

Л.А. УРХАНОВА¹, А.А. ИВАНОВ², С.А. ЛХАСАРАНОВ²¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО БЕТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРА- И ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ДОБАВОК

Аннотация. Учитывая постоянно растущие требования к качеству, надежности и долговечности бетонных конструкций для гидротехнических сооружений, возникает необходимость в разработке составов гидротехнического бетона с улучшенными эксплуатационными свойствами. Цель исследования - улучшение физико-механических и деформативных свойств гидротехнического бетона с применением тонкодисперсных алюмосиликатных пород – перлитов и коллоидной добавки в виде золя кремниевой кислоты. Объектом исследования является модифицированный гидротехнический бетон на основе композиционного вяжущего с применением тонкодисперсного стекловидного и закристаллизованного перлита, золя кремниевой кислоты и суперпластификатора на основе поликарбоксилатов «Полипласт». Результаты исследования: Обоснован выбор кремнеземсодержащих добавок и показано, что их применение оказывает положительное влияние на свойства гидротехнического бетона. Установлено влияние комплексного модифицирования на свойства гидротехнического бетона путем уменьшения содержания портландцемента и замены его тонкодисперсным стекловидным перлитом, предварительно измельченным до удельной поверхности 300-600 м²/кг, введением золя кремниевой кислоты и суперпластификатора «Полипласт», применение которых позволяет повышать его физико-механические, деформативные и гидрофизические свойства: прочность на сжатие – 53,4 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 10,9 МПа; коэффициент трещиностойкости – 0,20; призмная прочность – 46,3 МПа; модуль упругости 37,345 МПа × 10³; коэффициент Пуассона – 0,199, водопоглощение – 2,43% по массе; марка по водонепроницаемости – W16. Доказано, что с добавлением к портландцементу добавки тонкодисперсного перлита, золя кремниевой кислоты и суперпластификатора Полипласт может быть получен гидротехнический бетон, характеризующийся прочностными показателями, не уступающими по прочности контрольному составу, и с повышенными показателями водонепроницаемости и трещиностойкости по сравнению с традиционными составами.

Ключевые слова: гидротехнический бетон, пластифицирующая добавка, золь кремниевой кислоты, стекловидный перлит, закристаллизованный перлит, степень дисперсности, удельная поверхность, водонепроницаемость, трещиностойкость, прочность при сжатии.

L.A. URKHANOVA¹, A.A. IVANOV², S.A. LHASARANOV²¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia² East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

INCREASING THE PERFORMANCE PROPERTIES OF HYDRAULIC CONCRETE USING ULTRA- AND FINE-DISPERSED ADDITIVES

Abstract. Taking into account the constantly growing requirements for the quality, reliability and durability of concrete structures for hydraulic structures, there is a need to develop hydraulic concrete compositions with improved performance properties. The aim of the study is to improve the physico-mechanical and deformative properties of hydraulic concrete using finely dispersed aluminosilicate rocks – perlites and colloidal additives in the form of silicic acid sol. The object of the study is modified hydraulic engineering concrete based on a composite binder using finely dispersed vitreous and crystallized perlite, silicic acid sol and a polycarboxylate-based superplasticizer «Polyplast». Results of the study: The choice of silica-containing additives is substantiated and it is shown that their use has a positive effect on the properties of hydraulic concrete. The effect of complex modification on the properties of hydraulic concrete was established by reducing the content of Portland cement and replacing it with finely dispersed glassy perlite, pre-crushed to a specific surface of 300-600 m²/kg, introducing silicic acid sol and the superplasticizer "Polyplast", which make it possible to improve the physical, mechanical, deformation and hydrophysical properties: compressive strength - 53.4 MPa; ultimate tensile strength in bending - 10.9 MPa; crack resistance coefficient - 0.20; prismatic strength - 46.3 MPa; modulus of elasticity 37.345 MPa × 10³; Poisson's ratio - 0.199, water absorption - by weight - 2.43%; water resistance grade - W16. It has been proven that by adding finely dispersed perlite, silica sol and superplasticizer Polyplast to Portland cement, it is possible to obtain hydraulic concrete characterized by strength indicators not inferior in strength to the control composition, and with increased indicators of water resistance and crack resistance compared to traditional compositions.

Keywords: hydraulic concrete, plasticizing additive, silica sol, glassy perlite, crystallized perlite, degree of dispersion, specific surface, water resistance, crack resistance, compressive strength.

Введение

Бетоны для гидротехнических сооружений должны отвечать повышенным требованиям по долговечности, предъявляемым к ним в условиях работы на рубеже воздушной и водной сред [1-3]. Задача повышения эффективности и долговечности массивных гидротехнических сооружений в таких условиях эксплуатации является актуальной и не может быть успешно решена без использования качественного бетона с современными добавками различной природы [4-6].

Использование активных тонкодисперсных и коллоидных добавок в качестве компонентов бетонных смесей является одним из значимых факторов для повышения экономической составляющей цементных композиций по расходу цемента, физико-механических, деформативных и гидрофизических свойств гидротехнического бетона [7]. Помимо уменьшения расхода цемента активные тонкодисперсные добавки способствуют связыванию свободной извести, что обеспечивает повышение стойкости цементного камня к агрессивному воздействию пресных и сульфатных вод. Использование тонкодисперсных добавок приводит к снижению общей пористости цементного камня в бетоне за счет оптимизации зернового состава смеси при увеличении объемной концентрации и дисперсности добавки, а также к улучшению физико-механических свойств за счет снижения дифференциальной пустотности исходной водовяжущей системы в сторону меньших по размеру пустот при размещении частиц добавки между частицами цемента, повышению деформативных и гидрофизических свойств [8]. Кроме того, формирование физико-механических и деформативных характеристик бетона взаимосвязано с образованием новых комплексных гидратных соединений, обладающих улучшенными характеристиками и имеющих определённую кристаллизационную структуру, которая влияет на изменение физико-механических свойств бетона [9-11].

