

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ
им. Н. Исанова**

На правах рукописи

УДК 691.54(043.3)

Джусупова Махават Абдысадыковна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ
МЕСТНОГО ПРИРОДНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ**

05.23.05 - строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

д.т.н., профессор Абдыкалыков А.А.

Бишкек – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ И БЕТОНОВ	18
1.1. Особенности твердения цементных вяжущих веществ в присутствии активных минеральных добавок.....	18
1.2 Физико-химические особенности структурообразования композиционных цементных композитов и бетонов на их основе.....	23
1.3 Вопросы и оценка эффективности использования золошлаковых отходов в составе вяжущих и бетонов.....	27
1.4 Особенности применения золы рисовой шелухи в составе вяжущих и бетонов	36
1.4 Экологические и экономические аспекты использования отходов топливно-энергетического и растительного производств.	38
Заключение по главе 1	41
ГЛАВА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	43
2.1. Характеристика сырьевых материалов.....	43
2.2 Методики проведения исследований.....	49
Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний.....	50
2.3 Физико-химические методы исследования.....	50
2.4 Эффективность применения экспериментально-статистического моделирования для решения задач утилизации промышленных отходов в производстве композиционных строительных материалов	51
2.5 Методика расчета оптимального зернового состава по программе «GRANUMETRIK»	53
Заключение по главе 2	55

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ И ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ СВОЙСТВ	56
3.1 Исследование микроструктуры и основных физико-химических показателей золошлаковых отходов	57
3.2. Оценка микроструктуры и основных физико-химических показателей золы рисовой шелухи.....	65
3.3 Исследование основных свойств композиционных вяжущих веществ с использованием золошлаковых отходов	70
3.3.1 Композиционные цементные вяжущие вещества с золой гидроудаления	72
3.3.2 Оптимизация рецептурно-технологических факторов вяжущего с использованием золы гидроудаления	79
3.3.3 Композиционные цементношлакозольные вяжущие вещества с использованием золошлаковой смеси.....	84
3.3.4 Оптимизация состава цементнозолошлакового вяжущего.....	88
3.3.5 Композиционные цементно-шлаковые вяжущие	91
3.3.6 Оптимизация состава цементношлакового вяжущего	98
3.4 Оценка эффективности использования золошлаковых отходов в композиционных вяжущих веществах.....	102
Заключение по главе 3	107
Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ МЕЛКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ БЕТОНА.....	111
4.1 Оценка гранулометрического состава заполнителей из природного сырья и топливных отходов.	112
4.2 Исследование основных свойств и гранулометрического состава заполнителей из топливных отходов.	119
Заключение по главе 4	130

Глава 5. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВАХ И ЗАПОЛНИТЕЛЕ ИЗ ТОПЛИВНЫХ ШЛАКОВ	132
5.1 Мелкозернистые бетоны на основе композиционного вяжущего с золой гидроудаления и заполнителя из шлака.....	135
5.2 Мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих с золошлаковой смесью и заполнителя из шлака	141
5.3 Мелкозернистые бетоны на основе цементношлаковых вяжущих и заполнителя из шлака.....	148
5.4 Оптимизация состава и оценка эффективности использования топливных отходов в мелкозернистом бетоне.....	154
5.5 Оптимизация состава мелкозернистого бетона на вяжущем с золой рисовой шелухи и заполнителя с золой гидроудаления	168
5.5.1 Микроструктура мелкозернистого бетона с золой рисовой шелухи и золы гидроудаления.	179
Заключение по главе 5:.....	184
ГЛАВА 6. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И ПРИРОДНОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ.....	185
6.1. Разработка составов мелкозернистого бетона на композиционном вяжущем с золошлаковой смесью и природном заполнителя оптимальной гранулометрии	186
6.2 Мелкозернистые бетоны на низкомарочном цементе с золошлаковой смесью и природном песке.....	195
Заключение по главе 6	210
ГЛАВА 7 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ.....	212
7.1 Технология производства цементозолошлаковых вяжущих.....	214
7.2 Технологическая схема производства стеновых блоков на основе цементнозолошлакового вяжущего.....	217

7.3. Техничко-экономические показатели производства цементнозолошлакового вяжущего.....	221
7.4. Техничко-экономические характеристики производства стеновых блоков на цементнозолошлаковых вяжущих.....	223
7.5. Технология производства цементозольных вяжущих веществ	224
7.6. Техничко-экономические показатели производства цементозольного вяжущего	228
7.7. Техничко-экономические характеристики производства 1 м ³ бетона класса В 15 (М200) на цементозольном вяжущем.....	230
7.8. Технологическая карта получения мелкозернистого бетона с использованием золы рисовой шелухи и золы гидроудаления.....	234
7.9 Техничко-экономические показатели эффективности получения мелкозернистого бетона с использованием золы рисовой шелухи и золы гидроудаления.	237
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	243
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	247

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АМД	-	активные минеральные добавки
БТЭЦ	-	Бишкекская теплоэлектростанция
В/Ц	-	водо-цементное отношение
ГУ	-	гидроудаление
ЗШС	-	золошлаковая смесь
ЗШО	-	золошлаковые отходы
ДТА	-	дифференциально-термический анализ
МД	-	минеральная добавка
П	-	пористость (%)
ПЦ	-	портландцемент
$R_{сж}$	-	предел прочности при сжатии (МПа)
$R_{изг}$	-	предел прочности при изгибе (МПа)
$R_{изг}^{28сут}$	-	предел прочности при сжатии после 28 суток
$R_{сж}^{28сут}$	-	предел прочности при изгибе после 28 суток
НГ	-	нормальная плотность
ТВО	-	тепловлажностная обработка
НУ	-	нормальные условия
Кр	-	коэффициент размягчения
λ	-	коэффициент теплопроводности
ЦЗВ	-	цементнозольное вяжущее
ЦЗШВ	-	Цементозолошлаковое вяжущее
ЦШВ	-	цементно-шлаковое вяжущее
Ш	-	шлак

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В Национальной программе развития Кыргызской Республики до 2026 года отдельным пунктом предусматривается решение вопросов, связанных с использованием вторичных отходов, минимизации их образования, безопасного сбора, переработки и нейтрализации. Указывается, что для создания благоприятной для жизни человека окружающей среды необходимо развитие и поддержка экологически ориентированного бизнеса, внедрение малоотходных, ресурсосберегающих технологий и т.п.

