

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦЕМЕНТОВ МИНЕРАЛЬНО- ОРГАНИЧЕСКИМИ ДОБАВКАМИ

**Дж.Х. Сайдзода, Р.Х. Сайрахмонов, Я.Г. Назиров, А.С. Раҳматзода**

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими

В статье приведены исследования влияния порошка волластонита (ПВ), золы уноса (ЗУ), модифицированного лигносульфоната (МЛСТ) и щелочного экстракта хлопчатника (ЩЭХ) на физико-механические свойства мелкозернистого бетона. Проведённое исследование позволило установить значительное влияние как минеральных, так и органических добавок на физико-механические свойства мелкозернистого бетона.

**Ключевые слова:** цемент, высокопрочный бетон, добавка, пластификатор, бетонная смесь, волластонит, зола, прочность, коррозионная стойкость.

### **БЕТОНҲОИ СОҲТМОНИ РОҲ БО ИЛОВАҲОИ ХИМИЯВӢ АЗ КОРКАРДИ МАВОДИ РАСТАӢ**

**Ҷ.Х. Сайдзода, Р.Х. Сайрахмонов, Я.Г. Назиров, А.С. Раҳматзода**

Дар мақола тадқиқоти хосиятҳои физикию-механикӣ бетонҳо, бо иловаҳои химиявӣ дар асоси экстракти аз растаниҳо чудо карда шуда омухта шудааст. Нишон дода шудааст, ки истифодাই иловаҳои номбурда хосиятҳои физикавӣ-механикӣ бетонро баланд менамоянд

**Калидвоҷаҳо:** сement, бетони роҳ, иловагиҳо, пластификатор, мустаҳкамӣ, экстрактҳои растаниӣ, устворӣ.

### **INVESTIGATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETE BASED ON MODIFIED CEMENTS WITH MINERAL AND ORGANIC ADDITIVES**

**J.H. Saidzoda, R.H. Sairakhmonov, Ya.G. Nazirov, A.S. Rakhmatzoda**

The article presents studies of the effect of wollastonite powder (WP), fly ash (FA), modified lignosulfonate (MLST) and alkaline extract of cotton (AEC) on the physical and mechanical properties of fine-grained concrete. The conducted research allowed us to establish a significant influence of both mineral and organic additives on the physico-mechanical properties of fine-grained concrete.

**Keywords:** cement, high-strength concrete, additive, plasticizer; concrete mix, wollastonite, ash, strength, corrosion resistance.

### **Введение**

В настоящее время развитие транспортной системы требует повышенного внимания к качеству и надёжности дорожного покрытия. Основной задачей в области дорожного строительства остаётся обеспечение долговечности, ремонтопригодности и устойчивости покрытий к климатическим и эксплуатационным нагрузкам. В условиях роста автопарка и увеличения интенсивности движения на ключевых автомагистралях страны этот фактор становится решающим при выборе конструктивного решения дорожной одежды. Для этих целей внедрение технологии цементобетона в Республике Таджикистан является востребованным. Тем не менее, внедрение цементобетонных технологий в Республике Таджикистан сталкивается с рядом объективных сложностей, включая высокую стоимость портландцемента, ограниченность специализированной техники и отсутствие нормативной базы, адаптированной под местные условия. Одним из путей решения этих проблем является использование модифицированных цементов с добавками минерального и химического происхождения, что позволяет существенно снизить расход цемента, улучшить реологические свойства бетонной смеси и повысить эксплуатационные характеристики готового покрытия.

### **Теоретическая часть**

В практике созданием высококачественных дорожных покрытий является проект прочной основы, которая будет стойкой к подземным водам, дождям, снегу, а также резким перепадам температур. Можно предполагать, что составляющие материалы к покрытиям дорог подбираются таким образом, чтобы сделать его устойчивым и качественным [1-10]. Известно, что цементобетон является основным альтернативным материалом асфальтобетону. Один из важнейших показателей свойства бетона, определяющих его долговечность, кроме устойчивости его структуры при действии на них агрессивной среды, является прочность. В условиях Республики Таджикистан природно-климатические условия региона, характеризующиеся резкими перепадами температуры, значительным уровнем солнечной радиации, а также сезонными обильными осадками, существенно влияют на работоспособность традиционных типов дорожного покрытия, так как в настоящее время большинство из них являются асфальтобетонами. На этой основе можно предполагать, что цементобетонные покрытия, обладая высокими физико-механическими характеристиками, являются эффективной альтернативой асфальтобетонным покрытиям, широко распространённым в республике. Для этих целей применение цементобетона в дорожном строительстве при устройстве дорожных покрытий позволяет значительно повысить срок службы дорог и снизить частоту ремонтов и обеспечить устойчивость к воздействию агрессивных факторов окружающей среды [10-11].