В исследовании для получения модифицированного гидротехнического бетона использовали перлитовые породы, подвергнутые механохимической активации в энергонапряженных аппаратах, ультрадисперсную добавку кремнезема и суперпластификатор на основе поликарбоксилата. Ультрадисперсная добавка кремнезема в виде золя и активная минеральная добавка, подвергнутая механической активации, будут способствовать улучшению микроструктуры цементного камня, формированию плотной упаковки частиц композиционного вяжущего и гидратационному взаимодействию портландцемента с

кремнеземсодержащими добавками [12], улучшая физико-механические, деформативные и гидрофизические свойства бетона с их использованием.

Модели и методы

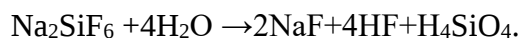
Для улучшения физико-механических, деформативных и гидрофизических свойств гидротехнического бетона, а также для повышения его трещиностойкости использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ГОСТ 31108-2020 производства ООО «Тимлюйцемент», природный песок с истинной плотностью 2450 кг/м³, гранитный щебень со средней плотностью до 2600 кг/м³. В качестве активных минеральных добавок использовали тонкодисперсный стекловидный и закристаллизованный перлит Мухор-Талинского месторождения Республики Бурятия. Химический состав перлита приведен в таблице 1. Содержание стеклофазы в закристаллизованном перлите – 20-40%, в стекловидном – 60-80%, пуццоланическая активность по методу поглощения ими CaO 24 мг CaO/г и 35 мг CaO/г перлита соответственно.

Таблица 1- Усредненный химический состав стекловидного и закристаллизованного перлита, масс. %

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	R ₂ O	п.п.п
Перлит стекловидный	68,40	13,75	0,50	0,06	0,50	0,30	0,15	0,10	3,91	3,37	-	5,97
Перлит закристаллизованный	73,13	11,7	1,08	1,71	0,55	0,30	-	-	-	-	6,4	7,65

Стекловидный и закристаллизованный перлит сначала подвергались дроблению, затем измельчались в лабораторном виброистирателе ВИ-4х350 до достижения удельной поверхности, которая варьировалась от 300 до 600 м²/кг в зависимости от состава бетона. Композиционное вяжущее для гидротехнического бетона готовилось путем тщательного смешивания портландцемента с тонкодисперсным стекловидным и закристаллизованным перлитом.

Для получения золя кремниевой кислоты, используемого в качестве коллоидной добавки, применялся метод гидролиза растворимых солей, в частности кремнефтористого натрия (Na₂SiF₆), без удаления катионов натрия Na⁺. Оптимальная концентрация золя составила 0,75%. Процесс гидролиза кремнефтористого натрия протекает по следующей реакции:



Полученный золь кремниевой кислоты, представленный в виде водного раствора с плотностью 1,018 г/см³ и водородным показателем (pH) от 4,5 до 4,8, использовался в составе бетона. Золь вводился в бетонную смесь вместе с водой затворения при оптимальной концентрации 0,4% от массы цемента, что обеспечивало его эффективное воздействие на основные свойства бетона.

В качестве поверхностно-активных веществ применялся суперпластификатор «Полипласт ПК тип S», производимый на основе модифицированных поликарбоксилатов отечественной компанией ООО «Полипласт-Сибирь». Оптимальная дозировка суперпластификатора составляла 0,2% от массы цемента.

Бетонная смесь с композиционным вяжущим готовилась в лабораторном бетоносмесителе. Процесс подготовки включал тщательное смешивание предварительно

отдозированных компонентов: портландцемента, тонкодисперсного перлита, песка с модулем крупности $M_{кр.} = 2,1$, щебня фракции 10-20 мм и воды. В воду добавлялись золь кремниевой кислоты и суперпластификатор Полипласт. Все компоненты тщательно перемешивались в течение 1 минуты для достижения однородной смеси с маркой по удобоукладываемости ПЗ (осадка конуса 10-15 см). Из полученных составов бетонных смесей готовились образцы-кубы 100х100х100 мм и образцы-призмы для испытания на изгиб и определения призмочной прочности размером 100х100х400 мм. Образцы твердели в нормальных условиях 28 суток, затем испытывались по стандартным методикам в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» и ГОСТ 24452-2023 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона». Показатель трещиностойкости гидротехнического бетона ($K_{тр}$) определялся косвенно, как отношение прочности бетона на растяжение при изгибе к прочности на сжатие ($R_{изг}/R_{сж}$).

Результаты и обсуждения

Анализ результатов прочности при сжатии образцов гидротехнического бетона с добавлением стекловидного и закристаллизованного перлита с удельной поверхностью 300 м²/кг (рис. 1а) и 600 м²/кг (рис. 1б) показал, что при замене портландцемента 10-20% тонкодисперсным стекловидным перлитом ($S_{уд}=300$ м²/кг) с суперпластификатором Полипласт происходит незначительное увеличение прочности на сжатие – на 5-7% по сравнению с контрольным составом при сохранении водоцементного отношения – 0,44. Эффект действия при введении активной минеральной добавки в виде закристаллизованного перлита с такой же степенью дисперсности уменьшается. При повышении удельной поверхности перлита с 300 до 600 м²/кг наблюдается увеличение прочности во всех исследуемых составах (рис.1б).