Строительная отрасль является одним из крупнейших потребителей природных ресурсов, что предопределяет необходимость разработки и внедрения эффективных стратегий их рационального использования. Эти меры позволяют уменьшить антропогенную нагрузку на окружающую среду и повысить эффективность ресурсопотребления.

Золошлаковые отходы (ЗШО), образующиеся в топливно-энергетической промышленности, относятся к наиболее массовым видам техногенных отходов. В Кыргызстане высокая ресурсоемкость экономики обусловлена недостаточным уровнем технологического развития производственной базы и эксплуатацией устаревшего оборудования, что приводит к значительным потерям сырья, несмотря на его физико-химическое сходство с природными материалами. Включение ЗШО в строительные технологии позволяет покрыть до 40% потребности в сырье и снизить затраты на производство строительных материалов на 10–30%.

Золошлаковые отходы и зола рисовой шелухи (ЗРШ) обладают выраженными пуццолановыми свойствами и низкой рыночной стоимостью, что делает их перспективными компонентами для создания композиционных цементных вяжущих. Производство таких вяжущих возможно как на цементных заводах, так и на предприятиях, выпускающих товарный бетон и

железобетонные изделия. Включение указанных отходов в строительные технологии способствует реализации принципов устойчивого развития, снижению техногенной нагрузки на окружающую среду и повышению эффективности строительной отрасли. Зола рисовой шелухи (ЗРШ) является одной из наиболее эффективных активных минеральных добавок для цементных вяжущих и бетонных композитов. Ее уникальность заключается в том, что она содержит высокое количество аморфного диоксида кремния (SiO_2), который активно участвует в процессах гидратации цемента и способствует образованию дополнительного количества прочных гидросиликатов кальция (CSH-гелей). Частицы ЗРШ обладают высокой дисперсностью и могут заполнять микропоры, улучшая плотность цементной матрицы, что приводит к снижению пористости, повышению прочности и водонепроницаемости, морозостойкости, долговечности и экологичности строительных материалов.

Применение золошлаковых отходов способствует снижению потребления цемента, производство которого сопровождается значительными выбросами CO_2 (0,97 т на 1 т клинкера). Замена части цемента активированными минеральными добавками снижает экологическую нагрузку и повышает экономическую эффективность строительства. Внедрение таких решений способствует более устойчивому развитию отрасли и снижению зависимости от традиционных природных ресурсов.

При использовании золошлаковых отходов, имеющих нестабильные свойства, особое внимание должно уделяться их подготовке для принятия эффективных технологических решений. В частности, механоактивация (дробление, помол) ЗШО значительно улучшает свойства вяжущих и бетонов. В частности: увеличивается реакционная способность (пуццолановая активность) за счет уменьшения размера частиц и нарушения кристаллической и стекловидной фаз; дисперсные частицы улучшают распределение в цементной матрице, способствуя плотному заполнению пор и улучшению структуры бетона; активированные ЗШО могут выступать в роли центров кристаллизации, способствуя более ускоренному образованию гидратных

новообразований. Кроме того, экономический и экологический аспект активации ЗШО заключается в снижении расхода цемента без потери, а в отдельных случаях повышению прочностных характеристик бетона, снижению его стоимости и сокращении выбросов CO₂ в атмосферу.

Использование золошлаковых отходов (ЗШО) в качестве мелкого заполнителя для бетона повышает его физико-механические и эксплуатационные характеристики, снижает экологическую нагрузку и себестоимость производства.

В связи с вышеизложенным, диссертационная работа посвящена изучению и систематизации техногенных отходов, закономерностей их влияния на основные физико-механические и структурные характеристики цементных композиционных вяжущих веществ и бетонов. Исследование направлено на разработку эффективных технологических решений, обеспечивающих максимальное вовлечение техногенных отходов в производство композиционных вяжущих веществ и бетонов при сохранении или улучшении их эксплуатационных свойств.

Объект исследования: композиционные цементные вяжущие вещества, мелкозернистые бетоны, получение и применение.

Предмет исследования: золошлаковые отходы, зола рисовой шелухи, цементные композиты. Химический состав, основные физико-химические, физико-механические, гранулометрические показатели, микроструктура золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи. Основные физико-механические свойства композиционных вяжущих и бетонов. Экспериментально-статистические модели свойств вяжущих и бетонов. Технологические аспекты и технико-экономические показатели производства композиционных цементов, бетонов и изделий.

Цель исследования: Разработка научно-обоснованных подходов к утилизации золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи в составе композиционных цементных вяжущих и мелкозернистых бетонов путем изучения их химического состава, физико-механических и структурных

характеристик, а также закономерностей влияния на свойства цементных композитов.

Постановка и концепция научной проблемы. Рабочая гипотеза.

Принимая во внимание сложную экологическую ситуацию в крупных и малых городах республики, вопрос утилизации и рационального использования золошлаковых отходов приобретает особую актуальность. На золоотвалах теплоэлектроцентралей и котельных ежегодно накапливаются миллионы тонн ЗШО, что требует эффективных решений по их утилизации и переработке. В то же время активные минеральные добавки для бетонных композитов в основном импортируются, что увеличивает себестоимость производства строительных материалов. Таким образом, внедрение технологий переработки золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи в строительной отрасли является важным направлением, способствующим устойчивому развитию, снижению зависимости от импортных компонентов и повышению экологической безопасности.

