

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство»

(наименование кафедры)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Технология строительного производства

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Совершенствование способов уменьшения водопоглощения
цементно-содержащих материалов

Студент

К.В. Никитина

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А.В. Крамаренко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы

д.э.н., к.т.н., профессор

А.А. Руденко

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент, Д.С. Тошин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 Теоретические исследования свойств цементно-содержащих материалов и процессов водопоглощения.....	6
1.1 Цементно – содержащие материалы. Структура, свойства, область применения	6
1.2 Анализ изменения эксплуатационных свойств бетона при воздействии на него водной среды.....	13
1.3. Пути повышения устойчивости бетонных изделий к воздействию водной среды.....	18
1.4 Применение микронаполнителей в цементных материалах	22
2 Характеристика применяемых материалов. Методы исследования.....	28
2.1 Свойства используемых материалов.....	28
2.2 Методы экспериментальных исследований	35
3 Исследование влияния высокоактивного метаксаолина на свойства мелкозернистого бетона	43
3.1 Математическое моделирование влияния компонентов на водопоглощение по массе	43
3.2 Влияние добавки высокоактивного метаксаолина в составе вяжущего на водопоглощение и пористость цементного камня.....	50
3.3 Математическое моделирование влияния компонентов на прочность при сжатии.....	64
3.4 Влияние добавки высокоактивного метаксаолина в составе вяжущего на прочностные характеристики цементного камня	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	86
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	88

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Проблема водопоглощения цементно-содержащих материалов актуальна во всем мире. Водопоглощение по массе является одним из важнейших свойств бетона, от численного значения водопоглощения бетона зависят и другие основные физико-технические показатели, такие как морозостойкость, коррозионная стойкость, деформационные характеристики.

В основном способность сопротивления водопоглощению бетона зависит от его состава, но также можно выделить следующие критерии:

- Вид цемента, так как использование специальных цементов, имеющих свойства водонепроницаемости, а также расширяющихся или напрягающих обеспечивает непостоянный характер капилляров и допускает получение бетонов с высокой водонепроницаемостью;

- Качество заполнителей, а особенно от количества содержания в них примесей, так как от этого зависит сцепление цементного камня и заполнителя;

- Качество уплотнения, потому что дефекты и неоднородность являются каналами для фильтрации воды;

- Условия твердения, способные обеспечить необходимые условия для оводнения цемента;

Таким образом проблема водопоглощения является актуальной и важной, так как в последствии приводит к уменьшению прочности, сокращению срока службы и разрушению материалов.

Целью исследования является анализ существующих способов уменьшения водопоглощения цементно-содержащих материалов и совершенствование способов решения данной проблемы.

Предметом исследования является подбор компонентов и оптимальных составов, способствующих уменьшению водопоглощения.

Объектом исследования являются способы уменьшения водопоглощения цементно – содержащих материалов.

Задачи исследования:

1. Анализ проблем и методов снижения водопоглощения цементно – содержащих материалов;
2. Подбор оптимальных составов для уменьшения водопоглощения цементно – содержащих материалов;
3. Исследование водопоглощения и пористости цементно-содержащих материалов с содержанием высокоактивного метаксаолина;
4. Исследование прочностных свойств цементно-содержащих материалов с высокоактивным метаксаолином.

Методы исследования: анализ, синтез, прогнозирование, моделирование, эксперимент.

Научная новизна.

1. Использование высокоактивного метаксаолина в качестве ингредиента, позволяющего уменьшить водопоглощение цементно-содержащих материалов и повысить их прочность;
2. Оптимизации состава смеси, приводящей к уменьшению водопоглощения цементно – содержащих материалов.

Практическая значимость.

Практическая значимость состоит в разработке эффективных методов снижения водопоглощения и повышения прочности цементно – содержащих материалов.

Апробация результатов исследования. По теме диссертационной работы опубликовано 3 статьи:

1. Крамаренко А.В., Никитина К.В. Анализ современных добавок, способствующих уменьшению водопоглощения цементно-содержащих материалов / А.В. Крамаренко, К.В. Никитина // Электронный журнал «Наука и образование: новое время». - №3. - 2018.

2. Шишканова В.Н., Никитина К.В. Исследование влияния метаксаолина на водопоглощение и прочность бетона / В.Н. Шишканова, К.В. Никитина // II Всероссийская научно - практическая конференция «Идеи и проекты молодежи России». - 2019.

3. Крамаренко А.В., Никитина К.В. Анализ современных способов улучшения физических свойств цементно-содержащих материалов / А.В. Крамаренко, К.В. Никитина // Электронный журнал «Наука и образование: новое время». - №3. - 2019.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников. Общий объем работы составляет 92 страницы машинописного текста.

1 Теоретические исследования свойств цементно-содержащих материалов и процессов водопоглощения

1.1 Цементно – содержащие материалы. Структура, свойства, область применения

В современном строительстве цементно – содержащие материалы являются основными материалами, используемыми в самых различных качествах, например: строительных и декоративных материалах, имеющих устойчивость к повышенным температурам и большим силовым воздействиям. Все это делает их наиболее универсальным строительным материалом. Бетоны получают в результате твердения и уплотнения смеси, состоящей из твердых наполнителей, воды, вяжущих пластификаторов и добавок, обеспечивающих характерные особенности определенной марке или классу. География применения бетонов, с высокими физико - механическими свойствами, постоянно растёт, а развитие технологий в области материаловедения содействует увеличению спроса на такие материалы.

Размер зерен, пор, а также других структурных элементов серьезно влияет на свойства материала, в связи с этим в материале имеется микро – и макроструктура. Макроструктурой можно считать структуру, которую видно невооруженным глазом или при увеличении в небольших масштабах.

Основными элементами макроструктуры можно считать – крупный заполнитель, цемент, песок и вовлеченный воздух, образующий поры.

Классификацию макроструктуры бетона можно вести в зависимости от содержания цемента и его расположении в теле бетона, необходимо также отметить то, что структура остается неизменной при твердении.

Тем не менее главными показателями, оказывающими влияние на свойства бетона, являются характеристики плотности и пористости, а именно показатели их объема и характера, а также соотношение в свойствах отдельных составляющих материала. От них зависят основные технические

характеристики, такие как, долговечность и стойкость материала к воздействию различных условий.

Основными типами макроструктуры бетона являются:

- плотная

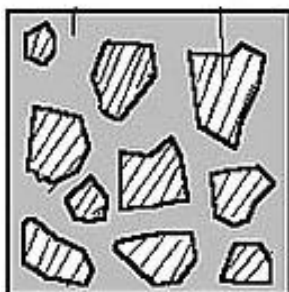


Рисунок 1.1 – Плотная структура

- плотная на пористых заполнителях

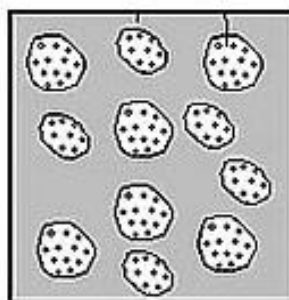


Рисунок 1.2 – Плотная структура на пористом заполнителе

- ячеистая

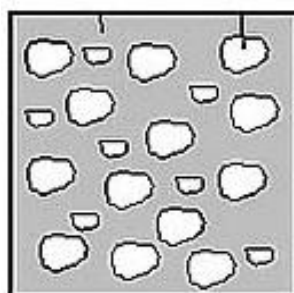


Рисунок 1.3 – Ячеистая структура

- зернистая

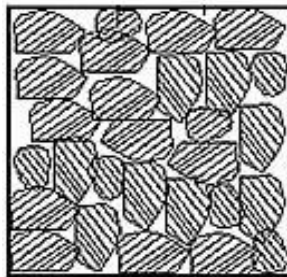


Рисунок 1.4 – Зернистая структура

Под плотной структурой подразумевается заполнитель, расположенный контактно, с зернами, непосредственно соприкасающимися друг с другом через тонкий слой цемента или с плавающим расположением заполнителя, с зернами, удаленными друг от друга на значительные расстояния.

Характеризуется плотная структура сплошной матрицей из твердого материала с вкраплениями зерен заполнителя, прочно связанными с материалом самой матрицы.

Отличие ячеистой структуры заключается в распределении пор в сплошной среде материала, имеющих вид отдельных условно замкнутых ячеек.

Совокупность скрепленных зерен материала в твердом состоянии представляет собой зернистую структуру. Пористость данной структуры имеет непрерывный характер и аналогична показателям пустотности сыпучего материала.

Наиболее прочными являются материалы, имеющие плотную структуру, наименее прочными являются материалы с зернистой структурой. Материалы с более плотной структурой имеют меньшую проницаемость, по сравнению с ячеистыми, при этом ячеистая структура материалов имеет меньшую проницаемость нежели зернистая структура.

Микроструктурой является структура, видимая при больших масштабах увеличения микроскопом. Она состоит из зерен цемента, не вступивших в реакцию, образовавшихся при этом новообразования и микроскопические пора разных размеров. Данная структура цемента требует тонких и точных исследований, которые достижимы при использовании микроскопии.

Микроструктура бетона формируется в процессе длительного твердения.

В бетоне зрелого возраста она включает:

- остатки зерен цемента;
- продукты гидратации цемента;
- поры (капиллярные и гелевые).

При этом остатки зерен цемента покрыты оболочками из продуктов гидратации, которые, срастаются, и образуют жесткую структуру цементного камня. Взаимосвязанные пустоты между этими оболочками представляют собой капиллярные поры. Остатки зерен цемента в бетоне 28-дневного возраста составляют 40-50% от их исходного количества. Причиной их сохранения даже в бетоне многолетнего возраста является низкая проницаемость окружающих их оболочек из продуктов гидратации. Это приводит к недостаточному использованию цемента. Степень гидратации отдельных зерен зависит от их размера. Остатки зерен цемента оказывают положительное воздействие на эксплуатационные свойства бетона. За счет их наличия твердение продолжается длительное время и может занимать месяцы и годы, при этом улучшаются основные свойства материала, такие как прочность, что делает конструкции более надежными. Также благодаря наличию непрореагировавших зерен клинкера в материале наблюдается самостоятельное залечивание микротрещин, появляющихся во время эксплуатации и твердения бетона.

К основным свойствам бетона относят:

Прочность является самым важным свойством бетонных конструкций, прочность характеризуется способностью сопротивляться воздействию внешних сил, не разрушаясь при этом. На прочность бетона влияет прочность каменного заполнителя и качество цемента, растворенного в воде. Чем прочнее каменный заполнитель и чем лучше он скреплен цементным клеем, тем выше прочность бетона. Прочность бетона со временем становится больше.

Таблица 1.1 – Таблица прочности бетона

Марка бетона	Класс бетона	Прочность, МПа	Прочность кг/см ²
M50	B3,5	4,5	45,8
M75	B5	6,42	65,5
M100	B7,5	9,63	98,1
M150	B12,5	16,05	163,7
M200	B15	19,26	196,4
M250	B20	25,69	261,8
M300	B22,5	28,9	294,6
M350	B27,5	35,32	360
M400	B30	38,35	392,8
M450	B35	44,95	458,2
M500	B40	51,37	523,7

Средней плотностью является соотношение массы материала к объему. Средняя плотность оказывает очень серьезное влияние на качество бетона, при повышении средней плотности повышается прочность бетона. Поры в бетоне появляются уже на этапе его изготовления, в результате испарения излишек воды, которые не вступают в химическую реакцию с цементом при твердении. Также причинами появления пор являются плохое перемешивание бетонной смеси и недостаточное количество цемента.

Таблица 1.2 – Средняя плотность бетона

Бетон	Марки по средней плотности
Легкий бетон	D800; D900; D1000; D1100; D1200; D1300; D1400; D1500; D1600; D1700; D1800; D1900; D2000
Ячеистый бетон	D500; D600; D700; D800; D900; D1000; D1100; D1200
Поризованный бетон	D800; D900; D1000; D1100; D1200; D1300; D1400

Пористостью является соотношение объема пор к объему материала. Поры это обязательное явление в бетоне, не зависимо от его плотности.



Рисунок 1.5 – Поры бетона

Водостойкостью бетона является его способность оказывать сопротивление воздействию воды и не разрушаться при этом. Водостойкий бетон применяется для строительства гидротехнических сооружений.

Теплопроводностью бетона является способность передачи теплового потока, возникающего из-за разности температур на границе раздела поверхностей. Чем меньше теплопроводность, тем более огнестойким будет бетон, что означает увеличение времени выдержки высоких температур.

Морозостойкостью является способность выдерживать температурные перепады. При низкой морозостойкости в случае заполнения пор материала водой и ее последующем замерзании, за счет расширения воды поры разрушатся. Морозостойкий бетон способен выдерживать многократные циклы замораживания и оттаивания, при этом не разрушаясь и не теряя своих прочностных характеристик.

Таблица 1.3 – Морозостойкость бетона

Марка бетона	Класс бетона	Морозостойкость, F
M100	B7,5	F50
M150	B12,5	F50
M200	B15	F100
M250	B20	F100
M300	B22,5	F200
M350	B27,5	F200
M400	B30	F300
M450	B35	F200-F300
M550	B40	F200-F300

Удобоукладываемостью является способность укладываться в форму при этом обеспечивая материалу максимальную плотность, что ведет в дальнейшем к высокой прочности и долговечности бетонных изделий.

Таблица 1.4 – Классификация бетонных смесей по удобоукладываемости

Марка смеси по удобоукладываемости		Норма удобоукладываемости по показателю		
		жесткости	подвижности	
			Ок.	Рк
Сверх - жесткие	СЖ3	Более 100	-	-
	СЖ2	51-100	-	-
	СЖ1	50 и менее	-	-
Жесткие	Ж4	31-60	-	-
	Ж3	21-30	-	-
	Ж2	11-20	-	-
	Ж1	5-10	-	-
Подвижные	П1	4 и менее		
	П2	-	5-9	-
	П3	-	10-15	-
	П4	-	16-20	26-30
	П5	-	21 и более	31 и более

1.2 Анализ изменения эксплуатационных свойств бетона при воздействии на него водной среды

Долговечностью является свойство материала сохранять свои физико - механические свойства, которые обеспечивают его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

На долговечность бетона оказывают влияние внешние и внутренние факторы. Наиболее распространенными являются физические, механические и химические факторы, такие как: воздействия атмосферы, температурные перепады, агрессивные воздействия среды.

Одним из свойств, влияющим на долговечность бетона является пористость.

Цементно – содержащие материалы обладают капиллярно – пористой структурой, поры в таких материалах являются неотъемлемой их частью. Наличие пор можно объяснить вступлением части воды затворения в химическую реакцию с цементом. Во время застывания и твердения бетона часть воды, находящейся в растворе, испаряется.

Наличие дополнительных пор объясняется нарушением структуры цементного камня в результате нарушения сплошности по границе раздела цементного камня и зерен заполнителя.

Крупные поры могут образовываться на месте воздушных пузырьков, которые образуются в процессе перемешивания или заливки раствора. Их хорошо видно невооруженным глазом: диаметр пор колеблется в пределах от 0,1 до 2 мм. При образовании заметных пустот можно говорить о серьезном браке материала.

Микроскопические поры не слишком опасны для строения, поскольку они практически не влияют на плотность. Но вот сравнительно крупные пустоты уменьшают прочность бетона. Допустимое содержание воздушных

пузырьков составляет 2 – 3%. Но в реальности их количество достигает пяти, а порой и шести процентов.

Расчеты, проведенные специалистами, доказали, что существует зависимость между повышением содержания пузырьков, на месте которых образуются поры, и прочности бетона. Каждый дополнительный процент воздушных полостей серьезно снижает прочность бетона.

Пористость от которой возникает существенная зависимость физико – механических свойств цементно – содержащих материалов – общая пористость.

Общая пористость бетона оценивается отношением объема пор к объему материала, данная зависимость представлена в формуле 1.1

$$P_0 = (B - 0,23\alpha C) + (1 - \delta) / 10, \quad (1.1)$$

где B – расход воды кг/м³ уплотненной бетонной смеси;

C – расход цемента кг/м³ уплотненной бетонной смеси;

α – степень гидратации цемента;

δ – структурная плотность, то есть степень уплотнения бетонной смеси.

Объем пор в цементном камне выражен первым слагаемым, а объем пор, образующихся при недостаточном уплотнении бетонной смеси, в случае, когда $\delta < 1$.

Уменьшение общей пористости наблюдается с течением времени в результате увеличения степени гидратации цемента, скорость уменьшения пор достигается увеличением расхода цемента на 1 м³ бетона.

Основными причинами проникновения воды в тело бетона является не соблюдение пропорций при замешивании бетонной смеси и нарушение условий высыхания и схватывания массы.

Малое количество воды при замешивании приводит к плохому соединению между собой ингредиентов бетонной смеси, что приводит к образованию каналов и путей для проникновения воды в тело бетона.

Влажность бетона является важной характеристикой, рассмотрим несколько видов влажности, зависящие от условий эксплуатации бетонных изделий.

Первым видом является сорбционная влажность. Сорбционной влажностью является приобретенная бетоном влажность, которая зависит от влажности окружающего воздуха. Поры заполняются влагой за счет того, что конденсируют водяные пары из воздуха, при этом при изменении влажности воздуха бетон подстраивается и начинает конденсировать и испарять влагу.

Усредненной равновесной влажностью является сохранение внутренними слоями бетона влажности, на зависимо от колебаний влажности поверхностного слоя.

Капиллярный подсос - это еще один вид влажности, который достигается в конструкциях часто подверженных воздействию воды. Остающийся на воздухе бетон всасывает влагу своими капиллярными порами. Чем выше пористость, тем выше высота капиллярного поднятия. Чаще всего данное явление наблюдается в конструкциях гидротехнических сооружений, фундаментах или других конструкциях, части которых находятся в постоянном контакте с водой. В зоне капиллярного подсоса бетон очень уязвим температурным перепадам.

Водопоглощение - способность материала или изделия впитывать и удерживать в порах и капиллярах воду.

Водопоглощение бетона - процесс, обусловленный поглощением и конденсацией, связанными с изменением его температуры и относительной влажности воздуха, а также капиллярным перемещением жидкости внутри пор материала.

Водопоглощение бетона численно можно охарактеризовать объемным или массовым содержанием воды (в процентном соотношении), которое материал поглощает за некоторый промежуток времени при нахождении в воде или в случае контакта с водой. На величину водопоглощения бетона в большей степени влияет морозостойкость, которая зависит от множества

факторов, таких как количество макропор, характер пористости, состав цемента. Морозостойкость бетона можно повысить путем уменьшения количества макропор, достигают этого путем уменьшения водоцементного отношения, уменьшением водопотребности смесей, качественным уплотнением, а также созданием благоприятных условий твердения.

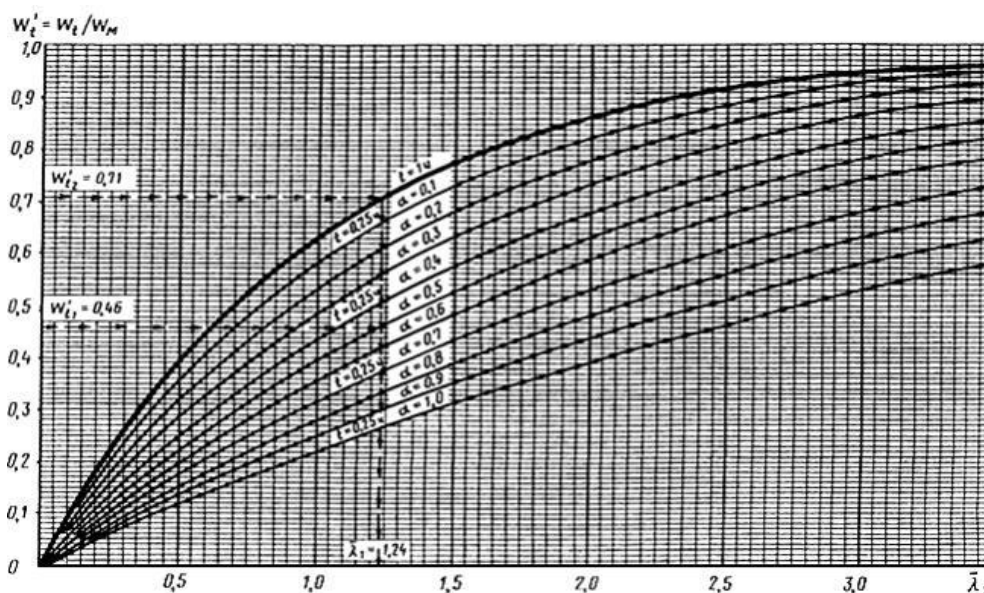


Рисунок 1.6 - Номограмма параметров пористости по кинетике насыщения материала жидкостью

В основном способность сопротивления водопоглощению бетона зависит от его состава, но также можно выделить следующие критерии:

- Вид цемента, так как использование специальных цементов, имеющих свойства водонепроницаемости, а также расширяющихся или напрягающих обеспечивает непостоянный характер капилляров и допускает получение бетонов с высокой водонепроницаемостью;

- Качество заполнителей, а особенно от количества содержания в них примесей, так как от этого зависит сцепление цементного камня и заполнителя;

- Качество уплотнения, потому что дефекты и неоднородность являются каналами для фильтрации воды;

- Условия твердения, способные обеспечить необходимые условия для оводнения цемента;

- Условия эксплуатации, которые исключают возникновение и раскрытие трещин, поскольку при наличии трещин, имеющих ширину раскрытия, превышающую 0,1 мм, возникает повышение капиллярной фильтрации на каждые 0,1 мм ширины раскрытия трещины;

- Использование специальных приемов для закупорки сквозных капилляр, например, использование полимерных пропиток.

Как правило, водопоглощение ухудшает свойства материала, увеличивает теплопроводность и среднюю плотность, уменьшает прочность.

Из – за воздействия на цементно - содержащие материалы воды, влаги, циклического замораживания и размораживания, в них начинает происходить процесс разрушения целостной структуры цементного камня, называемый коррозией.

Различают три вида коррозии бетона: вымывание компонентов цементного камня, воздействие на камень агрессивных веществ и образование, и последующая кристаллизация в порах бетона труднорастворимых веществ.

Рассмотрим первый вид коррозии бетона - коррозию выщелачивания.

Коррозия выщелачивания является одним из самых распространенных видов, сопровождающаяся вымыванием компонентов цементного камня. Происходит это из - за того, что бетонные изделия подвергаются воздействию воды, что приводит к нарушению химического равновесия жидкости, содержащейся в порах и составляющими компонентами цементного камня, результатом этого становится растворение гидроксида кальция.

Первый вид коррозии становится причиной снижения прочности и последующего разрушения бетонного изделия, внешним признаком данного вида коррозии становится появление белого налета на конструкциях.

1.3. Пути повышения устойчивости бетонных изделий к воздействию водной среды

Водостойкость материалов можно повысить путем увеличения их плотности и прочности с помощью нагнетания растворов (цементация, силикатизация, битумизация, смолизация, нагнетание полимерных материалов), а также при обработке поверхностей материалов кремнийорганическими полимерными материалами или путем гидрофобизации и флюатирования.

Процесс цементации заключается в добавлении цементного раствора в пробуренные отверстия конструкции, что приводит к увеличению ее плотности и водонепроницаемости, а значит и коррозионной стойкости.

Метод силикатизации состоит в добавлении в отверстия конструкции жидкого стекла, вводимый после раствор хлористого кальция, вступая в реакцию с жидким стеклом, способствует образованию уплотняющего осадка из плохо растворимого гидросиликата кальция и нерастворимого геля кремнезема.