Уместно отметить, что цементобетон имеет повышенную прочность на сжатие, минимальные усадочные деформации, устойчивость к ультрафиолетовому излучению, а также отсутствие пластических деформаций при высоких температурах. В производственных условиях чтобы достичь выносливость цементных бетонов производят различные работы: -повышают однородность цементного камня; -применяют цементы с повышенным содержанием алюмоферитов; используют различные химические добавки: -увеличивают расход цемента. Однако на практике не все эти вышеупомянутые мероприятия дадут бетону всестороннюю выносливость. Например, добавление ускорителей твердения, повышенное содержание С<sub>3</sub>А, пропаривание в определённой мере уменьшают устойчивость бетона при эксплуатации. Отсюда можно предположить, что в практике технологии цементных вяжущих и бетонов на их основе существенно возрастает интерес к поверхностно-активным и тонкодисперсным минеральным добавкам, которые, в основном, используются в качестве пластифицирующих, гидрофобизирующих или активных и инертных наполнителей цемента [6-8].

Анализ ряда работ авторов [2, 3] показывает, что для дорожного бетона, эксплуатируемого в дорожных покрытиях, подвергающегося воздействию агрессивной окружающей среды, существует проблема его преждевременного разрушения вследствие недостаточной эксплуатационной стойкости. Известно, что на сегодняшний день дорожный портландцемент достаточно популярен для создания бетона для автомобильных дорог, ведь он обладает именно теми свойствами, которые необходимы для создания качественного покрытия. Такой вид портландцемента характеризуется: -максимальной прочностью; -стойкостью к морозу; -ударной вязкостью; -водонепроницаемостью. Практика показывает, что обычный портландцемент не может иметь подобные качества без специальных добавок. Для дорожного цемента характерно присутствие в составе пластифицирующих и гидрофобных добавок. Также в составе можно обнаружить доменный шлак (около 15% от общей массы) и трехкальциевый алюминат (не более 8%) [9-11]. Они должны иметь определенную стандартную скорость схватывания и набор прочности, высокую износостойкость, высокую морозостойкость и ударную вязкость. Начало схватывания таких цементов должно наступать не ранее чем через 2ч от начала затвердения [9-11]. Можно отметить, что способность дорожного цемента к медленному схватыванию помогает при строительстве сооружения, находившегося на больших расстояниях. Обычно в среднем такой специальный портландцемент начинает застывать только через 120 минут, а вот обычный схватывается уже через 45 минут.

По мнению авторов [8, 9], важным фактором, влияющим на структуру бетона, является количество воды, принимаемое для приготовления бетонной смеси. По их мнению, для гидратации цемента необходимо 30-40% воды от общего принимающего количества воды в единице объема бетонной смеси. Однако в практике для обеспечения подвижности бетонной смеси количество воды берут с некоторым избытком. По мнению авторов [9-10], избыточная вода остается в структуре бетона, свободна при эксплуатации. Впоследствии вступает в химическое соединение с менее активными частицами цемента, а в результате заполняет поры и капилляры в цементном камне и полостях между зернами крупного заполнителя по истечении времени, испаряясь, освобождает их. В практике технологии цементных вяжущих и бетонов на их основе существенно возрастает интерес к поверхностно-активным и тонкодисперсным минеральным добавкам, которые, в основном, используются в качестве пластифицирующих, гидрофобизирующих или активных и инертных наполнителей цемента. В производственных условиях применение пластифицирующих добавок придает бетонным и растворным смесям нерасслаиваемость, сохранение удобоукладываемости во времени [4-6]. Для придания бетону подвижности необходимо в его составе применять химические добавки: модифицированный лигносульфонат (МЛСТ), щелочной экстракт хлопчатника (ЩЭХ) и другие пластифицирующие добавки. Химические добавки имеют ресурсные базы производства в Республике Таджикистан, характеристика и их способы получения приведены в ряде работ отечественных авторов [12-16].

Целью эксперимента являлось изучение прочности цементного теста, его реологических характеристик и структурных изменений при введении добавок. Образцы цементного теста изготавливались в соответствии с ГОСТ 30744-2001 и выдерживались в стандартных климатических условиях. Для проведения комплексного исследования были выбраны материалы, которые обеспечивают получение мелкозернистого бетона с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Подбор материалов производился с учётом климатических, экономических и ресурсных условий Республики Таджикистан, а также в соответствии с современными требованиями к прочности, долговечности и устойчивости бетонных конструкций.

## Материалы и методы исследования

Для исследования применялись материалы местного значения.

