

МОНОГРАФИЯ

ISSN: 2500-1949

**ИНТЕРНАУКА**  
*internauka.org*



# ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Том 93

**ИНТЕРНАУКА**  
*internauka.org*

# ВОПРОСЫ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ

Монография

Том 93

Москва  
2024

УДК 08  
ББК 94  
В74

**Главный редактор:**

**Ходакова Нина Павловна**, д-р пед. наук, проф. Московского городского педагогического университета, чл.-кор. Академии информатизации образования, проф. Европейской и международной Академии Естествознания, почетный профессор и почетный доктор Российской Академии Естествознания.

**Редакционная коллегия:**

**Бабаева Ф.А.**, канд. пед. наук,  
**Беляева Н.В.**, д-р с.-х. наук  
**Беспалова О.Е.**, канд. филол. наук,  
**Богданов А.В.**, канд. физ.-мат. наук,  
**Большакова Г.И.**, д-р ист. наук,  
**Голованов Р.С.**, канд. полит.  
наук, канд. юрид. наук,  
**Землякова Г.М.**, канд. пед. наук,  
**Зливко А.П.**, канд. юрид. наук,  
**Канокова Ф.Ю.**, канд.  
искусствоведения,

**Кернесюк Н.Л.**, д-р мед. наук,  
**Китиева М.И.**, канд. экон. наук,  
**Коренева М.Р.**, канд. мед. наук,  
**Понькина А.М.**, канд.  
искусствоведения,  
**Савин В.В.**, канд. филос. наук,  
**Тагиев У.Т. оглы.** канд. тех. наук,  
**Харчук О.А.**, канд. биол. наук,  
**Хох И.Р.**, канд. психол. наук,  
**Шевцов В.В.**, д-р экон. наук,  
**Щербаков А.В.**, канд. культурологии.

**Авторы:**

Глава 1: Сидоров Е.П.;

Глава 2: Анисимов К.В., Ситников С.А.;

Глава 3: Телёнок А.А., Степанова И.С., Стурова Е.В., Приймак Н.В.,  
Плотникова Е.П.;

Глава 4: Урядова В.В.;

Глава 5: Адилходжаев А.И., Хасанов Б.Б., Умаров К.С., Кадиров И.А., Шарипова Д.Т., Кудратов Б.Ш., Азимов Д.Т., Тошева Д.Ф., Раджабов М.З., Умаров И.И.;

Глава 6: Кобулов Ж.Р., Икрамова Д.З.к., Абдуллаев Р.Я., Турсунходжаева Р.Ю., Саидивалиев Ш.У., Эргашева З.В., Ташматова М.С., Дехканов М.М.у., Файзуллаев Г.У.у., Нассуллаев А.Х.у.;

Глава 7: Закиров Р.С., Музаффарова М.К.

**В74 Вопросы современной науки:** коллект. науч. монография; – М.: Изд. Интернаука, 2024. Т. 93. – 250 с.

ISSN 2500-1949

ББК 94

© ООО «Интернаука», 2024 г.

## ГЛАВА 5.

### КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

#### Введение

В настоящее время бетон и железобетон остается самым востребованным материалам в строительстве. Это подтверждается как отечественными, так и зарубежными экспертами, прогнозирующими сохранение его ведущей позиции в ближайшем будущем. Глобальный объем производства данных материалов оценивается примерно в двенадцать миллиардов кубических метров в год.

В мировой практике производства различных строительных материалов в частности бетонов и ж/б широко внедряется разработки и технологии, направленные на экономию ресурсов. Одной из ключевых целей в современном бетоноведении является активное реализация концепции "зеленый бетон" и развитие технологий, направленных на создание высокопрочных, высококачественных и долговечных бетонов с требуемыми показателями свойств.

В Узбекистане достигнуты значительные успехи в области повышения качества цементных бетонов за счет использования эффективных химических добавок и минеральных наполнителей, снижения себестоимости производства бетонных конструкций и повышения надежности возводимых зданий и сооружений. В настоящее время при производстве бетонных и железобетонных конструкций малоизученными остаются вопросы разработки коррозионностойких составов бетонных смесей для обеспечения прочностных и сейсмических характеристик проектируемых материалов.

Одним из основных путей реализации данной задачи является разработка технологии производства высококачественных и долговечных конструкций на композиционном вяжущем с применением бинарных микронаполнителей различной природы, в частности, на основе системы "кварц+карбонат".

#### 5.1. Состояние вопроса и задачи исследования

Анализ результатов обследования технического состояния бетонных и железобетонных конструкций объектов различного назначения указывает на то, что развитие деструктивных процессов бетона или арматуры наступает значительно раньше, чем нормативный срок эксплуатации. Это происходит как из-за воздействия различных агрессивных сред, так и преимущественно физико-химических взаимодействий, протекающих

в бетоне при эксплуатации: карбонизации, выщелачивания и развития процессов коррозии цементного камня.

В современной мировой практике широко используются высокопрочные и высококачественные бетоны нового поколения, обладающие высокоплотной структурой. Основными компонентами таких бетонов являются высокомарочные цементы  $\geq M600$  и комплексные добавки на основе минеральных порошков различной природы и химических добавок, в основном суперпластификаторов. Однако несмотря на их преимущества, эти бетоны часто не обеспечивают требуемую долговечность конструкций из-за ослабления структурных связей и как следствие разупрочнению цементного камня.

Для разработки новых материалов с требуемой структурой и физико-механическими параметрами отвечающих в полной мере требованиям, нормативных документов необходимо минимизировать или смягчить негативные факторы, которые могут отрицательно повлиять на долговечность конструкции.

### **5.1.1. Основные причины процесса карбонизации бетона и влияние её на долговечность строительных конструкций**

Железобетонные конструкции эксплуатирующиеся в атмосферной среде, подвергаются воздействию различных газов, преимущественно углекислого газа, который присутствует в воздухе в больших концентрациях. Концентрация  $CO_2$  в атмосфере сельской местности обычно составляет около 0,03% по объему или  $600 \text{ мг/м}^3$ , а в городах и промышленных районах она может быть значительно выше, достигая 0,3% или  $6000 \text{ мг/м}^3$ , а в промышленных цехах – до 1% [1-3].

Вследствие проникновения  $CO_2$  в тело бетона образуется карбонат кальция ( $CaCO_3$ ), который в свою очередь снижает защитные свойства бетона.

Бетон, как пористый материал, активно поглощает углекислый газ, кислород и влагу из окружающей среды. Это поглощение негативно влияет на арматуру, так как при повреждении бетона она оказывается в кислотной среде и начинает корродировать. Образование ржавчины увеличивает объем арматуры, создает внутреннее напряжение и приводит к разрушению бетона и обнажению корродирующей арматуры. Этот процесс разрушения ускоряется, если арматура обнажена, что приводит к быстрой потери несущей способности железобетонных конструкций.

Присутствие  $CO_2$  в атмосфере способствует переходу гидроксида кальция  $Ca(OH)_2$  бетона в карбонат кальция ( $CaCO_3$ ). Эта реакция может протекать при низких концентрациях  $CO_2$ , но глубина карбонизации увеличивается с увеличением его концентрации в воздухе. Факторы,

способствующие ускорению процессов карбонизации цементного камня, во многом предопределяются и зависят от относительной влажности воздуха, проницаемости материала (пористости) и температуры окружающей среды.

Карбонат кальция, образующийся в результате карбонизации, имеет низкую растворимость в воде и стремится заполнить поры на поверхности бетона, что положительно сказывается на его прочности. Однако, когда карбонизация достигает глубоких слоев бетона, контактирующих с арматурой, это может привести к снижению щелочности и потере химических свойств, необходимых для защиты арматуры от коррозии [4].

Важно отметить, что известь, образующаяся при гидратации цемента, создает в бетоне щелочную среду с высоким значением pH, что обычно составляет от 10,5 до 11,5. Однако, когда известь нейтрализуется при взаимодействии с CO<sub>2</sub>, pH бетона снижается, что может привести к потере его способности защищать арматуру от коррозии. Многие исследователи условно считают, что как только pH бетона падает ниже 10, он теряет способность надежно защищать арматуру от коррозии. Минимальным критическим значением pH для бетона считают величину 11,8 [5].

Исследования железобетонных конструкций свидетельствуют о продолжающемся процессе карбонизации бетона в течение всего периода их эксплуатации, хотя этот процесс обычно не проникает на большую глубину. Однако есть исключения, когда конструкции из бетона с недостаточной плотностью или при высокой концентрации CO<sub>2</sub> воздуха подвержены более интенсивной карбонизации [6].