Обоснование гипотезы:

1. Пуццолановая активность ЗШО:

- Зола содержит аморфный кремнезем и оксид алюминия, которые в присутствии воды и гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) образуют дополнительные гидросиликаты, повышающие прочность и плотность цементного камня.

2. Экономическая эффективность:

- Замена части цемента золошлаками снижает затраты на производство, так как ЗШО являются отходами и их использование не требует дополнительных ресурсов.

3. Экологический аспект:

- Утилизация ЗШО в цементной промышленности снижает нагрузку на окружающую среду, уменьшая объемы отходов, направляемых на захоронение.

4. Технологическая возможность:

- Золошлаки имеют мелкодисперсную структуру, что позволяет равномерно распределять их в цементной матрице, улучшая микроструктуру материала.

Ожидаемые результаты:

- Улучшение прочностных характеристик цементного камня.
- Повышение устойчивости к химической коррозии (например, сульфатной).
- Снижение усадки и трещинообразования.
- Оптимизация состава цементной смеси с учетом свойств ЗШО.

При этом оптимальное соотношение золошлакового наполнителя и цемента будет зависеть от химического состава ЗШО, их дисперсности и условий гидратации, что требует экспериментального подтверждения.

Использование золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи расширяет возможность утилизации промышленных и растительных отходов в строительной отрасли, снижая экологическую нагрузку и обеспечивая экономическую эффективность производства.

Вопрос получения эффективных цементных композиционных вяжущих и бетонов решается за счет использования золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи, изучения их физико-химических особенностей и оптимизации процессов структурообразования.

Задачи исследований:

1. Изучение теоретических основ создания композиционных вяжущих и бетонов с учетом современной теории твердения цементных вяжущих, а также механизмов структурообразования композиционных материалов.
2. Провести анализ микроструктуры, химического, минералогического, фазового и гранулометрического состава топливных отходов и золы рисовой шелухи, и установить эффективное направление их использования в производстве композиционных вяжущих, заполнителей и бетонов.
3. Оптимизация рецептурно - технологических факторов и свойств композиционных цементных вяжущих с использованием золошлаковых отходов (зола гидроудаления, золошлаковая смесь, топливный шлак).
4. Исследование зернового состава природных мелких заполнителей и золошлаковых отходов для использования в качестве заполнителя для бетонов.

5. Оценка эффективности использования золошлаковых отходов при получении мелкозернистых бетонов с заданными эксплуатационными характеристиками.
6. Оптимизация рецептурно - технологических факторов и свойств мелкозернистых бетонов с использованием золошлаковых отходов на заполнителе из топливных шлаков.
7. Оптимизация составов мелкозернистых бетонов с на цементных вяжущих с наполнителем из рисовой шелухи и заполнителем с золой гидроудаления.
8. Оптимизация составов мелкозернистых бетонов на низкомарочных цементнозолошлаковых вяжущих и природном заполнителе.
9. Разработка технологии и расчет технико-экономических показателей композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов.
10. Технико-экономическая оценка и опытно-промышленная апробация результатов исследований.

Научная новизна полученных результатов.

1. Разработаны научно-прикладные основы и технологические решения для создания оптимальной структуры композиционных цементных вяжущих с использованием топливных отходов, обеспечивающие необходимые показатели качества мелкозернистых бетонов на их основе.
2. Систематизированы и обобщены направления и механизмы управления структурой композиционных цементных вяжущих для обеспечения их требуемых стабильных прочностных и других эксплуатационных свойств.
3. Предложены экспериментально- статистические модели свойств композиционных цементных вяжущих с различными топливными отходами, позволяющие прогнозировать их свойства в различных условиях твердения и установить связь между рецептурно- технологическими параметрами.
4. Предложены оптимальные зерновые составы природных мелких заполнителей и заполнителей из топливных отходов для обеспечения оптимальной плотной структуры мелкозернистого бетона требуемого качества, позволяющая снизить содержание цемента.

5. Предложены различные способы использования золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи в качестве наполнителей в цемент, позволяющих сохранить, а в некоторых случаях повысить его прочностные показатели.
6. Предложены экспериментально-статистические модели свойств мелкозернистого бетона на низкомарочных цементах, активизированных и наполненных золошлаковой смесью, с сохранением требуемых эксплуатационных свойств.
7. Предложены экспериментально-статистические модели свойств мелкозернистого бетона на композиционном вяжущем с наполнителем из золы рисовой шелухи и мелком заполнителе, где недостающая дисперсная часть представлена золой гидроудаления.
8. Разработаны оптимальные составы мелкозернистых бетонов классов В7,5 – В20,5 на композиционных вяжущих веществах, наполненных золой гидроудаления, золошлаковой смесью, топливным шлаком и золой рисовой шелухи.

Практическая значимость полученных результатов

1. Проведена систематизация золошлаковых отходов, определена и обоснована направленность их использования в качестве наполнителя цемента и в качестве заполнителей для бетонов.
2. Получены и рекомендованы композиционные вяжущие вещества, наполненные золой гидроудаления, золошлаковой смесью, топливным шлаком.
3. Получены оптимальные составы мелкозернистых бетонов на разработанных композиционных цементных вяжущих веществах и заполнителях природного и техногенного происхождения.
4. Получены мелкозернистые бетоны на низкомарочных цементах, активированных и наполненных золошлаковой смесью.
5. Разработан оптимальный состав мелкозернистого бетона с использованием золы рисовой шелухи как наполнителя в цемент и золы гидроудаления как дисперсная часть мелкого заполнителя.