Битумизация является процессом нагнетания битума и является эффективным способом придания материалам водонепроницаемости и коррозионной стойкости. Стойкость битума к химическому воздействию повышает стойкость бетона в агрессивной среде, и прежде всего стойкость к выщелачиванию. Существенным недостатком битумизации является ограничение ее проведения на влажной поверхности.

Смолизация - добавление водного раствора карбамидной смолы, затвердевающей при добавлении отвердителя, не являющегося агрессивным по отношению к цементно-содержащему материалу. Смолизация является эффективным методом для повышения плотности и водонепроницаемости материалов с мелкими порами и при отсутствии фильтрации воды.

Гидрофобизацию поверхности материала применяют с целью защиты от атмосферных осадков в условиях повышенной влажности. Для

гидроизоляции применяются: водные эмульсии, представляющие собой раствор кремнийорганической жидкости; водные растворы, являющиеся смесью кремнийорганических соединений.

Флюатирование поверхности цементно – содержащих материалов основано на взаимодействии между свободной известью и растворами кремнефтористых солей легких металлов, которые, при вступлении в реакцию с углекислым кальцием, образуют нерастворимые продукты, оседающие в порах и уплотняющие материал.

Также для повышения стойкости цементно – содержащих материалов широкое применение получили полимерные материалы на основе различных смол, в основном эпоксидных.

Защитное покрытие необходимо бетону для того, чтобы оградить его от воздействия различных агрессивных факторов.

Достичь эффективных показателей защитных покрытий можно благодаря:

- Стойкости к воздействию внешней агрессивной среде;
- Покрытие должно быть неизменяемым по отношению к защищаемому материалу;
- Достаточной характеристике прочности и хорошему сцеплению с поверхностью бетона;
- Достижению необходимых теплоизоляционных свойств.

Существуют различные виды защитных покрытий:

- Лакокрасочные покрытия, которые применяют для защиты материала от действия агрессивных атмосферных явлений, газов и паров;
- Обмазочные покрытия, к которым можно отнести облицовочные и штукатурные покрытия, а также покрытия, наносимые напылением, применяются для защиты от агрессивных воздействий атмосферы, воздействий воды.

- Рулонные покрытия, например, резиновые, полиэтиленовые, полиизобутиленовые, применяют для защиты конструкций от атмосферных воздействий, а также воздействий влаги и воды.

- Футеровочные покрытия, к ним можно отнести – огрунтовку, шпатлевку, оклейку и облицовку.

Для проведения защитных антикоррозионных мероприятий необходимо сначала установить назначение конструкций, а также степень воздействия на них агрессивных факторов. Конструкции должны удовлетворять следующим условиям:

а) Поверхности конструкции должны быть без неровностей, выступов, раковин и острых ребер. Неровности поверхности не должны превышать 1-2 мм при условии плавного перехода толщин и отсутствия мелких углублений. Все углы, ребра и резкие переходы необходимо скруглять до радиуса 5 – 20 мм;

б) Если на поверхности конструкции имеются большие выступы или участки неровностей, их необходимо заглаживать или удалять. Маленькие углубления нужно удалять путем затирки цементно – песчаным раствором или портландцементным раствором.

Если на поверхности изделия образовались большие углубления и выступы их необходимо заделать цементно – песчаным раствором или раствором цемента с мелким щебнем в качестве заполнителя.

Для того, чтобы наносить на поверхность изделия защитные покрытия необходимо дождаться его усадки.

в) Запрещено наличие воздействия воды на поверхность бетона со стороны, противоположной защищенной, в этом случае ее необходимо защищать нанесением гидроизоляционных покрытий.

г) Конструкция должна быть доступна для проведения осмотра и ремонта покрытия.

Также к эффективным методам повышения водостойкости можно отнести использование добавок.

Таблица 1.5 – Классификация добавок.

1. Пластифицирующие		
1	2	3
Суперпластифицирующие	Пластификация смесей	Увеличение подвижности
Пластифицирующие		
2. Водоредуцирующие		
Суперводоредуцирующие	Снижение водопотребности смесей	Уменьшение количества воды затворения
Водоредуцирующие		
3. Увеличивающие воздухо- газо содержание		
Воздухововлекающие, газообразующие, пенообразующие	Вовлечение воздуха, газовыделение	Увеличение объема воздуха (газа) в смесях тяжелых и мелкозернистых бетонов и растворов. Обеспечение значения коэффициента использования порообразующей добавки
Повышающие прочность	Повышение прочности бетонов и растворов в проектном возрасте	Увеличение прочности бетонов и растворов в проектном возрасте
Снижающие проницаемость	Снижение проницаемости бетонов и растворов	Увеличение марки бетонов и растворов по водонепроницаемости
Повышающие коррозионную стойкость	Повышение коррозионной стойкости бетонов и растворов в условиях воздействия различных агрессивных сред	Увеличение стойкости бетонов и растворов по отношению: - к коррозионно - активным средам - к внутренней коррозии
Гидрофобизирующие	Придание бетонам и растворам водоотталкивающих свойств	Снижение водопоглощения бетонов и растворов Гидрофобизирующая способность добавки

1.4 Применение микронаполнителей в цементных материалах

Огромное многообразие типов и классов цемента используется в основных инженерных областях, например, строительстве зданий или производстве заранее обработанных деталей, и широком диапазоне отраслей производства строительных химикатов. Широкие возможности варьирования базового материала и значительный диапазон изменения итогового состава позволяют создавать практически любые желаемые свойства и удовлетворять любым требованиям. К тому же, связующие вещества на основе цемента и не содержащие цемент исходные материалы применяются в стандартных областях, таких как изготовление гипса, известковой штукатурки или ангидридного маяка.

Во многих случаях используются другие связующие вещества, если измененные общие условия или особые требования вынуждают создавать новые свойства материалов. К таким можно отнести экологические соображения, физиологические классификации или рыночные тенденции.

Различные дисперсные минеральные наполнители влияют на свойства и структуру бетона, а именно способствуют упрочнению материала, повышают их прочность, водостойкость и снижают водопоглощение.

Рассмотрим наиболее известные микронаполнители, применяемые при изготовлении бетонов, к ним можно отнести: микрокремнезем, золу уноса, известняковую муку и высокоактивный метакаолин.

Микрокремнезем - высокорреакционная пуццолановая добавка, представляющая собой дисперсную пыль и являющаяся побочным продуктом при выплавке кремния. Предназначен для получения бетонов с высокими эксплуатационными свойствами. К достоинствам можно отнести: хорошую стойкость к истиранию, имеет низкую проницаемость для газов и воды, смеси с введенным в них микрокремнеземом не расслаиваются за счет высокой связности между компонентами, уменьшение расхода цемента, придает материалу высокую прочность и повышенную стойкость к коррозии.

Размер частиц микрокремнезема составляет 0,1 - 0,2 микрона, что примерно в пятьдесят раз меньше частиц летучей золы. Микрокремнезем вступает в реакцию с гидроксидом кальция, высокая мелкость и чистота материала способствует его быстрой и эффективной реакции. Среднее содержание микрокремнезема в бетонной смеси составляет от 10 до 30 % от массы цемента.

Зола - уноса - тонкодисперсный материал с небольшим размером частиц, используемый в производстве бетонов без дополнительного помола. Для золы уноса характерной особенностью является присутствие в ее составе несгоревшего топлива и железа. Размеры золы - уноса составляют меньше 0,315 мм. Зола - уноса образуется при сгорании твердого топлива в присутствии кислорода при температуре порядка 800°C.

По типу сжигаемого топлива золы делятся на: антрацитовые, каменноугольные и буроугольные.

По составу золы бывают кислые и основные, в зависимости от содержания в составе оксида кальция.

К преимуществам применения золы - уноса можно отнести: повышение прочности бетонных изделий, улучшение удобоукладываемости, снижение усадки, увеличение водостойкости и огнестойкости.

Недостатки применения золы - уноса: повышенный контроль за компонентами смеси. уменьшение начальной прочности при низких температурах.

Как одну из наиболее эффективных групп добавок рассмотрим алюмосиликатную группу. Алюмосиликатная группа представляет собой особую нишу в мире связующих веществ. С точки зрения материаловедения данная группа связующих веществ включает в себя алюмосиликатные активированные щелочью связующие вещества. Основные их компоненты являются источниками диоксида кремния (SiO_2) и оксида алюминия (Al_2O_3), например шлака, пепла или активированной глины, а также активированных

щелочью компонентов, таких как жидкое стекло или растворы щелочей, гидроксидов.

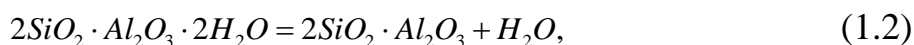
Применение алюмосиликатов при приготовлении бетонных смесей ведет к модификации структуры цементного камня в затвердевшем бетоне, а именно, к ее уплотнению. Такой эффект связан с тем, что средний медианный размер зерен алюмосиликатных добавок на порядок меньше вяжущего вещества, что позволяет говорить об эффекте «микробетона», то есть заполнении межзерновых пустот частицами активной минеральной добавки, вступающими в химическое взаимодействие с продуктами гидратации клинкерных минералов, а также с примесными щелочными оксидами, что и ведет к образованию плотных не растворимых водой новообразований.

Следствием такого взаимодействия алюмосиликатов с компонентами цементного камня является существенное уплотнение структуры формирующихся при твердении бетона гидратных новообразований, что ведет к повышению плотности, водонепроницаемости, коррозионной стойкости и долговечности бетона и конструкции в целом.

Так как следствием введения в состав бетона добавок на основе алюмосиликатов является его взаимодействие с гидролизной известью (портландитом), образующейся от гидратации основных клинкерных минералов (алита и белита), то в результате твердения бетон обладает не только повышенной плотностью и, как следствие, высокими эксплуатационными характеристиками, но и высокой стойкостью к основным видам химической коррозии бетона.

Высокоактивный метакаолин (ВМК) – представляет собой алюмосиликатный материал, это искусственно изготовленная пуццолановая добавка, обладающая наиболее высокой активностью среди имеющихся на рынке активных минеральных добавок. В частности, метакаолин способен связать извести примерно в 2,5 раза больше, чем широко применяемый в стройиндустрии микрокремнезем.

Метакаолин представляет собой алюмосиликатный материал, полученный путем прокаливания каолиновой глины при температуре в диапазоне от 650 до 900 ° С. При этих температурах освобождается химически связанная вода и происходит процесс распада кристаллического каолинита на аморфный метакаолин.



Из - за того, что каолин не может реагировать с новообразованиями цементного камня и является неактивным заполнителем, который снижает прочностные характеристики материала. Метакаолин в бетоне реагирует с гидроксидом кальция с образованием гидратов силиката кальция (CSH-гель) вместе с кристаллическими продуктами, такими как гидраты алюмината кальция и алюмосиликатные гидраты, они заменяют гидроксид кальция, тем самым способствуя улучшению микроструктуры бетона.



Основной отличительной особенностью метакаолина от микрокремнезема является его химическая природа. В отличие от микрокремнезема, метакаолин является смесью активного кремнезема и глинозема почти в равных пропорциях, то есть является не силикатным, а алюмосиликатным пуццоланом.

К особенностям метакаолина можно отнести:

- Светлый цвет от белого до кремового, что делает его практически безальтернативным материалом для модификации составов на основе белых и цветных цементов, с целью повышения их атмосферостойкости, водонепроницаемости и, как следствие, долговечности.



Рисунок 1.7 – Высокоактивный метакаолин

- По своей форме метакаолин представляет пластинчатые частицы среднего размера порядка 1-2 микрон. Эти частицы на порядок мельче частиц портландцемента, что позволяет им достраивать гранулометрию.

Поэтому, введение метакаолина в цементные бетоны позволяет:

- Повысить пластичность и удобоукладываемость бетонных смесей.
- Существенно снизить расход суперпластификаторов, необходимых для компенсации загущающего эффекта при введении тонкодисперсной добавки к цементу. В частности, при рациональном подборе дозировки метакаолина и пластификатора, удобоукладываемость бетона с метакаолином может оказаться даже выше удобоукладываемости бетона того же состава с тем же количеством пластификатора, но без метакаолина.

Области применения метакаолина:

Перечисленные выше особенности метакаолина определяют следующие основные области его применения.

Тяжелые бетоны, в том числе, высокопрочные и самоуплотняющиеся.

Снижение дозировки цемента при производстве бетонов всегда являлось целевой функцией задачи оптимизации состава бетонной смеси. Это важно как с экономической точки зрения, что особенно актуально в

последнее время, в связи с интенсивным ростом цен на цемент, так и с точки зрения повышения характеристик бетонов, в частности, снижения их ползучести и усадочных деформаций.

В сочетании с применением высокоэффективных пластификаторов, метакаолин позволяет существенно снизить количество цемента в рецептурах бетонов, особенно, в бетонах с повышенными требованиями к водонепроницаемости и морозостойкости.

Преимущества:

- Повышение ранней и конечной прочности и непроницаемости;
- Улучшение пластичности.

Выводы по первому разделу.

В первом разделе были изучены основные свойства цементно-содержащих материалов, рассмотрены проблемы, которые возникают при эксплуатации бетонных изделий в случае воздействия на них неблагоприятных условий, агрессивных сред и воды. Изучены наиболее известные способы борьбы с воздействием воды на изделия, и проанализировано влияние различных микронаполнителей на свойства цементно-содержащих материалов, на основании анализа был выбран наиболее эффективный микронаполнитель высокоактивный метакаолин.

2 Характеристика применяемых материалов. Методы исследования

2.1 Свойства используемых материалов

2.1.1 Портландцемент

Экспериментальная часть диссертационной работы проводилась в лаборатории кафедры «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство» Архитектурно – строительного института Тольяттинского государственного университета.

При проведении экспериментальных исследований в качестве вяжущего был использован быстротвердеющий цемент ЦЕМ I 42,5 Б, выбранным в соответствии с ГОСТ 31108 – 2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515 – 2013 «Цементы. Общие технические условия».

Быстротвердеющий цемент – цемент, отличающийся повышенной прочностью через трое суток твердения. Химический состав сырьевых материалов, применяемых для производства быстротвердеющего цемента и высокопрочного цемента, должен быть более однородным. Помол сырьевых материалов должен быть весьма тонким. Характеристика цемента приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики цемента ЦЕМ I 42,5 Б

Наименование		Фактическое значение
1		2
Предел прочности при сжатии, МПа	2 сут.	22,9
	28 сут.	42,5
Начало схватывания, мин		180
Конец схватывания, мин		235
Удельная поверхность, м ² /кг		400

Продолжение таблицы 2.1

1	2
Тонкость помола, проход через сито № 008, %	97,2
Содержание вспомогательного компонента (опока), %	3,3
Химический состав клинкера, %	
Оксид кальция CaO	65,8
Оксид кремния SiO ₂	21,8
Оксид алюминия Al ₂ O ₃	5,01
Оксид железа (III) Fe ₂ O ₃	4,26
Оксид магния MgO	1,21
Оксид серы (VI)	0,41
Щелочные оксиды (в пересчете на Na ₂ O)	0,78
Минералогический состав клинкера (расчетный), %	
Трехкальциевый силикат (C ₃ S)	61,5
Двухкальциевый силикат (C ₂ S)	16,3
Трехкальциевый алюминат (C ₃ A)	6,1
Четырехкальциевый алюмоферрит (C ₄ AF)	12,9
Санитарно – эпидемиологические свойства цемента	
Удельная эффективная активность естественных радионуклеидов А эфф, Бк/кг	74,5

Для производства цементов применяют портландцементный клинкер, в котором суммарное содержание трехкальциевого и двухкальциевого силикатов ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) составляет не менее 67% массы клинкера, а массовое отношение оксида кальция к оксиду кремния (CaO/SiO₂) – не менее 2,0. Содержание оксида магния (MgO) в клинкере не должно быть более 5,0% массы клинкера.

2.1.2 Мелкий заполнитель

Для проведения испытаний использовались два вида мелкого заполнителя природные Волжский и Камский пески. Пески были выбраны в соответствии с ГОСТ 8736 – 2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Гранулометрический состав мелкого заполнителя приведен в таблицах 2.2, 2.3.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав Камского песка

№ сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
10	0,3	-
5	8,5	8,8
2,5	22,5	31,3
1,25	16,5	47,8
0,63	11	58,8
0,315	40,3	99,1
0,16	0,3	99,4
< 0,16	0,6	100
	100,0	
$M_{кр}$		3,45

Природный Камский песок по своему модулю крупности относится к группе песков повышенной крупности в соответствии с таблицей 1 ГОСТ 8736 – 2014. Полный остаток на сите с сеткой 0,63 не соответствует таблице 2 ГОСТ 8736 – 2014.

Насыпная плотность Камского песка составляет 1562 кг/м³.

Таблица 2.3 – Гранулометрический состав Волжского песка

№ сита, мм	Частный остаток, %	Полный остаток, %
1	2	3
10	-	-

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3
5	-	-
2,5	0,4	-
1,25	0,4	0,8
0,63	1,2	2,0
0,315	30	32,0
0,16	66	98,0
< 0,16	2	100,0
	100,0	
$M_{кр}$		1,33

Природный Волжский песок по своему модулю крупности относится к группе песков очень мелкие в соответствии с таблицей 1 ГОСТ 8736 – 2014. Полный остаток на сите с сеткой 0,63 соответствует таблице 2 ГОСТ 8736 – 2014.

Насыпная плотность Волжского песка составляет 1470 кг/м³.

2.1.3 Высокоактивный метакаолин

В качестве микронаполнителя был использован высокоактивный метакаолин.

Метакаолин является высокоактивной пуццолановой добавкой для модификации бетонов.

Высокоактивный метакаолин «ВМК» - продукт дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата). Благодаря специальной технологии обжига и дальнейшего помола, продукт обладает высокими эксплуатационными характеристиками при применении его как в составах тяжелых, мелкозернистых, самоуплотняющихся, и легких ячеистых бетонов, так и при проектировании составов и производстве сухих строительных смесей. Дегидратированный, аморфный алюмосиликат, по

своей сути является высокоактивным природным пуццоланом, то есть гидравлически – активной добавкой, способной при взаимодействии с известью ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образовывать нерастворимые, низкоосновные гидроалюмосиликаты кальция. Такие свойства обуславливают превосходные строительно-технические характеристики материалов, смесей и конструкций на основе бетона с добавкой высокоактивного метакеолина. Свойства высокоактивного метакеолина приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Свойства высокоактивного метакеолина

Свойство	Значение
Цвет	Белый
Удельная поверхность, $\text{г}/\text{см}^2$	12000 – 13000
Насыпная плотность (в рыхлом состоянии), $\text{кг}/\text{м}^3$	450
Насыпная плотность (в уплотненном состоянии), $\text{кг}/\text{м}^3$	550
Остаток на сите 008, %	0,08
Массовая доля оксида кремния SiO_2 , %	51,4
Массовая доля оксида алюминия Al_2O_3 , %	> 42
Массовая доля оксида железа Fe_2O_3 , %	0,8
Пуццоланическая активность, $\text{мг Ca}(\text{OH})_2$	> 1000
Влажность, %	< 0,5
pH водной суспензии, ед.	6,5

Применение ВМК при приготовлении бетонных смесей ведет к модификации структуры цементного камня в затвердевшем бетоне, а именно, к ее уплотнению. Такой эффект связан с тем, что средний медианный размер зерен ВМК на порядок меньше тонины вяжущего, что позволяет говорить об эффекте «микробетона», то есть заполнении межзеренных пустот (пустот между частицами вяжущего) частицами активной минеральной добавки,

вступающими в химическое взаимодействие с продуктами гидратации клинкерных минералов, а также с примесными щелочными оксидами, что и ведет к образованию плотных не растворимых водой новообразований. Следствием такого взаимодействия ВМК с компонентами цементного камня, является существенное уплотнение структуры формирующихся при твердении бетона гидратных новообразований, что ведет к повышению плотности бетона, его водонепроницаемости, коррозионной стойкости, и долговечности бетона и конструкции в целом. Так как следствием введения в состав бетона ВМК, является его взаимодействие с гидролизной известью - портландитом, образующейся от гидратации основных клинкерных минералов – алита и белита, то в результате твердения, бетон обладает не только повышенной плотностью и как следствие высокими эксплуатационными характеристиками, но и высокой стойкостью к основным видам химической коррозии бетона. Использование пластификаторов при изготовлении бетонной смеси с тонкодисперсными порошками, активными минеральными добавками, в том числе и метакаолином, является необходимым условием. В противном случае, высокая дисперсность минерального порошка вызовет резкое повышение водопотребности и, как следствие – существенный спад прочности затвердевшего бетона.

2.1.4 Пластификатор

Пластификатор Sika ViscoCrete 25RU – комплексная уплотняющая добавка для жестких бетонных смесей. Используется при производстве изделий из цветных, серых изделий. Производство осуществляется в основном машинным способом, методом безопалубочного формования или с моментальным расформованием с применением технологии прессования, вибропрессования, центрифугирования.

Сферы применения: производство тротуарной плитки, бетонных камней, бордюров.

К преимуществам относят:

- повышение формуемости, связности, уплотняемости изделий;
- повышение плотности и конечной прочности изделий;
- снижение износа формообразующей оснастки;
- снижение расхода цемента;
- сокращение времени формовки и доводки поверхности;
- повышение качества лицевой поверхности;
- снижение налипания бетона;
- сокращение количества брака;
- снижение капиллярного водопоглощения;
- повышение морозостойкости изделий.

Технические характеристики гиперпластификатора приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики

Характеристики	Описание
Основа	Смесь сурфактантов и сополимеров насыщенных углеводов.
Внешний вид	Жидкость белого цвета
Плотность	1,00 – 1,01 кг/дм ³ (при 20°С)
Показатель рН	5,0 – 7,0
Дозировка	0,2 – 1,0 % от массы цемента
Применение	0,2 – 1,0 % от массы цемента ViscoCrete 25RU вводится в бетонную смесь с водой затворения или добавляется в конце перемешивания бетонной смеси. Обычно время перемешивания бетонной смеси составляет не менее 30 секунд с момента подачи добавки в бетонную смесь. Время перемешивания после введения добавки зависит от индивидуальных условий каждого производства и

Продолжение таблицы 2.5

1	2
	должно быть определено при предварительном тестировании по критерию однородности свойств (в основном влажности) бетонной смеси. ViscoCrete 25RU не должен применяться в подвижных бетонных смесях, т.к. это может привести к чрезмерному воздухововлечению и значительному снижению прочности бетона.
Важные замечания	Добавка не должна подвергаться замораживанию. В случае замерзания возможно ухудшение её свойств. Для дальнейшего использования добавки, подвергнутой замораживанию, необходимо проведение дополнительных лабораторных испытаний.

2.2 Методы экспериментальных исследований

2.2.1 Мелкий заполнитель

В качестве мелкого заполнителя при проведении исследования использовались природные пески Волжского и Камского месторождения.

Качество и свойства мелкого заполнителя оценивались по методикам, изложенным в ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» и ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Зерновой состав определяют путем отсева песка на стандартном наборе сит, включающий сита с круглыми отверстиями диаметром 10 мм, 5 мм и 2,5 мм и проволочные сита со стандартными ячейками 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм, 0,075 мм, 0,05 мм. Пробу песка массой не менее 2000 кг высушивают в сушильном шкафу до постоянной массы. Просеивание производят механическим или ручным способами. Продолжительность просеивания

должна быть такой, чтобы при контрольном интенсивном ручном встряхивании. При ручном просеивании допускается определять окончание просеивания, интенсивно встряхивая каждое сито над листом бумаги. Просеивание считают законченным, если при этом практически не наблюдается падения зерен песка.

