Application of Geopolymer Concrete for Prestressed Girder Structures of Bridges Towards Sustainable Development, // International Journal of GEOMATE, Vol. 25, Issue 110, 2023, pp. 21–28.
9. 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). S. 27-34.
10. 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. № 3. S. 153-172.
11. Kherraf L., Abdelouhed 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. № 1(9). S. 31-39.
12. Urkhanova L.A., Ivanov A.I., Lkhasaranov S.A. Hydraulic Engineering concrete based on a Composite Binder using dispersed perlite and a colloidal additive// International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/ 2025/ Issue 1. Volume 21. PP. 69-78.
13. Urkhanova L.A. Saidova, Z.; Yakovlev, G.; Orbán, Z.; Grakhov, V. Cement Compositions Modified with Dispersed Magnesium Silicate Dihydrate- and Carbon-Based Additives // Construction Materials. – 2022. №2. RR. 101-113. <https://doi.org/10.3390/constrmater2020008>
14. Tang L.V., Nguyen Z.CH., Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V. Stroitel'nyye materialy s nizkim uglerodnym sledom s ispol'zovaniyem promyshlennykh otkhodov //Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal. 2025. t. 17. № 1. s. 83-94
15. Fediuk R., Makarova N., Qader D.N., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation // Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23, C. 2642–2657. DOI10.1016/j.jmrt.2023.01.179
16. Fediuk R., Makarova N., Kozin A., Petropavlovskaya V., Novichencova T., Sulman M., Petropavlovskii K. Nanomodified Basalt Fiber Cement Composite with Bottom Ash // Journal of Composites Science, 2023, 7(3), 96. DOI: 10.3390/jcs7030096
17. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Bur'yanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikatsiya tsementnykh betonov mnogosloynnymi uglerodnymi nanotrubkami// Stroitel'nyye materialy. 2011. № 2. S.47-51.
18. M. B. Kaddo, Yu.S. Filimonova Hydrophysical properties of heavy-duty concrete with a complex modifier for hydromeliorative construction // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 20(4) 72–80 (2024). DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-72-80>
19. Tkach Ye.V., Temirkanov R. I., Tkach S.A. Comprehensive study of modified concrete based on activated microsilicon together with micro-reinforcing fiber to improve performance // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. – 2021. – Vol. 332. – No. 5. – P. 215–226. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3204

20. Rauza Serova, Evgeniya Stasilovich, Yedil Imanov, Tatyana Bogoyavlenskaya, Maksim Khan, Tkach Ye.V. Modified aerated concrete based on man-made waste // International Journal of GEOMATE, Sept. 2022, Vol.23, Issue 97, pp.131-138 ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), Japan, DOI: <https://doi.org/10.21660/2022.97.3334>
21. Luo X., Weng Y., Wang S., Du J., Wang H., Xu C. Superhydrophobic and oleophobic textiles with hierarchical micro-nano structure constructed by sol-gel method // Journal of sol-gel science and technology. 2019. № 3. S. 820-829.
22. Kalmagambetova A.Sh., Bogoyavlenskaya T.A., Effekt of physical of samplec on the mechanical charakterictiks, An International Journal "Advances in Materials Research", Vol. 10, No. 1, 2021, pp. 67-76.
23. Dovgan' I.V. Topologicheskiye aspekty strukturoobrazovaniya v dispersnykh sistemakh i vya-zhushchikh materialakh / I.V. Dovgan', A.V. Kolesnikov, S.V. Semenova, G.A. Kirilenko // Stroitel'nyye ma-terialy. 2011. №3. S.100-102.
24. Korolev Ye.V. Kompozitsionnyye materialy kak polidispersnyye sistemy. Effektivnyye mo-deli / Ye. V. Korolev, A. N. Grishina, A. M. Ayzenshtadt // Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. – 2021. – № 3(48). – S. 16.

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

Филимонова Юлия Сергеевна

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия
канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного и гражданского и подземного строительства,
E-mail: JuliaS06@mail.ru

Черных Александра Александровна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный универси-тет», г. Москва, Россия,
студент группы 4-81 кафедры градостроительства.
E-mail: ChernyhAA@gic.mgsu.ru

Information about authors

Tkach Evgeniya Vl.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor in the Department of Urban Planning.
Email: ev_tkach@mail.ru

Filimonova Yulia S.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
PhD in Engineering Sciences, Associate Professor in the Department of Industrial, Civil, and Underground Construction,
Email: JuliaS06@mail.ru

Chernykh Alexandra A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student in Group 4-81 in the Department of Urban Planning.
Email: ChernyhAA@gic.mgsu.ru

Статья поступила в редакцию 30.10.2025
Одобрена после рецензирования 23.11.2025
Принята к публикации 01.12.2025

The article was submitted 30.10.2025
Approved after reviewing 23.11.2025
Accepted for publication 01.12.2025