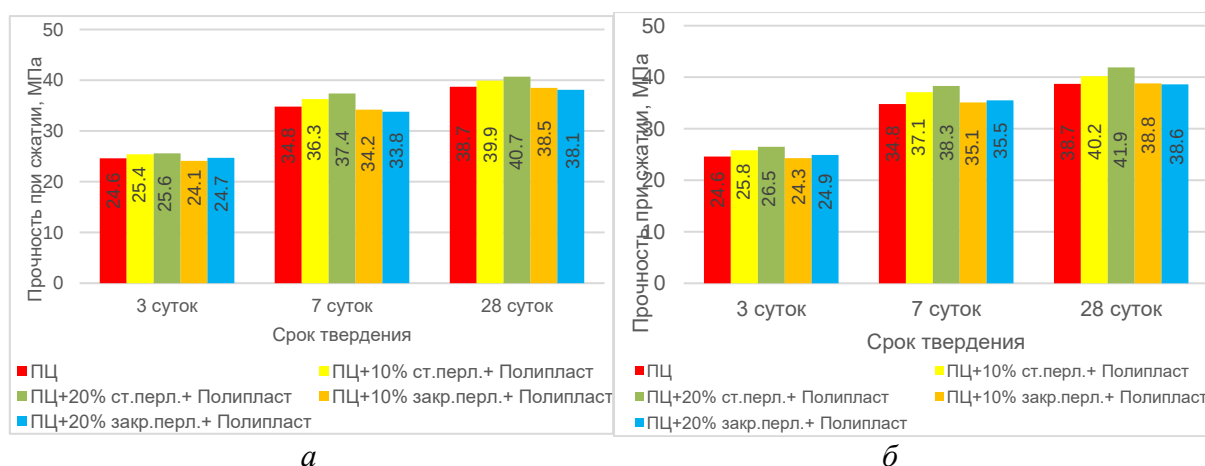


Рисунок 1 - Прочность при сжатии образцов бетона с добавлением тонкодисперсного перлита: а – удельная поверхность 300 м²/кг; б – удельная поверхность 600 м²/кг

Полученные результаты по увеличению прочности бетона дает основание предположить, что процесс механоактивации перлитовых пород в вибрационной мельнице приводит к деполимеризации структуры алюмосиликатных пород, их дальнейшей аморфизации и повышению, соответственно, их активности как пуццолановой добавки.

При введении в состав бетонной смеси коллоидной добавки в виде золя кремниевой кислоты в количестве 0,4% от массы цемента (рис. 2а) оказывает положительный эффект на увеличение прочности на сжатие бетона: на 25-40% по сравнению с бетоном на основе портландцемента. Коллоидная кремнеземсодержащая добавка, обладая повышенной

реакционной активностью по сравнению с перлитовыми породами, вступает в реакцию с известью, связывая ее с образованием гидросиликатов кальция, уплотняя и упрочняя структуру бетона. Средняя плотность бетона с добавками перлита и коллоидной добавкой на 16 % выше, чем у бетона без добавок, что свидетельствует о снижении пористости цементного камня и создании более плотной структуры.

При увеличении степени дисперсности стекловидного перлита (рис. 2б) с 300 м²/кг до 600 м²/кг прочность бетона на сжатие увеличивается в среднем на 20 % при одинаковом составе. Следует отметить, что при оптимальных дозировках суперпластификатора 0,2% и золя кремниевой кислоты 0,4 % от массы цемента прочность при сжатии бетона в возрасте 28 суток увеличилась на 25 % и 38% при замене цемента на 10 и 20% соответственно стекловидным перлитом. В пересчете на сухое вещество дозировка золя кремниевой кислоты в 14 раз меньше в сравнении с суперпластификатором Полипласт. Использование закристаллизованного перлита в качестве тонкодисперсного наполнителя в составе композиционного вяжущего совместно с коллоидной добавкой дает незначительное увеличение прочности бетона. Результаты исследований подтверждают, что при производстве тонкомолотых многокомпонентных цементов необходимо применение эффективных помольных агрегатов, использование которых не дает прироста энергетических затрат. К числу таких агрегатов относится строжневой виброистиратель, в котором механические воздействия на измельчаемый материал осуществляется в виде удара и трения. Результатом тонкого измельчения алюмосиликатного сырья является повышение запаса свободной энергии вещества, возникающее за счет увеличения поверхности и дефектности пространственной атомной и молекулярной структуры механически обработанного твердого тела.

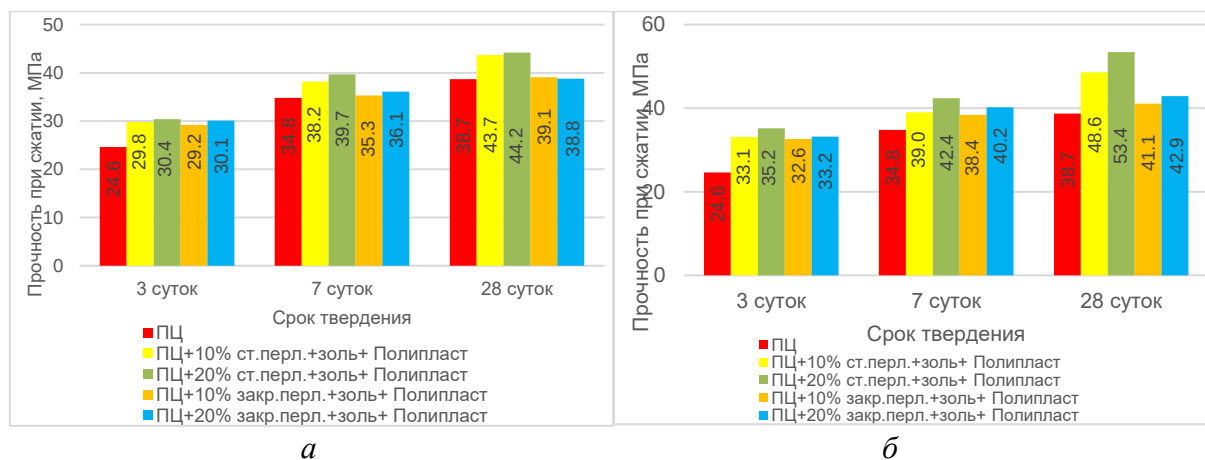


Рисунок 2 - Прочность при сжатии образцов бетона с добавлением золя кремниевой кислоты и тонкодисперсного перлита:

а –удельная поверхность перлита 300 м²/кг

б –удельная поверхность перлита 600 м²/кг

Исследование прочности на растяжение при изгибе образцов гидротехнического бетона с использованием тонкодисперсного стекловидного и закристаллизованного перлита (рис. 3) показали, что наибольшая прочность на растяжение при изгибе достигается с использованием 10% стекловидного перлита ($S_{уд} = 600 \text{ м}^2/\text{кг}$) – 7,5 МПа, при этом составы с использованием закристаллизованного перлита показали уменьшение прочности в среднем на 8%.