По результатам проведенных исследований определяют:

- частный остаток на каждом сите:

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где m_i – масса остатка на данном сите, г;

m – масса просеиваемой навески, г.

- полный остаток на каждом сите:

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,5} + \dots + a_i, \quad (2.2)$$

где $a_{2,5}$, $a_{1,5}$, a_i – частные остатки на соответствующих ситах;

- модуль крупности песка вычисляют по формуле:

$$M_k = \frac{A_{2,5} + A_{1,5} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,16}}{100}, \quad (2.3)$$

где $A_{2,5}$, $A_{1,5}$, $A_{0,63}$, $A_{0,315}$, $A_{0,16}$ – полные остатки на сите с круглыми отверстиями диаметром 2,5 мм и на ситах с сетками 1,5, 0,63, 0,315, 0,16 мм.

Определение насыпной плотности.

Насыпную плотность определяют путем взвешивания песка в мерных сосудах.

Проведение испытания.

Песок насыпают совком в предварительно взвешенный мерный объемом 1 дм³ с заранее определенной массой пустого сосуда с высоты 10 см от верхнего края до образования над верхом цилиндра конуса. Конус без уплотнения песка снимают вровень с краями сосуда металлической линейкой, после чего сосуд с песком взвешивают.

Насыпную плотность песка вычисляют:

$$\rho_n = \frac{m_1 - m}{V}, \quad (2.4)$$

где m_1 – масса мерного сосуда с песком, кг;

m – масса мерного сосуда;

V – вместимость сосуда, m^3 .

2.2.2 Добавки

Качество и свойства добавок определяют в соответствии с ГОСТ 30459 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности» и ГОСТ 24211 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».

Для проведения испытания отбирается средняя проба, путем отбора точечных проб и последующего составления из них объединенной пробы. От порошковых добавок отбирают не менее двух точечных проб из любых точек массы добавки.

«Материалы, применяемые для приготовления смесей, бетонов или растворов, должны соответствовать нормативным или техническим документам на эти материалы и иметь документ о качестве.

Добавки должны иметь документ о качестве, подтверждающий их соответствие всем нормируемым показателям качества, регламентируемым в нормативном или техническом документе, по которому производится и применяется добавка конкретного вида.

Добавки следует вводить в смеси основных составов в соответствии с требованиями нормативных или технических документов на добавки конкретных видов. Сыпучие водонерастворимые добавки вводят в основные составы в сухом виде, после чего сухая смесь с добавкой должна быть тщательно перемешана до подачи в нее воды.

Испытание добавок, повышающих прочность.

Эффективность действия добавок, повышающих прочность бетонов и растворов, оценивают по увеличению прочности образцов основных составов по сравнению с контрольным.

Испытание гидрофобизирующих добавок.

Эффективность действия гидрофобизирующих добавок оценивают по степени уменьшения водопоглощения бетонов и растворов основных составов по сравнению с контрольным составом и по гидрофобизирующей способности добавок» [16].

2.2.3 Подбор оптимального состава бетонной смеси

Для изучения возможности применения высокоактивного метакеолина в качестве добавки в бетонную смесь были использованы природные пески Волжского и Камского месторождения. Высокоактивный метакеолин вводился в состав жесткой бетонной смеси в количестве 5%, 8%, 10%, 15% от массы цемента.

В ходе проведения исследования были подобраны оптимальные составы бетонной смеси в соответствии с ГОСТ 27006 – 86 «Бетоны. Правила подбора состава».

Подбор состава бетона включает в себя определение номинального состава, расчет и корректировку состава на пробных замесах.

Количество материалов на 1 м³ бетонной смеси определяют, исходя из расхода и объема материалов, использованных при изготовлении пробного замеса. Конечный состав смеси выражается в виде расхода материалов на 1 м³ бетонной смеси или в частях по массе и объему.

2.2.4 Изучение свойств бетонной смеси

«Определение свойств бетонных смесей велось в соответствии с ГОСТ 10181 – 2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

Определение удобоукладываемости бетонной смеси.

Подвижность бетонной смеси оценивают по осадке конуса (ОК), отформованного из бетонной смеси.

Испытания проводят, применяя конус, металлическую линейку, загрузочную воронку, кельму, прямой металлический гладкий стержень диаметром 16 мм, длиной 600 мм с округленными концами.

Конус устанавливают на гладкий лист и заполняют бетонной смесью марок П1, П2 или П3 через воронку в три слоя одинаковой высоты. Каждый слой уплотняют штыкованием металлическим стержнем в нормальном конусе 25 раз, в увеличенном – 56 раз. Конус во время заполнения и штыкования должен быть плотно прижат к листу. После уплотнения бетонной смеси снимают загрузочную воронку, избыток смеси срезают кельмой вровень с верхними краями конуса и заглаживают поверхность бетонной смеси. Время от начала заполнения конуса до его снятия не должно превышать 3 мин. Осадку конуса бетонной смеси определяют, укладывая гладкий стержень на верх конуса и измеряя расстояние от нижней поверхности стержня до поверхности бетонной смеси с погрешностью не более 0,5 см.

Приготовленную смесь укладывают в металлические формы (кубические и призматические). Далее уложенную смесь уплотняют на виброплощадке, после приготовления образцы хранят в течение суток. Распалубливание образцов ведут по достижении 24 часов с момента укладки, после хранят их в течение 7, 14 и 28 суток в нормальных условиях твердения.» [6].

2.2.5 Физико – механические свойства бетонов

В качестве объектов исследования использовались мелкозернистые бетоны. В дальнейшем составы испытывались на прочность, водопоглощение, пористость.

Предел прочности при сжатии бетонных образцов испытывали на образцах кубической формы размерами 70Ч70Ч70 мм на гидравлическом прессе. Перед проведением испытания бетонные образцы измеряли и взвешивали с погрешностью не более 0,1 %. Прочностные свойства бетонных образцов определяли в соответствии с ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Образец нагружали плавно при постоянной скорости нарастания нагрузки до его полного разрушения, максимальное значение усилия определяло разрушающую силу.

Предел прочности при сжатии определяется по формуле:

$$R_{сж} = \frac{P}{F} \cdot \alpha, \quad (2.5)$$

где P – разрушающая сила, кг;

F – площадь поперечного сечения образца, см²;

α – масштабный коэффициент.

Для ребра куба со стороной равной 70 мм масштабный коэффициент принимается равным 0,85.

Предел прочности на осевое растяжение при изгибе бетонных образцов проводили в соответствии с ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Показатели определяли на образцах призматической формы размерами 40×40×160 мм. Линейные размеры образцов измеряют с погрешностью не более 1 %. Образец – призму устанавливают в испытательную машину и нагружают до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки ($0,05 \pm 0,01$) Мпа/с.

Прочность бетона на растяжение при изгибе определяется по формуле:

$$R_{ib} = \frac{F \cdot l}{a \cdot b^2}, \quad (2.6)$$

где F – разрушающая нагрузка, Н;

a , b , l – ширина, высота поперечного сечения призмы и расстояние между опорами соответственно при испытании образцов на растяжение при изгибе, мм;

Водопоглощение бетонных образцов определяли в соответствии с ГОСТ 12730.3 – 78 «Бетоны. Методы определения водопоглощения».

Поверхность бетонных образцов необходимо очистить от пыли и грязи. Испытания образцов проводят при высушивании образцов до постоянной массы.

Высушивание образцов проводят по ГОСТ 12730.2 – 78 «Бетоны. Метод определения влажности». Подготовленные образцы взвешивают, после чего ставят в сушильный шкаф и высушивают до постоянной массы при температуре 105°С с изменением на 5 °С в сторону увеличения или уменьшения. Постоянной массу образца считают, в случае если результаты двух последовательных взвешиваний отличаются не более, чем на 0,1 %.

Для определения водопоглощения образцы помещают в емкость с водой, с расчетом того, что уровень воды в емкости выше уложенных в нее образцов примерно на 50 мм. Образцы необходимо укладывать так, чтобы высота образца была минимальной. Температура воды в емкости должна быть около 20 °С с изменением в сторону увеличения или уменьшения не более, чем на 2°С.

Взвешивание образцов необходимо проводить через каждые 24 часа водопоглощения на обычных или гидростатических весах с погрешностью не более 0,1 %. При взвешивании на обычных весах образцы, вынутые из воды, предварительно вытирают отжатой влажной тканью. Массу воды, вытекшую из пор образца на чашку весов, следует включать в массу насыщенного образца. Испытание проводят до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,1%.

Водопоглощение бетона по массе в % определяют по формуле:

$$W_m = \frac{m_c - m_g}{m_c} \cdot 100, \quad (2.7)$$

где m_c – масса сухого образца, г;

m_b – масса влажного образца, г.

Водопоглощение по объему в % определяют по формуле:

$$W_o = \frac{W_m \cdot \rho_0}{\rho_g}, \quad (2.8)$$

где ρ_0 – плотность сухого бетона, кг/м³;

ρ_b – плотность воды, принимаемая 1 г/см³.

Пористость бетонных образцов определяют в соответствии с ГОСТ 12730.4 – 78 «Бетоны. Методы определения показателей пористости».

Полный объем пор в % определяют по формуле:

$$P_{\Pi} = \left(\frac{\rho_{\delta} - \rho_0}{\rho_{\delta}} \right) \cdot 100, \quad (2.9)$$

где ρ_{δ} – плотность измельченного в порошок бетона, определенная при помощи пикнометра;

Истинную плотность образца определяют путем измерения массы единицы объема измельченного высушенного материала.

ρ_0 – плотность сухого бетона.

Объем открытых капиллярных пор бетона в % определяют по формуле:

$$P_0 = W_0, \quad (2.10)$$

где, W_0 – объемное водопоглощение бетона, %.

Водостойкость образцов характеризуется коэффициентом размягчения, который представляет собой отношение прочности в водонасыщенном состоянии к прочности в сухом состоянии. Коэффициент размягчения вычисляют по формуле:

$$K_p = \frac{R_{нас.}}{R_{сух}}, \quad (2.11)$$

где $R_{нас.}$ – предел прочности при сжатии образцов, насыщенных водой, Мпа;

$R_{сух}$ – предел прочности при сжатии сухих образцов, Мпа.

Выводы по второму разделу.

По результатам раздела 2 были установлены основные методы проводимых экспериментальных исследований, и изучены свойства применяемых материалов при экспериментах материалов.

3 Исследование влияния высокоактивного метаксаолина на свойства мелкозернистого бетона

3.1 Математическое моделирование влияния компонентов на водопоглощение по массе

Описано создание и анализ данной математической модели, позволяющей адекватно описать соотношения исходных компонентов бетонной смеси на показатели водопоглощения мелкозернистого бетона в возрасте 28 суток в нормальных условиях твердения.

Полученное в результате математического моделирования регрессионное уравнение первого порядка зависимости функций водопоглощения мелкозернистого бетона от исходных сырьевых компонентов.

Целью создания математической модели является создание эмпирических моделей, изображающих влияние сырьевых компонентов на физические характеристики мелкозернистого бетона, рассмотренные в роли выходящих целевых функций.

Под прочностью понимают способность материала впитывать и удерживать в порах и капиллярах воду. Водопоглощение является важнейшей характеристикой материалов, которая влияет на его эксплуатационные свойства.

Водопоглощение является характеристикой, которая зависит от применяемых материалов и их свойств и методов испытаний.

В качестве материалов были использованы: бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б, природные Волжский и Камский пески в качестве мелкого заполнителя, гиперпластификатор Sika ViscoCrete 25RU. Высокоактивный метаксаолин ВМК – 45 белого цвета.

Состав мелкозернистой бетонной смеси представлен в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Состав мелкозернистого бетона

Исходные материалы	Расход материалов, кг/м ³
Цемент 42,5Б	530
Песок	1675
ВМК	26
Вода	206
Гиперпластификатор «Sika»	6
Всего	2443

В качестве входных переменных параметров используем расходы исходных компонентов: Цемента (Ц), Песка (П), Высокоактивного метаксаолина (ВМК), Воды (В), гиперпластификатора (Sika). Для уменьшения количества экспериментов расход гиперпластификатора принимаем в постоянным расным 1 % от массы цемента. Исходными факторами будут являться следующие соотношения:

x_1 – отношение ВМК/Ц в пределах 0,047...0,051;

x_2 – отношение П/Вяж в пределах 2,8 ... 3,2,

где Вяж = П+ ВМК,

x_3 – отношение В/Ц в пределах 0,37 ... 0,41;

Число необходимых опытов планирования первого порядка:

$$N=2^k, \quad (3.1)$$

где k – количество входных факторов.

$$N=2^3=8$$

Полученные уровни факторов и интервалы варьирования представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Входные факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	вид переменных	-1	0	+1	
1	2	3	4	5	6
$\frac{ВМК}{Ц}$	x_1	0,047	0,049	0,051	0,002
$\frac{П}{Вяж}$	x_2	2,8	3	3,2	0,2

Продолжение таблицы 3.2

1	2	3	4	5	6
$\frac{B}{Ц}$	x_3	0,37	0,39	0,41	0,02

Составы мелкозернистого бетона приведены в таблице 3.3

Таблица 3.3 – Составы мелкозернистого бетона, по методу планирования

В виде переменных			В натуральном виде			Состав мелкозернистого бетона				
x_1	x_2	x_3	$\frac{ВМК}{Ц}$	$\frac{П}{Вяз}$	$\frac{В}{Ц}$	Ц	ВМК	П	В	Sika
+1	+1	+1	0,051	3,2	0,41	490	25	1648	201	4,9
-1	+1	+1	0,047	3,2	0,41	553	26	1852	227	5,5
+1	-1	+1	0,051	2,8	0,41	529	27	1557	217	5,3
-1	-1	+1	0,047	2,8	0,41	510	24	1495	209	5,1
+1	+1	-1	0,051	3,2	0,37	549	28	1846	203	5,5
-1	+1	-1	0,047	3,2	0,37	531	25	1779	196	5,3
+1	-1	-1	0,051	2,8	0,37	509	26	1498	188	5,1
-1	-1	-1	0,047	2,8	0,37	617	29	1808	228	6,2

Прочность образцов на сжатие в возрасте 28 суток в нормальных условиях твердения представлены в таблице 3.4

Таблица 3.4 – Водопоглощение по массе мелкозернистых бетонов

В натуральном виде			Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{ВМК}{Ц}$	$\frac{П}{Вяз}$	$\frac{В}{Ц}$	R_1	R_2	R_3	$Y_{ср}=R_{ср}$	Y	$(Y_{ср}-Y)^2$
0,051	3,2	0,41	7,9	8,0	7,8	7,5	7,25	0,063
0,047	3,2	0,41	7,3	7,4	7,1	6,8	7,25	0,203

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,051	2,8	0,41	5,9	6,4	6,1	5,7	5,5	0,04
0,047	2,8	0,41	5,6	5,8	6,0	5,3	5,5	0,04
0,051	3,2	0,37	8,0	8,0	8,2	7,8	7,9	0,01
0,047	3,2	0,37	8,2	8,3	8,5	8,0	7,9	0,01
0,051	2,8	0,37	6,1	6,2	6,5	5,8	6,15	0,123
0,047	2,8	0,37	6,9	6,5	7,1	6,3	6,15	0,023
			$\sum (Y_{cp} - Y)^2$					0,512

Составим матрицы из значений исходных компонентов и средних значений прочности при сжатии.

Матрица планирования

$$X = \begin{pmatrix} 0,051 & 3,2 & 0,41 \\ 0,047 & 3,2 & 0,41 \\ 0,051 & 2,8 & 0,41 \\ 0,047 & 2,8 & 0,41 \\ 0,051 & 3,2 & 0,37 \\ 0,047 & 3,2 & 0,37 \\ 0,051 & 2,8 & 0,37 \\ 0,047 & 2,8 & 0,37 \end{pmatrix}$$

Матрица выходного параметра

$$Y = \begin{pmatrix} 7,5 \\ 6,8 \\ 5,7 \\ 5,3 \\ 7,8 \\ 8,0 \\ 5,8 \\ 6,3 \end{pmatrix}$$

Транспонированная матрица планирования

$$X^T = \begin{pmatrix} 0,051 & 0,047 & 0,051 & 0,047 & 0,051 & 0,047 & 0,051 & 0,047 \\ 3,2 & 3,2 & 2,8 & 2,8 & 3,2 & 3,2 & 2,8 & 2,8 \\ 0,41 & 0,41 & 0,41 & 0,41 & 0,37 & 0,37 & 0,37 & 0,37 \end{pmatrix}$$

$$X \cdot X^T = \begin{pmatrix} 0,01924 & 1,176 & 0,15288 \\ 1,176 & 72,32 & 9,36 \\ 0,15288 & 9,36 & 1,2 \end{pmatrix}$$

$$Y \cdot X^T = \begin{pmatrix} 2,6 \\ 161 \\ 20,7 \end{pmatrix}$$

Вычисляем обратную матрицу:

$$(X \cdot X^T)^{-1} = \begin{pmatrix} 15702.7 & -95.19 & -1237.44 \\ -95.18 & 2.54 & -7.58 \\ -1237.44 & -7.58 & 214.01 \end{pmatrix}$$

Таблица 3.5 – Таблица расчетных элементов матриц

X	x ₁	x ₂	x ₃	Y	Y _{cp}	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₃ ²	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ Y	x ₂ Y	x ₃ Y
	0,051	3,2	0,41		7,5	0,0026	10,24	0,17	0,16	0,02	1,31	0,38	24	3,1
	0,047	3,2	0,41		6,8	0,0022	10,24	0,17	0,15	0,019	1,31	0,32	21,8	2,8
	0,051	2,8	0,41		5,7	0,0026	7,84	0,17	0,14	0,02	1,15	0,29	16,0	2,3
	0,047	2,8	0,41		5,3	0,0022	7,84	0,17	0,13	0,019	1,15	0,25	14,8	2,2
	0,051	3,2	0,37		7,8	0,0026	10,24	0,14	0,16	0,019	1,18	0,40	25,0	2,9
	0,047	3,2	0,37		8,0	0,0022	10,24	0,14	0,15	0,017	1,18	0,38	25,6	3,0
	0,051	2,8	0,37		5,8	0,0026	7,84	0,14	0,14	0,019	1,04	0,30	16,2	2,1
	0,047	2,8	0,37		6,3	0,0022	7,84	0,14	0,13	0,017	1,04	0,30	17,6	2,3
	Σ=						0,0192	51,84	1,24	1,16	0,15	9,36	2,62	161,0

Вычисляем матрицу искоемых коэффициентов:

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y_{cp}, \quad (3.2)$$

где X^T - транспонированная матрица планирования,

Y_{cp} - матрица выходного параметра.

$$A = \begin{pmatrix} 15702,7 & -95,19 & -1237,44 \\ -95,18 & 2,54 & -7,58 \\ -1237,44 & -7,58 & 214,01 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2,6 \\ 161 \\ 20,7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 113,58 \\ 4,57 \\ -7,72 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты уравнения регрессии:

$$a_1 = 113,58 \quad a_2 = 4,57, \quad a_3 = -7,72;$$

Уравнение линейной регрессии принимает вид:

$$y = 113,58 + 4,57x_2 - 7,72x_3;$$

Далее проведем статистический анализ математической модели.

Таблица 3.6 – Таблица расчетных элементов

Y	y ₁	y ₂	y ₃	Y _{cp}	y ₁ - Y _{cp}	y ₂ - Y _{cp}	y ₃ - Y _{cp}	(5) ²	(6) ²	(7) ²	Su ²
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	7,9	8,0	7,8	7,5	0,4	0,5	0,3	0,16	0,25	0,09	0,25

Продолжение таблицы 3.6

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	7,3	7,4	7,1	6,8	0,5	0,6	0,3	0,25	0,36	0,09	0,35
	5,9	6,4	6,1	5,7	0,2	0,7	0,4	0,04	0,49	0,16	0,35
	5,6	5,8	6,0	5,3	0,3	0,5	0,7	0,09	0,25	0,49	0,42
	8,0	8,0	8,2	7,8	0,2	0,2	0,4	0,04	0,04	0,16	0,12
	8,2	8,3	8,5	8,0	0,2	0,3	0,5	0,04	0,09	0,25	0,19
	6,1	6,2	6,5	5,8	0,3	0,4	0,7	0,09	0,16	0,49	0,37
	6,9	6,5	7,1	6,3	0,6	0,2	0,8	0,36	0,04	0,64	0,52
Σ	max $Su^2=0,42$										2,57

Выполним проверку воспроизводимости опытов или проверку гипотезы об однородности дисперсий. Проверку проводим с помощью критерия Кохрена.

Расчетное значение критерия Кохрена:

$$G_{расч} = \frac{\max S^2}{\sum S_i^2}, \quad (3.3)$$

Критическое значение критерия Кохрена находят из таблицы по числу:

- степени свободы числителя $f=k-1=3-1=2$;
- степени свободы знаменателя $f_2=N=8$;
- уровня значимости $\alpha = 0,05$.

С учетом данных параметров критическое значение равно $G_{кр} = 0,5157$.

$$G_{расч} = \frac{\max S^2}{\sum S_i^2} = \frac{0,42}{2,57} = 0,16$$

$G_{расч} = 0,16 < G_{кр} = 0,5157$, следовательно гипотеза об однородности дисперсий не отвергается.

Далее проведем оценку коэффициентов регрессии по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{n=1}^8 x_{ij} \bar{y}_j}{8}, \quad (3.4)$$

Полученные данные сведем в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Значения критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии первого порядка

Параметры	Итерация j							
	0	1	2	3	4	5	6	7
b_j	6,7	0,05	0,875	-0,325	0,075	0,225	-0,05	0
$ b_j $	6,7	0,05	0,875	0,325	0,075	0,225	0,05	0
t_{bj}	11,82	0,088	1,54	0,573	0,132	0,397	0,088	0

По результатам проведенных расчетов получаем уравнение регрессии;

$$Y_1 = 6,7 + 0,05x_1 + 0,875x_2 - 0,325x_3 + 0,075x_4 + 0,225x_5 - 0,05x_6;$$

Необходимо провести проверку значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента. Коэффициент b считается значимым при выполнении условия:

$$t_{bj} \geq t_a(f_2), \quad (3.5)$$

где $t_a(f_2)$ - критическое распределение Стьюдента.

Критерий Стьюдента при степени свободы $f_2 = N(k-1) = 8(3-1) = 16$, и уровне значимости $\alpha = 0,025$ равен $t_{0,025}(16) = 2,1199$

Значения критерия Стьюдента уравнения регрессии определяют:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{b\delta}}, \quad (3.6)$$

где $S_{b\delta}$ - оценка дисперсии уравнения регрессии.

$$S_{bq} = \sqrt{\frac{S_u^2}{N}} = \sqrt{\frac{2,57}{8}} = 0,567, \quad (3.7)$$

После проверки значимости коэффициентов незначимые коэффициенты были отброшены, получено уравнение

$$Y_1 = 6,7 + 0,875x_2 - 0,325x_3;$$

Проверим гипотезу об адекватности модели, основанную на расчетах дисперсии адекватности S_{ad}^2 и критерия Фишера $F_{\text{рас}}$:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum (Y_{cp} - Y)^2}{N - m}, \quad (3.8)$$

где Y – значение отклика;

$$F_{расc} = \frac{S_{ad}^2}{S_u^2}, \quad (3.9)$$

где m – число оцениваемых коэффициентов регрессии, $m=3$.