В качестве основного вяжущего использовался портландцемент марки ПЦ 400-Д20, тонкость помола 96%, истинная плотность 3,06г/см<sup>3</sup>; величиной удельной поверхности 3376 см<sup>2</sup>/г, активность 40,6Мпа, соответствующая ГОСТ 31108-2016. Цемент обладает стабильной прочностью, нормированной тонкостью

помола и высокой активностью. Его применение обусловлено широким распространением и хорошей совместимостью с минеральными и химическими добавками. Особое внимание уделялось контролю удельной поверхности и сроков схватывания, так как они напрямую влияют на структуру и формирование прочностных характеристик.

### **Минеральные добавки**

- а) **Порошок волластонита** — природный минерал, состоящий в основном из метасиликата кальция ( $\text{CaSiO}_3$ ).  
б). Обладает игольчатой структурой, повышающей ориентацию частиц и способствующей образованию направленной прочной структуры цементного камня. Применяется в качестве микрофиллера, повышает раннюю прочность, уменьшает усадку и улучшает адгезионные свойства [8, 15, 16].  
в) **Зола-унос** — продукт сгорания угля на ТЭЦ. Имеет сферическую форму частиц и высокую пущолановую активность. Применяется для частичной замены цемента с целью снижения стоимости и повышения долговечности. Уменьшает проницаемость и повышает устойчивость к сульфатной агрессии [1-5].

### **Химические добавки**

- а) **Модифицированный лигносульфонат технический** — пластификатор на основе продуктов сульфитной варки древесины. Обеспечивает увеличение подвижности бетонной смеси, снижение водопотребности и повышение плотности структуры. Уменьшает водоцементное отношение, способствуя росту прочности и трещиностойкости [8, 15, 16].  
б) **Щелочной экстракт хлопчатника** — органическая добавка, получаемая из переработки отходов хлопкового производства. В составе имеет полисахариды, которые выполняют роль диспергатора. Повышает равномерность распределения цементных частиц, улучшает удобоукладываемость и снижает усадочные деформации [8, 15, 16].

### **Заполнитель**

В качестве заполнителя использован природный карьерный песок средней крупности, соответствующий требованиям ГОСТ 8736-2014. Песок предварительно просеивался и промывался. Особое внимание уделялось модулю крупности, наличию глинистых и органических примесей.

### **Вода**

Вода применялась питьевого качества в соответствии с ГОСТ 23732-2011. Она не содержала агрессивных примесей, способных негативно повлиять на процессы гидратации и взаимодействие с химическими добавками.

Выбор каждого компонента был обоснован с точки зрения его вклада в достижение заданных свойств бетона: прочности, морозостойкости, плотности, трещиностойкости и водонепроницаемости. Особое внимание уделялось возможности использования местных и доступных материалов, что важно для экономики строительства в Таджикистане.

Для всесторонней оценки эффективности модифицирующих добавок в составе цемента применялся комплекс лабораторных и инструментальных методов, соответствующих отечественным и международным стандартам. Методы исследования охватывали физико-механические, структурные и технологические характеристики вяжущего вещества. Количество добавки выбрали с учётом нормативных показателей (ГОСТ 26633-2015, ГОСТ 10060-2012).

Исследование проводилось в соответствии с ГОСТ 310.3-76 — "Цементы. Метод определения сроков схватывания", ГОСТ 310.4-81 — "Цементы. Метод определения равномерности изменения объёма". Использовалась стандартная методика с применением прибора Вика. Определение нормальной густоты позволяло оценить водопотребность цементного теста, а сроки схватывания — реакционную активность и совместимость добавок с клинкерной составляющей. Прочность при сжатии и изгибе определялась по ГОСТ 30744-2001 "Цементы. Методы испытаний на прочность" на образцах  $40 \times 40 \times 160$  мм. Испытания проводились на возрастах 2, 7 и 28 суток для оценки ранней и марочной прочности. Образцы хранились в стандартных условиях (температура  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , влажность  $>95\%$ ). В практических условиях оптимизация соотношения между вяжущим и добавками в зависимости от их природы производится экспериментальным путем [1-6]. Для этого в пневматическом смесителе перемешивали цемент с добавкой из волластонита и золы угля. Для исследования влияния добавки на физико-механические и деформационные свойства подобран состав бетона, и были изготовлены смеси бетона. Смеси готовились по обычной лабораторной технологии и были изготовлены образцы различных размеров. После образцы хранились при нормально-влажных условиях.

Для оценки влияния добавок на плотность и пористость цементного камня готовились образцы цементного камня с одинаковым водоцементным отношением. Добавки вводились в соответствующих количествах от массы цемента. После твердения в нормальных условиях ( $t = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ , влажность 95%) в течение 28 суток определялись средняя плотность и общая пористость образцов.