6. Разработаны оптимальные гранулометрические составы мелких заполнителей и природного песка, золошлаковой смеси, золы гидроудаления и топливного шлака.
7. Разработаны технологические карты на производство композиционных вяжущих и изделий из мелкозернистых бетонов.
8. Рассчитаны основные технико-экономические показатели производства разработанных композиционных вяжущих и бетонов на их основе.
9. Результаты диссертационных исследований апробированы на предприятиях г. Бишкек ЗАО Кум-Шагыл и ОсОО “Шерой”.

Экономическая значимость полученных результатов.

1. Экономический эффект при изготовлении мелкозернистого бетона В-15 (М 200) при введении в цемент золы ГУ 30 % при выпуске 10000 т/год составит 3 422 300 сом; экономический эффект от введения в цемент ЗШС 20 % при выпуске 10000 т/год составит 3 836 970 сом.
2. Экономический эффект при выпуске 10 000 тонн бетона В-15 (М 200) составит 2 490 000 сом; а при изготовлении 10 000 штук условного стенового блока из МЗБ класса В-15 (М 200) экономическая эффективность составит 29 600 сом.
3. При производительности завода по производству бетона 30 тыс. м³/год экономическая эффективность от использования добавки золы рисовой шелухи (ЗРШ) в цемент и золы гидроудаления (ЗГУ) вместо части мелкого заполнителя составит при изготовлении экспериментальных мелкозернистых бетонов классов В15 - 8215500 сом; В20 - 15523800 сом; В22,5 - 26812200 сом.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Результаты химического, физико-химического, микроструктурного анализов и физико - механических испытаний золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи для определения направленности их использования в композиционных вяжущих веществах и мелкозернистых бетонах.
2. Результаты исследований основных физико-химических характеристик золы гидроудаления, золошлаковых смесей и топливных отходов для оценки их

активности в композиционных вяжущих веществах в зависимости от количества и способа их введения.

3. Результаты оптимизации зернового состава мелких заполнителей природного и техногенного происхождения (зола гидроудаления, золошлаковая смесь, топливный шлак) для полной или частичной замены в мелкозернистом бетоне.

4. Оптимальные составы композиционных вяжущих веществ, полученных разными способами и наполненных в разной степени золой гидроудаления, золошлаковой смесью и топливным шлаком.

5. Оптимальные составы МЗБ классов В7,5 - В-20,5 на основе композиционного вяжущего вещества с наполнителями из золы гидроудаления, золошлаковой смеси, топливного шлака и заполнителя из топливного шлака.

6. Оптимальные составы МЗБ классов В7,5 – В15 на основе низкомарочного активизированного и наполненного золошлаковой смесью вяжущего, суперпластификатора и природного заполнителя.

7. Оптимальные составы МЗБ классов В7,5 - В-20 МЗБ на основе композиционного вяжущего вещества, наполненного золой рисовой шелухи и природного заполнителя с дисперсными частицами золы гидроудаления (Патент №2293).

8. Оптимальные составы МЗБ класса В25 на основе цементнозолошлакового вяжущего и природном мелком заполнителя оптимальной гранулометрии.

9. Технологическая схема и технико-экономические показатели производства композиционных вяжущих веществ, бетонов и изделий на их основе.

Личный вклад соискателя в изучении химического состава, микроструктуры, физико-химических особенностей фазового состава и систематизация топливных отходов для оценки направленности их использования; в изучении и анализе физико-химических особенностей структурообразования композиционного вяжущего вещества с ЗШО различной степени наполнения; в оценке зависимости свойств композиционных вяжущих веществ от механической активации, количества и вида ЗШО; Оценке

эффективности использование цемента в композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонах; в определении и анализе основных физико-механических свойств МЗБ требуемого класса на композиционных цементных вяжущих и заполнителях из топливного шлака; в определении рационального зернового состава мелких заполнителей природного и техногенного происхождения; разработке состав МЗБ на активированном низкомарочном цементе с ЗШО; разработке состав МЗБ на композиционном вяжущем, наполненного золой рисовой шелухи и природном заполнителе с дисперсными частицами золы гидроудаления; в разработке технологической схемы и расчете технико-экономических показателей производства композиционных вяжущих веществ и МЗБ с использованием ЗШО и золы рисовой шелухи.

Особая благодарность выражается всему коллективу кафедры «Производство, экспертиза строительных материалов и конструкций», в частности научному консультанту д.т.н., профессору Абдыкалыкову А. и к.т.н., профессору Ассакуновой Т.Т.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы докладывались на конференциях и семинарах:

1. Regional Academy of Management European Scientific Foundation Institute Materials of the II International scientific-practical conference «THE EUROPE AND THE TURKIC WORLD: SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY» May 29-31, 2017 Izmir, Turkey;
2. Международная научно-практическая конференция «НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ» Казахстан г. Шымкент 2017 г. ноябрь;
3. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве» Алматы 2018 г.
4. Международная практическая конференция «Вызовы современности: инновационное развитие строительной отрасли, проблемы ее цифровизации и стандартизации» 25-26 апреля 2019 г., г. Бишкек, КГУСТА им.Н.Исанова;
4. Membership in the WTO: Prospects of Scientific Researches and International Technology Market» Materials of the IV International Scientific-Practical

Conference, October 23-25, 2019, Vancouver, Canada. 7. Международный семинар «Моделирование и оптимизация строительных композитов», 21-22 ноября 2019 г., г. Одесса, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, Украина. 8. 9-я Международная конференция по актуальным проблемам инженерной механики, АРЕМ 2022; Украина, Одесса; с 20 по 24 мая 2019 г.

9. V International Scientific-Practical Conference "Integration of the Scientific Community To the Global Challenges of Our Time" February 12-14, 2020. Tokyo, Japan. 10. Международная конференция ученых-практиков «Интеграция научных сообществ глобальные вызовы нашего времени» 12-14 февраля 2020 г.