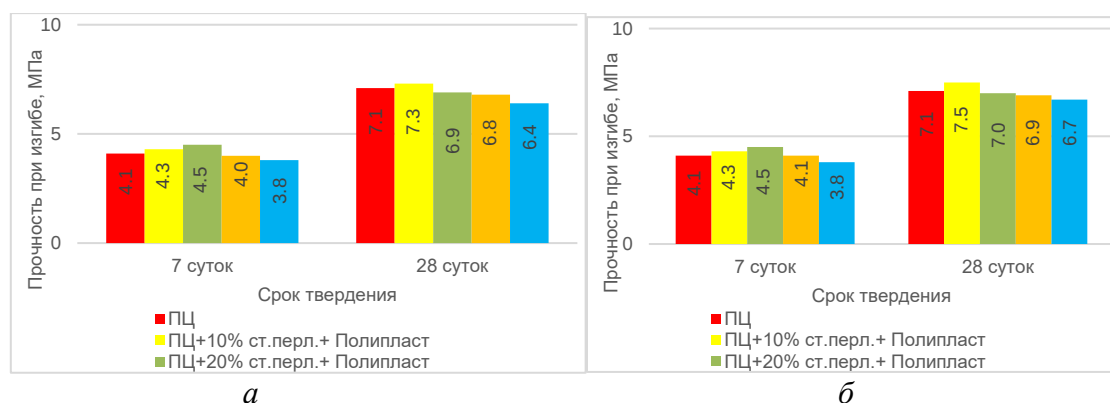


Рисунок 3 - Прочность на растяжение при изгибе образцов бетона с добавлением тонкодисперсного перлита:

а – удельная поверхность 300 м²/кг

б – удельная поверхность 600 м²/кг

При совместном применении стекловидного перлита ($S_{yd}=300 \text{ м}^2/\text{кг}$) и золя кремниевой кислоты (рис. 4а) происходит повышение прочности на растяжение при изгибе у составов с 10 и 20% стекловидного перлита до 8,1 и 8,4 МПа, соответственно, что на 14% и 21% выше прочности контрольного состава. Наиболее высокие значения прочности на растяжение при изгибе достигаются с применением тонкодисперсного стекловидного перлита ($S_{yd}=600 \text{ м}^2/\text{кг}$) и золя кремниевой кислоты (рис. 4б). Увеличение прочности на растяжение при изгибе происходит у всех исследуемых составов. Максимальное увеличение прочности на растяжение при изгибе наблюдается при замене портландцемента 10 и 20% стекловидного перлита и золя кремниевой кислоты – 10,6 и 10,9 МПа, соответственно, что почти на 50% выше прочности бетона контрольного состава.

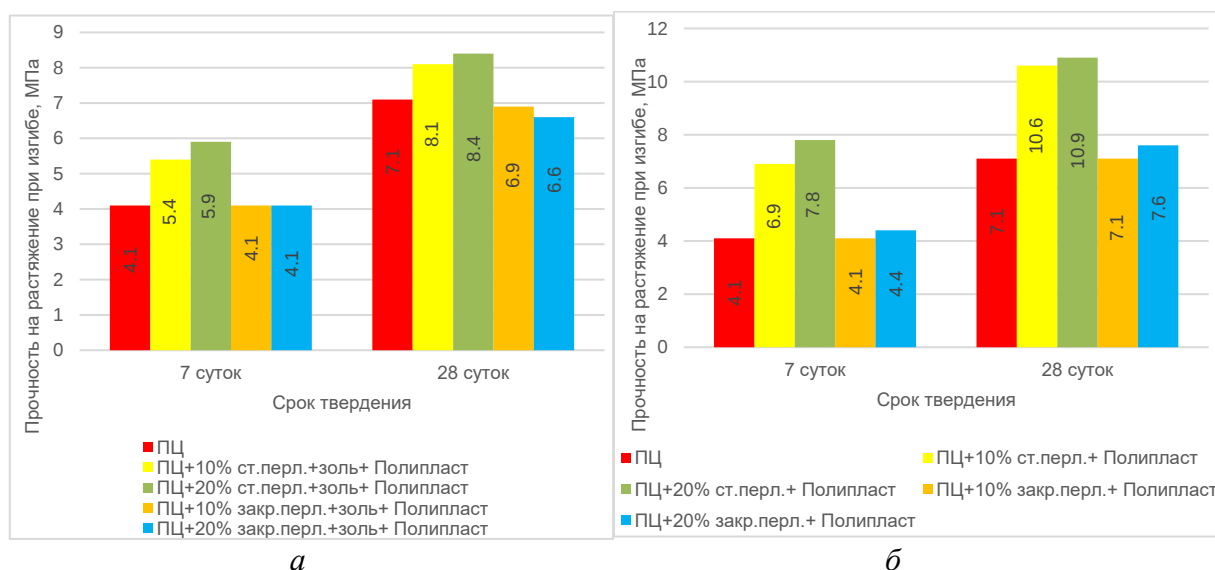


Рисунок 4. Прочность на растяжение при изгибе образцов бетона с добавлением золя кремниевой кислоты и тонкодисперсного перлита:

а – удельная поверхность перлита 300 м²/кг

б – удельная поверхность перлита 600 м²/кг

Гидротехнический бетон оптимального состава с применением стекловидного и закристаллизованного перлита и золя кремниевой кислоты исследованы на трещиностойкость (рис. 5). Коэффициент трещиностойкости $K_{тр}$ косвенно оценивался по отношению $R_{изг}/R_{сж}$.