Метод РФА применялся для идентификации гидратных новообразований и фазового состава цементного камня с добавками. Анализ позволял оценить вовлечённость добавок в химические реакции и характер продуктов гидратации (C-S-H, портландит, этtringит и др.). Во всех исследованиях контрольным считался состав без добавок.

В таблице 1 приведены результаты экспериментального исследования по определению нормальной густоты теста дорожного цемента.

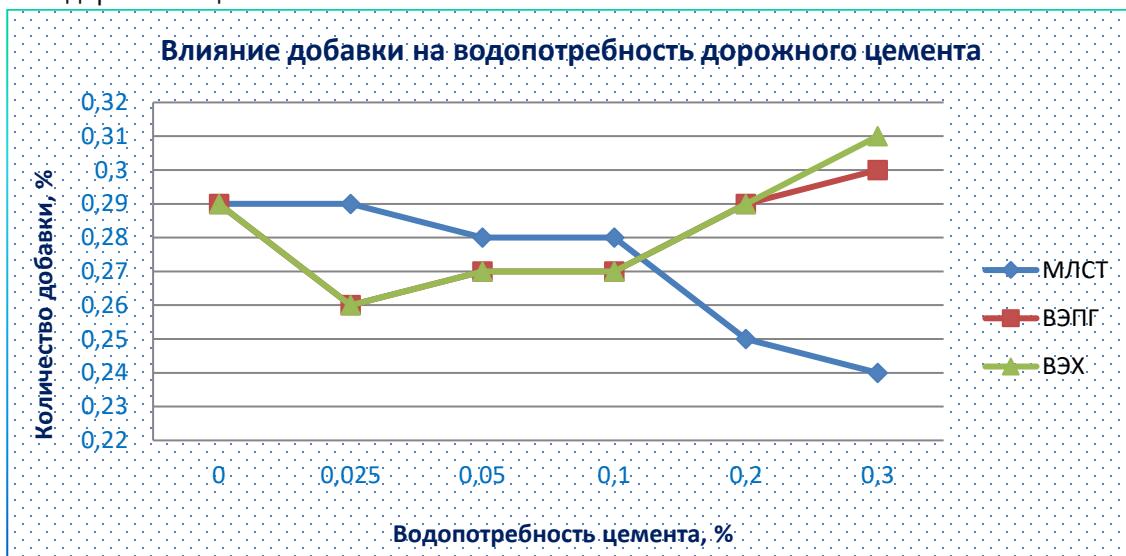


Рисунок 1 - Изменения водопотребности цемента при введении в его состав добавки

Из данных эксперимента (см. рисунок 1) добавка из различных веществ в зависимости от их количества, от веса цемента по-разному изменяют водоцементное отношение по сравнению с тестом без добавок. Добавка ВЭХ в малом количестве от веса цемента уменьшает его водопотребность, однако при увеличении количества добавок из ВЭХ до 0,3% от веса цемента повышает водопотребность цемента. С введением добавок из ВЭПГ в количестве 0,01 до 0,1 % от веса цемента водопотребность цемента понижается, при увеличении количества добавок ВЭПГ от 0,1 до 0,3 повышается вода и цементные отношения. Введение добавок из МЛСТ в количестве до 0,3% коэффициент нормальной густоты цементного теста резко уменьшается. МЛСТ имеет полифункциональные свойства и [10] характеризуется стабильностью.

Результаты определения прочностных характеристик цементного теста приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Прочность цементного теста на сжатие (МПа)

№п/п	Состав	2 суток	7 суток	28 суток
1	Контрольный образец, (без добавок)	28,5	40,06	
2	Волластонит 10%	30,8	44,5	
3	Зола-унос 10%	29,2	43,1	
4	Волластонит 10% + МЛСТ 0,3%	33,4	46,8	
5	Зола-унос 10% + ЩЭ 0,075%	32,1	45,7	
6	Волластонит 10% + ЩЭ 0,075%	33,5	46,1	
	Зола-унос 10% + МЛСТ	32,2	45,2	

Анализ данных таблицы 1 показывает, что добавки минерального происхождения повышают прочность цемента на 10-12% в сравнении с контрольным образцом без добавки. Однако применение минеральных добавок с химическими в комплексе позволяет одновременно улучшить реологические свойства цемента, микроструктуру бетона, устойчивость к влаге и морозу, трещиностойкость, усталостную выносливость и термостабильность. Испытания цементобетонных образцов показали, что использование минеральных и химических добавок значительно повышает их прочность, именно образцы с волластонитом и МЛСТ имеют показатели прочности 47Мпа, когда образец с добавкой, имеющей только волластонит, показатель по прочности 44,5Мпа. Зола-унос в количестве 10% увеличила прочность образцов на 12% в сравнении с контрольным образцом. В данной части экспериментальных исследований рассмотрено влияние местных минерально-органических добавок на плотность и пористость цементного камня. Применение этих добавок направлено на уплотнение структуры, повышение степени гидратации цемента и снижение капиллярной пористости, что способствует росту долговечности и прочности цементных композитов.