Степени свободы $f_1 = N = 8$, $f_2 = N - m = 8 - 3 = 5$. Критическое значение критерия Фишера $F_{табл}(8,5) = 3,6875$.

Тогда $S_{ad}^2 = \frac{0,512}{8} = 0,064$ и $S_u^2 = 2,57 \rightarrow F_{расc} = \frac{S_{ad}^2}{S_u^2} = \frac{0,064}{2,57} = 0,025$, а $F_{расc} = 0,025 <$

$F_{табл} = 3,6875$, следовательно уравнение удовлетворяет результатам практического эксперимента.

3.2 Влияние добавки высокоактивного метаксаолина в составе вяжущего на водопоглощение и пористость цементного камня

Для изучения влияния высокоактивного метаксаолина на характеристики водопоглощения и пористости мелкозернистого бетона были использованы следующие материалы: бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б, природные Волжский и Камский пески в качестве мелкого заполнителя, гиперпластификатор Sika ViscoCrete 25RU. Высокоактивный метаксаолин ВМК – 45 белого цвета добавлялся в сухом виде от массы цемента в количестве 5 %, 8 %, 10 % и 15 %. Состав бетонной смеси представлена в таблице 3.8

Таблица 3.8 – Количество компонентов в кг/м³ бетонной смеси I серии

№ партии	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6
Содержание ВМК, % от цемента	0	5	8	10	15
Единица измерения	кг/м ³				
Цемент 42,5Б	535	530	484	478	467
Песок	1605	1675	1578	1577	1635
ВМК	-	26	44	53	84
Вода	193	206	198	202	210

Продолжение таблицы 3.8

1	2	3	4	5	6
Гиперпластификатор «Sika»	5,35	6	5	5	6
В/Ц	0,361	0,389	0,409	0,423	0,450
Средняя плотность, кг/м ³	2339	2443	2309	2315	2402
Осадка конуса, см	1,3	2,2	1,8	1,8	1,8

Образцы мелкозернистого бетона I серии были изготовлены кубической формы с размерами 70×70×70 мм и призматической формы с размерами 40×40×160 мм с различными составами. Образцы выдерживали в течение 7 и 28 суток в нормальных условиях твердения. Часть образцов после распалубливания подвергали тепловлажностной обработке, соблюдая мягкий режим твердения – температура не превышала 70°C, предельная скорость подъема и снижения температуры не превышала 25°C/ч.

Результаты испытаний на водопоглощение I серии образцов представлены в таблице 3.9 и на рисунках 3.1 и 3.2. Данные о снижении водопоглощения образцов в 28 суток от 7 суток сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.9 – Водопоглощение бетона I серии образцов

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	W по массе, %		W по объему, %	
			7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
2	0%	нормальные условия	6,9	6	15,67	14,03
		пропаривание	7,4	6,3	17,31	14,74
3	5%	нормальные условия	7	5,8	17,10	14,17
		пропаривание	7	6	17,10	14,66
4	8%	нормальные условия	6,8	5,3	15,70	12,24
		пропаривание	6,4	5,6	14,78	12,93
5	10%	нормальные условия	6,4	4,7	14,82	13,43
		пропаривание	6	5,2	13,89	12,04
6	15%	нормальные условия	6,1	3,7	14,65	13,69
		пропаривание	4,5	4,2	10,81	10,09

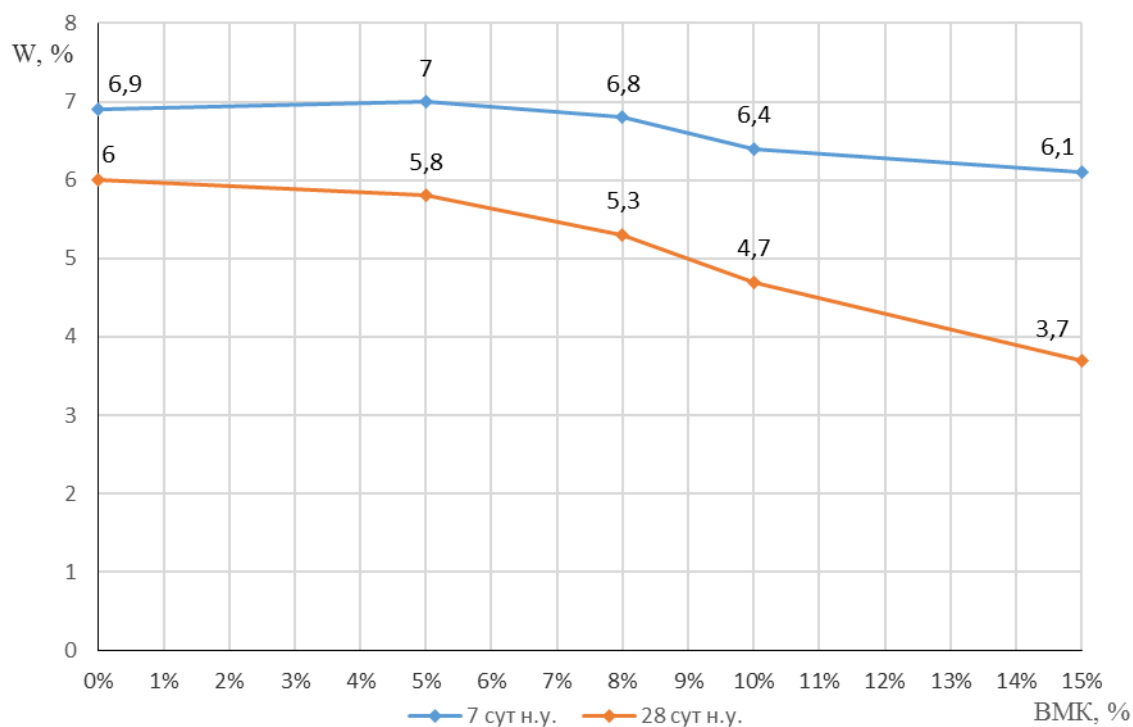


Рисунок 3.1 – Водопоглощение бетона партий 2 – 6 в нормальных условиях твердения в зависимости от содержания метакаолина

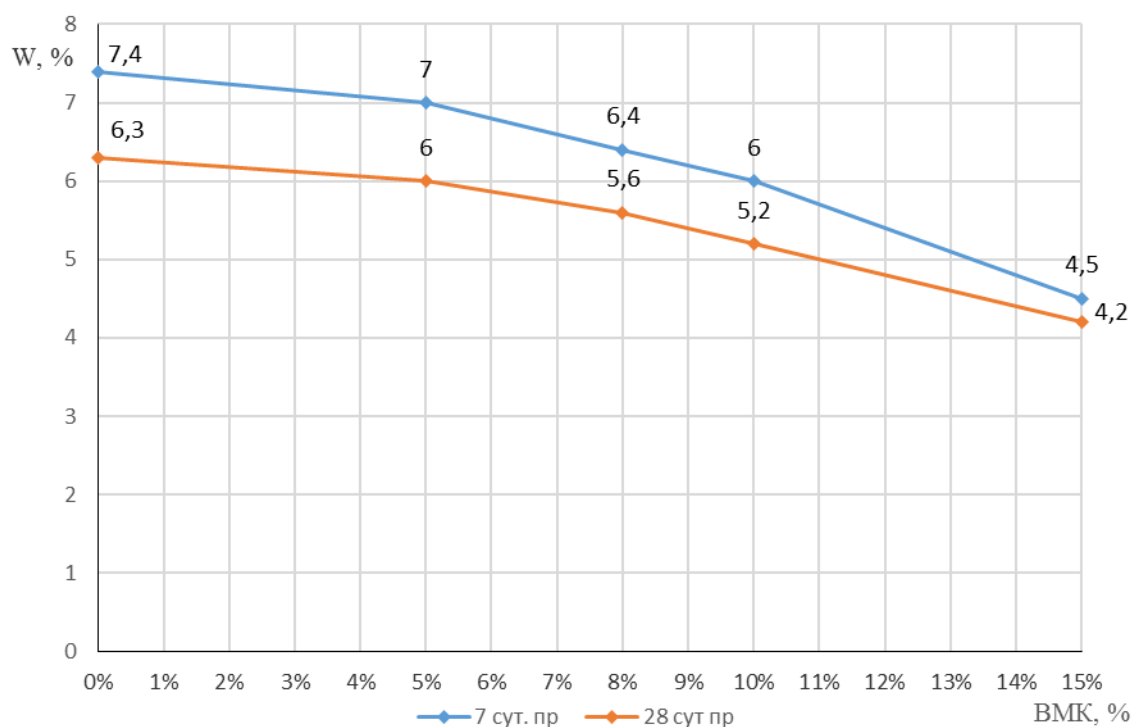


Рисунок 3.2 – Водопоглощение бетона партий 2 – 6 после пропаривания в зависимости от содержания метакаолина

Таблица 3.10 – Снижение водопоглощения бетонных образцов I серии в возрасте 28 суток по отношению к водопоглощению образцов в 7 суток

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	Снижение W, %
2	0%	нормальные условия	13
		пропаривание	15
3	5%	нормальные условия	17
		пропаривание	14
4	8%	нормальные условия	22
		пропаривание	13
5	10%	нормальные условия	27
		пропаривание	13
6	15%	нормальные условия	39
		пропаривание	7

На рисунках 3.1, 3.2 и таблице 3.10 наблюдается снижение водопоглощения бетонных образцов с увеличением концентрации добавки высокоактивного метаксаолина. У образцов, выдержанных в нормальных условиях твердения, наилучшие результаты наблюдаются в случаях, когда содержание добавки составляет 8 - 15 %.

Влияние высоких температур на бетонные образцы показано на рисунке 3.3 и в таблице 3.11.

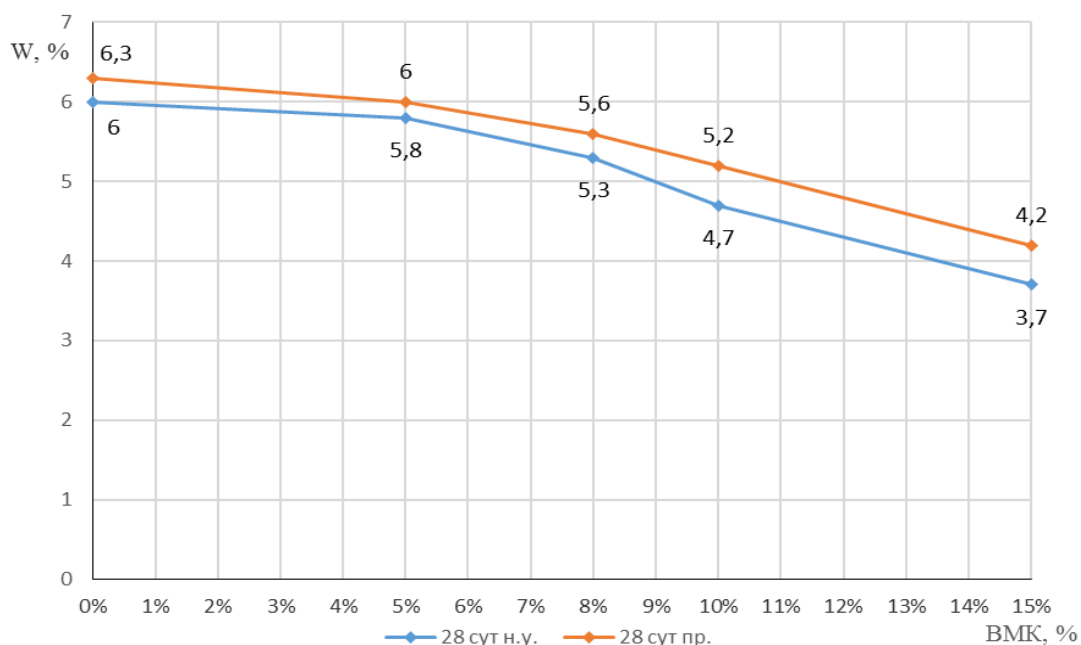


Рисунок 3.3 – Зависимость водопоглощения I серии образцов от условий твердения

Таблица 3.11 - Изменение W (%) бетонных образцов I серии при пропаривании по отношению к нормальным условиям твердения

№ партии	Кол-во ВМК	Изменение W, %	
		7 сут	28 сут
2	0%	7	5
3	5%	1	3
4	8%	-6	5
5	10%	-6	9
6	15%	-26	12

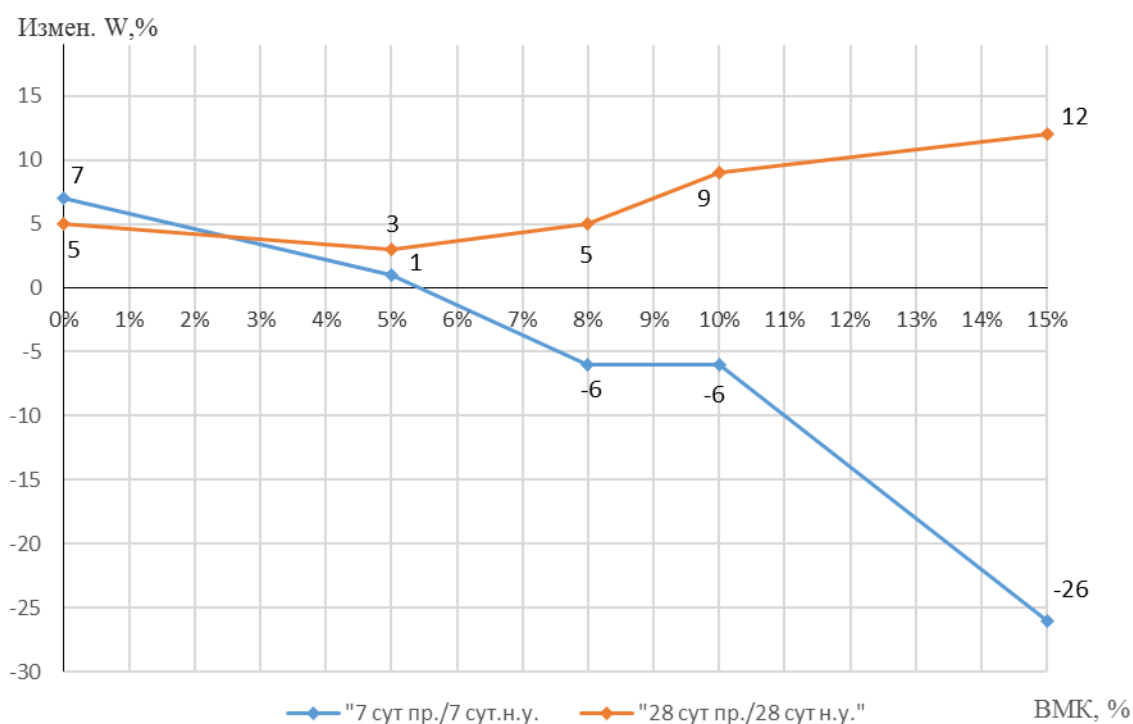


Рисунок 3.4 - Изменение W (в %), в зависимости от условий твердения бетонных образцов I серии

Анализ данных рисунков 3.3, 3.4 и таблицы 3.22 позволяет предположить, что влияние высоких температур при твердении бетона, способствует повышению водопоглощения образцов в 28 суток.

II серия образцов бетона

С целью определения эффективности применения гиперпластификатора в составе бетонной смеси и дальнейшей оценки его воздействия на водопоглощение и пористость бетона были изготовлены партии без добавления гиперпластификатора. Образцы мелкозернистого

бетона II серии были изготовлены кубической и призматической форм с размерами 70×70×70 мм и 40×40×160 мм, соответственно. Образцы выдерживали в течение 7 и 28 суток в нормальных условиях твердения, часть подвергали пропариванию с соблюдением мягкого режима твердения. Составы бетонной смеси II серии представлены в таблице 3.12

Таблица 3.12 – Количество компонентов в кг/м³ бетонной смеси II серии

№ партии	1	7	8
Содержание ВМК, % от цемента	0	10	15
Единица измерения	кг/м ³		
Цемент 42,5Б	526	470	438
Песок	1578	1551	1533
ВМК	-	51	79
Вода	226	225	250
Гиперпластификатор «Sika»	-	-	-
В/Ц	0,430	0,430	0,468
Средняя плотность кг/м ³	2330	2297	2300
Осадка конуса, см	3,3	1,6	1,2

Результаты испытаний на водопоглощение II серии образцов представлены в таблицах 3.13, 3.14 и на рисунках 3.5 и 3.6.

Таблица 3.13 – Водопоглощение бетона II серии образцов

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	W по массе, %		W по объему, %	
			7сут	28 сут	7 сут	28 сут
1	0%	нормальные условия	7,6	7,5	17,71	17,48
		пропаривание	7,5	7,1	17,48	16,54
7	10%	нормальные условия	8,4	8,1	21,63	20,86
		пропаривание	10	9,6	25,75	24,72
8	15%	нормальные условия	8,3	7,9	21,41	20,38
		пропаривание	8,6	8	22,19	20,64

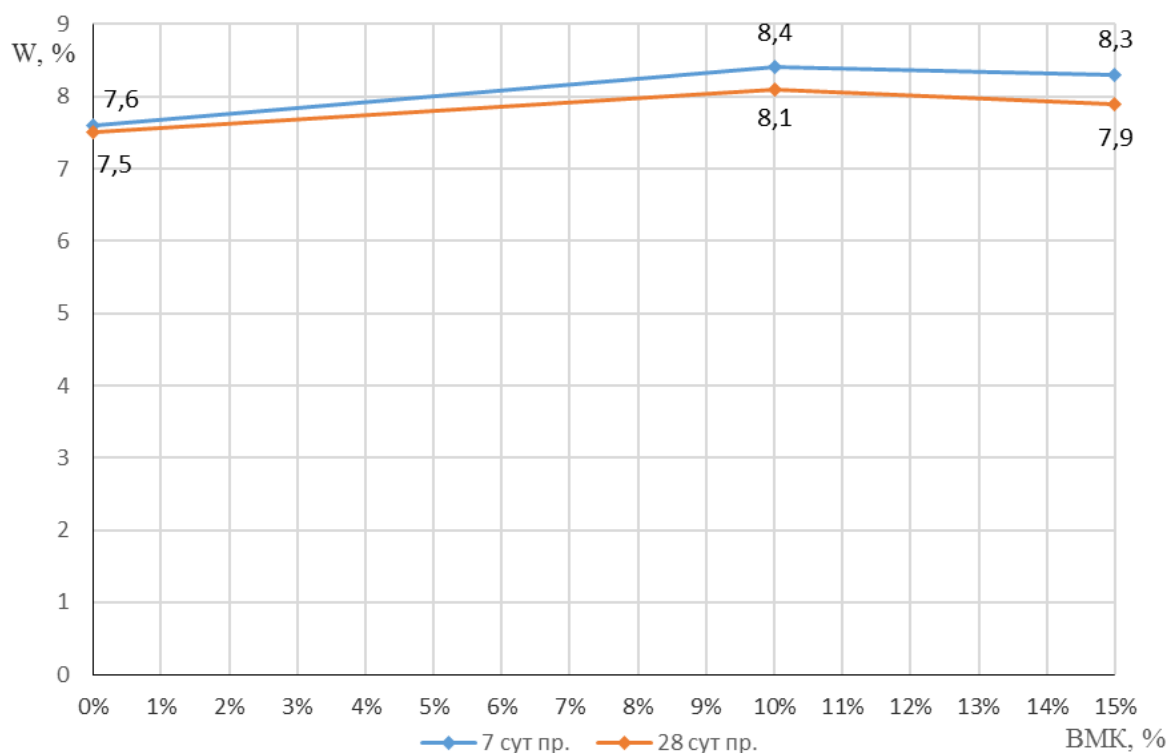


Рисунок 3.5 - Водопоглощение бетона партий 1,7,8 в нормальных условиях твердения в зависимости от содержания метакаолина

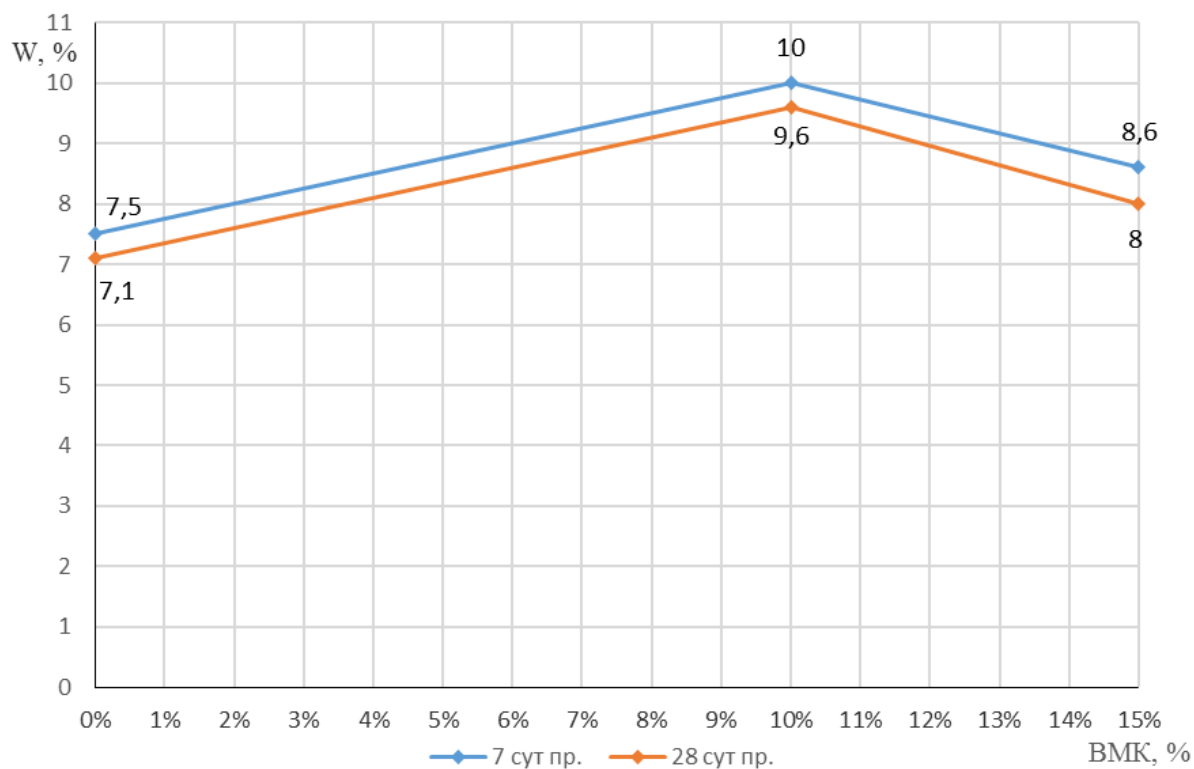


Рисунок 3.6 - Водопоглощение бетона партий 1,7,8 после пропаривания в зависимости от содержания метакаолина

Таблица 3.14 – Снижение водопоглощения бетонных образцов II серии в 28 суток по отношению к образцам в возрасте 7 суток

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	Снижение W, %
1	0%	нормальные условия	2
		пропаривание	5
7	10%	нормальные условия	4
		пропаривание	4
8	15%	нормальные условия	5
		пропаривание	7

Согласно результатам таблицы 3.14 наблюдается снижение водопоглощения бетонных образцов с увеличением концентрации добавки высокоактивного метаксаолина. Но вместе с этим, по данным рисунков 3.5 и 3.6 прослеживается повышение водопоглощения образцов с содержанием высокоактивного метаксаолина без пластификатора, по сравнению с контрольными образцами, не содержащими метаксаолин и гиперпластификатор.