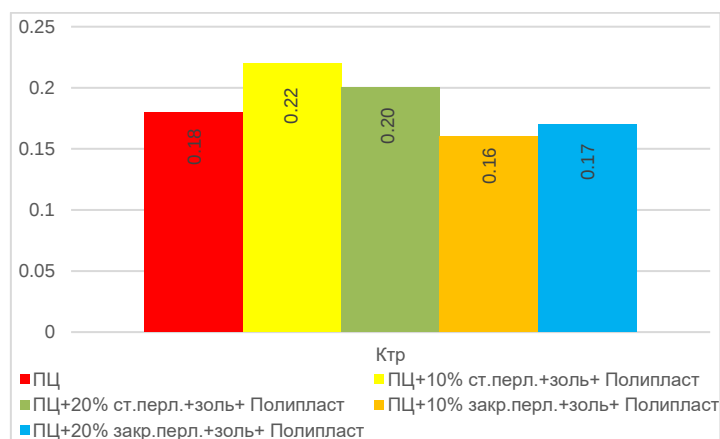


Рисунок 5 - Показатель трещиностойкости гидротехнического бетона

Высокие показатели трещиностойкости гидротехнического бетона $K_{тр}$ показали составы с тонкодисперсным стекловидным перлитом (10,20% по массе), золом кремниевой кислоты и суперпластификатором Полипласт – 0,22 и 0,20, что превышает показатель трещиностойкости бездобавочного состава (0,18) бетона в среднем на 22%. Значительный рост прочности обусловлен изменением структуры и химико-минералогического состава гидротехнического бетона с использованием композиционного вяжущего на основе тонкодисперсных и коллоидных добавок [13-15]. Важную роль играет пуццолановая активность стекловидного перлита, которая проявляется в изменении баланса гидратных фаз цементного камня, способствуя тем самым увеличению объёма более прочных и стабильных низкоосновных гидросиликатов кальция и формированию плотных конгломератных структур.

Наличие в среднем 60-80% стекловидной фазы в стекловидном перлите способствует повышению прочности гидротехнического бетона по сравнению с использованием закристаллизованного перлита аналогичного химического состава. Это связано с увеличением содержания аморфной фазы в алюмосиликатных породах и её дальнейшей аморфизацией при тонком измельчении в энергоёмких измельчителях [16-18]. Аморфный кремнезем в составе перлита связывает свободный гидроксид кальция, выделяющийся в процессе гидратации цемента, что приводит к образованию дополнительного объёма низкоосновных гидросиликатов кальция.

При увеличении удельной поверхности перлита повышается прочность гидротехнического бетона с композиционным вяжущим, так как ультрадисперсные частицы перлита заполняют промежутки между более крупными частицами цемента. Это приводит к формированию однородной и пластичной смеси с плотной упаковкой частиц и множественными коагуляционными контактами [19].

Коллоидная добавка в виде золя кремниевой кислоты превращается в гель, что способствует уплотнению микроструктуры твердеющего состава. Золя кремниевой кислоты усиливает гидратационную активность силикатсодержащих минералов портландцемента и реагирует с гидратной известью, приводя к образованию тоберморитоподобных гидросиликатов кальция. Образующие гидросиликаты армируют твердеющую систему, повышая тем самым её прочность на растяжение при изгибе.

Для повышения долговечности, эксплуатационных свойств и трещиностойкости гидротехнического бетона выполнены исследования по определению деформативных свойств бетона на оптимальном составе, который показал высокие физико-механические характеристики (табл. 2).

Таблица 2 – Деформативные свойства гидротехнического бетона на основе композиционного вяжущего

Состав	Призменная прочность, МПа		Модуль упругости E_b , МПа $\times 10^3$		Коэффициент Пуассона	
	3 суток	28 суток	3 суток	28 суток	3 суток	28 суток
ПЦ	19,8	34,6	22,974	32,362	0,18	0,216
ПЦ + 20% Стекл. перлита + Полипласт	23,4	40,2	24,084	35,680	0,18	0,202
ПЦ + Золь+ Полипласт	25,6	39,6	23,742	34,493	0,17	0,191
ПЦ + 20% Стекл. перлита + Золь + Полипласт	30,1	46,3	26,247	37,345	0,17	0,199

Анализ результатов деформативных свойств бетона показал, что совместное применение стекловидного перлита, золя кремниевой кислоты и суперпластификатора дает увеличение призменной прочности по сравнению с контрольным составом с 34,6 МПа до 46,3 МПа. Повышенные значения призменной прочности гидротехнического бетона главным образом связаны с большей кубиковой прочностью представленных составов бетона по отношению к контрольному образцу.

Модуль упругости E_b составов с 20% стекловидного перлита + Полипласт и состава с золой кремниевой кислоты + Полипласт повышается по сравнению с бездобавочным составом в среднем на 10-12%. Совместное использование стекловидного перлита, золя кремниевой кислоты и суперпластификатора Полипласт увеличивает модуль упругости на 16% по сравнению с контрольным составом. При этом составы с отдельным применением стекловидного перлита и золя кремниевой кислоты уменьшают коэффициент Пуассона по сравнению с контрольным составом с 0,216 до 0,202 и 0,191 соответственно.

Повышение модуля упругости гидротехнического бетона на основе композиционного вяжущего с применением тонкодисперсных и коллоидных добавок происходит за счет уплотнения структуры, вызванного взаимодействием перлита, золя и суперпластификатора с продуктами гидратации цемента и образованием дополнительных связей гидросиликата кальция. Кроме того, более низкое водоцементное отношение снижает пористость цементного камня и бетона, что также способствует увеличению модуля упругости [20,21]. В свою очередь уменьшение коэффициента Пуассона объясняется введением поликарбоксилатного суперпластификатора Полипласт и золя кремниевой кислоты, которые модифицируют структуру бетона, увеличивая количество структурных элементов в гидратированных оболочках зерен. Это приводит к повышению поверхности скольжения частиц, снижению поперечных деформаций и, как следствие, уменьшению коэффициента Пуассона.