Результаты обследований действующих объектов показывают значительный рост аварийных ситуаций в последние годы из-за карбонизации бетона, что требует масштабных ремонтных работ. Это объясняется тем, что сроки эксплуатации зданий и сооружений, построенных в 50-60-е годы, приближаются к нормативным значениям. Однако, имеются также многочисленные случаи раннего (через 10... 15 лет) повреждения железобетона как из-за высокой проницаемости конструкций, так и недооценки агрессивности среды [7].

Профилактика и устранение указанных выше негативных последствий может быть достигнута путем использования композитов с низкой проницаемостью. Это достигается за счет многоуровневой оптимизации структуры, включающей применение компонентов с различной дисперсностью. Такой подход позволяет создать компактную структуру с минимальной пористостью и эффективно предотвращать проникновение вредных веществ и влаги в поры материала. Кроме этого необходимо

обеспечить подходящие условия для формирования требуемой щелочной среды в цементной системе.

### **5.1.2. Влияние активных минеральных добавок на процесс карбонизации цементных композитов**

Скорость карбонизации бетона, главным образом, зависит от его структуры, в особенности от содержания капиллярных пор и гидратных фаз, а также от его способности реагировать, прежде всего с гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [8].

Вид цемента играет значительную роль. В работе [9] отмечается, что тип и количество цемента в бетоне влияют как на способность удерживать углекислый газ, так и на его диффузионное сопротивление. Чем больше в бетоне содержится щелочных продуктов гидратации, тем больше углекислого газа может быть связано, что замедляет перемещение фронта карбонизации в глубь бетона. Исследования [9, 10] показывают, что скорость карбонизации бетона возрастает при переходе от портландцемента к вяжущим с активными минеральными добавками, особенно при более высоком наполнении. Исследованиями [9-11, 12] доказано, что наименьшая глубина карбонизации наблюдается у бетона на портландцементе, средняя - у бетона на пуццолановом и сульфатостойком цементе, а наибольшая - у бетона на шлакопортландцементе с содержанием шлака 50 и 80%.

Полученная разница между различными типами цемента объясняется неравным запасом гидратированных продуктов, способных к карбонизации, прежде всего  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [9]. В исследовании [12] также отмечается, что цементы с добавлением пуццолановых материалов, таких как микрокремнезем, зола-унос или трасс, со временем уменьшают количество  $\text{CaO}$  в результате взаимодействия с пуццоланами, что ускоряет процесс карбонизации.

Анализ литературы по данной теме показывает, что большинство проведенных исследований свидетельствует о том, что бетоны с активными добавками подвержены карбонизации быстрее, чем бетоны на портландцементе. То есть, чем больше реакционно активной добавки содержит цемент, тем быстрее происходит карбонизация. Этот вывод подтверждается [13].

### **5.1.3. Исследование факторов, влияющих на позднее формирование этtringита в цементном камне**

Снижение прочности бетона вплоть до разрушения в результате сульфатных соединений обусловлено образованием этtringита в цементной матрице. Процессы, связанные с формированием и присутствием

этtringита, остаются не вполне ясными, несмотря на множество проведенных исследований.

Этtringит, образующийся в начальные периоды гидратации цемента, благоприятно влияет на процесс схватывания, но его формирование в уже затвердевшем бетоне приводит к негативным последствиям. Некоторые исследования указывают на то, что его присутствие в порах и трещинах бетона скорее следствие, чем причина образования трещин [14].

Считается, что начальное образование этtringита в бетоне завершается примерно через 24 часа после затворения водой. Это приводит к образованию мелкокристаллического этtringита, который может быть не всегда обнаружен современными методами анализа, особенно при его малых размерах и равномерном распределении [14].

Наличие этtringита в бетоне, хранящемся или используемом в сухих условиях, может оставаться незамеченным в течение длительного времени. Показатели pH среды играют важную роль в устойчивости этtringита, и его формирование может быть подвержено разрушению при высоких значениях pH.

Образование и рост кристаллов этtringита в процессе гидратации цемента происходят в основном на начальных этапах, пока концентрация  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в растворе остается достаточно высокой. Увеличение содержания  $\text{C}_3\text{S}$  в цементе способствует этому процессу, так как  $\text{C}_3\text{S}$  является источником образования  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Подходящие условия приводят к преобразованию «дремлющего» этtringита в крупные кристаллические структуры, видимые в трещинах бетона и на его поверхности. Это явление аналогично образованию выделов на поверхности бетона, вызванному повышенным содержанием растворимых солей, где жидкая фаза переносит ионы солей на поверхность их кристаллизации. Основную роль в этом процессе играют концентрация гидроксида кальция и ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  в жидкой фазе цементного раствора.

Позднее образование этtringита может быть обусловлено использованием ускорителей твердения, содержащих щелочные сульфаты, что приводит к высокой концентрации  $\text{SO}_4^{2-}$ , способствующей формированию этtringита в дисперсном состоянии. Условия окружающей среды, такие как вымывание, могут способствовать росту кристаллов этtringита путем снижения концентрации сульфатных ионов.

Также позднее образование этtringита может быть связано с неполной гидратацией  $\text{C}_3\text{A}$  и  $\text{C}_4\text{AF}$ , вызванной активной гидратацией  $\text{C}_3\text{S}$  и выделением  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Исследования показывают, что процесс гидратации минералов замедляется в присутствии извести.

В цементе низкая концентрация сульфатов позволяет этtringиту сосуществовать с гидросульфалоуминатами. При увеличении жидкой

фазы и концентрации сульфатных ионов возможно образование большего количества этtringита за счет превращения гидросульфатоалюминатов в этtringит.

Эксплуатация бетона в переменных влажностных условиях может привести к образованию кристаллов этtringита в его порах. Повышение температуры в результате тепловой обработки или сушки также может увеличить концентрацию этtringита.

В различных условиях, таких как изменения влажности, замораживание и оттаивание, действие хлористых солей, возможна поздняя кристаллизация этtringита. Например, изменение влажности в порах бетона влияет на концентрацию  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и рост этtringита. Замораживание также приводит к дополнительному водонасыщению и увеличению объема поровой жидкости, что способствует образованию этtringита. Действие растворов хлористых солей приводит к обменным реакциям с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и снижению рН поровой жидкости.

Активные минеральные добавки, включенные в состав цементных композиций, потенциально могут вызывать образование зародышей этtringита. Эти добавки реагируют с гидроксидом кальция, присутствующим в цементе, и образуют новые соединения. В результате таких реакций происходит снижение содержания гидроксида кальция в системе, что в свою очередь ведет к снижению рН поровой жидкости. Этот процесс имеет важное значение для понимания механизмов образования этtringита и его последующего развития в цементных материалах.

В целом, различные факторы, такие как состав цемента, присутствие добавок и условия окружающей среды, оказывают существенное влияние на процессы гидратации цемента и образование его гидратных фаз, что необходимо учитывать при разработке более устойчивых и долговечных цементных материалов.

Исключение вероятности позднего появления этtringита в затвердевшем бетоне возможно путем замены добавки гипса, которая служит замедлителем схватывания, на другие химические добавки, такие как карбонатные, например, обеспечивающие эффективное замедление процессов гидратации. При использовании цементов с добавками гипса в изготовлении бетонов необходимо вводить различные добавки, способствующие достижению определенного водородного показателя поровой жидкости. Этот показатель должен быть таким, при котором существование «цементной бациллы» (этtringита) становится нестабильным, что обеспечит долговечность и стабильность бетонных конструкций.

#### **5.1.4. Анализ причин выщелачивания гидроксида кальция и методы борьбы с ним**

Коррозия первого вида, известная также как выщелачивание цемента, представляет собой агрессивный процесс, который происходит в условиях эксплуатации бетонных конструкций в пресных водах. Этот процесс особенно активен в условиях фильтрации воды через бетонные поверхности или при ее простом омывании, а также при воздействии воды под давлением.