Влияние высоких температур на бетонные образцы показано на рисунках 3.7, 3.8 и в таблице 3.15.

Таблица 3.15 - Изменение W (%) бетонных образцов II серии при пропаривании по отношению к нормальным условиям твердения

№ партии	Кол-во ВМК	Изменение W, %	
		7 сут	28 сут
1	0%	-1	-5
7	5%	16	16
8	8%	4	2

Установлено, что воздействие температуры на бетонные образцы II серии оказало негативное влияние, в результате которого водопоглощение

бетонных образцов увеличилось, что отражено на рисунках 3.7, 3.8 и в таблице 3.15.

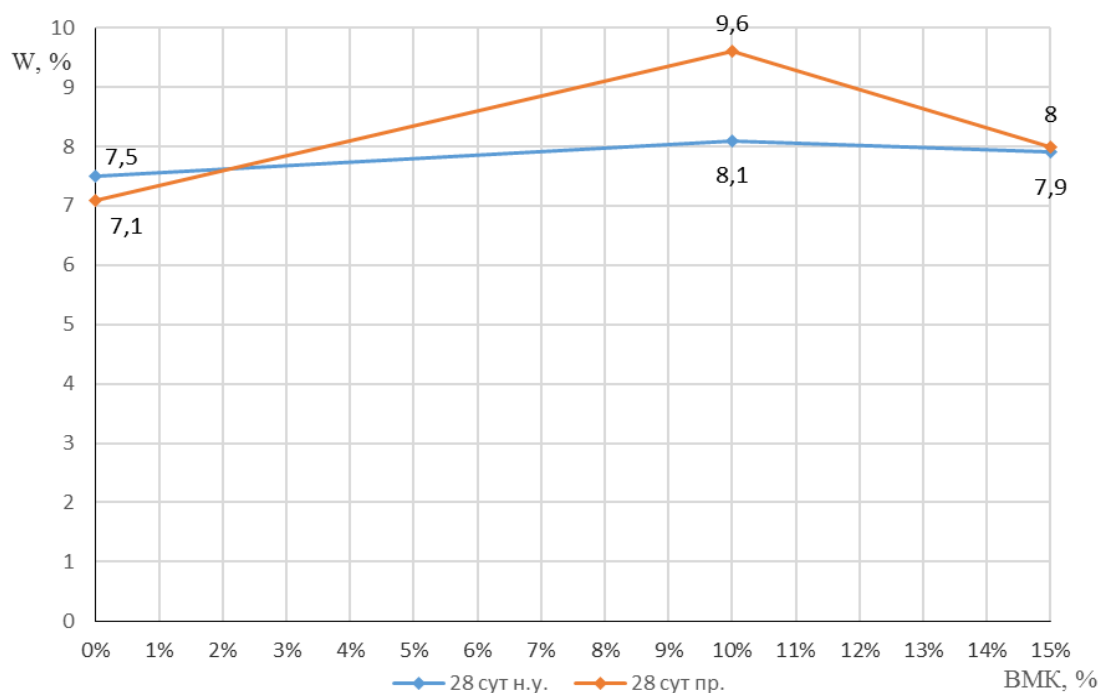


Рисунок 3.7 - Зависимость водопоглощения II серии образцов от условий твердения

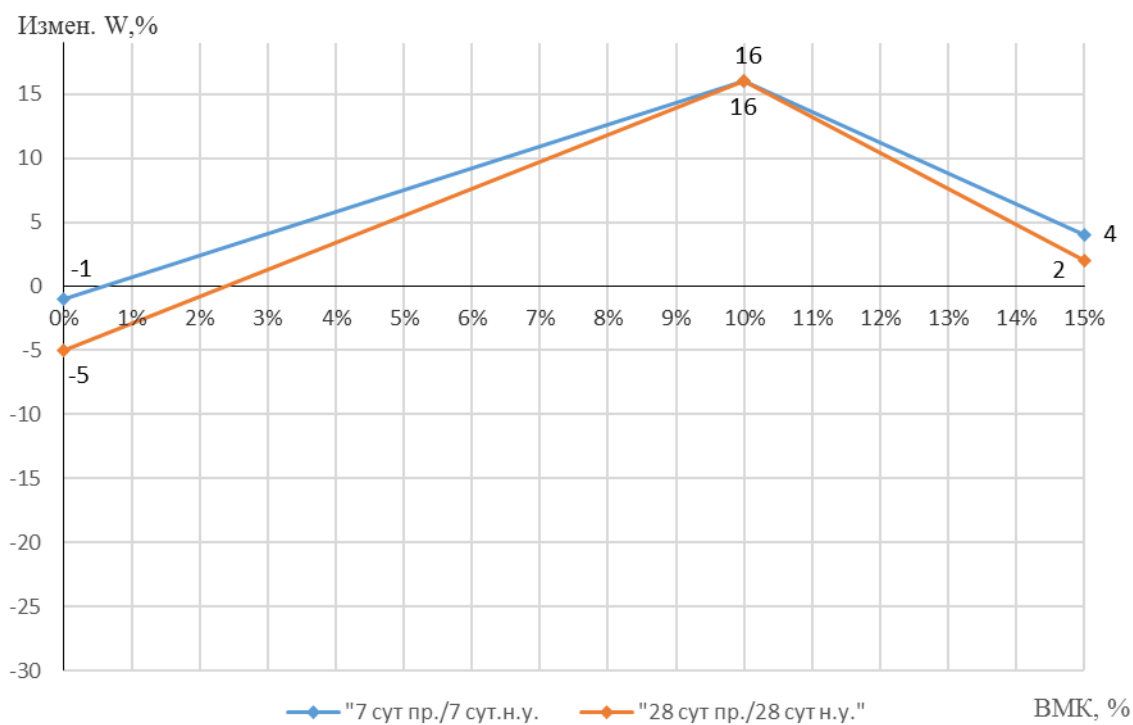


Рисунок 3.8 - Изменение W (в %), в зависимости от условий твердения бетонных образцов II серии

Для подробного исследования влияния гиперпластификатора на водопоглощение были проведены дополнительные исследования, результаты которых отражены на рисунках 3.9 и 3.10.

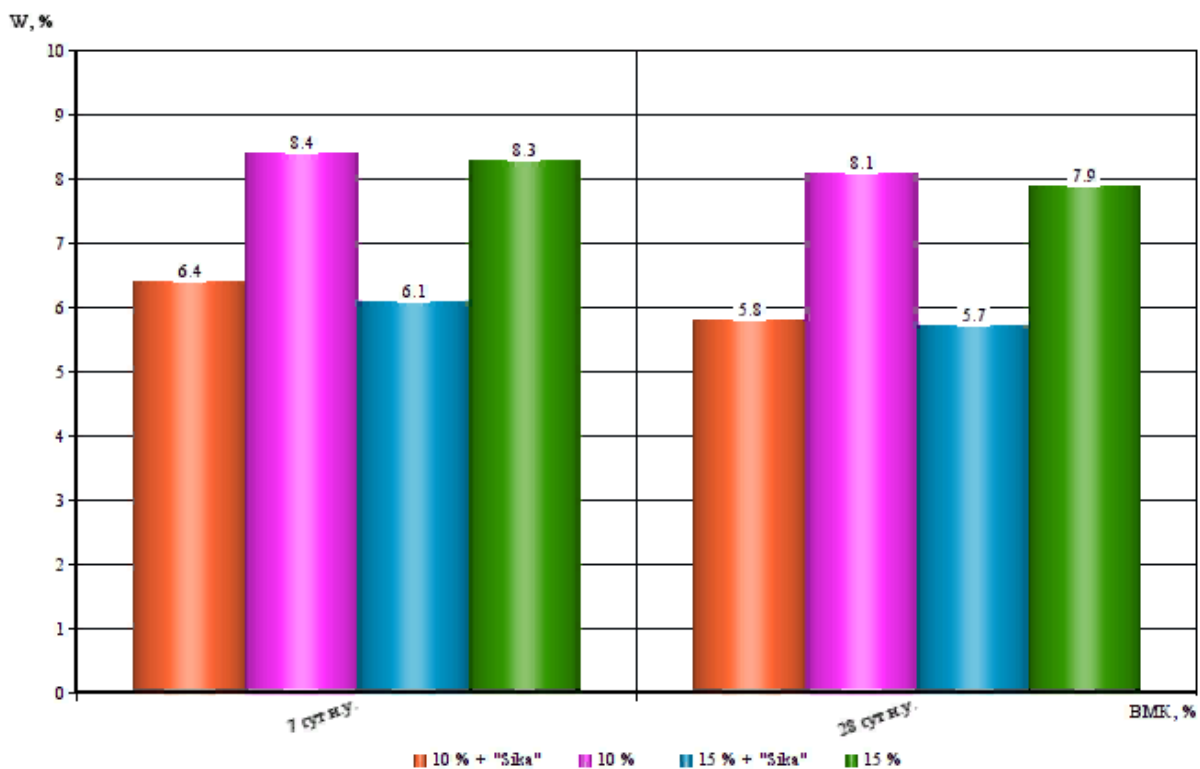


Рисунок 3.9 – Влияние гиперпластификатора на водопоглощение образцов I и II серий, выдержанных в нормальных условиях твердения

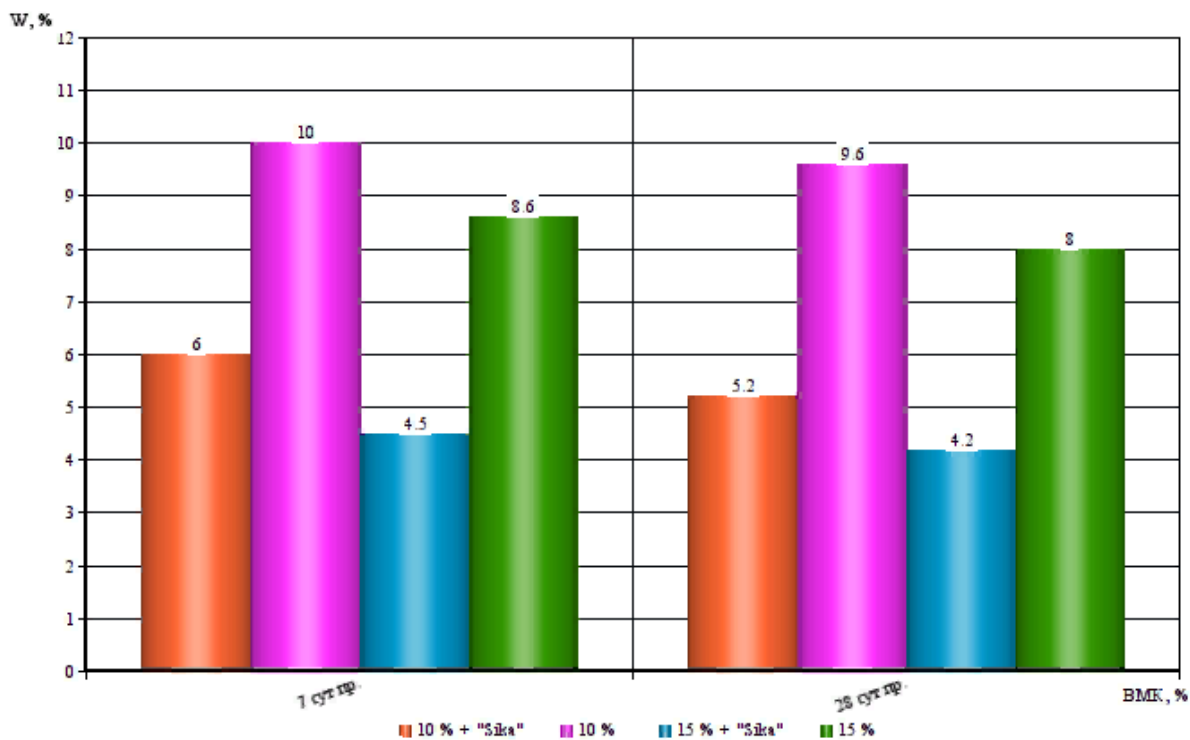


Рисунок 3.10 – Влияние гиперпластификатора на водопоглощение образцов I и II серий, после пропаривания

По данным рисунков 3.9 и 3.10 можно наблюдать резкое увеличение водопоглощения при использовании добавки ВМК без гиперпластификатора. Повышение водопоглощения при использовании высокоактивного метаксаолина без пластификатора в нормальных условиях в возрасте 28 суток составляет в среднем составляет 28 %, а при пропаривании 46 %.

Проведенные исследования показывают, что использование добавки высокоактивного метаксаолина без добавления гиперпластификатора негативно сказывается на способности бетона к водопоглощению.

Для исследования влияния добавки высокоактивного метаксаолина в более подвижных смесях была изготовлена III серия образцов. При приготовлении данной серии были использованы следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б М500 Д0, природные Волжский и Камский пески в количестве 30 и 70 %, гиперпластификатор Sika ViscoCrete 25RU. Состав бетонной смеси III серии представлен в таблице 3.16.

Таблица 3.16 - Количество компонентов в кг/м³ бетонной смеси III серии

№ партии	9	10	11	12	13	14
Содержание ВМК, % от цемента	0	0	5	8	10	15
Единица измерения	кг/м ³					
Цемент 42,5Б	520	512	498	487	473	440
Песок	1563	1536	1 574	1588	1574	1553
ВМК			26	44	51	79
Вода	255	214	219	219	217	229
Гиперпластификатор «Sika»	-	5,1	6	5	5	4
В/Ц	0,490	0,418	0,440	0,450	0,459	0,520
Средняя плотность кг/м ³	2338	2268	2323	2343	2320	2306
Осадка конуса, см	4,3	4,9	6	5,3	5,2	6,7

Результаты испытаний III серии образцов, полностью подверженной пропариванию представлены в таблицах 3.17, 3.18, а также на рисунке 3.11.

Таблица 3.17 – Водопоглощение бетона III серии образцов

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	W по массе		W по объему	
			7сут	28 сут	7 сут	28 сут
10	0%	пропаривание	8	7,5	20,36	19,09
11	5%		7,8	7,3	19,89	18,62
12	8%		7,5	6,4	19,24	16,42
13	10%		7	6	17,99	15,42
14	15%		6,3	5,8	16,25	14,96

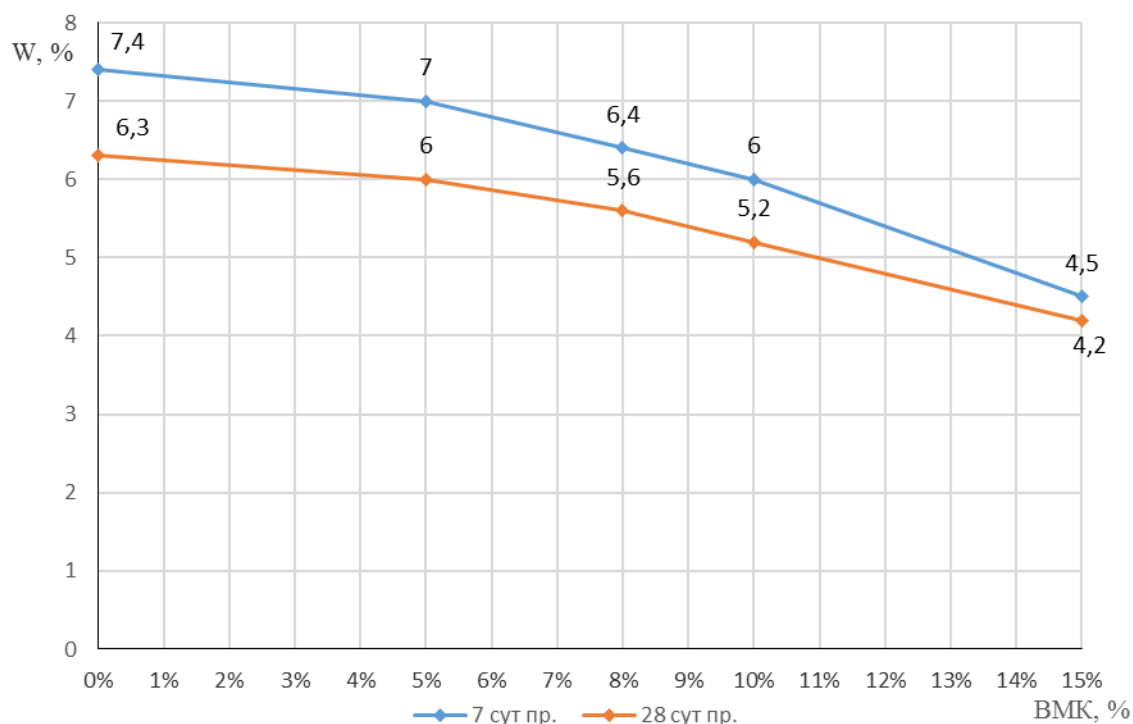


Рисунок 3.11 - Водопоглощение бетона партий 9 - 14 в зависимости от содержания метаксаолина

Таблица 3.18 – Изменение водопоглощения бетонных образцов III серии в 28 суток по отношению к 7 суткам

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	Снижение W, %
10	0%	пропаривание	6
11	5%		6
12	8%		15
13	10%		14
14	15%		8

Установлено, что с увеличением концентрации добавки высокоактивного метаксаолина в бетонной смеси водопоглощение

уменьшается. Наибольшее снижение наблюдается в образцах с добавкой в количестве 8 и 10 % (см. таблицу 3.18)

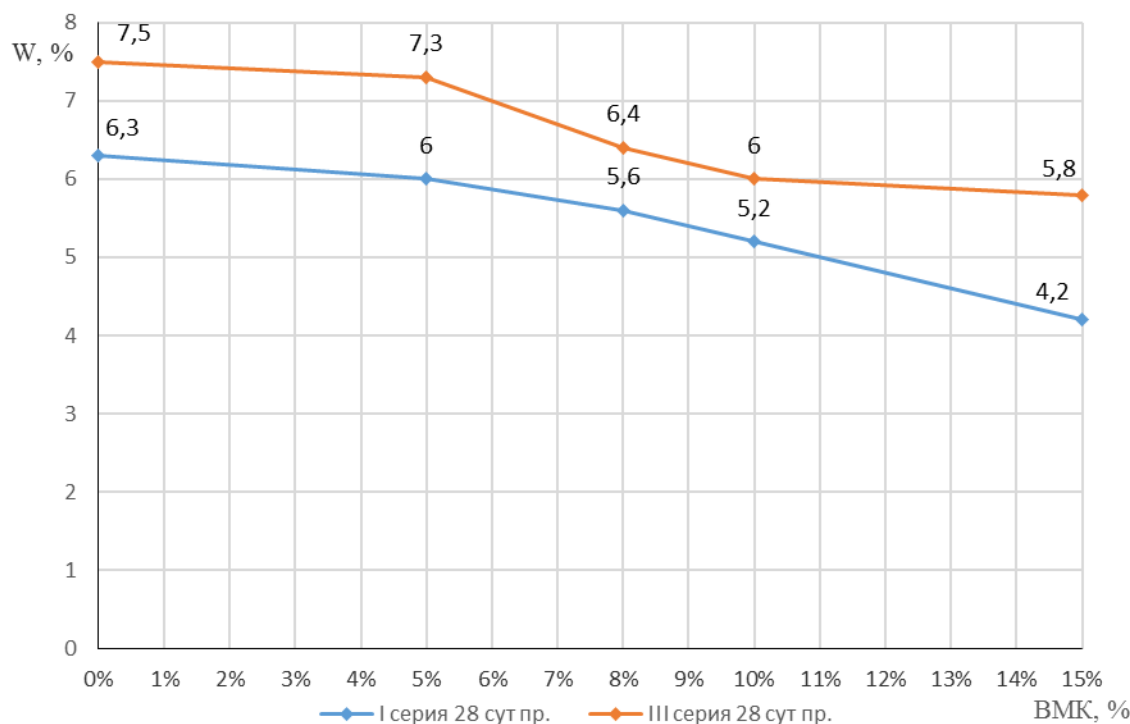


Рисунок 3.12 - Зависимость водопоглощения I и III серий образцов от подвижности смеси

Стоит отметить, что водопоглощение в более подвижных смесях (III серии образцов) показывает значения выше, чем в менее подвижных смесях (I серии образцов (рисунок 3.12)).

С увеличением количества высокоактивного метаксаолина водопоглощение уменьшается во всех мелкозернистых бетонах, выдержанных как в нормальных условиях твердения, так и при пропаривании. Наименьшее значение водопоглощения имеют образцы бетона, содержащего в своем составе 15% ВМК.

Эти результаты свидетельствуют о формировании плотной структуры мелкозернистого бетона с добавлением высокоактивного метаксаолина. Уменьшение водопоглощения бетона с увеличением в его составе метаксаолина объясняется увеличением количества тонкодисперсной добавки в составе цемента, что способствует созданию микрокапиллярной структуры и снижению микрокапилляров.

Характеристики пористости мелкозернистого бетона.

На основании полученных данных истинной плотности и плотности бетона в сухом состоянии были проведены расчеты для определения полного объема пор образцов мелкозернистого бетона.

Данные о полном объеме пор сведены в таблицу 3.19 и рисунок 3.13.

Таблица 3.19 – Полный объем пор образцов мелкозернистого бетона серий I, II, III.

№ партии	Кол-во ВМК	плотность, кг/м ³			Пп, %
		сухое сост.	ест. сост.	истинная	
I серия					
2	0%	2250	2339	2570	12,45
3	5%	2280	2443	2570	11,28
4	8%	2270	2309	2570	11,67
5	10%	2180	2315	2570	15,17
6	15%	2170	2402	2570	15,56
II серия					
1	0%	2170	2330	2540	14,57
7	10%	2110	2297	2540	16,93
8	15%	2190	2300	2540	13,78
III серия					
10	0%	2112	2338	2580	18,14
11	5%	2184	2323	2580	15,35
12	8%	2123	2343	2580	17,71
13	10%	2139	2320	2580	17,09
14	15%	2059	2306	2580	20,19

В результате реакции между метаксаолином и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ происходит формирование и оптимизация структуры порового пространства. Сокращение пористости происходит за счет образования и роста первичных кристаллических гидросиликатных фаз, заполняющих пространство на микроуровне.