Таблица 3 – Определение гидрофизических характеристик

Состав	Водопоглощение по массе, W_m , %	Водонепроницаемость	
		Время падения давления в камере устройства ВВ-2, с	Марка бетона по водонепроницаемости
ПЦ	4,90	186	W10
ПЦ + 20% Стекл. перлита + Полипласт	3,66	294	W12
ПЦ + Золь+ Полипласт	3,05	391	W14
ПЦ + 20% Стекл. перлита.+ Золь + Полипласт	2,43	573	W16

Для повышения срока службы гидротехнического бетона немаловажным является обеспечение требуемых гидрофизических характеристик бетона, а именно показателей по водопоглощению и водонепроницаемости (табл. 3).

Исследование влияния дисперсного перлита и золя кремниевой кислоты на водопоглощение гидротехнического бетона (табл. 3) показало, что совместное использование стекловидного перлита, золя кремниевой кислоты и суперпластификатора Полипласт уменьшает водопоглощение по массе на 50% по сравнению с контрольным составом.

Данные результаты свидетельствуют о формировании плотной структуры гидротехнического бетона. Достаточно низкое водопоглощение бетона объясняется особенностями строения его порового пространства. Использование тонкодисперсного перлита и золя кремниевой кислоты в коллоидном состоянии способствует созданию микрокапиллярной структуры и значительному снижению объема макрокапилляров и, таким образом, уменьшению водопоглощения [22-24].

Результаты исследования водонепроницаемости показали, что для составов с раздельным сочитанием стекловидного перлита и золя кремниевой кислоты с суперпластификатором Полипласт марка бетона по водонепроницаемости увеличилась до W12-W14 по сравнению с контрольным составом – W10. Совместное сочитание 20% стекловидного перлита, золя кремниевой кислоты в коллоидном состоянии и суперпластификатора Полипласт повысила марку бетона по водонепроницаемости до W16.

Повышение водонепроницаемости бетона можно объяснить процессом поликонденсации, который протекает на всех стадиях золь-гель трансформации. В ходе этого процесса формируются микрогелевые структуры, включающие молекулы разной молекулярной массы — от отдельных мономеров до сложных полимеров [25,26]. Поликонденсация внутри частиц приводит к их уплотнению, а на стадии гелеобразования укрепляет коагуляционные связи между частицами. Образующиеся гелевые продукты заполняют микропоры бетонной структуры, образуя плотную и однородную матрицу [27]. Введение перлита в бетон способствует образованию низкоосновных гидросиликатов кальция, которые также играют ключевую роль в увеличении водонепроницаемости материала.

Выводы

1. Решение проблемы трещинообразования, а также повышения физико-механических, деформативных и гидрофизических свойств гидротехнического бетона может быть осуществлено за счет модификации бетона композиционным вяжущим, в состав которого входят ультра- и тонкодисперсные кремнеземсодержащие добавки.

2. Разработанный состав гидротехнического бетона с использованием композиционного вяжущего на основе тонкодисперсных алюмосиликатных пород и коллоидной добавки имеет повышенные физико-механические, деформативные и гидрофизические свойства: прочности на сжатие – 53,4 МПа; предел прочности на растяжение при изгибе – 10,9 МПа; коэффициент трещиностойкости – 0,20; призмную прочность – 46,3 МПа; модуль упругости $37,345 \text{ МПа} \times 10^3$; Коэффициент Пуассона – 0,199 водопоглощение – по массе – 2,43%; марку по водонепроницаемости – W16.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 234–241. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.209
2. Bingqi L., Zhenhong W., Yunhui J., Zhenyang Z. Temperature control and crack prevention during construction in steep slope dams and stilling basins in high-altitude areas // *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10. Pp. 1–15. DOI: 10.1177/ 1687814017752480

3. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of thermal-stresses and contraction joint distance of rcc dams // Journal of Thermal Stresses. 2013. Vol. 36. Issue 2. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
4. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 237. P. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
5. Григорьев В.Г., Козлова В.К., Андрияшина Е.Е., Шкробко Е.В., Лихошерстов А.А. Композиционные портландцементы для гидротехнического строительства // Ползуновский вестник. 2012. №1-2. С.62-64. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-portlandtsementy-dlya-gidrotehnicheskogo-stroitelstva>.
6. Иванов А.А., Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Хардаев П.К. Исследование влияния тонкодисперсных добавок на свойства композиционных вяжущих для гидротехнического бетона // Вестник ВСГУТУ. 2023. № 2(89). С. 80-88. DOI: 10.53980/24131997_2023_2_80
7. Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Корнеев А.И. Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором с повышенными эксплуатационными показателями // Строительство и реконструкция. 2022. № 2 (100). С. 112-119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119.
8. Li Q., Liang G., Hu Y., Zuo Z. Numerical analysis on temperature rise of a concrete arch dam after sealing based on measured data // Mathematical Problems in Engineering, 2014 (6), pp. 1-10. DOI:10.1155/2014/602818
9. Анискин Н.А., Чонг Чык Нгуен. Проблема температурного трещинообразования в бетонных гравитационных плотинах // Вестник МГСУ, 2020. -№3. – С. 380-398. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.380-398
10. Yerramala A., Ganesh Babu K. Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete // Cement and Concrete Composites. 2011. № 33, issue. 10. pp. 1057–1062. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.07.010
11. Tkach E.V., Filimonova YU.S. Модифицированный тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего для гидромелиоративного строительства // Техника и технология силикатов. 2022. Т. 29. № 4. С. 326-334. URL: <https://elibrary.ru/zeudxh?ysclid=m1j3b43xj4220283422>.
12. Ларсен О.А., Александрова О.В., Наруть В.В., Полозов А.А., Бахрах А.М. Исследование свойств активных минеральных добавок для применения в гидротехническом строительстве // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2020. №8. С. 8-14. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-8-17.
13. Касаткин С.П. Высокоэффективный бетон, модифицированный комплексной химической добавкой, содержащей нанодисперсии гидроксида кремния: диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2023. – 138 с. URL: https://pstu.ru/files/2/file/Dissertaciya_Kasatkin_S.P._02.07.2023.pdf
14. Урханова, Л.А., Иванов А.А., Лхасаранов С.А. Композиционный цемент с дисперсным перлитом и коллоидной добавкой для гидротехнического бетона // Цемент и его применение. - 2024. № 1-2024. DOI: 10.61907/CIA.2024.87.76.001
15. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов. М.: МИСИ-МГСУ. 2013, 201 с. URL:<https://mgsu.ru/resources/izdatelskayadeyatelnost/izdaniya/monografii/1725/?ysclid=m09bb4v43i945506938>
16. Shane D., Mark T., Cheeseman C.R., Comparison of test methods to assess pozzolanic activity // Cement and Concrete Composites. 2010. № 32 (2). pp. 121–127. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008
17. Урханова Л.А., Цыдыпова А.Ц. Влияние золя кремнекислоты на физико-механические свойства полистиролбетона //Строительные материалы. 2018. №1-2. С.45-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-45-51>
18. Жерновой Ф.Е., Мирошников Е.В. Комплексная оценка факторов повышения прочности цементного камня добавками ультрадисперсного перлита // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова, 2009. - №2. С. 55-60. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-faktorov-povysheniya-prochnosti-tsementnogo-kamnya-dobavkami-ultradispersnogo-perlita>
19. Лесовик В.С., Жерновой Ф.Е., Глаголев Е.С. Использование природного перлита в составе смешанных цементов // Строительные материалы, 2009. - № 6. С. 84-87. URL: <https://elibrary.ru/kuucdt?ysclid=m09bh8i6g321380846>
20. Aniskin N.A., Nguyen T.C., Hoang Q.L. Influence of size and construction schedule of massive concrete structures on its temperature regime // MATEC Web of Conferences. 2018. vol. 251. p. 02014. DOI: 10.1051/mateconf/201825102014
21. Лхасаранов С.А., Урханова Л.А., Иванов А.А., Смирнягина Н.Н. Исследование фазового состава композиционных вяжущих для гидротехнического бетона // Вестник ВСГУТУ. 2024. №2 (93). DOI 10.53980/24131997_2024_2_112
22. Hang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of taishan roller compacted concrete gravity dam // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. vol. 237. p. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
23. Tkach E., Filimonova Y. Modified concrete for irrigation and drainage construction // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 410. DOI:10.1051/e3sconf/202341001007.
24. Nguyen T.C., Luu X.B. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation // Magazine of Civil Engineering. 2019. vol. 4 (88). pp. 70–79. DOI: 10.18720/MCE.88.

25. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Саркисов Ю.С. и др. Исследование свойств цементного камня с комплексной добавкой // Вестник ТГАСУ. - 2020. – Т. 22, № 4. – С. 147–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-147-156
26. Зеленкевич Д.С., Ягубкин А.Н., Бозылев В.В. Использование полимерно-минеральных добавок для повышения водонепроницаемости и морозостойкости бетона // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2013. №16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-polimerno-mineralnyh-dobavok-dlya-povysheniya-vodonepronitsaemosti-i-morozostoykosti-betona>
27. Байбурун А.Х., Кочарина Е.Н., Кочарин Н.В., Киянец А.В., Лебедь А.Р. Влияние химических добавок на свойства бетона // ИВД. 2022. №6 (90). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-himicheskikh-dobavok-na-svoystva-betona>.