Таблица 2 – Влияние добавок на плотность и пористость цементного камня

Наименование добавки	количество % от массы цемента	Плотность образцов, г/см <sup>3</sup>	Пористость, образцов, %	Изменение относительно контроля, %
Без добавки (контроль)	—	2,19	16,4	—
Волластонит (ВП)	5	2,29	13,1	+5,1 / -16,2
Зола угля (ЗУ)	10	2,24	13,8	+3,4 / -14,01
Модифицированный лигносульфонат	0,3	2,26	14,0	+4,2 / -14,9
Щелочной экстракт хлопчатника	0,8	2,22	14,8	+2,1 / -10,8
ЗУ+ МЛСТ	10+0,3	2,28	13,9	+3,1 / -12,6
ВП + МЛСТ	10+0,3	2,34	13,6	+5,8 / -16,9

Из приведённых данных таблицы 2 следует, что введение исследуемых добавок способствует увеличению плотности цементного камня и уменьшению его пористости. Наиболее выраженный эффект достигается при использовании волластонита, который за счёт игольчатой структуры и пузцолановой активности обеспечивает микрофибрillлярное армирование цементной матрицы. Зола угля проявляет эффект микрозаполнения и участвует в образовании вторичных гидросиликатных минералов. Модифицированный лигносульфонат улучшает диспергирование частиц цемента и снижает водопотребность смеси, что приводит к уплотнению структуры. Щелочной экстракт хлопчатника активирует процессы гидратации и взаимодействует с минеральной частью системы, создавая органоминеральные связи, что также снижает общую пористость. В итоге, можно отметить, что все исследованные добавки положительно влияют на плотность цементного камня и снижают его пористость. Где наибольший эффект отмечается при введении волластонита и МЛСТ (повышение плотности на 5,8 % и снижение пористости на 16,9 %). Можно отметить, что комплексное использование добавок органо- и минерального типа позволяет достичь более равномерной структуры цементного камня и повысить долговечность цементных композитов.

Для анализа влияния добавок на микроструктуру цементного камня был проведен рентгенофазовый анализ (РФА). Образцы цементного теста исследовались в возрасте 28 суток. На рис. 2. соответственно выборочно приведена рентгенограмма фазового структурного анализа проб цементного камня и камня с добавками в возрасте 28 сут.