11. Международная сетевая научно-практическая конференция «Интеграционные процессы в научно-техническом и образовательном пространстве» вузов-участников Российско-Кыргызского консорциума технических университетов (РККТУ) 14 мая 2021 г. 12. XXII Международные Байконуровские чтения «Актуальные вопросы современной науки и образования» Научно-практическая конференция посвященная 110 летию академика О.А. Байконурова, 2022 г. 13. IX international scientific-practical conference The Europe and the Turkic World: Science, Engineering and Technology. - Адана, 2024. 14. Международная научно-практическая конференция «Строительная наука и образование: интеграция вузовской науки в устойчивое инновационное развитие страны», посвященная к 30-летию образования КГУСТА им. Н.Исанова 27-28 мая 2022 г. 15. IX научно-практическая конференция «Актуальные проблемы инженерной механики Украина, Одесса; ОГАСА, 17-20 мая 2022 г. 16. Международная научно-практическая конференция «Современные тренды в строительстве: проблемы и пути их решения», посвященная 80-летию выдающегося государственного и политического деятеля Кыргызской Республики Насирдина Исанова 2 ноября 2023 г. 17. Международная научно-техническая конференция «Моделирование и оптимизация строительных композитов» (семинар MOBS) Украина, Одесса; 5-6 декабря 2024 г.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Результаты исследований опубликованы в 27 научных статьях, в которых отражены основные результаты диссертационной работы, том числе 4 статьи в издании индексируемое в Elsevier «SCOPUS».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из 7 глав, общих выводов, списка использованной литературы, включающего 238 наименований. Полный объем диссертации 272 страниц, включая 70 рисунков, 67 таблиц.

ГЛАВА 1 АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ И БЕТОНОВ

1.1. Особенности твердения цементных вяжущих веществ в присутствии активных минеральных добавок.

Среди всех вяжущих веществ, используемых в строительстве, портландцемент в отличие от гипсовых, магнезиальных и известковых вяжущих имеет более сложный химический и минеральный состав, который обеспечивает возникновение разных по составу и строению новообразований, способных затвердевать, набирать прочность и сохранять ее длительное время не только в воздушно-сухих условиях, но и во влажных и даже в воде.

Основные эксплуатационные свойства затвердевшего цемента, а следовательно, и бетона на его основе в значительной степени зависят от его химического и минерального состава. Главными оксидами портландцемента являются CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , объем которых составляет около 95—97%. Кроме основных оксидов в клинкере находятся MgO , SO_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , Mn_2O_3 , Na_2O , K_2O , P_2O_5 и некоторые другие. Количество CaO составляет 63—66%. Второе место приходится на SiO_2 (21—24%), затем идут Al_2O_3 (4—8%), Fe_2O_3 (2—4%) и остальные оксиды.

Каждый из отмеченных оксидов влияет на конечные свойства цемента. Поэтому уже на стадии получения цементного клинкера (спекание смеси сырьевых компонентов) следует внимательно следить за процентным содержанием оксидов. Это важно знать и при разработке новых модификаций цементов или композиционных вяжущих на его основе.

Для примера отметим, что повышенное содержание оксида кальция обеспечивает не только быстрый рост прочности и высокую марку цемента, но затвердевший, такой цемент характеризуется пониженной водостойкостью. Отмеченное влияние оксида кальция на прочность наблюдается в том случае,

если он максимально полно связан в химические соединения с кислыми оксидами. Несвязанный (свободный) CaO в количестве более 0,5—1% оказывает негативное воздействие на затвердевший цемент.

Цемент с повышенным содержанием SiO₂ характеризуется замедленной скоростью набора прочности в начальный период твердения, но через полгода такой цемент будет иметь высокую прочность и повышенную водо- и сульфатостойкость.

Повышенное (более 8%) содержание глинозема Al₂O₃ ускоряет твердение цемента в первые часы и сутки, но такой цемент имеет пониженные морозостойкость, водо- и сульфатостойкости.

Оксиды железа тоже влияют на свойства цемента. При повышении их содержания и низком количестве Al₂O₃ цемент аналогичен высококремнеземистому. Цемент с большим содержанием Fe₂O₃ имеет высокую сульфатостойкость. Влияние других оксидов можно найти в специальной литературе.

Роль и влияние минерального состава цемента на прочность и долговечность цементных бетонов переоценить трудно. Основополагающими (главными) минералами в цементе являются трехкальциевый силикат (C₃S, алит) — 3CaO • SiO₂; двухкальциевый силикат (C₂S, белит) — 2CaO • SiO₂; трехкальциевый алюминат (C₃A) — 3CaO • Al₂O₃ и четырехкальциевый алюмоферрит (C₄AF, целит) — 4CaO • Al₂O₃ • Fe₂O₃. Они образуются из основных оксидов при обжиге (1300— 1500 °С) и имеют характерную для каждого кристаллическую структуру.

Трехкальциевый силикат, содержание которого в клинкере составляет 40—60%, предопределяет основные свойства цемента. Он обеспечивает высокую прочность цементного камня и быстрый рост ее во времени. Двухкальциевый силикат (15—30%) твердеет медленно, но впоследствии имеет высокую прочность.

Трехкальциевый алюминат (3—15%) характеризуется быстрым набором прочности, хотя она и невысокая.

Химический и минеральный составы являются «визитной карточкой» портландцемента. С их помощью можно не только оценить строительные свойства цемента, но и, что сегодня особенно важно, заранее «запроектировать» течение тех или иных химических и физикохимических процессов с целью получения нужных нам свойств у затвердевшего цемента или получить новые вяжущие с заранее заданными свойствами. Чтобы достичь этого необходимо знать те химические процессы, которые происходят в твердеющем вяжущем.

Согласно теории твердения вяжущих веществ А.А. Байкова, гидратация минералов клинкера может идти в двух направлениях: через раствор и топохимически. Эти обстоятельства во многом определяют морфологию и габитус кристаллов новообразований, а в конечном счете — формирование строительных свойств затвердевшего цемента.