Проникновение пресной воды во внутреннюю структуру бетона через трещины, поры и капилляры является ключевым процессом, способствующим выщелачиванию гидроксида кальция и его последующему выносу на поверхность бетона. При этом часть гидроксида кальция испаряется, а оставшаяся часть подвергается воздействию углекислоты воздуха, в результате чего образуется малорастворимый компонент - карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). В процессе выщелачивания нарушается химическое равновесие между поровой жидкостью и основными компонентами цементного камня, такими как гидросиликаты, алюминаты и ферриты. Этот дисбаланс приводит к последовательному прогрессу ступенчатого гидролиза данных соединений, что, в свою очередь, инициирует постепенное ослабление и разрушение структуры бетона. Даже частичное вымывание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  из бетона приводит к существенному снижению его механической прочности. По данным В.М. Москвина [15], выщелачивание 15–30% извести из цементного раствора от общего содержания в цементном камне приводит к снижению его прочности на 40–50%.

Появление на открытых поверхностях бетонных конструкций белых налетов и потеков является явным индикатором протекания в них процессов выщелачивания. Сопутствующее этим процессам падение механической прочности служит основанием для строителей говорить о так называемой "белой смерти" бетона. Этот термин используется для обозначения физического и химического разрушения бетонных конструкций, вызванного процессами выщелачивания и деградации их структуры.

Одним из подходов к решению этой проблемы является использование активных минеральных добавок в процессе изготовления бетонных смесей. Эти добавки могут внести значительный вклад в улучшение характеристик бетона и сделать его более устойчивым к выщелачиванию.

Активные минеральные добавки играют значимую роль в улучшении свойств бетонных конструкций. Они вступают в химическую реакцию с портландитом, основным компонентом портландцемента, и образуют гидросиликаты кальция – более прочные соединения, чем обычные гидраты кальция. Этот процесс приводит к образованию более плотной и компактной структуры бетона.

Гидросиликаты кальция обладают высокой прочностью и устойчивостью к агрессивным воздействиям окружающей среды. Их наличие в бетоне способствует повышению его механических характеристик, таких как прочность на сжатие, изгиб и растяжение. Кроме того, более плотная структура бетона, обусловленная образованием гидросиликатов кальция, снижает его проницаемость для воды и агрессивных химических веществ, что способствует увеличению его долговечности и срока службы.

Важно отметить, что активные минеральные добавки могут также способствовать укреплению межзерновых контактов в бетоне и улучшают его сцепление с заполнителем.

Таким образом, использование активных минеральных добавок в бетонных смесях не только улучшает их механические и физические свойства, но и обеспечивает повышенную долговечность и устойчивость бетонных конструкций в условиях эксплуатации.

В ходе анализа литературных источников, представленного в первой главе монографии, выявлено, что для обеспечения повышенной долговечности цементных композитов в условиях воздействия агрессивных сред необходимо учитывать ряд факторов, оказывающих влияние на их свойства. Учитывая все аспекты, наиболее оптимальным подходом к обеспечению долговечности и улучшению физико-механических характеристик является применение композиционного вяжущего с бинарным наполнителем с многоуровневой оптимизацией гранулометрического состава с использованием материалов различной дисперсности. Это позволяет создать более плотную упаковку композита и повысить его стойкость к воздействию различных внешних факторов.

Целью монографии является разработка композиционного цементного вяжущего на основе бинарного наполнителя для получения высокопрочных, высококачественных и долговечных бетонов с требуемыми показателями свойств.

В рамках данной монографии будут рассмотрены следующие задачи:

1. Разработка композиционного вяжущего с бинарным наполнителем;
2. Определение физико-механических характеристик разработанных составов;
3. Исследования стойкости композиционного вяжущего карбонизации, выщелачивания и сульфатной коррозии;
4. Исследование пористости разработанного композиционного вяжущего;

## 5.2. Методы исследования и применяемые материалы

### 5.2.1. Характеристика исходных материалов

**Вяжущее.** В качестве вяжущего для бетона применяли портландцемент М 400 Д0 АО «Ахангаранцемент» (табл. 2.1 и 2.2).

*Таблица 2.1.*

#### Физические свойства портландцемента

Вид цемента	Средняя плотность г/см <sup>3</sup>	Истинная плотность г/см <sup>3</sup>	Тонкость помола		Нормальная густота %
			Удельная поверхность см <sup>2</sup> /г	Остаток на сите 0,08%	
Портландцемент АО «Ахангаранцемент» М400 Д0	1,3	3,15	3400	6,5	25,0

*Таблица 2.2.*

#### Физико-механические свойства портландцемента

Вид цемента	Сроки схватывания час-мин		Предел прочности через 28 сут. твердения, МПа		Равномерность изменения объема
	начало	конец	изгиб	сжатие	
Портландцемент АО «Ахангаранцемент» М400 Д0	1-10	6-20	5,80	33.6	выдержал

Химический и минеральный составы клинкера портландцемента приведен в табл. 2.3 и 2.4.

*Таблица 2.3.*

#### Химический состав портландцемента АО «Ахангаранцемент»

Наименования показателя	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Значения показателей портландцемента, %	59,10	7,64	24,15	5,65	1,17	0,23	0,22	0,42

Таблица 2.4.

**Минералогический состав портландцемента  
АО «Ахангаранцемент»**

Наименования показателя	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>
Значения показателей, %	58	14	7	16	2

**Мелкий заполнитель.** Для приготовления бетонов в качестве мелкого заполнителя использовался фракционированный отсев при дроблении твердых горных пород. График просева песка представлен на рис. 2.2, а зерновой состав и физико-механические характеристики в табл. 2.5-2.6.

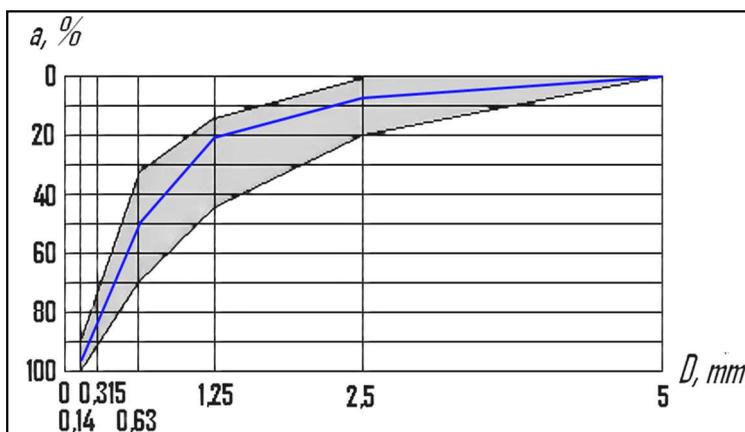


Рис. 2.2. График просева песка

Таблица 2.5.

**Зерновой состав песка**

Содержание грубозернистых примесей, %		Остатки на ситах, %	Гранулометрический состав Размеры сит, мм						Модуль крупности
св. 10 мм	св 5 мм		2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,15	
-	-	частные	2,0	6,5	34,5	41,5	13,0	2,5	2,4
-	-	полные	2,0	8,5	43,0	84,5	97,5	100	

Таблица 2.6.

**Физико-механические свойства песка**

№	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Объем пустот, %	Содержание, %	
				пылевидных и глинистых частиц	органических примесей
1	1343	2630	48,9	0,5	-

**Вода.** Для затворения бетонной смеси использовалась обыкновенная вода, отвечающая стандартным требованиям.

**Химическая добавка.** В качестве химической добавки для бетонной смеси использовали высокоэффективные суперпластификаторы нового поколения на основе эфиров поликарбоксилата POLIMIX и полифункциональную добавку CEMENTMIX AC компании ARMENT CONSTRUCTION CHEMICALS.

**Минеральный наполнитель.** Использовался микрокремнезем с удельной поверхностью 9000-11000 см<sup>2</sup>/г - отход промышленного производства АО «Узметкомбинат» (Ташкентская обл.) и известняк месторождения Мурунтов (Узбекистан).

**5.2.2. Методы исследования**

Пористость образцов определяли на ртутном порозиметре Thermo Scientific Pascal 240 EVO. Методика обеспечивает получение надежной информации о распределении пор по размерам, объеме порового пространства.

Удельную поверхность вяжущих, а также минерального наполнителя определяли с помощью прибора ПСХ-11А. Работа прибора основывается на методе газопроницаемости Козени-Кармана.

Предел прочности при сжатии и изгибе мелкозернистого бетона определяли на образцах размером 40x40x160 мм твердевших в нормальных тепло-влажностных условиях на прессе СТ-D2000 через 12 ч., в суточном и 28 суточном возрасте после хранения в камере нормального твердения.

Процесс помола композиционного вяжущего производили в ударном режиме измельчения в лабораторной шаровой мельнице ШЛМ-100.