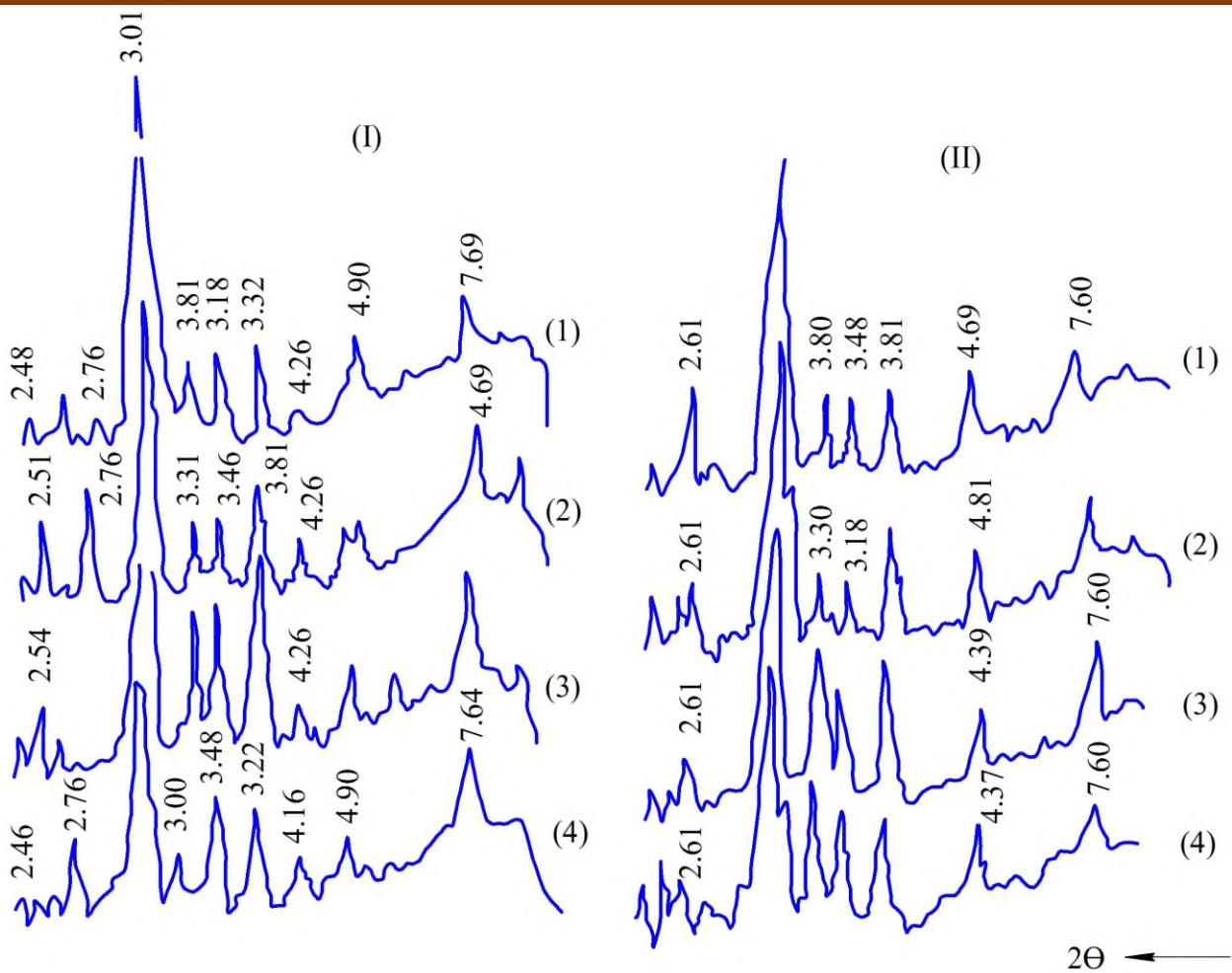


Рисунок 2 - Рентгенограмма цементного камня и камня с добавками:

I) Цемент без добавок; 2) Ц+ПВ10% + МЛСТ 0,3%; 3) Ц+ ЗУ10%+0,05%ВЭХ; 4) Ц+ ВП10% + ЗУ10%+0,3% МЛСТ.

Оценка состояния пиков рентгеновского сектора проведенных выбранных образцов показывает, что добавки ВЭХ способствуют ускорению структурообразования цементных минералов типа тоберморита и т.п., обеспечивающих высокую прочность цементного камня. Добавка МЛСТ, не изменяя морфологии состава цементного камня, способствует разложению разнообразных продуктов гидратации цемента и способствует образованию новых кристаллогидратов в составе цементного камня.

Для исследования комплексного воздействия минеральных и химических добавок на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона были применены следующие добавки:

- порошок минерала волластонита (ВП) (до 10%);
- зола-унос (ЗУ) (до 10%);
- модифицированный лигносульфонат (МЛСТ) (до 0,3%);
- щелочной экстракт хлопчатника (ЩЭХ) (до 0,075%).

Для работы был выбран состав мелкозернистого бетона с применением песка из отсева дробления щебня с модулем крупности 2,5мм. При этом -цемент 400 кг, вода 180 кг В/Ц= 0,45, песок 1780 кг - были отлиты образцы пяти различных составов:

1. Контрольный образец (без добавок).
2. С добавлением порошка волластонита (ВП).
3. С добавлением золы-уноса (ЗУ).
4. С комплексом: ВП + МЛСТ.
5. С комплексом: ЗУ+ЩЭХ.
6. С комплексом 7%ВП+8%ЗУ+ЩЭХ.
7. С комплексом 7%ВП+8%ЗУ+МЛСТ

Результаты исследования приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Физико-механические свойства бетона с добавками

№ состава	Прочность, МПа				OK, см	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	B <sub>п</sub>	W	F
	сжатие			изгиб					
	2	7	28	28					
1	14,3	21,2	40,4	4,63	2	2372	5,25	B6	200
2	14,4	22,3	44,3	5,81	2	2400	4,76	B7	300
3	13,5	21,3	43,1	5,12	2	2395	4,88	B8	300
4	14,6	22,5	46,6	6,80	3	2425	4,21	B8	400
5	14,4	23,6	44,5	6,16	3	2421	4,28	B8	400
6	15,5	23,1	46,4	6,28	4	2435	4,18	B8	450
7	14,9	22,9	45,8	6,91	4	2440	4,16	B8	450

Полученные результаты, приведенные в таблице 3, показывают, что минеральные и химические добавки положительно влияют на прочность как при сжатии, так и при растяжении. Наилучшие результаты достигнуты при комплексном введении добавок, особенно при сочетании волластонита и лигносульфоната, что подтверждает их синергетический эффект. Незначительное увеличение объёмной массы объясняется уплотнением структуры бетона благодаря улучшенному структурообразованию.