В соответствии с основными положениями теории твердения вяжущих веществ А.В. Волженского можно осознанно и целенаправленно управлять свойствами цементного камня, а значит и бетона. Изменяя температуру твердения, минеральный состав, дисперсность цемента, щелочность жидкой фазы твердеющей системы, можно регулировать скорость гидратации минералов, состав новообразований, размер кристаллов новообразований и соответственно строительные свойства затвердевшего цемента. Однако чтобы это осуществить, необходимо знать, как и при каких условиях проходят не только химические, но и физико-химические процессы в твердеющем цементе. Трехкальциевый силикат — основной минерал клинкера, взаимодействует с водой при обычных условиях по следующей схеме:



В твердеющей системе преимущественно образуется $3\text{CaO}\times 2\text{SiO}_2\times 3\text{H}_2\text{O}$. Если же в системе по каким-либо причинам изменяется щелочность среды, то образующиеся гидросиликаты кальция имеют переменный состав. Если в обычных условиях концентрация гидроксида кальция в жидкой фазе (в расчете на CaO) находится в пределах 0,05—1,1 г/л, возникают новообразования типа

$(0,8-1,5)\text{CaO}\times\text{SiO}_2\times(1-2,5)\text{H}_2\text{O}$. При этом основность продуктов гидратации будет тем выше, чем больше концентрация CaO в жидкой фазе.

Гидратация двухкальциевого силиката протекает аналогично описанной, но с меньшей скоростью, т.е. процесс достаточно длительный.

Взаимодействие $3\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3$ с водой в зависимости от температуры и щелочности среды, влажности, длительности и присутствия таких солей, как CaCO_3 , CaCl_2 , SiO_2 , гипса или силиката кальция сопровождается возникновением ряда новообразований. При этом образующиеся кристаллы новообразований могут быть гексагональной, пластинчатой, кубической, игольчатой или сферической формы. Каждой из перечисленных форм присущи свои свойства. Целит (C4AF) при гидратации дает обычно $3\text{CaO}\times\text{Al}_2\text{O}_3\times 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{CaO}\times\text{Fe}_2\text{O}_3\times\text{H}_2\text{O}$. При повышенной щелочности среды может возникать $4\text{CaO}\times\text{Fe}_2\text{O}_3\times 3\text{H}_2\text{O}$. Аналогично гидроалюминатам гидроферриты кальция способны образовывать комплексные соединения с $\text{CaSO}_4\times 2\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , SiO_2 и др.

Знание процессов взаимодействия цемента с водой в разных условиях, позволяет регулировать строительные свойства затвердевшего цемента и создавать современные многокомпонентные вяжущие вещества нового поколения, более эффективные, экономичные, экологически безопасные и конкурентоспособные.

Научной основой возможности применения минеральных добавок (МД) в составе цемента является теория В. Н. Юнга. Он разработал концепцию цементного камня, назвав его «микробетоном», и доказал, что в затвердевшем цементном камне содержится значительное количество непрореагировавших зерен цемента. Эти зерна могут быть заменены соответствующими фракциями минеральных добавок без снижения прочности материала. Данный подход открывает широкие возможности для оптимизации состава цемента и повышения эффективности его использования.

Основные положения по использованию минеральных добавок различного генезиса в цементных вяжущих изложены в работах В. А. Кинд

(1932), В. Н. Юнг (1951), П. П. Будников (1957), Ю. М. Бутт (1974). Развитие этого научного направления продолжили Н. И. Федьнин (1975), А. В. Волженский (1979), М. М. Сычев (1986), В. И. Соломатов (1989), Л. И. Дворкин (1991), В. Г. Батраков (1998), Н. Н. Шангина (1998), А. Е. Шейкин (1979), Ю.М.Баженов (2006), В. И. Калашников (2006) и др.

Создание новых прогрессивных, отвечающих требованиям времени вяжущих веществ, естественно, базируется на уже известных знаниях. Композиционные вяжущие обычно представляют собой смесь воздушного и гидравлического вяжущих и каких-либо специальных добавок, усиливающих те или иные их строительные свойства.

Получение высокоэффективных вяжущих веществ нового поколения сегодня сопровождается использованием сложных, с химической и минеральной точки зрения, составов компонентов с целью получения высококачественных бетонов разного функционального назначения с улучшенными, а иногда и с принципиально новыми свойствами и определенной заранее заданной структурой". В основу создания таких вяжущих положен принцип целенаправленного управления технологией на всех ее этапах: использование активных компонентов, разработка оптимальных составов, применение химических модификаторов, использование механохимической активации компонентов и некоторых других приемов.

По такому принципу было получено вяжущее низкой водопотребности (ВНВ) с повышенным содержанием суперпластификатора С-3 при использовании обычного портландцемента и активных наполнителей (золы, песка и др.).

Структура и свойства многокомпонентных вяжущих предопределяются выбором необходимых исходных материалов, а также их соотношением, дисперсностью и активностью. Дисперсность частиц вяжущего может в определенных условиях сыграть и негативную роль, вот почему каждый раз необходимо учитывать тонкость помола вяжущего. В настоящее время успешно

применяются различные ПАВ, исключая слипание (флокуляцию) тонких частиц вяжущего.

Использование дополнительного измельчения традиционного портландцемента позволило получить целую серию так называемых тонкомолотых цементов (ТМЦ).

1.2 Физико-химические особенности структурообразования композиционных цементных композитов и бетонов на их основе

Большинство строительных материалов представляют - собой сложные многокомпонентные системы, состоящие из более простых по строению подсистем. Эти подсистемы не равнозначны и имеют общие для всех дисперсных систем фундаментальные физико-химические признаки: гетерогенность, то есть наличие поверхности раздела между фазами, и дисперсность (раздробленность). Роль этих факторов в проявлении разнообразных свойств дисперсных систем и прежде всего их агрегативной и седиментационной устойчивостей становится более существенной по мере увеличения дисперсности и соответствующего уменьшения размера частиц и их концентрации в жидкой и газовой дисперсионных средах.