Исследования по оценке сульфатостойкости цементного камня проводили по методике Б.Г. Скрамтаева [21].

Образцы песчано-цементного состава размером 40x40x160 мм после 28-суточного твердения в нормальных условиях высушиваются до постоянного веса и затем на 24 часа погружаются в агрессивный раствор (5 % раствор Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). После этой выдержки образцы извлекали

из раствора и высушивали в сушильном шкафу при температуре 105-110°C в течение 8 часов. После охлаждения до комнатной температуры образцы вновь погружали в агрессивный раствор. Процесс попеременного насыщения агрессивным раствором и высушивания повторялся до разрушения образцов.

После каждого цикла испытаний измерялись линейные деформации образцов во влажном состоянии. Линейные деформации разрушения представляют собой максимальные значения линейных деформаций образцов до того, как они полностью или частично разрушались. Величина линейных деформаций в мм/м рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon = (l_i - l_0) / L$$

где  $l_i$  – отсчет по индикатору часового типа после  $i$  дней выдержки образца, мм;

$l_0$  – начальный отсчет по индикатору после водонасыщения образца, мм;

$L$  – длина образца, м.

Опасными считаются деформации, превышающие 0,5 %, т.е. 5 мм/м.

Определения эффективного коэффициента диффузии углекислого газа образцов исследовали согласно ГОСТ Р 52804-2007.

Результаты определения коррозии выщелачивания проводились по общепринятой методике [21].

В рамках экспериментальных исследований были сравнены три вида составов мелкозернистого бетона:

образцы первого состава изготовлены из портландцемента и песка в соотношении 1:3 без модификаторов;

второй состав, содержащий портландцемент и песок в соотношении 1:3, модифицированный комплексной добавкой на основе микрокремнезема (15% от массы вяжущего) и суперпластификатора POLIMIX (1% от массы вяжущего);

третий состав изготовлен из композитного вяжущего и песка нормальной плотности в соотношении 1:3.

Композиционное вяжущее получали путем раздельного помола. Клинкер вместе с химической добавкой измельчали в шаровой мельнице до достижения удельной поверхности 4000-4500 см<sup>2</sup>/г. Известняк измельчали до удельной поверхности 2000-2200 см<sup>2</sup>/г. Затем все компоненты, включая микрокремнезем с  $S_{уд} = 9000-11000$  см<sup>2</sup>/г, размолотый клинкер с химической добавкой CEMENTMIX AC и известковый наполнитель с дисперсностью 2000-2200 см<sup>2</sup>/г, смешивают в следующих пропорциях, мас. %:

клинкер – 60;  
микрокремнезем – 10;  
известняковый наполнитель – 29;  
химическая добавка CEMENTMIX AC – 1.

### **5.3. Особенности структуры и свойств исследуемых составов**

#### **5.3.1. Разработка композиционного вяжущего нового поколения**

Анализ литературных источников показал, что обеспечение высоких физико-механических показателей и обеспечение долговечности разрабатываемого бетона с использованием только портландцемента затруднено. Портландцемент, производимый путем совместного помола клинкера и гипса, не всегда позволяет обеспечить необходимую долговечность. Для улучшения этого показателя в технологии бетона широко используются активные минеральные добавки, содержащие в своем составе гидросиликаты кальция способствующие существенному росту прочности композита. Увеличение доли таких добавок способствует снижению водородного показателя гидратирующей среды, что в свою очередь обуславливает развитие коррозии арматуры. Вместе с этим снижение pH среды является причиной позднего формирования этtringита. В результате затвердевания вяжущего в среде возникают внутренние напряжения приводящих к деструктивным последствиям.

Для устранения указанных негативных последствий предлагается композиционное вяжущее, обладающее следующими преимуществами: уменьшение доли клинкерной составляющей, минимизация капиллярной пористости цементного камня, повышение прочности на всех стадиях твердения, увеличение морозостойкости, водонепроницаемости и долговечности материала снижении энергозатрат при помоле ингредиентов разрабатываемого вяжущего.

Композиционное вяжущее включающая клинкер, микрокремнезем с удельной поверхностью  $S_{уд}=9000-11000 \text{ см}^2/\text{г}$ , известняковый наполнитель с удельной поверхностью  $S_{уд}=2000-2200 \text{ см}^2/\text{г}$ , а также сухой суперпластификатор с ускорителем твердения CEMENTMIX AC при следующем содержании компонентов мас. %:

клинкер – 60;  
микрокремнезем – 10;  
известняковый наполнитель – 29;  
химическая добавка CEMENTMIX AC - 1

Композиционное вяжущее получают путем раздельного помола в следующей последовательности:

клинкер вместе с химической добавкой CEMENTMIX AC измельчают в шаровой мельнице до удельной поверхности  $4000-4500 \text{ см}^2/\text{г}$ ,

известняк до  $S_{уд} = 2000-2200 \text{ см}^2/\text{г}$ . Затем все подготовленные компоненты, включая микрокремнезем с  $S_{уд} = 9000-11000 \text{ см}^2/\text{г}$  смешивают в указанных пропорциях.

Многоуровневая оптимизация гранулометрического состава, разрабатываемого вяжущего с компонентами, имеющими различную дисперсность позволяет достичь плотной упаковки цементного композита с минимальной пористостью и проницаемостью. Такой подход направленный на оптимизацию химического состава и свойств вяжущего материала, по нашему мнению, обеспечивает эффективное формирование требуемой структуры и, в силу своей природы значительно повышает потенциальную и реакционную активность вяжущего.

В данном контексте, в качестве добавки, способствующей увеличению скорости схватывания вяжущего в ранние сроки твердения, предложен известковый наполнитель. Процесс взаимодействия известкового наполнителя с алюминатной фазой цемента приводит к образованию небольшого количества гидрокарбонатов кальция. Одновременно с этим, благодаря колматационному эффекту добавки, сквозные поры трансформируются в тупиковые, и наблюдается снижение проницаемости проектируемого материала.

Использование сухой добавки CEMENTMIX AC при помолке позволяет значительно сократить время измельчения клинкера, что ведет к экономии энергоресурсов. Кроме этого полифункциональная добавка позволяет сократить количества воды затворения за счет водоредуцирующего эффекта суперпластификатора. Наличие в её составе ускорителя твердения на основе триэталомина позволяет увеличить прочность цементного камня как раннем в возрасте в первые 12-24 часов, так и в позднем в возрасте 28 суток, что позволяет производить изделия и конструкции по малопрогревной или беспрогревной технологии.

### **5.3.2. Физико-механические характеристики композитного вяжущего нового поколения**

Как известно, прочность является одним из основных физико-механических показателей цементных композитов. Значения этого показателя зависят от марки вяжущего, количества добавок, условий твердения и многих других факторов. Для оценки эффективности, предлагаемого композиционного вяжущего на формирование прочности в разные периоды времени разрабатываемого материала проведено исследование следующих физико-механических показателей (табл. 3.1).

Анализ табл. 3.1 показывает, что при использовании предложенных составов с использованием композиционного вяжущего наблюдается постоянный рост прочности на сжатие и при изгибе на всех сроках

твердения. Увеличение прочности при сжатии и изгибе составило 43-59% и 41-51% соответственно по сравнению с эталонным составом. Третий состав обладает аналогично высокими прочностными показателями по сравнению с комплексно-модифицированным составом.

**Таблица 3.1.**

**Прочность при сжатии и изгибе исследуемых образцов**

№	Прочность при сжатии, МПа			Прочность при изгибе, МПа		
	12 ч.	1 сут.	28 сут.	12 ч.	1 сут.	28 сут.
Состав №1	9,3	11,7	41,5	1,31	2,9	4,8
Состав №2	15,3	19,3	57,6	2,1	3,01	5,9
Состав №3	38,7	43,0	71,4	3,7	4,9	7,5

Прочность при сжатии и изгибе по отношению второго состава возросла на 15-55% и 42-66% соответственно. Начальное увеличение прочности через 12 часов и 1 сутки обусловлено содержанием ускорителя твердения в составе полифункциональной добавки. Увеличение прочности с 28-суточных образцов объясняется многоуровневой оптимизацией гранулометрического состава вяжущего, увеличением объемной концентрации низкоосновных гидросиликатов кальция путем механизма связывания аморфным кремнеземом наполнителя гидроксида кальция и уменьшением дефектности благодаря колматации пор известняковым наполнителем.