Применение комплексных добавок в составе мелкозернистого бетона позволяет повысить его физико-механические свойства, обеспечивая более высокую прочность и плотность. Это делает такие составы перспективными для использования в дорожном строительстве в условиях повышенной эксплуатационной нагрузки.

Одним из важнейших показателей качества бетонной смеси является модуль упругости — способность материала восстанавливать свою форму после снятия нагрузки. Модуль упругости цементобетона — это основной параметр, характеризующий его жёсткость и способность сопротивляться деформациям под действием нагрузок. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 24452-80 на цилиндрических образцах размером 150×300 мм. Трещиностойкость бетона — это его способность сопротивляться зарождению и развитию трещин под действием нагрузок и деформаций (механических, температурных, усадочных). Определение трещиностойкости бетона - важный параметр для оценки его долговечности, особенно при проектировании транспортных, гидротехнических сооружений и железобетонных конструкций.

Трещиностойкость определяли по методу одноосного растяжения (по ГОСТ 29167-91), в лабораторных условиях приготавливали образцы призмы 100×100×400 мм с добавками и без них. Для оценки использовался коэффициент трещиностойкости ( $K_{LC}$ ), измеряемый в МПа·м<sup>0,5</sup>. Испытания проводились на образцах с надрезом при трёхточечном изгибе. После определяли напряжение, при котором возникала первая трещина. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Влияние добавки на модуль упругости и трещиностойкости бетона

№	Состав	Модуль упругости, ГПа	Трещиностойкость $K_{LC}$ (МПа·м <sup>0,5</sup> )
1	Контрольный	28.5	0.47
2	Волластонит 10%	31.0	0.51
3	Зола-унос 10%	30.2	0.53
4	ВП+МЛСТ	33.4	0.58
5	ЗУ+ЩЭХ	32.6	0.6
6	ЗУ+ ВП +ЩЭХ	33.4	0.65
7	ЗУ+ ВП+МЛСТ	33.6	0.68

Анализ результатов показывает, что комплексные добавки обеспечивают значительный прирост модуля упругости по сравнению с контрольным составом. Особенно эффективным оказалось сочетание

волластонита с модифицированным лигносульфонатом. Это указывает на улучшенную микроструктуру и более плотную цементную матрицу. Кроме того, из данных таблицы 4 видно, что добавки способствуют увеличению трещиностойкости бетона на 10–18% по сравнению с контрольным образцом. Особенно эффективным оказалось комплексное применение минеральных и органических добавок. Это связано с улучшением микроструктуры, более равномерным распределением напряжений и повышением сопротивляемости к зарождению и росту микротрещин.

## Выводы

Проведённое исследование позволило установить значительное влияние как минеральных, так и органических добавок на физико-механические свойства мелкозернистого бетона. Полученные результаты можно резюмировать следующим образом:

1. Применение порошка волластонита и золы-уноса в количестве до 10% способствует повышению прочности цемента и улучшению его физико-механических характеристик.
2. Добавки органического происхождения, такие как модифицированный лигносульфонат и щелочной экстракт хлопчатника, положительно влияют на структуру цементного камня, улучшая его однородность и плотность.
3. Комплексное применение минеральных и органических добавок демонстрирует синергетический эффект, обеспечивая максимальные показатели прочности, модуля упругости и трещиностойкости.
4. Наибольшие значения модуля упругости и коэффициента трещиностойкости были зафиксированы у составов с комплексными добавками, что говорит о высокой перспективности их применения в дорожном строительстве.
5. Влияние добавок на процессы структурообразования подтверждает формирование более прочной, устойчивой и микроплотной структуры цементного камня, что положительно отражается на эксплуатационных свойствах бетона. Таким образом, внедрение комплексных модифицирующих добавок в состав цементных композиций позволяет повысить качество, прочность и надёжность мелкозернистого бетона, что особенно важно в условиях повышенных нагрузок и агрессивного климата Республики Таджикистан.

*Рецензент: Умарзода У.Х. — к.т.н., первый заместитель Председателя Комитета по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан.*