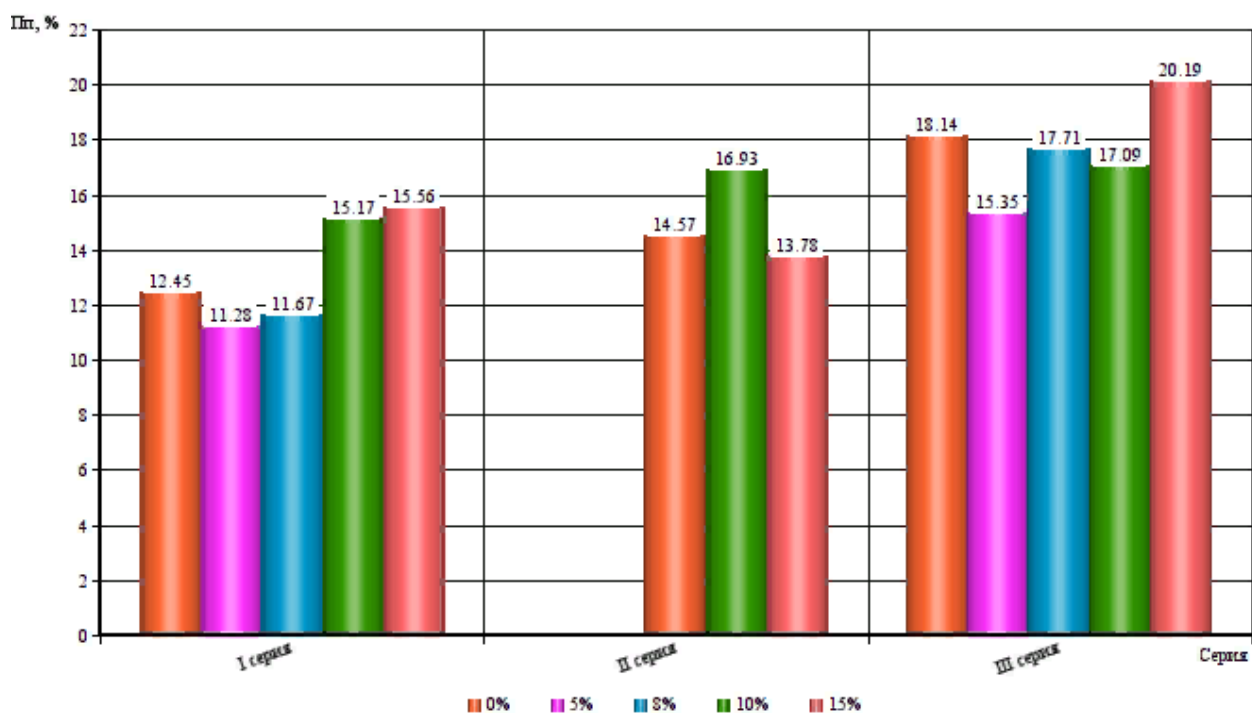


Рисунок 3.13 – Показатели полного объема пор мелкозернистого бетона серий I, II, III

3.3 Математическое моделирование влияния компонентов на прочность при сжатии

Описано создание и анализ данной математической модели, позволяющей адекватно описать соотношения исходных компонентов бетонной смеси на прочность при сжатии мелкозернистого бетона в 28 суток в нормальных условиях твердения.

Полученное в результате математического моделирования регрессионное уравнение первого порядка зависимости функций прочности при сжатии от исходных сырьевых компонентов.

Целью создания математической модели является создание эмпирических моделей, изображающих влияние сырьевых компонентов на физико – механические свойства мелкозернистого бетона, рассмотренные в роли выходящих целевых функций.

Под прочностью понимают способность материала сопротивляться разрушению. Прочность является одним из важнейших свойств, влияющих на качество бетона.

Прочность является интегральной характеристикой, зависящей от состава материала, свойств исходных компонентов, а также условий твердения, приготовления и методов испытаний.

В качестве материалов были использованы: бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б, природные Волжский и Камский пески в качестве мелкого заполнителя, гиперпластификатор Sika ViscoCrete 25RU. Высокоактивный метакраолин ВМК – 45 белого цвета.

Состав мелкозернистой бетонной смеси представлен в таблице 3.20

Таблица 3.20 – Состав мелкозернистого бетона

Исходные материалы	Расход материалов, кг/м ³
1	2
Цемент 42,5Б	530
Песок	1675
ВМК	26
Вода	206
Гиперпластификатор «Sika»	6
Всего	2443

В качестве входных переменных параметров используем расходы исходных компонентов: Цемента (Ц), Песка (П), Высокоактивного метакраолина (ВМК), Воды (В), гиперпластификатора (Sika). Для уменьшения количества экспериментов расход гиперпластификатора принимаем в постоянным расным 1 % от массы цемента. Исходными факторами будут являться следующие соотношения:

x_1 – отношение ВМК/Ц в пределах 0,047...0,051;

x_2 – отношение П/Вяж в пределах 2,8 ... 3,2,

где Вяж = П+ ВМК,

x_3 – отношение В/Ц в пределах 0,37 ... 0,41;

Число необходимых опытов планирования первого порядка:

$$N=2^k, \quad (3.10)$$

где k – количество входных факторов.

$$N=2^3=8,$$

Полученные уровни факторов и интервалы варьирования представлены в таблице 3.21

Таблица 3.21 – Уровни факторов и интервалы варьирования

Входные факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
натуральный вид	вид переменных	-1	0	+1	
$\frac{ВМК}{Ц}$	x_1	0,047	0,049	0,051	0,002
$\frac{П}{Вяз}$	x_2	2,8	3	3,2	0,2
$\frac{В}{Ц}$	x_3	0,37	0,39	0,41	0,02

Составы мелкозернистого бетона приведены в таблице 3.22

Таблица 3.22 – Составы мелкозернистого бетона, по методу планирования

В виде переменных			В натуральном виде			Состав мелкозернистого бетона				
x_1	x_2	x_3	$\frac{ВМК}{Ц}$	$\frac{П}{Вяз}$	$\frac{В}{Ц}$	Ц	ВМК	П	В	Sika
+1	+1	+1	0,051	3,2	0,41	490	25	1648	201	4,9
-1	+1	+1	0,047	3,2	0,41	553	26	1852	227	5,5
+1	-1	+1	0,051	2,8	0,41	529	27	1557	217	5,3
-1	-1	+1	0,047	2,8	0,41	510	24	1495	209	5,1
+1	+1	-1	0,051	3,2	0,37	549	28	1846	203	5,5
-1	+1	-1	0,047	3,2	0,37	531	25	1779	196	5,3
+1	-1	-1	0,051	2,8	0,37	509	26	1498	188	5,1
-1	-1	-1	0,047	2,8	0,37	617	29	1808	228	6,2

Прочность образцов на сжатие в возрасте 28 суток в нормальных условиях твердения представлены в таблице 3.23.

Таблица 3.23 – Прочность мелкозернистых бетонов на сжатие

В натуральном виде			Прочность на сжатие Rсж, МПа					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{ВМК}{Ц}$	$\frac{П}{Вяз}$	$\frac{В}{Ц}$	R ₁	R ₂	R ₃	Y _{ср} =R _{ср}	Y	(Y _{ср} -Y) ²
0,051	3,2	0,41	53,2	52,3	53,2	52,9	53	0,01
0,047	3,2	0,41	45,3	45,2	44,2	52	53	1
0,051	2,8	0,41	57,3	56,4	57,6	50,2	49,4	0,64
0,047	2,8	0,41	58,4	58,5	57,7	49,7	49,4	0,09
0,051	3,2	0,37	52,7	52,8	51,7	57,8	57,4	0,16
0,047	3,2	0,37	57	56,7	55,5	58,1	57,4	0,49
0,051	2,8	0,37	51,2	51,5	50	52,8	53,8	1
0,047	2,8	0,37	41,9	41,5	40,5	53,7	53,8	0,01
			$\sum (Y_{ср} - Y)^2$					3,4

Составим матрицы из значений исходных компонентов и средних значений прочности при сжатии.

Матрица планирования

$$X = \begin{pmatrix} 0,051 & 3,2 & 0,41 \\ 0,047 & 3,2 & 0,41 \\ 0,051 & 2,8 & 0,41 \\ 0,047 & 2,8 & 0,41 \\ 0,051 & 3,2 & 0,37 \\ 0,047 & 3,2 & 0,37 \\ 0,051 & 2,8 & 0,37 \\ 0,047 & 2,8 & 0,37 \end{pmatrix}$$

Матрица выходного параметра

$$Y = \begin{pmatrix} 52,9 \\ 52 \\ 50,2 \\ 49,7 \\ 57,8 \\ 58,1 \\ 52,8 \\ 53,7 \end{pmatrix}$$

Транспонированная матрица планирования

$$X^T = \begin{pmatrix} 0,051 & 0,047 & 0,051 & 0,047 & 0,051 & 0,047 & 0,051 & 0,047 \\ 3,2 & 3,2 & 2,8 & 2,8 & 3,2 & 3,2 & 2,8 & 2,8 \\ 0,41 & 0,41 & 0,41 & 0,41 & 0,37 & 0,37 & 0,37 & 0,37 \end{pmatrix}$$

$$X \cdot X^T = \begin{pmatrix} 0,01924 & 1,176 & 0,15288 \\ 1,176 & 72,32 & 9,36 \\ 0,15288 & 9,36 & 1,2 \end{pmatrix} \quad Y \cdot X^T = \begin{pmatrix} 20,93 \\ 1284,48 \\ 166,26 \end{pmatrix}$$

Вычисляем обратную матрицу:

$$(X \cdot X^T)^{-1} = \begin{pmatrix} 15702,7 & -95,19 & -1237,44 \\ -95,18 & 2,54 & -7,58 \\ -1237,44 & -7,58 & 214,01 \end{pmatrix}$$

Таблица 3.24 – Таблица расчетных элементов матриц

	x ₁	x ₂	x ₃		Y _{ср}	x ₁ ²	x ₂ ²	x ₃ ²	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	x ₁ Y	x ₂ Y	x ₃ Y
	1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,051	3,2	0,41		52,9	0,0026	10,24	0,17	0,16	0,02	1,31	2,7	169,2	21,7
	1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	0,047	3,2	0,41		50	0,0022	10,24	0,17	0,15	0,019	1,31	2,35	160,0	20,5
X	0,051	2,8	0,41	Y	50,2	0,0026	7,84	0,17	0,14	0,02	1,15	2,56	140,6	20,6
	0,047	2,8	0,41		49,7	0,0022	7,84	0,17	0,13	0,019	1,15	2,34	139,2	20,4
	0,051	3,2	0,37		57,8	0,0026	10,24	0,14	0,16	0,019	1,18	2,95	184,9	21,4
	0,047	3,2	0,37		58,1	0,0022	10,24	0,14	0,15	0,017	1,18	2,73	185,9	21,5
	0,051	2,8	0,37		52,8	0,0026	7,84	0,14	0,14	0,019	1,04	2,69	147,8	19,5
	0,047	2,8	0,37		53,7	0,0022	7,84	0,14	0,13	0,017	1,04	2,52	150,4	19,9
	Σ=					0,0192	51,84	1,24	1,16	0,15	9,36	20,8	1278	165,5

Вычисляем матрицу искомых коэффициентов:

$$A = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y_{ср}, \quad (3.11)$$

$$A = \begin{pmatrix} 15702,7 & -95,19 & -1237,44 \\ -95,18 & 2,54 & -7,58 \\ -1237,44 & -7,58 & 214,01 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 20,93 \\ 1284,48 \\ 166,256 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 656,04 \\ 10,24 \\ -55,53 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты уравнения регрессии:

$$a_1 = 656,04 \quad a_2 = 10,24, \quad a_3 = -55,53;$$

Уравнение линейной регрессии принимает вид:

$$y = 656,04 + 10,24x_2 - 55,53x_3;$$

Далее проведем статистический анализ математической модели.

Таблица 3.25 – Таблица расчетных элементов

	y_1	y_2	y_3	Y_{cp}	$y_1 - Y_{cp}$	$y_2 - Y_{cp}$	$y_3 - Y_{cp}$	$(5)^2$	$(6)^2$	$(7)^2$	Su^2
Y	53,2	53,5	53,2	52,9	0,3	0,6	0,3	0,09	0,36	0,09	0,27
	52,4	52,3	52,7	52	0,4	0,3	0,7	0,16	0,09	0,49	0,37
	50,4	50,9	50,7	50,2	0,2	0,7	0,5	0,04	0,49	0,25	0,36
	49,9	50,0	50,2	49,7	0,2	0,3	0,5	0,04	0,09	0,25	0,19
	58,1	58,2	58,5	57,8	0,3	0,4	0,7	0,09	0,16	0,49	0,37
	58,7	58,4	59,0	58,1	0,6	0,3	0,9	0,36	0,09	0,81	0,42
	53,1	53,4	53,7	52,8	0,3	0,6	0,9	0,09	0,36	0,81	0,42
	54,3	53,9	54,5	53,7	0,6	0,2	0,8	0,04	0,04	0,64	0,35
Σ	max $Su^2=0,42$										2,75

Выполним проверку воспроизводимости опытов или проверку гипотезы об однородности дисперсий. Проверку проводим с помощью критерия Кохрена.

Расчетное значение критерия Кохрена:

$$G_{расч} = \frac{\max S^2}{\sum S_i^2}, \quad (3.12)$$

Критическое значение критерия Кохрена находят из таблицы по числу:

- степени свободы числителя $f=k-1=3-1=2$;
- степени свободы знаменателя $f_2=N=8$;
- уровня значимости $\alpha = 0,05$.

С учетом данных параметров критическое значение равно $G_{кр} = 0,5157$.

$$G_{расч} = \frac{0,42}{2,75} = 0,15$$

$G_{расч} = 0,15 < G_{кр} = 0,5157$, следовательно гипотеза об однородности дисперсий не отвергается.

Далее проведем оценку коэффициентов регрессии по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^8 x_{ij} \bar{y}_j}{8}, \quad (3.13)$$

Полученные данные сведем в таблицу 3.26.

Таблица 3.26 – Значения критерия Стьюдента коэффициентов уравнения регрессии первого порядка

Параметры	Итерация j							
	0	1	2	3	4	5	6	7
b_j	53,4	0,025	1,8	-2,2	0,125	0,325	-0,55	0,025
$ b_j $	53,4	0,025	1,8	-2,2	0,125	0,325	-0,55	0,025
t_{bj}	91,13	0,043	3,07	3,75	0,213	0,55	0,94	0,043

По результатам проведенных расчетов получаем уравнение регрессии;

$$Y_1 = 53,4 + 0,025x_1 + 1,8x_2 - 2,2x_3 + 0,125x_4 + 0,325x_5 - 0,55x_6 + 0,025x_7;$$

Необходимо провести проверку значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента. Коэффициент b считается значимым при выполнении условия:

$$t_{bj} \geq t_a(f_2), \quad (3.14)$$

где $t_a(f_2)$ - критическое распределение Стьюдента.

Критерий Стьюдента при степени свободы $f_2 = N(k-1) = 8(3-1) = 16$, и уровне значимости $\alpha = 0,025$ равен $t_{0,025}(16) = 2,1199$

Значения критерия Стьюдента уравнения регрессии определяют:

$$t_{bj} = \frac{|b_j|}{S_{b\delta}}, \quad (3.15)$$

где $S_{b\delta}$ - оценка дисперсии уравнения регрессии.

$$S_{bq} = \sqrt{\frac{S_u^2}{N}} = \sqrt{\frac{2,75}{8}} = 0,586, \quad (3.16)$$

После проверки значимости коэффициентов незначимые коэффициенты были отброшены, получено уравнение

$$Y_1 = 53,4 + 1,8x_2 - 2,2x_3;$$

Проверим гипотезу об адекватности модели, основанную на расчетах дисперсии адекватности S_{ad}^2 и критерия Фишера $F_{расc}$:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum (Y_{cp} - Y)^2}{N - m}, \quad (3.17)$$

где Y – значение отклика;

$$F_{расc} = \frac{S_{ad}^2}{S_u^2}, \quad (3.18)$$

где m – число оцениваемых коэффициентов регрессии, $m=3$.

Степени свободы $f_1 = N = 8$, $f_2 = N - m = 8 - 3 = 5$. Критическое значение критерия Фишера $F_{табл}(8,5) = 3,6875$.

Тогда $S_{ad}^2 = \frac{3,4}{8} = 0,425$ и $S_u^2 = 2,57 \rightarrow F_{расc} = \frac{S_{ad}^2}{S_u^2} = \frac{0,425}{2,75} = 0,155$, а $F_{расc} = 0,155 <$

$F_{табл} = 3,6875$, следовательно уравнение удовлетворяет результатам практического эксперимента.

3.4 Влияние добавки высокоактивного метакеолина в составе вяжущего на прочностные характеристики цементного камня

Для исследования влияния добавки высокоактивного метакеолина были изготовлены три серии бетонных образцов с различными характеристиками.

Прочностные характеристики I серии бетонных образцов сведены в таблицы 3.27, 3.28 и на рисунки 3.14 и 3.15.

Таблица 3.27 – Прочность бетона с добавлением высокоактивного метакеолина I серии

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	R _{сж} , МПа			K _{разм}	R _{изг} , МПа
			7 сут	28 сут	водонас. сост.		
1	2	3	4	5	6	7	8
2	0%	нормальные условия	36,1	46,2	42,0	0,9	4,4
		пропаривание	42	49	45,6	0,93	4,1
3	5%	нормальные условия	39,3	57,1	52,5	0,92	4,7
		пропаривание	47	53,9	43,1	0,80	4,4
4	8%	нормальные условия	43,4	58,2	54,1	0,93	4,7
		пропаривание	48,2	56,8	51,7	0,91	4,2

Продолжение таблицы 3.27

1	2	3	4	5	6	7	8
5	10%	нормальные условия	38,2	52,4	47,1	0,9	4,6
		пропаривание	39,4	50,5	43,3	0,86	4
6	15%	нормальные условия	42,5	56,4	45,2	0,8	3,8
		пропаривание	33,1	38,2	26,0	0,68	2,8

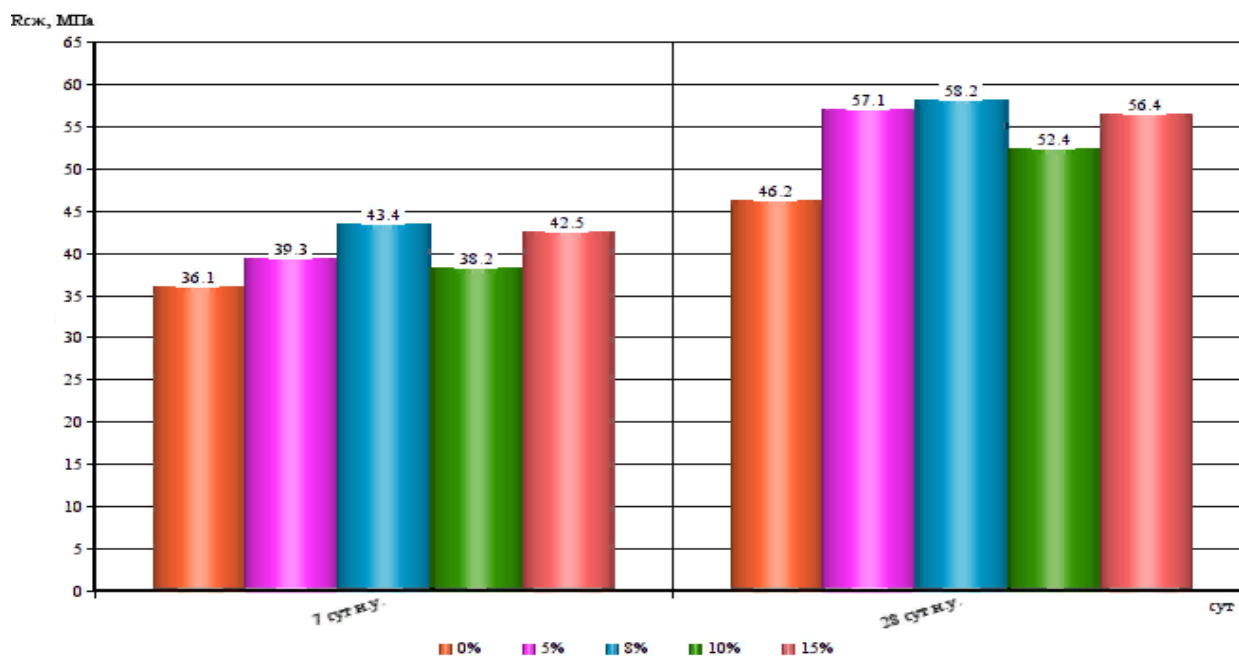


Рисунок 3.14 – Предел прочности при сжатии образцов партий 2 – 6 в нормальных условиях твердения

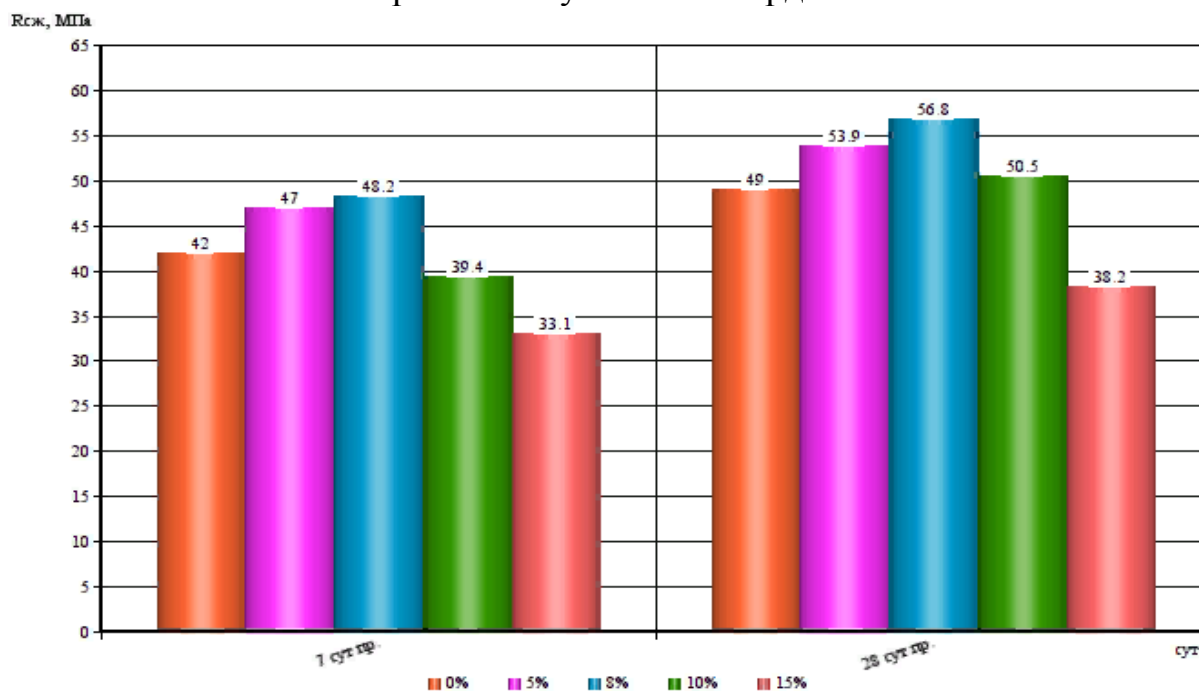


Рисунок 3.15 – Предел прочности при сжатии образцов партий 2 – 6 после пропаривания

Таблица 3.28 – Набор прочности (в %) бетонных образцов в 7 суток по отношению к прочности образцов в 28 суток

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	Набор $R_{сж}$, %
2	0%	нормальные условия	78
		пропаривание	86
3	5%	нормальные условия	69
		пропаривание	87
4	8%	нормальные условия	75
		пропаривание	85
5	10%	нормальные условия	73
		пропаривание	78
6	15%	нормальные условия	75
		пропаривание	87

Анализ данных таблицы 3.27 и рисунков 3.14 и 3.15 позволяет утверждать, что наибольшие значения прочности достигаются при содержании высокоактивного метаксаолина в количестве 5 - 8 % от цемента, при увеличении дозировки показатели начинают снижаться.