**5.3.3. Характеристика пористой структуры исследуемых составов**

Многочисленными исследованиями доказано, что физико-механические свойства цементного камня: прочность, деформативность, проницаемость и морозостойкость, тесно связаны с кристаллическими новообразованиями и пористой структурой материала. Бетон, как капиллярно-пористый материал, характеризуется наличием пор и капилляров различных размеров.

В Узбекистане и странах ближнего зарубежья оценку пористости строительных материалов принято осуществлять на основе классификации разработанной М.М. Дубининым [16-20] (табл. 3.2).

Характеристика пористости цементного камня определяли на ртутном порозиметре фирмы Thermo Scientific Pascal 240. Образцы для образования вакуума погружали на вакуумизатор и после достижения требуемого значения вакуума дилатометр заполняли ртутью и погружали в отсек автоклава порозиметра для получения порограмм. Порограммы рассчитываются автоматически с помощью программы SOLID EVO и

определяли такие характеристики как удельный объем ( $\text{мм}^3/\text{г}$ ) пор и общую пористость (%).

**Таблица 3.2.**

**Классификация пор по размерам цементного камня**

Размеры пор	Характеристика	Состояние воды в порах	Свойства цементного камня, на которые влияет размер пор
1000 - 15 мкм	Крупные сферические пустоты	Имеет свойства объемной фазы	Прочность, проницаемость, морозостойкость
15-0,05 мкм	Крупные капилляры	То же	То же
50-10 нм	Капилляры среднего размера. Поры между частицами	Умеренное действие поверхностного натяжения	Прочность, проницаемость, усадка при высокой влажности
10 – 2,5 нм	Малые (гелевидные) капилляры	Сильное действие поверхностного натяжения	Усадка
2,5 – 0,5 нм	Микропоры, поры геля, поры между кристаллами	Сильно адсорбирована, мениски не образуются	Усадка, ползучесть
0,5 нм	Микропоры «межслойные». Поры в кристаллах	Структурная	Усадка, ползучесть

Результаты определения удельного объема пор (рис. 3.1) и общей пористости (рис. 3.2) исследуемых образцов цементного камня приведены в табл. 3.3-3.5.

**Таблица 3.3.**

**Характеристика пористой структуры исследуемых образцов**

Параметры пористой структуры исследуемых образцов	Состав №1	Состав №2	Состав №3
Общий объем пор ( $\text{мм}^3/\text{г}$ ):	63,81	49,24	34,42
Общая площадь поверхности пор ( $\text{м}^2/\text{г}$ ):	6,576	5,112	4,908
Средний диаметр пор (мкм):	0,0388	0,0385	0,028
Срединный диаметр пор (мкм):	0,1199	0,1374	0,0555
Общая пористость образца, %	14,91	10,989	7,678

Таблица 3.4.

## Интегральная пористость исследуемых составов

Диапазон размеров пор (мкм)	Средний размер пор (мкм)	Образец №1 (мм <sup>3</sup> /г)	Образец №2 (мм <sup>3</sup> /г)	Образец №3 (мм <sup>3</sup> /г)
25.0000-16.6073	20,8036	0	0,61	0
16.6073-11.0320	13,8196	0,1	1,31	0,05
11.0320-7.3285	9,1803	0,85	2	0,21
7.3285-4.8682	6,0984	2,07	3,27	0,63
4.8682-3.2339	4,0511	3,34	4,87	1,48
3.2339-2.1483	2,6911	5,36	6,87	2
2.1483-1.4271	1,7877	8,27	9,64	3,11
1.4271-0.9480	1,1875	12,04	12,62	4,27
0.9480-0.6297	0,7889	16,96	15,58	5,57
0.6297-0.4183	0,524	21,11	18,68	7,12
0.4183-0.2779	0,3481	24,69	21,49	9,1
0.2779-0.1846	0,2312	28,41	24,01	10,86
0.1846-0.1226	0,1536	31,7	26,82	12,66
0.1226-0.0815	0,102	35,11	30,46	14,85
0.0815-0.0541	0,0678	38,68	34,08	17,35
0.0541-0.0359	0,045	42,72	36,65	19,57
0.0359-0.0239	0,0299	47,65	38,96	21,84
0.0239-0.0159	0,0199	54,51	41,19	25,43
0.0159-0.0105	0,0132	59,95	44,44	31,22
0.0105-0.0070	0,0088	63,81	49,24	34,42

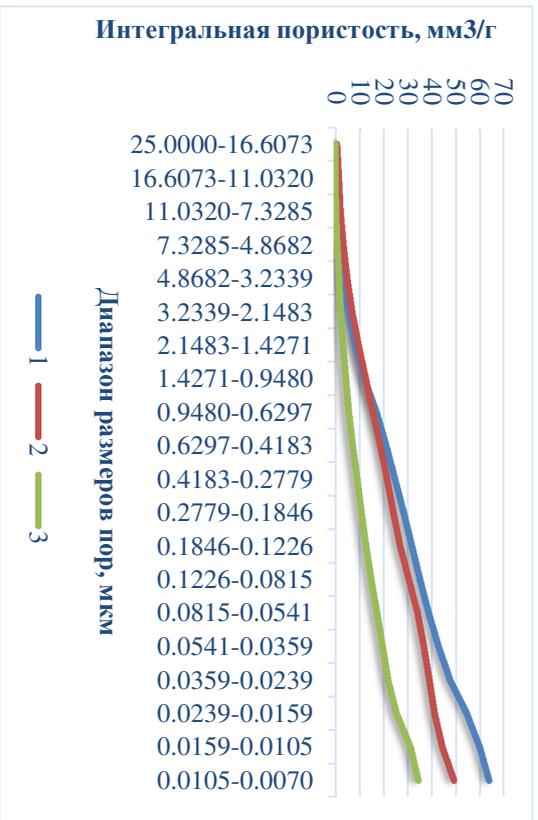
Полученные результаты показывают, что использование комплексного модификатора приводит к значительным изменениям пористости: общая пористость композиции №2 снижается на 32,16 %%, а интегральная на 39,45 % по отношению к контрольному. В основном уменьшает размер пор в области 4,8682-0,1846 мкм, что по классификации М.М. Дубинина [17] влияет на прочность, морозостойкость и проницаемость. Уменьшение пористости, по нашему мнению, связано с появлением низкоосновных новообразований, возникающих в результате реакции кремнезема и глинозема с гидроксидом кальция.

**Таблица 3.5.**

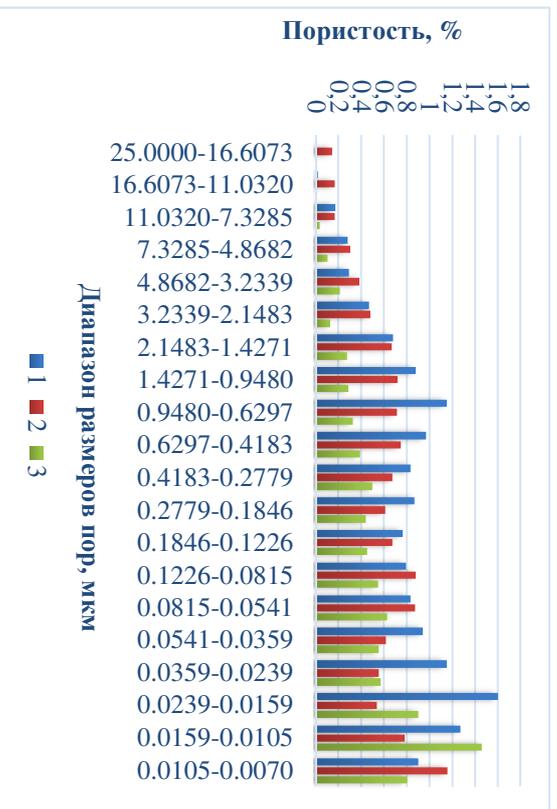
**Дифференциальная пористость исследуемых составов**

Диапазон размеров пор	Средний размер пор	Образец №1	Образец №2	Образец №3
(мкм)	(мкм)	(%)	(%)	(%)
25.0000-16.6073	20,8036	0	0,148	0
16.6073-11.0320	13,8196	0,025	0,168	0,013
11.0320-7.3285	9,1803	0,174	0,168	0,04
7.3285-4.8682	6,0984	0,285	0,306	0,107
4.8682-3.2339	4,0511	0,297	0,385	0,213
3.2339-2.1483	2,6911	0,471	0,484	0,133
2.1483-1.4271	1,7877	0,681	0,671	0,279
1.4271-0.9480	1,1875	0,879	0,719	0,291
0.9480-0.6297	0,7889	1,15	0,715	0,329
0.6297-0.4183	0,524	0,97	0,749	0,39
0.4183-0.2779	0,3481	0,837	0,677	0,5
0.2779-0.1846	0,2312	0,87	0,611	0,443
0.1846-0.1226	0,1536	0,769	0,677	0,454
0.1226-0.0815	0,102	0,797	0,881	0,552
0.0815-0.0541	0,0678	0,834	0,874	0,632
0.0541-0.0359	0,045	0,944	0,621	0,559
0.0359-0.0239	0,0299	1,152	0,557	0,572
0.0239-0.0159	0,0199	1,601	0,539	0,905
0.0159-0.0105	0,0132	1,272	0,785	1,461
0.0105-0.0070	0,0088	0,902	1,159	0,805

На наш взгляд, это связано с уменьшением содержания воды затворения за счет применения водоредуцирующей добавки, что, в свою очередь, снижает капиллярную пористость. Об этом свидетельствует полученные данные.