Изучение процессов структурообразования строительных композитов целесообразно на основании положений физико-химической механики дисперсных систем. Главной общей особенностью объектов физико - химии дисперсных систем, к которым можно отнести многие вторичные продукты промышленности, сильно развитая межфазная поверхность и, как следствие, большое значение избыточной поверхностной энергии Гиббса [26, 28].

Как правило, реальные системы полидисперсны, т.е. содержат широкий спектр частиц по размеру, причем некоторая доля частиц обычно имеет размер, характерный для области коллоидной дисперсности, что резко увеличивает значение удельной поверхности [31, 82]. Но поскольку избыточная межфазная энергия Гиббса пропорциональна удельной поверхности, то

высококонтрированные полидисперсные системы отличаются весьма высокой концентрацией этой энергии.

Дисперсные системы с развитой поверхностью и высокой концентрацией характеризуются самопроизвольным образованием пространственных структур, которые определяют основные для них структурно-механические свойства. Образование пространственных структур в высококонтрированных дисперсных системах связано непосредственно с атомными или коагуляционными контактами. Такие структуры возникают самопроизвольно, поскольку в соответствии с принципом Гельмогольца их образование сопровождается уменьшением избыточной межфазной энергии Гиббса и соответствующим ростом энтропии системы, а процесс структурообразования завершается формированием термодинамически устойчивых структур [26].

Закономерности структурообразования композиционных строительных материалов на различных структурных уровнях наиболее полно раскрываются в рамках полиструктурной теории [26, 63, 75, 82]. При анализе структур строительных материалов выделяются определенные их типы по размерному признаку, например, субмикроструктура на уровне продуктов новообразований минеральных вяжущих; микроструктура на уровне цементного камня; мезоструктура – растворная часть и микроструктура на уровне крупного заполнителя. Существование различных уровней структурных неоднородностей позволяет рассматривать строительные материалы как полиструктурные или сложносоставленные системы, организованные по принципу «структура в структуре». То есть структура любого низшего уровня является составляющей структуры более высокого уровня. Поэтому изменение любого параметра структуры ведет к изменению уровней, характеризующих готовый материал.

Объединение структур в композиционных материал следует рассматривать не как их сложение на каждом масштабном уровне с образованием структур более высоких масштабных уровней. Взаимодействие

двух структур одного или разного уровня структурных неоднородностей ведет к образованию новой структуры, в которой происходит трансформация свойств ее составляющих.

Взаимодействие дисперсных частиц в дисперсной системе осуществляется через межчастичные контактные связи [28, 72, 80, 82]. Прочность связей (контактов) между частицами твердых фаз зависит от физико-химической природы поверхностных частиц и дисперсионной среды. В случае, если сила взаимодействия со средой выше энергии взаимодействия друг с другом, то частицы взаимодействуют через дисперсионную среду. Так называемые структуры с коагуляционными контактами, которые образуются между частицами твердых фаз, разделенных прослойками жидкой дисперсионной среды. В остальных случаях частицы стремятся осуществить непосредственный точечный контакт (характерный для высокодисперсных порошков).

Образование контактов сопровождается высвобождением энергии, вызывающей упругие напряжения, что может вызвать начальное деформирование зоны контакта. Пластическое деформирование зоны контакта. Пластическое деформирование увеличивает площадь контакта и ведет к возрастанию высвобождающейся поверхностной энергии. В результате увеличивается абсолютное значение прижимной силы и силы сцепления между частицами дисперсионной фазы.

Контактные взаимодействия частиц сопровождается своеобразным процессом спекания [15, 63]. Движущей силой спекания в общих позициях термодинамики является уменьшение термодинамического потенциала системы. Причем движущая сила процесса спекания тем больше, чем больше поверхностная энергия.

Анализируя свойства структурированных систем, поверхностные явления и закономерности формирования в них различных типов дисперсных структур, Ребиндер П.А. классифицировал структуры, формирующие тела, на два вида: к первому относится коагуляционная структура, образующаяся за счет слабых Ван-дер-Ваальсовых сил молекулярного взаимодействия между частицами.

Такие структуры могут формироваться за счет двух типов контактов - пленочных и точечных (атомных). При пленочных контактах молекулярное взаимодействие дисперсных частиц осуществляется через тонкую прослойку среды. Такие тонкие прослойки в местах контактов между частицами коагуляционной структуры определяют все ее свойства - способность к обратимому разрушению - восстановлению (тиксотропность), низкую прочность, пластичность и т.д.

Согласно Ребиндеру П.А. и его сотрудников [63], в вяжущих веществах кристаллические контакты обусловлены процессом срастания кристаллов и регулируются заданным уровнем перенасыщения. Сычев М.М. [76] рассматривает образование структуры как синтез твердого тела и следствие конденсации дисперсных систем. Он связывает способность материалов проявлять вяжущие свойства с влиянием продуктов, имеющих полярные группы. По этой теории предполагается, что твердение обусловлено образованием «стесненных условий», в которых частицы находятся так близко одна к другой, что начинают действовать силы дальней связи, и полярные группы на поверхности работают как кристаллизационные контакты валентного типа.

При разработке композиционных вяжущих и бетонов следует рассматривать их как сложную систему, состоящую из подсистем или элементов, каждый из которых выполняет свои функции. Элементы в системе не изолированы друг от друга, а сгруппированы так, чтобы обеспечить целесообразность всей системы (). Причем, структурная прочность, устойчивость, разрушение и восстановление дисперсной системы связаны между собой ().