## Литература

1. Толмачев С.Н. Влияние вовлеченного воздуха на свойства дорожного бетона и фибробетонов. / Толмачев С.Н., Беличенко Ё.А. // Строительные материалы. 2017. № 1-2. С.68-72.
2. Назиров Я.Г. Прочность и деформативность бетонов с добавкой щелочного экстракта стеблей хлопчатника /Шарифов А. Акрамов А.А., Назиров Я.Г., Муминов А.К. //Известия академии наук Республики Таджикистан. №4(153), -2013.-С.106-112.
3. Назиров Я.Г. Повышение прочности и коррозионностойкости цементсодержащих композиций с экстрагируемыми веществами состава стеблей хлопчатника /Шарифов А. Акрамов А.А., Назиров Я.Г., Муминов А.К//Известия Академии наук Республики Таджикистан. 2016. №5-6.- С.248-252.
4. Зайцев П.А. Бетонные смеси и бетоны с химическими добавками на основе модифицированных лигносульфонатов /П. А. Зайцев и др. //Цемент и его применение. - 2004. - № 1. - С. 70-72.
5. Зайцев П.А. О регулировании свойств бетонных смесей и бетонов химическими добавками на основе лигносульфонатов /П.А. Зайцев, Е.С. Шитиков; А.Феднер; С.Н. Ефимов; А.Б. Самохвалов //Строительные конструкции зданий и сооружений дорожного сервиса: сб. науч. тр. - М.: МАДИ (ГТУ). - 2004. - С. 68-77.
6. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны. Пенза: ПГУАС, 2016. – 156 с
7. Шитиков Е.С. Особенности применения комплексов химических добавок для производства бетонных смесей различного назначения / Е.С. Шитиков, Л.И. Алебастрова, Е.В. Гордеева //Строительные материалы. - 2005. - № 6. - С. 38-40.
8. Сайрахмонов Р.Х. Цементно-волластонитовые вяжущие с химическими добавками и материалы на их основе. Душанбе. ТТУ, 2020, 148 с.
9. Носов В.П., Фотиади А.А. Причины образования уступов на цементобетонных покрытиях автомобильных дорог./ Носов В.П., Фотиади А.А. // Наука и техника в дорожной отрасли, 2008 №. 3, с.20–22.
10. Зайцев П.А. Некоторые вопросы качества бетонных смесей и бетонов в транспортном строительстве /Зайцев П.А. и др. //Прогрессивные конструктивно-технологические решения для тоннеле- и метростроения в России: сб. науч. тр. - М: ОАО ЦНИИС. - 2004. - Вып. 221. - С. 213.
11. Феднев Т.А. Требования к цементам для бетонов различного назначения / JLA. Феднер, С.Н. Ефимов, П.А. Зайцев //Цемент и его применение. - 2005. - № 3. - С. 7-8.
12. Шарифов А. Опыт применения модифицированного лессом СДБ в бетоне / Шарифов А., Дусмурадов Т., Голубев М.Н. и др. //Бетон и железобетон. -1988- № 3,- С. 15-16.

13. Каримов Э.Х. Влияние водного экстракта гетерокомпонентов растительного сырья на физико-химические процессы в тампонажных и пластовых дисперсных системах. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Душанбе, 2019. 43. с.
14. Шарифов А.Ш., Дустмурадов Т., Голубев М.Н. Опыт применения модифицированного лессом СДБ в бетоне. // Бетон и жезобетон. -ю1988.-№3.-С.15-16.
15. Сайрахмонов. Р.Х. Тонкодисперсные минеральные материалы в комплексе с химическими добавками для дорожного бетона / Сайрахмонов. Р.Х., Раҳматзода А..С. и др. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2 (65), -Душанбе, - 2024. С.184. ISSN: 2520-222.
16. Сайрахмонов Р.Х. Теоретические предпосылки и экспериментальное исследование создания бетонов высокого качества для покрытия аэродромов / Сайрахмонов Р.Х, Ҳасан Муҳаммадӣ, Ғағурзода Д.С. // - Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. №3 (71), -Душанбе, - 2025. С.234. ISSN: 2520-2227.

**МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ-INFORMATION ABOUT AUTHORS**

TJ	RU	EN
Сайдзода Ҷамшед Ҳамро	Сайдзода Ҷамшед Ҳамро	Saidzoda Jamshed Hamro
д.и.т., профессор	д.т.н., профессор	doctor of technical sciences, professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: <a href="mailto:Jamshed66@mail.ru">Jamshed66@mail.ru</a>		
TJ	RU	EN
Сайраҳмонов Раҳимҷон Ҳусейнович	Сайраҳмонов Раҳимҷон Ҳусейнович	Sayrakhmonov Rahimjon Huseynovich
н.и.т., дотсент	к.т.н., доцент	candidate of technical sciences associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: <a href="mailto:srivakn@mail.ru">srivakn@mail.ru</a>		
TJ	RU	EN
Назиров Яҳӯ Гиёҳович	Назиров Яҳӯ Гиёҳович	Nazirov Yahyo Giyohovich
н.и.т., и.в. дотсент	к.т.н., и.о. доцента	candidate of technical sciences, acting associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: <a href="mailto:yakhyo80@gmail.com">yakhyo80@gmail.com</a>		
TJ	RU	EN
Раҳматзода Алишер	Рахматзода Алишер	Rakhmatzoda Alisher
унвончӯ	соискатель	graduate student
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осими	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
E-mail: <a href="mailto:srivakn@mail.ru">srivakn@mail.ru</a>		