*Рисунок 3.1. Интегральная пористость по размерам исследуемых составов*



*Рисунок 3.2. Дифференциальная пористость по размерам исследуемых составов*

Существенное снижение пористости наблюдалась у состава 3. Общая пористость мелкозернистого бетона уменьшилась на 50,5 % по сравнению с контрольным. Интегральная пористость также сократилась на 57,67 %. Благодаря значительному снижению пористости, самый высокий показатель прочности был зафиксирован для состава № 3. Изменения пористости можно объяснить преобразованием  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{SiO}_2$  в новые устойчивые соединения такие как гидросиликаты кальция и уменьшением количества воды затворения.

Из основания классификации М.М. Дубинина установлено, что поры размером менее 10 нм не влияют на механические свойства. Опасные поры, снижающие прочность, морозостойкость и водопроницаемость, имеют размер более 10 нм. В связи с этим в монографии приводится дополнительная разделения отдельных категорий пор на прочность и долговечность мелкозернистого бетона (рис. 3.3).



**Рисунок 3.3. Опасные и безопасные поры исследуемых составов**

Использование комплексной добавки, включающей микрокремнезем и суперпластификатор POLIMIX, в составе №2 приводит к снижению опасной пористости на 43,52%. В третьем составе наблюдается снижение опасной пористости на 66,95%, в результате чего ее значение достигает 5,507%.

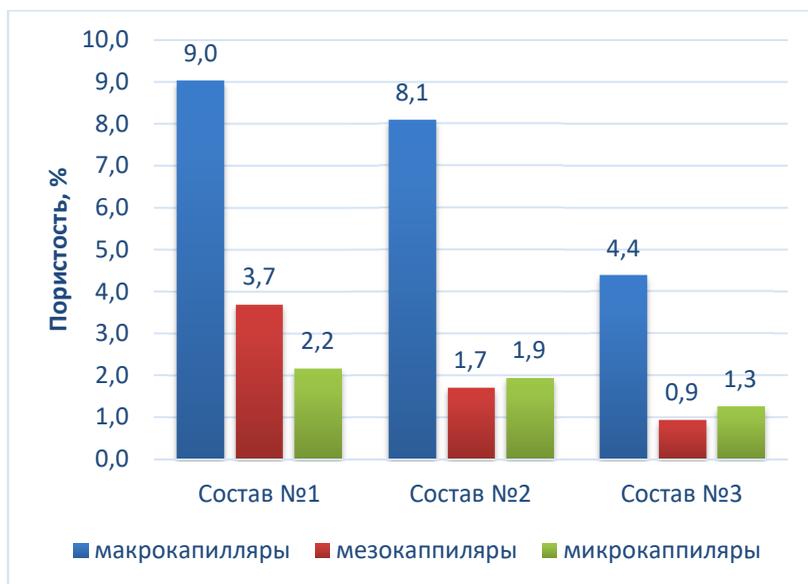
В зависимости от происхождения поры в цементных камнях можно разделить на воздушные, седиментационные (капиллярные и седиментационные поры) и усадочные. Воздушные поры образуются под воздействием технологических факторов. Седиментационные поры образуются в результате внешнего и внутреннего водоотделения. При

внешнем водоотделения часть воды обтекая заполнитель выходит в наружу и образует капиллярно контактирующую систему. Оставшаяся вода скапливается под крупным заполнителем и насыщает контактную зону. Усадочные поры образуются в результате усадки системы "цемент-вода" во время схватывания цементного камня. Существует предположение, что усадочные поры имеют размеры, характерные для капилляров [16-20].

Исходя из вышеизложенного, на основе анализа классификации [17] были выделены следующие три группы капиллярных пор цементного камня:

1. макрокапилляры - 15-0,5 мкм (влияют на прочность, проницаемость и морозостойкость);
2. мезокапилляры - 50-10 нм (влияют на прочность, проницаемость и усадку при высокой влажности);
3. микрокапилляры - 10-2,5 нм (влияют на усадку).

Далее в работе было определено содержание капилляров макро-, мезо- и микроуровнях (рис. 3.4).



**Рисунок 3.4. Количество макро-, мезо- и микрокапилляров исследуемых составов**

Сравнение пористости исследуемых составов показывает, что состав № 3 является наиболее благоприятным с точки зрения снижения опасной пористости и сокращения макро-, мезо- и микрокапиллярного и повышения прочности мелкозернистого бетона.

#### **5.3.4. Коррозионностойкость композитного вяжущего нового поколения**

Цементный камень бетонных конструкций подвергается воздействию агрессивной окружающей среды, что приводит к его более быстрому разрушению по сравнению с природными горными породами. Химическая коррозия цементного камня под воздействием агрессивных жидкостей и газов является одним из ключевых факторов, определяющих долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

В эксплуатационных условиях цементный камень и бетон подвергаются воздействию различных типов воды, включая дождевую, талую, речную, морскую, грунтовую, промышленную и сточную. Влияние этих вод на долговечность бетона зависит от природы содержащихся в них веществ. В зависимости от процессов, происходящих в бетоне под воздействием агрессивных вод, выделяются наиболее основных видов химической коррозии, такие как выщелачивающая, углекислотная, сульфатная и др.

В природных условиях редко наблюдается коррозия, вызванная исключительно одним видом агрессивных веществ. Фактически, единственным исключением может быть углекислотная коррозия. В остальных случаях действие различных агрессивных компонентов сопровождается воздействием углекислоты, присутствующей в воде или в атмосферном воздухе. Таким образом, можно утверждать, что все виды химической коррозии неразрывно связаны с углекислотной коррозией.

В зависимости от условий эксплуатации бетонных конструкций выделяются наиболее опасные виды химической коррозии. Например, для гидротехнических сооружений, подвергающихся воздействию речных вод, основными видами коррозии являются выщелачивающая и углекислотная. В то же время, для бетонных конструкций, эксплуатируемых в условиях подземных и морских вод, основными угрозами являются сульфатная и магниезальная коррозии, с учетом возможного влияния углекислотной коррозии и коррозии выщелачивания. В районах с развитой промышленностью в воздушной среде может наблюдаться повышенная концентрация сернистого газа, что может усилить сульфатную коррозию. Для дорожных бетонов также характерны коррозия выщелачивания и углекислотная коррозия как основные опасности.

В процессе коррозии выщелачивания происходит растворение и вынос  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  фильтрационными водами, что приводит к снижению его содержания в цементном камне и нарушению равновесия в системе. Это ведет к потере устойчивости основных структурообразующих компонентов цементного камня. Постепенное снижение концентрации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в жидкой фазе вызывает разложение гидратных фаз, обычно стабильных в растворах с высоким содержанием гидроксида кальция.

Разложение гидросиликатов кальция, входящих в состав цементного камня, вначале приводит к уменьшению прочности материала, а затем может привести к его полному разрушению. Этот процесс аналогично протекает и с другими гидратными фазами. Интенсивность вымывания гидроксида кальция из цементного камня зависит от состава продуктов гидратации, который определяется минералогическим и химическим составом портландцемента, а также от условий выщелачивания, пористости цементного камня и доступности его внутренней поверхности для воды.

Коррозия выщелачивания усиливается и происходит особенно интенсивно, когда вода фильтруется через бетон под определенным напором. Увеличенное содержание углекислого газа в воде также может одновременно усилить углекислотную коррозию.