REFERENCES

1. Barbara K., Maciej B., Maciej P., Aneta Z. Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. Pp. 234–241. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.209
2. Bingqi L., Zhenhong W., Yunhui J., Zhenyang Z. Temperature control and crack prevention during construction in steep slope dams and stilling basins in high-altitude areas. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 10. Pp. 1–15. DOI: 10.1177/1687814017752480
3. Kuzmanovic V., Savic L., Mladenovic N. Computation of thermal stresses and contraction joint distance of rcc dams. *Journal of Thermal Stresses*. 2013. Vol. 36. Issue 2. Pp. 112–134. DOI: 10.1080/01495739.2013.764795
4. Zhang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperature field of Taishan roller compacted concrete gravity dam [IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. 2019.] Vol. 237. P. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117
5. Grigoriev V.G., Kozlova V.K., Andryushina E.E., Shkrobko E.V., Likhoshershtov A. A. Composite Portland cements for hydraulic engineering. *Polzunovsky Bulletin*. 2012. Vol. 1-2. P.62-64. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnye-portlandsementy-dlya-gidrotehnicheskogo-stroitelstva>.
6. Ivanov A.A., Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Khardaev P.K. Study of the influence of finely dispersed additives on the properties of composite binders for hydraulic concrete. [Bulletin of VSGUTU. 2023]. Vol. 2 (89). P. 80-88. DOI: 10.53980/24131997_2023_2_80
7. Tkach E.V., Filimonova Yu.S., Korneev A.I. Heavy concrete based on a polydisperse binder with a complex polymer modifier with improved performance indicators. *Construction and Reconstruction*. 2022. Vol. 2 (100). P. 112-119. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-100-2-112-119.
8. Li Q., Liang G., Hu Y. , Zuo Z. Numerical analysis of temperature rise of a concrete arch dam after sealing based on measured data. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014 (6), Pp. 1-10. DOI:10.1155/2014/602818
9. Aniskina N.A., Chong Chyk Nguyen. The problem of temperature cracking in concrete gravity dams. Bulletin of MGSU, 2020. - No. 3. – P. 380-398. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.3.380-398
10. Yerramala A., Ganesh Babu K. Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33, issue. 10. Pp. 1057–1062. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.07.010
11. Tkach E.V., Filimonova YU.S. Modified heavy concrete based on polydisperse binder for irrigation and drainage construction. *Silicate engineering and technology*. 2022. Vol. 29. No. 4. P. 326-334. URL: <https://elibrary.ru/zeudxh?ysclid=m1j3b43xj4220283422>.
12. Larsen O.A., Aleksandrova O.V., Narut V.V., Polozov A.A., Bakhrakh A. M. Study of the properties of active mineral additives for use in hydraulic engineering. *Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov*. 2020. Vol. 8. P. 8-14. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-8-8-17.
13. Kasatkin S.P. Highly effective concrete modified with a complex chemical additive containing nanodispersions of silicon dioxide hydrous: dissertation for the degree of . degree of candidate of technical sciences. – Saint Petersburg, 2023. – 138 p. URL: https://pstu.ru/files/2/file/Dissertaciya_Kasatkin_S.P._02.07.2023.pdf
14. Urkhanova, L.A., Ivanov A.A., Lhasaranov S.A. Composite cement with dispersed perlite and colloidal additive for hydraulic concrete. *Cement and its application*. - 2024. Vol. 1-2024. DOI: 10.61907/CIA.2024.87.76.001
15. Bazhenov Yu.M., Alimov L.A., Voronin V.V. Structure and properties of concrete with nanomodifiers based on technogenic waste. M.: MISI-MGSU. 2013, 201 p. URL: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskayadeyatelnost/izdaniya/monografii/1725/?ysclid=m09bb4v43i945506938>
16. Shane D., Mark T., Cheeseman C.R., Comparison of Test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010. Vol. 32 (2). Pp. 121–127. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008
17. Urkhanova L.A., Tsydypova A.Ts. Effect of silica sol on the physical and mechanical properties of polystyrene concrete. *Construction materials*. 2018. Vol. 1–2 . P.45-51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-756-1-2-45-51>
18. Zhernovoy F.E., Miroshnikov E.V. Comprehensive assessment of factors increasing the strength of cement stone by adding ultrafine perlite. *Bulletin of the BSTU named after V. G. Shukhov*, 2009. - Vol. 2. P. 55-60. URL:

<https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-otsenka-faktorov-povysheniya-prochnosti-tsementnogo-kamnya-dobavkami-ultradispersnogo-perlita>

19. Lesovik V.S., Zhernovoy F.E., Glagolev E. S. Use of natural perlite in the composition of mixed cements. *Construction materials*, 2009. - Vol. 6. P. 84-87. URL: <https://elibrary.ru/kuucdt?ysclid=m09bh8i6g321380846>

20. Aniskin N.A., Nguyen T.C., Hoang Q.L. Influence of size and construction schedule of massive concrete structures on its temperature regime. [MATEC Web of Conferences. 2018]. vol. 251. p. 02014. DOI: 10.1051/mateconf/201825102014

21. Lkhasaranov S.A., Urkhanova L.A., Ivanov A.A., Smirnyagina N.N. Study of phase composition of composite binders for hydraulic concrete. *Bulletin of VSGUTU*. 2024. Vol. 2 (93). DOI 10.53980/24131997_2024_2_112

22. Hang X., Shi R., Dai H., Liu Q., Zhang X. Simulation and research on temperament field of Taishan roller compacted concrete gravity dam. [IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019]. vol. 237.p. 032117. DOI: 10.1088/1755-1315/237/3/032117

23. Tkach E., Filimonova Y. Modified concrete for irrigation and drainage construction. [E3S Web of Conferences. 2023.] Vol. 410. DOI:10.1051/e3sconf/202341001007.

24. Nguyen T.C., Luu X.B. Reducing temperature difference in mass concrete by surface insulation. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. vol. 4 (88). Pp. 70–79. DOI: 10.18720/MCE.88.

25. Dem'yanenko O.V., Kopanitsa N.O., Sarkisov Yu.S., et al. Study of the properties of cement stone with a complex additive. [Bulletin of TSUACE.] - 2020. - Vol. 22, No. 4. - P. 147–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-4-147-156

26. Zelenkevich D.S., Yagubkin A.N., Bozylev V.V. Use of polymer-mineral additives to improve the water impermeability and frost resistance of concrete. [Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied Sciences]. 2013. Vol. 16. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-polimerno-mineralnyh-dobavok-dlya-povysheniya-vodonepronitsaemosti-i-morozostoykosti-betona>

27. Bayburin A.Kh., Kocharina E.N., Kocharin N.V., Kiyanets A.V., Lebed A.R. Influence of chemical additives on the properties of concrete. [IVD]. 2022. Vol. 6 (90). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyaniye-himicheskikh-dobavok-na-svoystva-betona>

Информация об авторах

Урханова Лариса Алексеевна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Градостроительство»,

E-mail: urkhanova@mail.ru

Иванов Андрей Андреевич

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ), г.Улан-Удэ, Россия, аспирант кафедры «Строительные материалы, автомобильные дороги и деревообработка»,

E-mail: vadim290607@gmail.com

Лхасаранов Солбон Александрович

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (ВСГУТУ), г.Улан-Удэ, Россия, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные материалы, автомобильные дороги и деревообработка»

E-mail: solbon230187@mail.ru

Information about authors:

Urkhanova Larisa A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning,

E-mail: urkhanova@mail.ru

Ivanov Andrey A.

East Siberian State University of Technology and Management (VSGUTU), Ulan-Ude, Russia, Postgraduate student of the Department of Construction Materials, Highways and Woodworking,

E-mail: vadim290607@gmail.com

Lhasaranov Solbon A.

East Siberian State University of Technology and Management (VSGUTU), Ulan-Ude, Russia, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Construction Materials, Highways and Woodworking

E-mail: solbon230187@mail.ru