Анализ таблицы 3.27 показывает, что после пропаривания бетонные образцы, изготовленные с различным количеством метаксаолина в 28 суток имеют более низкие прочностные показатели, чем у образцов выдержанных в нормальных условиях твердения.

Набор прочности бетонными образцами в 7 суток по отношению к прочности образцов в 28 суток представлен в таблице 3.28, из которой видно, что в возрасте 7 суток образцы набирают прочность в пределах 73 - 87 % от марочной прочности.

Процент изменения прочности после пропаривания в возрасте 7 и 28 суток по сравнению с прочностью образцов в нормальных условиях твердения приведен в таблице 3.29 и на рисунке 3.16.

Таблица 3.29 - Изменение $R_{сж}$ (%) I серии образцов после пропаривания по отношению к образцам, выдержанным в нормальных условиях твердения

№ партии	Кол-во ВМК	Изменение $R_{сж}$, %	
		7 сут	28 сут
2	0%	15	6
3	5%	16	-6
4	8%	10	-2
5	10%	3	-4
6	15%	-22	-32

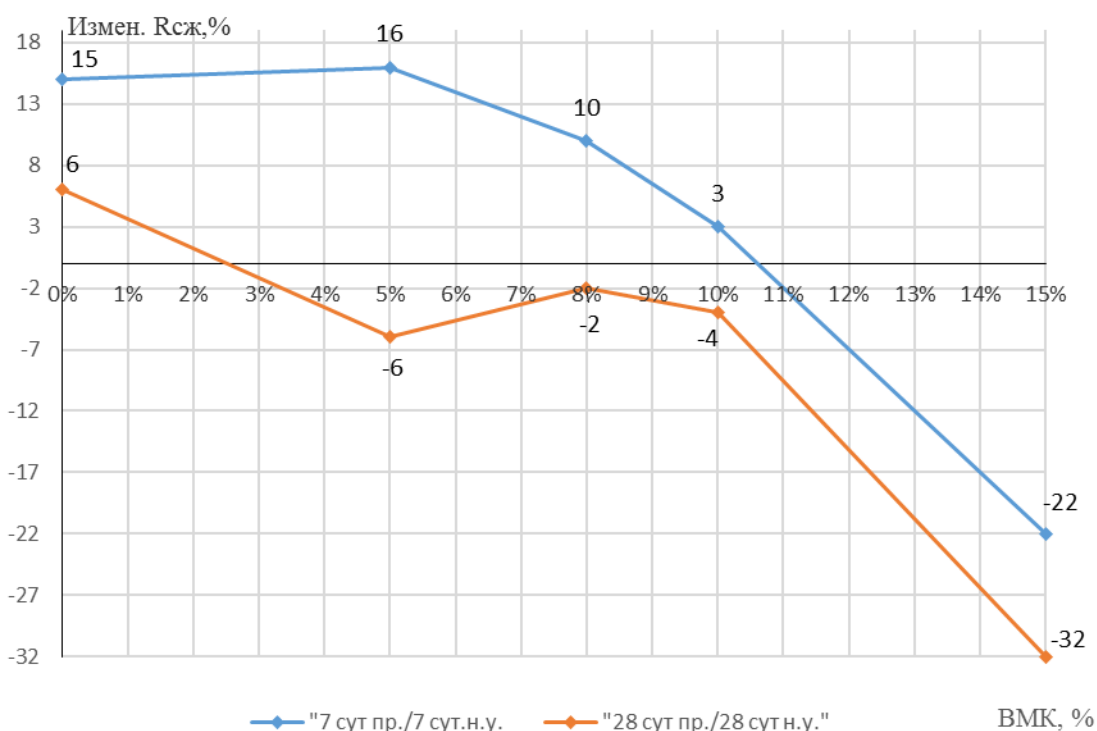


Рисунок 3.16 - Изменение $R_{сж}$ (в %), в зависимости от условий твердения бетонных образцов I серии

Рассмотренное выше, позволяет утверждать, что пропаривание оказывает негативное влияние на прочностные характеристики бетонных образцов, изготовленных с добавлением высокоактивного метаксаолина.

Коэффициент размягчения бетонных образцов с увеличением количества метаксаолина снижается до 0,68, то есть водостойкость цементного камня снижается.

Предел прочности при изгибе I серии образцов.

Определение предела прочности при изгибе проводилось на образцах призмах, серии I с размерами 40×40×160 мм, как в нормальных условиях, так и при пропаривании. Характеристики образцов на изгиб приведены на рисунке 3.15. Разрушение образца при проведении испытания на изгиб представлено на рисунке 3.17.

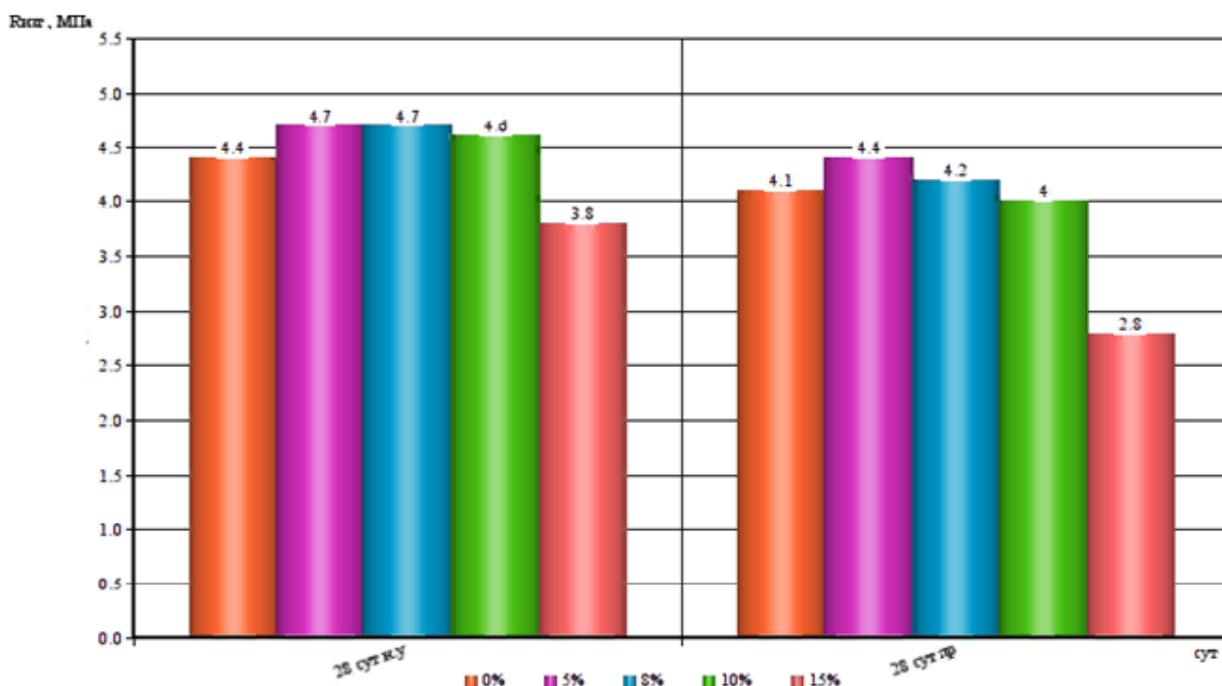


Рисунок 3.17 – Изменение предела прочности при изгибе I серии образцов в зависимости от условий твердения.

В рамках проводимых исследований, можно сделать вывод о том, что максимальные значения предела прочности при изгибе достигаются в образцах с содержанием высокоактивного метаксаолина 5 и 8%, а наименьшие при содержании метаксаолина в количестве 15%. Падение прочности при избыточном содержании высокоактивного метаксаолина составляет 20 % в нормальных условиях и 36 % при пропаривании.



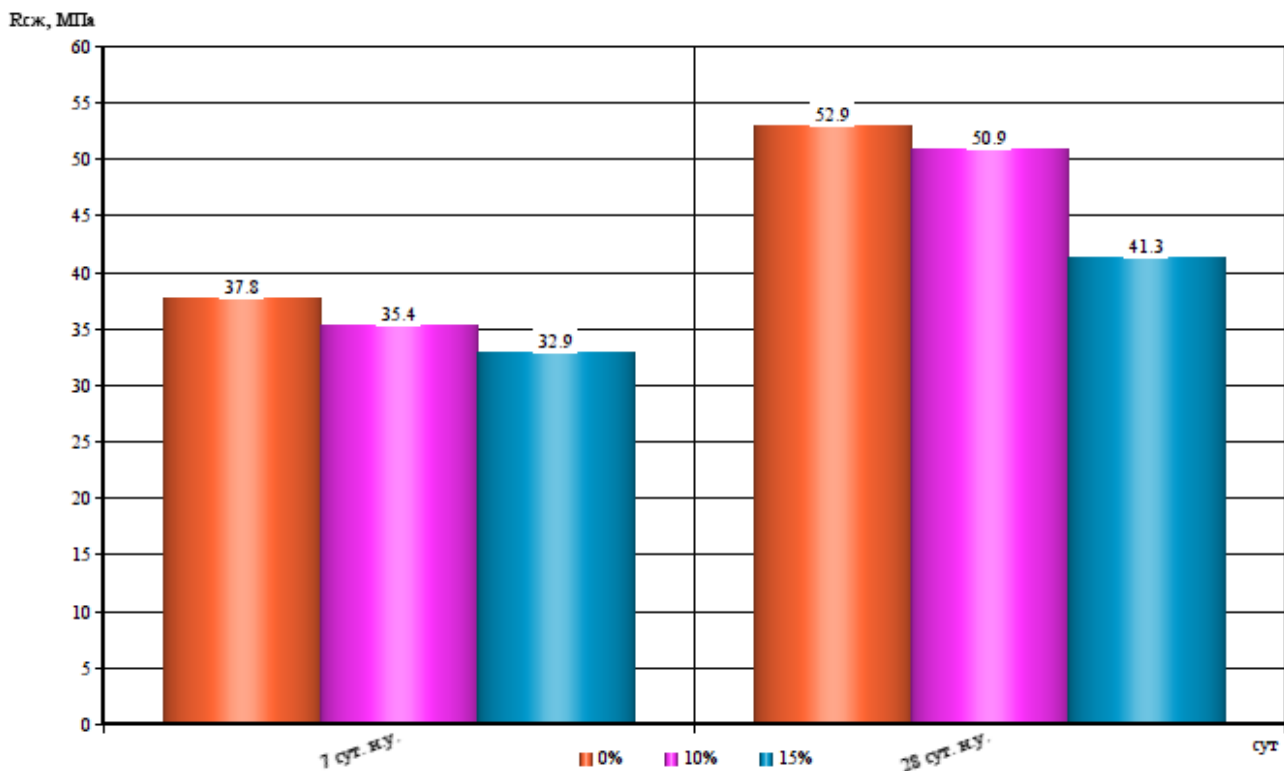
Рисунок 3.18 – Разрушение образца при испытании на изгиб

Для определения прочностных характеристик бетонных образцов с добавкой высокоактивного метаксаолина без введения в состав гиперпластификатора была изготовлена II серия бетонных образцов.

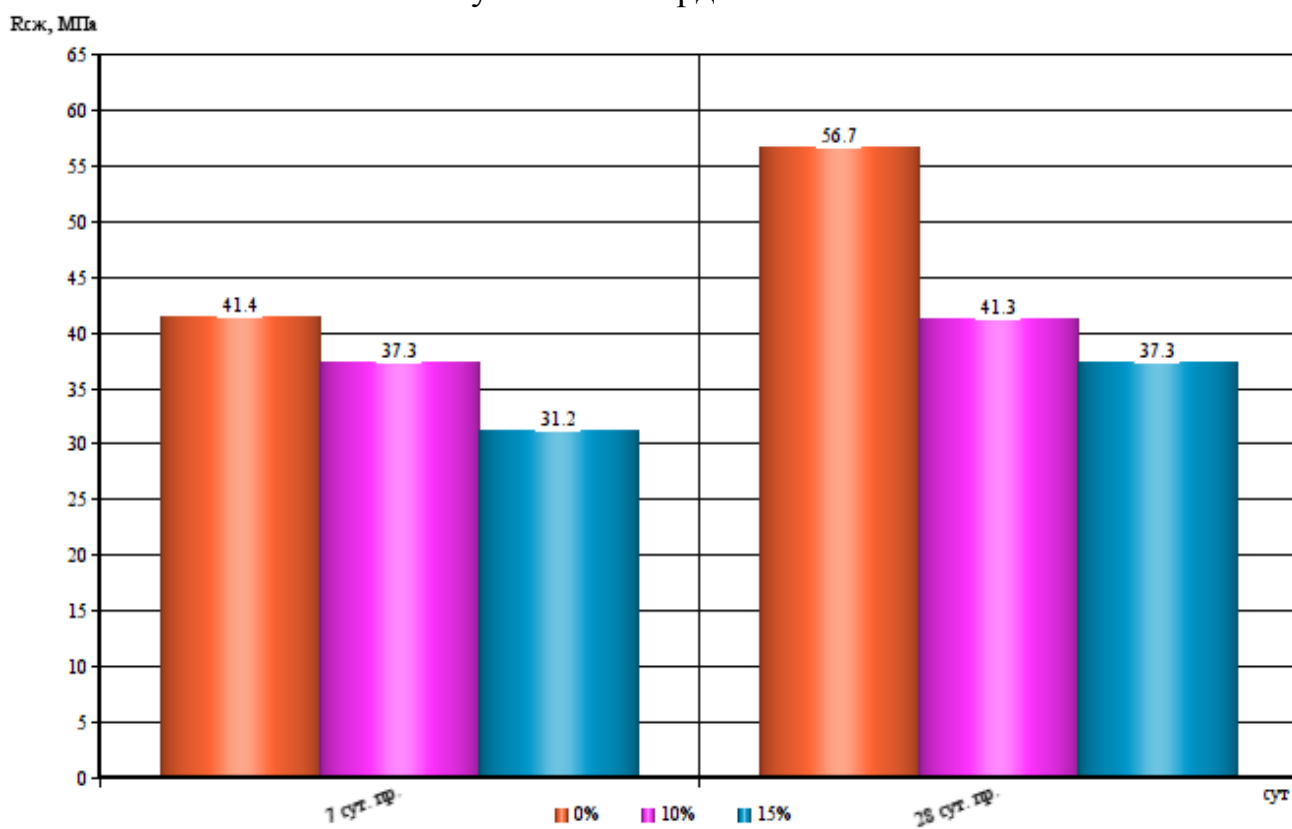
Характеристики прочности II серии бетонных образцов представлены в таблицах 3.30, 3.31 и на рисунках 3.19 и 3.20.

Таблица 3.30 - Прочность бетона с добавлением высокоактивного метаксаолина II серии

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	R _{сж} , МПа			К разм
			7 сут	28 сут	водонас. сост.	
1	2	3	4	5	6	7
1	0%	нормальные условия	37,8	52,9	50,2	0,95
		пропаривание	41,4	56,7	52,7	0,93
7	10%	нормальные условия	35,4	50,9	49,3	0,97
		пропаривание	37,3	41,3	33,8	0,82
8	15%	нормальные условия	32,9	41,3	40,1	0,97
		пропаривание	31,2	37,3	27,6	0,74



Рисунку 3.19 – Прочность бетонных образцов II серии в нормальных условиях твердения



Рисунку 3.20 – Прочность образцов II серии после пропаривания

Таблица 3.31 – Набор прочности бетонных образцов II серии в 7 суток по отношению к прочности образцов в 28 суток

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	Набор $R_{сж}$, %
1	0%	нормальные условия	71
		пропаривание	73
7	10%	нормальные условия	70
		пропаривание	90
8	15%	нормальные условия	80
		пропаривание	84

По данным таблицы 3.30 можно сделать вывод, что при пропаривании бетонные образцы демонстрируют снижение прочностных характеристик в 28 суток, по сравнению с образцами, выдержанными в нормальных условиях твердения.

Можно отметить, что в бетонных образцах без гиперпластификатора наблюдается снижение прочностных характеристик, по сравнению с образцами без содержания метаксаолина и гиперпластификатора. Набор прочности 7 суточными образцами составляет не менее 70 % от 28 суточных образцов.

Коэффициент размягчения имеет тенденцию к снижению значений, минимальное из которых равно 0,74, что означает снижение водостойкости бетонных образцов.

Для более подробной оценки влияния гиперпластификатора совместно с метаксаолином на прочностные характеристики мелкозернистого бетона сравниваются образцы I серии, содержащие в своем составе гиперпластификатор и образцы II серии, в составе которых гиперпластификатор отсутствует. Сравнение приведено на рисунках 3.19 и 3.20.

На рисунке 3.21 наблюдается снижение прочности в образцах содержащих метаксаолин без гиперпластификатора. Падение прочности в образцах в возрасте 7 суток и 28 суток составляет в среднем 15 %. Предел

прочности при сжатии в 7 суток составляет в среднем 75 % от предела прочности при сжатии в 28 суток в нормальных условиях твердения.

В тоже время на рисунке 3.22 наблюдается снижение прочности в образцах содержащих метакаолин без гиперпластификатора. Падение прочности в образцах в возрасте 7 суток и 28 суток составляет в среднем 15 %. Предел прочности при сжатии в 7 суток составляет в среднем 85 % от предела прочности при сжатии в 28 суток после пропаривания.

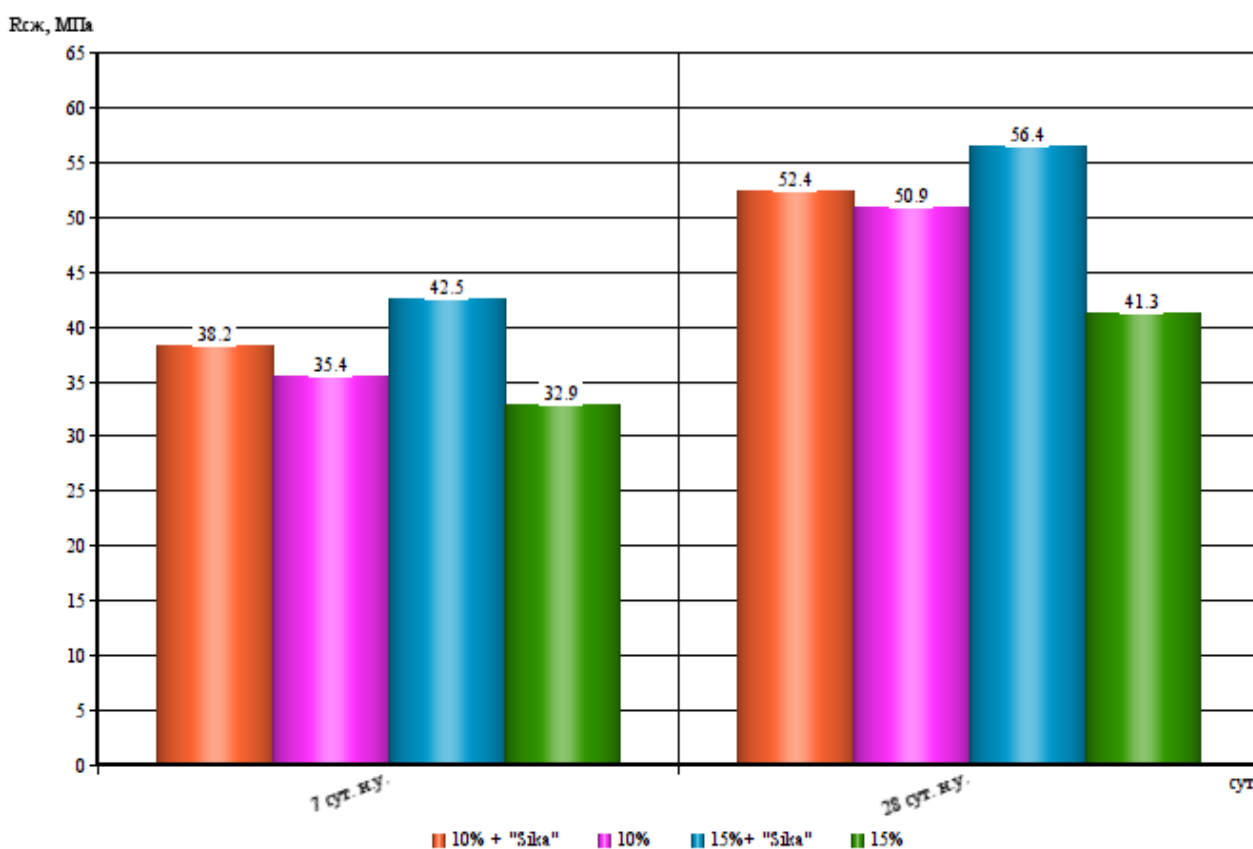


Рисунок 3.21 – Влияние гиперпластификатора на прочностные характеристики образцов серий I и II после твердения в нормальных условиях

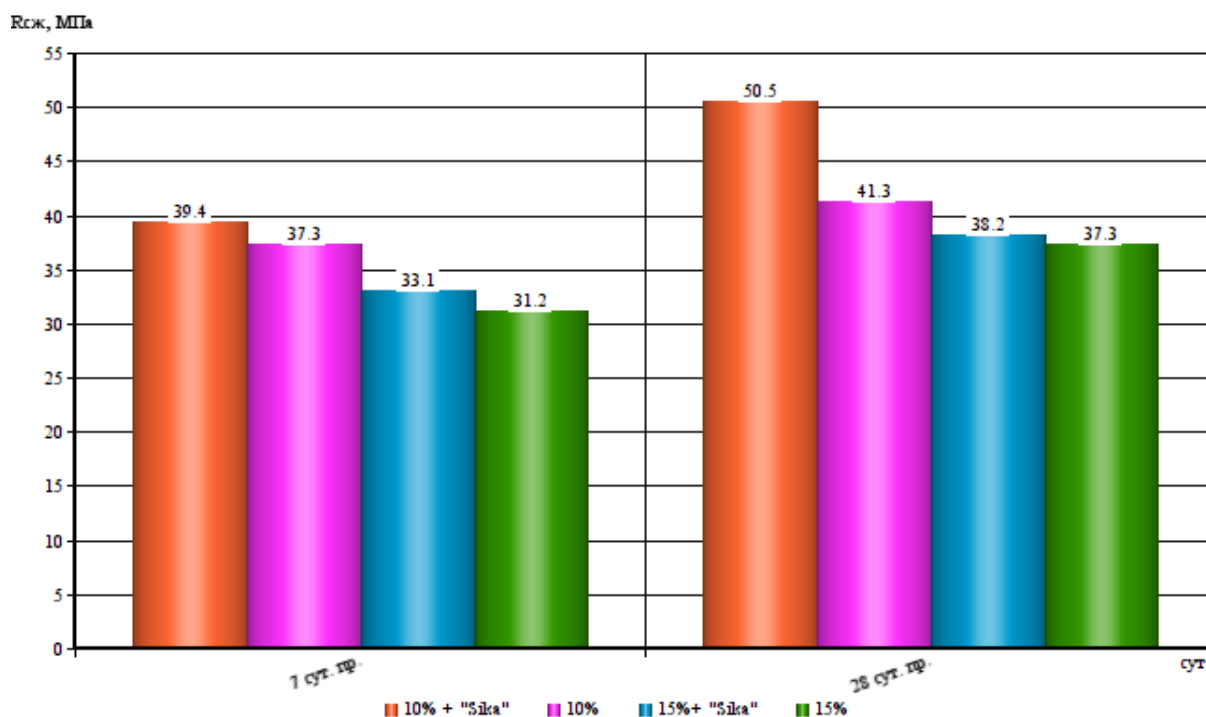


Рисунок 3.22 - Влияние гиперпластификатора на прочностные характеристики образцов серий I и II после пропаривания

Таким образом можно сделать вывод о необходимости применения гиперпластификатора совместно с высокоактивным метакаолином, так как его наличие в составе бетонной смеси влияет на прочностные характеристики образцов.