В таблице 3.6 представлены результаты исследования коррозии выщелачивания исследуемых составов, проведенного согласно общепринятой методике [21].

**Таблица 3.6.**

**Показатели коррозии выщелачивания**

№	Выщелачивание в дистиллированной воде, мг/л	Выщелачивание в растворе $\text{CO}_2$ (0,5%), мг/л
Состав №1	1178	833
Состав №2	895	623
Состав №3	412	398

Из представленных результатов можно сделать вывод о высокой устойчивости цементного камня, полученного путем гидратации комплексного вяжущего с использованием бинарных наполнителей различной природы, к коррозии выщелачивания. Вероятно, это обусловлено формированием плотной структуры и снижением пористости материала, что затрудняет вымывание щелочных компонентов. Кроме того, возможно, частичное связывание гидроксида кальция микрокремнеземом также оказывает положительное воздействие на стойкость к коррозии. Важно отметить, что в концентрированных растворах  $\text{CO}_2$  наблюдается

значительное снижение вымываемого количества гидроксида кальция. В целом, многоуровневая оптимизация гранулометрического состава, вяжущего и введение различных добавок в состав комплексного вяжущего способствуют не только увеличению стойкости цементного камня против коррозии выщелачивания, но и улучшению его устойчивости к совместному воздействию различных видов химической коррозии.

Исследователями, занимающимися изучением воздействия окружающей среды на долговечность цементного камня и бетона, недооценивается масштабность коррозионных процессов, происходящих при воздействии агрессивных компонентов атмосферного воздуха, прежде всего углекислоты. На сегодняшний день отсутствует стандартизированная методика для оценки устойчивости цементного камня к углекислотной коррозии, несмотря на известный факт, что воздействие факторов физической коррозии, таких как колебания влажности, температуры, радиация и другие, может значительно снизить прочностные характеристики бетона.

Основными факторами, действующими на уровень углекислотного воздействия на цементный камень, являются относительная влажность воздуха, окружающая температура, пористость твердеющего камня и химический состав гидратационных продуктов, которые в свою очередь зависят от минералогического и химического состава используемого цемента.

Определения эффективного коэффициента диффузии углекислого газа образцов исследовали согласно ГОСТ Р 52804-2007 (табл. 3.7).

**Таблица 3.7.**

**Показатели коэффициента диффузии углекислого газа исследуемых составов**

№	Эффективный коэффициент диффузии углекислого газа, $10^4$ см <sup>2</sup> /с
Состав №1	0,1 (бетон высокой проницаемости в соответствии с ГОСТ Р 52804-2007)
Состав №2	0,08 (бетон пониженной проницаемости в соответствии с ГОСТ Р 52804-2007)
Состав №3	0,03 (бетон особо низкой проницаемости в соответствии с ГОСТ Р 52804-2007)

Результаты исследования процессов карбонизации (табл. 3.6) свидетельствуют о том, что плотная упаковка структуры композита, достигнутая за счет многоуровневой оптимизации гранулометрического состава

вяжущего, обеспечила максимальное снижение проницаемости и в результате степень карбонизации сократилось на 33%.

На основании вышеприведенных результатов можно заключить, что применение композитного вяжущего способствует повышению устойчивости цементной матрицы против углекислотной коррозии.

Одним из ключевых вопросов современного материаловедения является обеспечение надежности и продолжительной эксплуатации бетонных изделий и конструкций. Это достигается путем разработки различных методов повышения устойчивости бетонов к коррозии. В различных отраслях промышленности и транспорта множество сооружений подвергается воздействию сульфатов, содержание которых в грунтовых и промышленных водах может значительно варьировать. Если содержание сульфатов превышает 1500 мг/л (по  $\text{SO}^{2-}$ ), то только применение сульфатостойких цементов может гарантировать долговечность бетона и железобетона в таких условиях. Это особенно актуально при строительстве подземных и подводных сооружений, железобетонных трубопроводов, а также при облицовке заглубленных в грунт ядерных реакторов.

На сегодняшний день не существует универсального стандарта для оценки сульфатостойкости цементного камня. В основном, для этой цели используется коэффициент сульфатостойкости, который рассчитывается как отношение прочности образцов мелкозернистого бетона (состав 1:3), выдержанных в 5% растворе сульфата натрия или сульфата магния в течение 180 суток, к прочности таких же образцов в возрасте 28 суток. Для многих типов портландцемента при таких испытаниях коэффициент сульфатостойкости превышает единицу или незначительно ниже (0,85-0,95), что затрудняет прогнозирование срока службы сооружений. Эти тесты отражают условия эксплуатации лишь для бетонных изделий, находящихся в постоянной водной среде с высоким содержанием сульфатов.

В нашем исследовании мы применили ускоренный метод для оценки стойкости цементного камня к сульфатной коррозии, предложенный Б.Г. Скрамтаевым. Этот метод позволяет не только сравнивать коррозионную стойкость различных видов цемента, но и приближается к реальным условиям эксплуатации многих бетонных конструкций. В ходе испытаний по этому методу образцы чередуются между погружением в агрессивный раствор и высушиванием до их разрушения. В переменных условиях образцы разрушаются гораздо быстрее, чем при постоянном погружении в сульфатный раствор.

В ходе экспериментов по сульфатостойкости каждые три цикла измерялись линейные деформации образцов во влажном состоянии.

Линейные деформации разрушения представляют собой максимальные значения изменений размеров образцов до того момента, когда они полностью или частично разрушаются. Считается, что деформации, превышающие 0,5% или 5 мм на метр, являются опасными. Результаты измерения линейных деформаций образцов в процессе испытаний на сульфатостойкость и количество циклов испытаний до разрушения представлены в табл. 3.8.

**Таблица 3.8.**

**Деформации при твердении и испытании цементов  
на сульфатостойкость**

Наименование	Деформация образцов-балочек, мм/м					Общее количество циклов до разрушения
	3 цикла	6 цикла	9 цикла	12 цикла	Перед разрушением	
Состав №1	0.16	0.26	1.73	-	5,93	9
Состав №2	0.16	0.23	1.71	3,68	5,77	15
Состав №3	0,04	0.08	0.42	1.15	3,54	24

В ходе испытаний отмечается плавное увеличение линейных деформаций образцов по мере увеличения числа циклов. Максимальные значения деформаций перед разрушением составила 5,77 мм/м для состава с комплексной добавкой на основе микрокремнезема и поликарбонатного суперпластификатора, и 2,45 мм/м для состава на основе комплексного. Исключение гипса из состава композитного вяжущего и его замена известняком привело к исключению образования этtringита. Кроме того, применение данного композита это позволило снизить проницаемость материала и повысить его стойкость против сульфатной среды.

Применение композитного вяжущего с бинарным наполнителем различной природы, включающего микрокремнезем и известняковый наполнитель, существенно повышает способность получаемых цементов к сопротивлению разрушительному воздействию агрессивной сульфатной среды. Добавка такого состава к вяжущим увеличивает количество циклов испытаний до разрушения на 38%.

**Заключение**

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании предложенного состава композиционного вяжущего во всех сроках твердения наблюдается увеличение показателя прочности на сжатие на 44-58%. Начальное увеличение прочности в возрасте 12 ч и 1 суток

объясняется тем, что содержание ускорителя в составе суперпластификатора обеспечивает резкое повышение прочности. Увеличение предела прочности на сжатие 28-суточных образцов происходит за счёт многоуровневой оптимизации гранулометрического состава вяжущего, увеличения объемной концентрации низкоосновных гидросиликатов кальция посредством механизма связывания аморфным кремнеземом наполнителя гидрооксида кальция и снижения дефектности благодаря колматации пор известняковым наполнителем.

Результаты исследования процессов выщелачивания и карбонизации свидетельствуют о том, что плотная упаковка структуры композита, достигнутая за счет многоуровневой оптимизации гранулометрического состава вяжущего, обеспечила максимальное снижение проницаемости. В результате уровень выщелачивания уменьшился на 33-51%, а степень карбонизации сократилось на 33%. Кроме того, замена гипсового камня на известняк привела к исключению образования этtringита и таумасита в составе вяжущего, что повысило сульфатостойкость на 38%.

Таким образом, приведенные выше данные свидетельствуют о преимуществах комплексного вяжущего перед другими составами, о достижении поставленных задач, таких как повышение прочности бетона в возрасте 12-24 часов, а также увеличение прочности при сжатии в возрасте 28 суток, снижение энергетических затрат при его приготовлении и повышения стойкости композита против основным видам коррозии.