Процент изменения прочностных характеристик после пропаривания в возрасте 7 и 28 суток по сравнению с образцами, выдержанными в нормальных условиях твердения.

Таблица 3.32 - Изменение $R_{сж}$ (%) образцов при пропаривании по отношению к прочности в нормальных условиях твердения

№ партии	Кол-во ВМК	Изменение $R_{сж}$, %	
		7 сут	28 сут
1	0%	9	7
7	10%	5	-19
8	15%	-5	-10

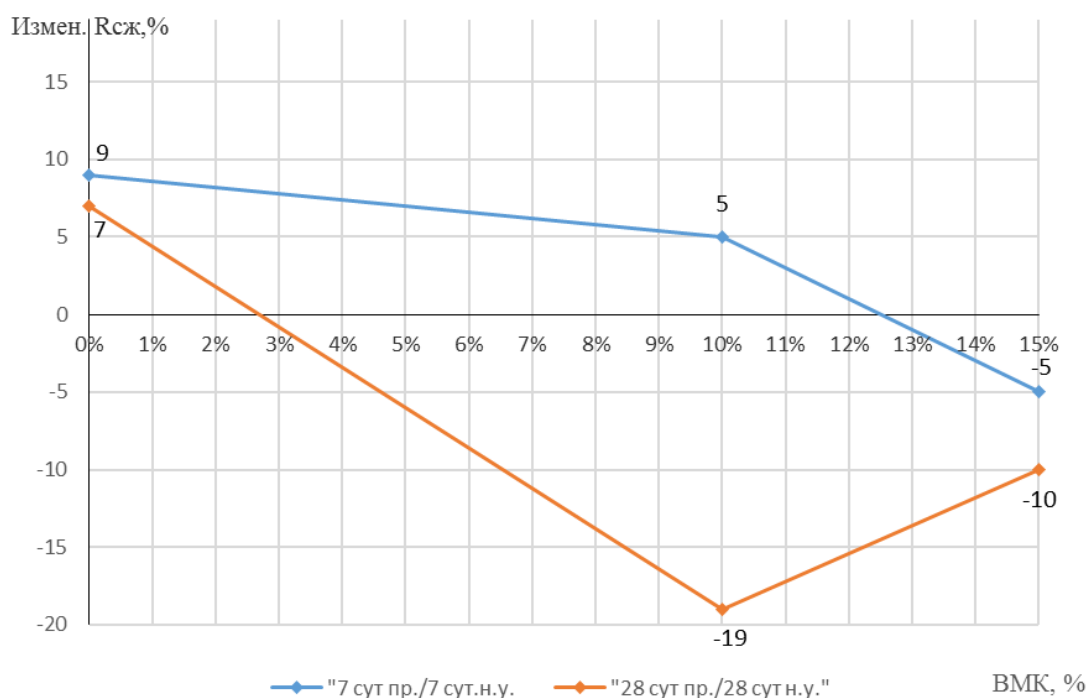


Рисунок 3.23 - Изменение $R_{сж}$ (в %), в зависимости от условий твердения бетонных образцов II серии

Анализ данных рисунка 3.23 и таблицы 3.32 позволяет отметить, что высокие температуры, которые воздействуют на бетонные образцы при твердении оказывают негативное влияние на прочностные характеристики бетонов.

Для оценки воздействия добавки высокоактивного метаксаолина на более подвижные смеси была изготовлена III серия бетонных образцов с большей осадкой конуса и водоцементным отношением.

Данные прочности III серии бетонных образцов представлены в таблицах 3.33, 3.34 и на рисунке 3.24.

Таблица 3.33 – Прочность бетона с добавлением высокоактивного метаксаолина III серии

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	R _{сж} , МПа			К разм
			7 сут	28 сут	водонас. сост.	
10	0%	пропаривание	25,7	35,7	32,1	0,9
11	5%		34,9	47,3	44,4	0,94
12	8%		35,7	48,1	40,9	0,85
13	10%		32,4	45	22,5	0,5
14	15%		31,8	36,4	28,4	0,78

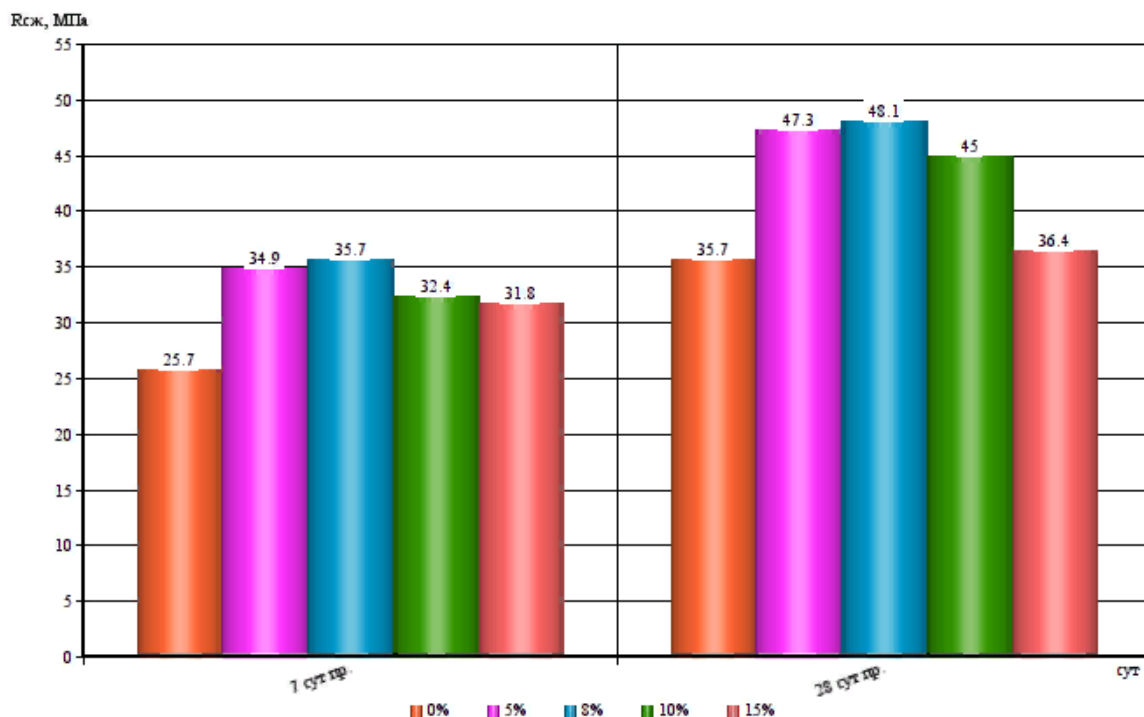


Рисунок 3.24 – Прочность при сжатии образцов серии III после пропаривания

Таблица 3.34 – Набор прочности бетонных образцов III серии в 7 суток по отношению к прочности образцов в 28 суток

№ партии	Кол-во ВМК	Условия твердения	Набор R _{сж} , %
10	0%	нормальные условия	72
11	5%	нормальные условия	74
12	8%	нормальные условия	74
13	10%	нормальные условия	72
14	15%	нормальные условия	87

Таким образом установлено, что наибольшие значения предела прочности при сжатии достигают образцы с содержанием метаксаолина в количестве 8 %, в дальнейшем при увеличении дозировки показатели предела прочности начинают снижаться (таблица 3.33)

Согласно данным таблицы 3.33 можно сделать вывод о снижении коэффициента размягчения с увеличением содержания высокоактивного метаксаолина в бетоне до 0,5, что соответствует снижению водостойкости.

Как следует из таблицы 3.34 в возрасте 7 суток набор прочности составляет не менее 72% от марочной прочности в 28 суток.

Образцы после определения прочностных характеристик продемонстрированы на рисунке 3.25.



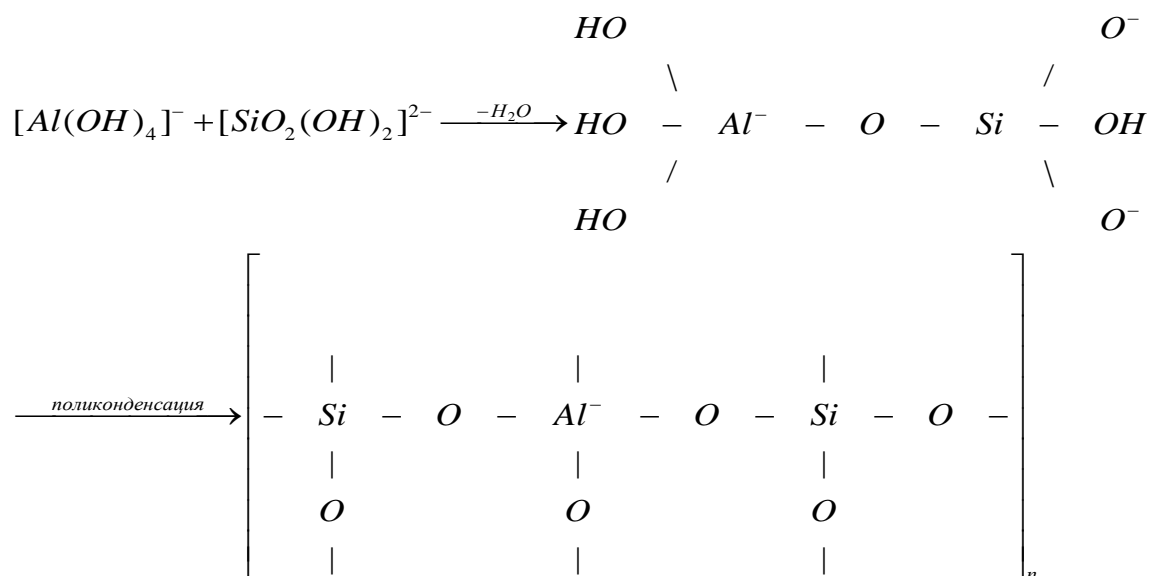
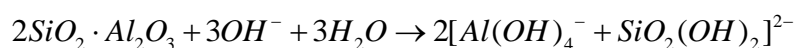
Рисунок 3.25 – Образцы, испытанные на прочность при сжатии

Экспериментально установлена оптимальная степень замены портландцемента высокоактивным метаксаолином в составе мелкозернистого бетона, равная 8%, что обеспечивает наибольшую прочность как при сжатии, так и при изгибе. Таким образом, введение метаксаолина в мелкозернистую бетонную смесь должно производиться в строго определенных дозировках, не превышающих 8% от массы цемента. Превышение установленной дозировки метаксаолина приводит к резкому снижению прочности мелкозернистых бетонов.

В результате реакции между метаксаолином и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ происходит формирование и оптимизация структуры порового пространства. Достижение высокой прочности связано с сокращением пористости за счет образования и роста первичных кристаллических гидросиликатных фаз, возможной перекристаллизации и образования вторичных кристаллов, заполнением ими пространства на микроуровне.

Достижение высокой прочности связано с сокращением пористости за счет образования и роста первичных кристаллических гидросиликатных фаз, возможной перекристаллизации и образования вторичных кристаллов.

По результатам проведенных экспериментальных исследований отмечено, что прочность бетонов, выдержанных в нормальных условиях твердения выше, чем у образцов подверженных пропариванию. Это можно объяснить тем, что при пропаривании (повышении температуры) цементного камня с увеличением в нем добавки высокоактивного метаксаолина его структура становится менее плотной. Снижение плотности, а в результате этого и прочности цементного камня в режиме пропаривания объясняется происходящим процессом полимеризации метаксаолина.



Пористость цементного камня с применением высокоактивного метаксаолина увеличивается с повышением температуры твердения. Твердение цементного камня при повышении температуры замедляется за счет преобразования высокоактивного метаксаолина в другие соединения, которые снижают прочностные характеристики цементного камня. Данное заключение подтверждается исследованиями зарубежных ученых: Rovnanik Pavel, Linnu Lu, Wei Chen [41, 42].

Выводы по третьему разделу.

В процессе подготовки к проведению эксперимента были построены математические модели, позволяющие спрогнозировать показатели прочности и водопоглощения, в зависимости от используемых материалов. Определены показатели водопоглощения и прочности на сжатие и изгиб, по значениям которых было получено значение оптимального содержания добавки высокоактивного метаксаолина.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что введение добавки высокоактивного метакеолина в бетонную смесь позволяет существенно снизить пористость и водопоглощение бетонных изделий.

2. С увеличением добавки высокоактивного метакеолина до 15 % наблюдается уменьшение открытой пористости и водопоглощения бетона. Уменьшение водопоглощения и открытой пористости бетона с увеличением в его составе высокоактивного метакеолина объясняется увеличением количества тонкодисперсной добавки в составе цемента, что способствует созданию микрокапиллярной структуры и снижению микрокапилляров.

3. Установлено, что при введении в состав смеси высокоактивного метакеолина наблюдается повышение прочности образцов на сжатие и изгиб. Оптимальное количество вводимого метакеолина составляет 8 % от массы цемента, при повышении дозировки наблюдается снижение показателей прочности. Это можно объяснить тем, что в больших дозировках метакеолин способен давать избыток тонкодисперсной фракции, что негативно сказывается на прочностных характеристиках материала.

4. Высокоактивный метакеолин способствует гидратации клинкерных минералов портландцемента, что обусловлено высокой дисперсностью его частиц и пуццолановой активностью. Набор прочности в 7 суток составляет не менее 70 % от марочной прочности.

5. Доказана целесообразность применения математической модели для планирования эксперимента, так как на этапе построения математической модели можно делать выводы об адекватности выбранных исходных параметров.

6. Доказана необходимость при изготовлении бетонов использовать добавку высокоактивного метакеолина совместно с гиперпластификатором,

который способствует снижению водопотребности бетонной смеси и увеличению прочности готовых бетонных изделий.

7. Условия твердения цементного камня оказывают существенное влияние на его пористость, водопоглощение и прочностные характеристики. В возрасте 7 суток бетон с содержанием высокоактивного метаксаолина в количестве 5 - 8% после пропаривания имеет более высокие показатели прочности, чем бетон, выдержанный в нормальных условиях твердения. При увеличении добавки метаксаолина, превышающей 8 % в бетоне наблюдается резкое снижение прочности. В возрасте 28 суток прочность бетона после пропаривания резко снижается и эти показатели ниже прочности бетонов, выдержанных в нормальных условиях твердения, при содержании высокоактивного метаксаолина в количестве 5 % от цемента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бадьин, Г.М. Справочник технолога – строителя / Г.М. Бадьин // - СПб. : БХВ-Петербург. – 2010. - 528 с.
2. Баженова, О.Ю., Баженов, М.И. Исследование некоторых свойств цементов с тонкодисперсной добавкой / О.Ю. Баженова, М.И. Баженов // Молодой ученый. - №10. - 2013. – с.96-97.
3. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов // М. : Изд – во АСВ. – 2011. – 528 с.
4. Булгаков, Б.И., Танг Ван Лам, Александрова, О.В. Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии / Б.И. Булгаков, Танг Ван Лам, О.В. Александрова // Вестник МГСУ. - №9 (108). – 2017. – с.999-1008.
5. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартиформ, 2011. – 16 с.
6. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартиформ, 2013. – 32 с.
7. ГОСТ 12730.1-78. Бетоны. Методы определения плотности. - Введ. 2018-07-01. – М. : Стандартиформ, 2018. – 6 с.
8. ГОСТ 12730.2-78. Бетоны. Метод определения влажности. - Введ. 2007-06-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 4 с.
9. ГОСТ 12730.3-78. Бетоны. Метод определения водопоглощения. - Введ. 2007-06-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 4 с.
10. ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения показателей пористости. - Введ. 2007-06-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 7 с.
11. ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. - Введ. 2007-06-01. – М. : Стандартиформ, 2007. – 12 с.

12. Цементы общестроительные. Технические условия. Введ. 2017-03-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
13. ГОСТ 30515-2013. Цементы. Общие технические условия. Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 41 с.
14. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия (с поправкой). Введ. 2015-04-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 7 с.
15. ГОСТ 8735-88. Песок для строительных работ. Методы испытаний. Введ. 1989-07-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 25 с.
16. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 10 с.
17. ГОСТ 27006-86. Бетоны. Правила подбора состава. Введ. 1987-01-01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 6 с.
18. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний. Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 28 с.
19. ГОСТ Р 52804-2007. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. - Введ. 2009-01-01. – М. : Стандартинформ, 2008. – 32 с.
20. ГОСТ Р 56178-2014. Модифкаторы органо -минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. - Введ. 2015-04-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 24 с.
21. ГОСТ 6665-91. Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия. Введ. 1992-01-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 30 с.
22. ГОСТ 17608-2017. Плиты бетонные тротуарные. Технические условия. Введ. 2018-03-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2018. – 19 с.
23. Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В.Н. Шишканова. - Тольятти. : ТГУ, 2013. – 126с. - URL: <https://dspace.tltsu.ru/handle/123456789/383> (дата обращения 22.04.2019).

24. Езерский, В.А., Кузнецова, Н.В., Дубровин, А.И. Улучшение свойств мелкозернистого бетона с помощью комплексных добавок / В.А. Езерский, Н.В. Кузнецова, А.И. Дубровин // Строительные материалы. - №6. – 2015. – с. 4-8.

25. Кирсанова, А.А., Крамар, Л.Я. Комплексный модификатор с метаксаолином для получения цементных композитов с высокой ранней прочностью и стабильностью / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар // Вестник ЮУрГУ, Серия «Строительство и архитектура». - №1. - 2012. - с.49-57.

26. Кирсанова, А.А., Крамар, Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метаксаолина для цементных бетонов / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар // Строительные материалы. - №11. - 2013. - с.54-56.

27. Кирсанова, А.А., Крамар, Л.Я., Орлов А.А. Особенности гидратации и твердения цементных бетонов с добавками - модификаторами, содержащими метаксаолин / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар, А.А. Орлов // Цемент и его применение. - №2. - 2015. - с.130-135.

28. Кирсанова, А.А., Крамар, Л.Я. Влияние добавки метаксаолина на структуру и свойства цементного камня / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар // Ресурсосберегающие технологии и эффективное использование местных ресурсов в строительстве: Материалы международной научно - технической конференции. - 2012. - с.51-55.

29. Красникова, Н.М., Степанов, С.В., Искандарова, А.Ф. Исследование влияния метаксаолина на прочность бетона / Н.М. Красникова, С.В. Степанов, А.Ф. Искандарова // Международный научный журнал «Инновационная наука». - №7. - 2015. - с. 41-42.

30. Лепескин, Н.А., Образцов, В.В., Федюк, Р.С. Исследование проницаемости мелкозернистого бетона на композиционно вяжущем / Н.А. Лескин, В.В. Образцов, Р.С. Федюк // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства: Материалы международной научно – практической конференции. – 2016. – с. 463 – 465.

31. Мелкозернистый бетон, модифицированный комплексной микродисперсной добавкой [Электронный ресурс] / Ю.М. Баженов, Н.П. Лукутцова, Е.Г. Карпиков. – Вестник МГСУ. - №2. – 2013. – с. 94-98. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/melkozernistyy-beton-modifitsirovannyy-kompleksnoy-mikrodispersnoy-dobavkoj-1> (дата обращения 15.05.2018).
32. Морозов, Н.М., Боровских, И.В. Галлеев, А.Ф. Влияние ультрадисперсных наполнителей на свойства песчаного бетона / Н.М. Морозов, И.В. Боровских, А.Ф. Галлеев // Международный научный журнал «Инновационная наука». - №9. – 2016. – с. 73-75.
33. Крамаренко, А.В., Никитина, К.В. Анализ современных добавок, способствующих уменьшению водопоглощения цементно-содержащих материалов [Электронный ресурс] / А.В. Крамаренко, К.В. Никитина // Наука и образование: новое время. - №3. – 2018. – URL: https://articulus-info.ru/wp-content/uploads/2018/05/3_2018o_Kramarenko-Nikitina.pdf (дата обращения 05.05.2018).
34. Крамаренко, А.В., Никитина, К.В. Анализ современных способов улучшения физических свойств цементно-содержащих материалов [Электронный ресурс] / А.В. Крамаренко, К.В. Никитина // Наука и образование: новое время. - №3. – 2019. – URL: <https://articulus-info.ru/category/05-00-00-tehnicheskie-nauki/?tag=3-maj-iyun-2019-g> (дата обращения 12.06.2019).
35. Саламанова, М.Ш. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы / М.Ш. Саламанова // Научно - аналитический журнал «Инновации и инвестиции». - №8. - 2015. - с.159-163.
36. Солдатенко, Л.В. Введение в математическое моделирование строительно – технологических задач / Л.В. Солдатенко // Оренбург: ГОУ ОГУ. – 2009. – 161 с.
37. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Введ. 2013-01-01. – М. : Минрегион России, 2012. – 17 с.

38. Федюк, Р.С. Исследование водопоглощения мелкозернистого фибробетона на композиционном вяжущем / Р.С. Федюк // Фундаментальные исследования. - №2. - 2016. - с. 303-307.

39. Шишканова, В.Н., Никитина, К.В. Исследование влияния метакаолина на водопоглощение и прочность бетона [Электронный ресурс] / В.Н. Шишканова, К.В. Никитина // Международная научно – практическая конференция «Идеи и проекты молодежи России». – 2019. – URL: <https://emc21.ru/stati-ii-vserossijskoj-nauchno-prakticheskoy-konferentsii-idei-i-proekty-molodyozhi-rossii-s-izdaniem-elektronnogo-sbornika-materialov-rints/> (дата обращения 20.05.2019)

40. Sabir B.B, Wild S., Bai J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review / B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai // Cement and Concrete Composites. – Issue 6. – 2010. – Pp 441-454.

41. Geddes D., Provis J.L., Bernal S.A. Effect of calcination method and clay purity on the performance of metakaolin-based geopolymers / D. Geddes, J.L. Provis, S.A. Bernal // International conference on alkali activated materials and geopolymers: versatile materials offering high performance and low emissions. – Issue 5. - 2018. - Pp 53 – 57.

42. Peiliang S., Linnu L., Wei C., Shuguang H. Efficiency of metakaolin in steam cured high strength concrete / S. Peiliang, L. Linnu, C. Wei, H. Shuguang // Construction and building materials. - 2017. - Pp 357 - 366.

43. Rovnanik P. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based polymer / P. Rovnanik // Construction and building materials. - 2010. - Pp 1176 - 1183.

44. Sarangi P., Panda K.C. Influence of Metakaolin and Silpozz on Development of High-Strength Concrete / P. Sarangi, K.C. Panda // Recent Advances in Structural Engineering. - Volume 1.- 2018.- Pp 827-839.

45. Pinto S.R., Andrioli A.L., Ronaldo A. Effect of preconditioning temperature on the water / S.R. Pinto, A.L. Andrioli, A. Ronaldo // Journal of Building Pathology and Rehabilitation. - Issue 1. - 2018. - Pp 159 – 164.