#### *Список литературы*

1. Лесовик, В.С. Геоника (Геомиметика). Теоретические основы природоподобных технологий / В.С. Лесовик, А.А. Володченко // В сборнике: Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование сборник научных трудов Международного научнотехнического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А.Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук». 2019. – С. 119–123.
2. Федюк, Р.С., Мочалов, А.В. Композиционные вяжущие для бетонов повышенной ударной стойкости / Р.С. Федюк, А.В. Мочалов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – №4 (200). – С. 85–91.
3. Баженов, Ю.М. Строительные композиты на основе бетонного лома и отходов камнедробления / Ю.М. Баженов, С.А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов // Грозный: ФГУП «Издательско-полиграфический комплекс «Грозненский рабочий», 2014 – 336 с.

4. Фомина, Е.В. Снижение аутогенной усадки композиционного вяжущего с использованием туфа / Е.В. Фомина, В.С. Лесовик, А.М. Айзенштадт // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 4 (41). – С. 48–55.
5. Александрова, О.В. Влияние кварцевого порошка и минеральных добавок на свойства высокопрочных бетонов / О.В. Александрова, Д.В. К. Нгуен, Б.И. Булгаков, В.Б. Петропавловская // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». – 2020. – № 3. – С. 7-15.
6. Анисимов, С.Н. Исследование прочности тяжелого бетона с пластифицирующими и минеральными добавками / С.Н. Анисимов, О.В. Кононова, А.О. Смирнов [и др.] // Современные проблемы науки и образования (Электронный журнал). – 2015. – № 2-1.
7. Гусев, Б.В. Бетоны с наполнителями различной дисперсности и их наномодификация / Б.В. Гусев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 384-393.
8. Алексеев, С.Н. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль.-М.: Стройиздат, 1990.-320 с.
9. Гусев, Б.В. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния / Б.В. Гусев, И.Н. Минсадров, П.В. Мироевский, Н.С. Трутнев // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2009. – Т. 1. – № 3. – С. 8-14.
10. Алексеев, С.Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С.Н. Алексеев. - М.: Изд-во литературы по строительству, 1968. - 230 с.
11. Ishida, T. Theoretically Identified Strong Coupling of Carbonation Rate and Thermodynamic Moisture States in Micropores of Concrete / T. Ishida, K. Maekawa and M. Soltani // Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 2, No. 2, p.p.213- 222, June 2004 / Copyright © 2004 Japan Concrete Institute.
12. Хамада, М. Карбонизация бетона и коррозия арматурной стали (основной доклад) / М. Хамада // Пятый международный конгресс по химии цемента / Сокр. Пер. с англ. Под ред. О.П. Мчедлова-Петросяна и др. - М.: Стройиздат - 1973.- С. 306-307.
13. Луцык Е.В. Разработка методов обеспечения долговечности железобетона при воздействии углекислого газа воздуха. Диссертация канд. техн. наук. - Уфа, УГНТУ, 2005. - 125 с.
14. Козлова В.К., Вольф А.В. Анализ причин позднего появления этtringита в цементном камне // Ползуновский вестник. 2009. №3.
15. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. Москвин В.М. и др. 1980. 536 с.
16. Современные методы исследования поровой структуры строительных материалов. Учебно-методическое пособие. Адылходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Цой В.М., Кадыров И.А. ТашИИТ, Т.: 2019, 101 стр.

17. Adilkhodjaev, A., Kadyrov, I., Rasulmukhamedov, A. Research of porosity of a cement stone with a zeolite containing filler and a superplastic stificator. (2021) E3S Web of Conferences, 264, art. no. 02007. [www.e3s-conferences.org](http://www.e3s-conferences.org) / doi: 10.1051/e3sconf/202126402007.
18. Adilkhodzhaev A.I., Kadirov I.A., Azimov D.T., Kudratov, B. Sh., Thermodynamic analysis of mineral powder grinding processes, International Scientific and Practical Conference on Problems in the Textile and Light Industry in the Context of Integration of Science and Industry and Ways to Solve Them, PTLICISIWS 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0197549>.
19. Adilkhodjaev Anvar, Kadyrov Ilkhom, Kudratov Bekzod, Azimov Doniyor, Xasanov Bahriddin, Umarov Isomiddin, On the structure of cement stone with fillers from metallurgical waste Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2023. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341001020>.
20. Anvar Adilkhodzhaev,\* Ilkhom Kadirov, Bekzod Kudratov, Bakhridin Khasanov, Mirzokhid Radjabov, Valery Kondrashenko, Some aspects of the processes of obtaining and application of mineral powders as fillers for cement systems E3S Web of Conf. Volume 410, 2023 XXVI International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341001021>.
21. Шуляков, К.В. Тяжелые бетоны, стойкие к циклическим воздействиям в суровых условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Шуляков Кирилл Владимирович. – Челябинск, 2020. – 178 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Абдуллаев Рустам Якубович** - канд. экон. наук, доц., *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Адилходжаев Анвар Ишанович** – д-р техн. наук, проф., *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Азимов Данияр Туйчиевич** – самостоятельный соискатель (PhD), *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Анисимов Константин Викторович** – канд. ист. наук, доц. кафедры экономики и гуманитарно-социальных дисциплин, *Липецкий институт кооперации (филиал) БУКЭП, РФ, г. Липецк.*

**Дехканов Мирали Мрхон угли** – ассистент, *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Закиров Равиль Сабирович** – д-р. техн. наук, проф., *Международная академия транспорта, РФ, г. Москва*

**Икрамова Диёра Зокир кизи** – ассистент, *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Кадиров Илхом Абдуллаевич** – д-р философии по техническим наукам (PhD), доц., *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Кобулов Жамиш Ренатович** – канд. техн. наук, проф., *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Кудратов Бекзод Шерзодович** – базовый докторант (PhD), *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Музаффарова Маужуда Кадырбаевна** – PhD, доц., *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Нассуллаев Абдурахмон Хайрулло угли** – ассистент. *Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.*

**Плотникова Евгения Павловна** – преподаватель кафедры Физической культуры и спорта, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, РФ, г. Владивосток.

**Приймак Наталья Викторовна** – старший преподаватель кафедры Физической культуры и спорта, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, РФ, г. Владивосток.

**Раджабов Мирзахид Закирович** – самостоятельный соискатель (PhD), Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", Узбекистан, г. Ташкент.

**Саидвалиев Шухрат Умарходжаевич** – канд. техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.

**Сидоров Евгений Павлович** – заместитель директора по научно-технической работе, НПО «Агростройсервис», РФ, г. Дзержинск.

**Ситников Сергей Анатольевич** – старший преподаватель кафедры финансов и бухгалтерского учета, Липецкий институт кооперации (филиал) БУКЭП, РФ, г. Липецк

**Степанова Ирина Сергеевна** – доц. кафедры Физической культуры и спорта, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, РФ, г. Владивосток.

**Стурова Елена Валерьевна** – доц. кафедры Физической культуры и спорта, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, РФ, г. Владивосток.

**Ташимова Мукаддас Садирходжаевна** – старший преподаватель, Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.

**Телёнок Алёна Антоновна** – студент лечебного факультета, 3 курс, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, РФ, г. Владивосток.

**Тошева Дилбар Фархадовна** – базовый докторант (PhD), Бухарский инженерно-технологический институт, Узбекистан, г. Бухара.

**Турсунходжаева Рашида Юсупджановна** – канд. техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.

**Умаров Исамиддин Инакович** – самостоятельный соискатель (PhD), Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", Узбекистан, г. Ташкент.

**Умаров Кадир Сапарбаевич** – д-р техн. наук, главный инженер, СП ООО "BINOKOR TEMIRBETON SERVIS", Узбекистан, г. Ташкент.

**Урядова Валентина Викторовна** – канд. филос. наук, доц., доц. кафедры социально-гуманитарных и экономических дисциплин, ФГБОУ ВО Тихоокеанский государственный медицинский университет Минздрава России, РФ, г. Владивосток.

**Файзуллаев Гайбулло Уктам угли** – ассистент, Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.

**Хасанов Бахриддин Баратович** – д-р техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет "Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства", Узбекистан, г. Ташкент.

**Шарипова Дилафруз Тоуфуковна** – д-р философии по техническим наукам (PhD), и.о. доцент, Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.

**Эргашева Захро Валижановна** – канд. техн. наук, доц., Ташкентский государственный транспортный университет, Узбекистан, г. Ташкент.