Бетон представляет собой многокомпонентную систему, где последовательно в зависимости от масштабных уровней условно делится на: цементно-песчаный камень, цементная матрица (микробетон), цементирующее вещество, новообразования цементирующего вещества, твердая фаза новообразований, субстанция единичного структурного элемента

Следует отметить, что какие-либо изменения в отдельно взятом элементе или замена одного элемента на другой приводит обычно к изменению свойств всей системы. Элементы системы взаимосвязаны между собой и чем разностороннее связи, тем эффективнее система. Задача исследования заключается в правильном подборе элементов системы с учетом их свойств и вклада в общую структуру системы.

1.3 Вопросы и оценка эффективности использования золошлаковых отходов в составе вяжущих и бетонов

Эффективность производства цементных вяжущих и изделий из них в современном понимании должна оцениваться не только по экономическим, но и по экологическим аспектам. В приоритете должны учитываться вопросы снижения отрицательной нагрузки на окружающую среду, рационального использования природных ресурсов, разумного потребления цемента, широкого вовлечения техногенных отходов различных производств.

На всей территории СНГ выработка тепловой энергии обеспечивается в основном тепловыми электростанциями и локальными котельными, близ которых за многие годы скопились многотоннажные запасы потенциально ценных золошлаковых отходов (ЗШО).

Вопросам их использования не один десяток лет занимаются различные отечественные и зарубежные исследователи, в строительной индустрии теоретически широко изучены, но широкое и эффективное вовлечение в производство практически не реализовывается в полной мере.

На территории СНГ показатель потребления ЗШО составляет менее 10% от общего объема. Потребителей настораживает тот факт, что в ряде случаев они содержат экологически вредные примеси в виде соединений тяжелых металлов и количество естественных радионуклидов превышать гигиенические нормы. Однако, в результате долговременного вылеживания ЗШО в отвалах

происходит окисление несгоревшего топлива и естественное вымывание вредных соединений под действием атмосферных осадков.

Ценность ЗШО заключается в их низкой рыночной стоимости и способности проявлять пуццолановые свойства, снижая расход цемента до 30 % при сохранении его исходных характеристик.

В исследованиях В.Н. Юнга научно обоснована вероятность использования различных минеральных добавок (МД) в цемент, где доказано, что затвердевший цементный камень «микробетон» содержит большое количество непрореагировавших зерен цемента, которые можно заменить без потери прочности различными МД.

Минеральные добавки в виде ЗШО вполне пригодны для использования в качестве наполнителя в цементы благодаря схожести химического и минералогического состава.

За счет скрытой химической активности по отношению к $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и непосредственному участию в процессах структурообразования ЗШО позволяют увеличить концентрацию твердых частиц и компенсировать недостаток дисперсных частиц в матрице бетонной смеси. Разрушение структуры цементных композиций значительно снижается за счет снижения концентрации гидроксида кальция в твердеющей системе [9, 16].

Целенаправленное регулирование структуры цемента и бетона золошлаковыми отходами позволяет повысить прочность, деформативность, морозо-, химическую стойкость и соответственно долговечность строительных конструкций и сооружений на их основе. Полная или частичная замена природных заполнителей ЗШО позволяет снизить теплопроводность бетонов, снизить массу зданий и сооружений. Так при уменьшении массы бетона на 10 % стоимость конструкции снижается на 3 %.

Снижение себестоимости и энергоемкости продукции остается одной из ключевых задач строительного комплекса. В этом контексте использование золошлаковых отходов (ЗШО), которые являются одним из наиболее распространенных, но недостаточно востребованных видов отходов,

представляет значительный интерес для производителей строительных материалов. В настоящее время ЗШО в основном применяются в качестве мелкого заполнителя в бетонах, однако наибольший экономический эффект может быть достигнут за счет их использования в качестве минеральных добавок (МД) для цементов. Такой подход не только способствует снижению затрат, но и повышает экологическую устойчивость производства [8, 14, 17, 28, 45, 54, 67, 73, 90].

При сжигании угля на тепловых электростанциях образуются твердые золошлаковые отходы (ЗШО), которые представляют собой продукты высокотемпературной обработки (1200–1800 °С) минеральной несгораемой части угля. В камерных топках образуются два основных вида ЗШО: зола уноса (ЗУ) и зола шлаковая (ЗШ).

Для удаления золы из бункеров золоуловителей применяются два основных способа: гидравлический и пневматический. Наибольшее распространение получил гидравлический способ благодаря его эффективности и относительно низким эксплуатационным затратам.

Мелкодисперсная зола уноса (ЗУ) выносится из топки вместе с дымовыми газами и улавливается в процессе очистки в циклонах и электрофильтрах. При этом гранулометрический состав улавливаемой золы варьируется в зависимости от конкретного поля электрофильтра.

Зола шлаковая (ЗШ) образуется в результате слипания размягченных частиц золы внутри камеры топки или на ее стенках. Она накапливается в шлаковом бункере, расположенном под топкой, а затем удаляется гидравлическим или пневматическим способом. Размер частиц ЗШ составляет от 1 до 50 мм.

Независимо от условий образования ЗШО делятся на 4 группы:

- 1) высококальциевые ($\text{CaO} > 45 \%$);
- 2) среднекальциевые ($\text{CaO} = 20 \dots 45 \%$);
- 3) низкокальциевые ($\text{CaO} = 10 \dots 20 \%$);
- 4) сверхкислые ($\text{CaO} < 10 \%$).

Высококальциевые и среднекальциевые шлаки и золы целесообразно применять в качестве сырья для производства вяжущих веществ, тогда как низкокальциевые и сверхкислые отходы эффективно использовать в качестве активных добавок к цементам или заполнителей в тяжелых и ячеистых бетонах.

ЗШО 1-й и 2-й групп могут обладать самостоятельными вяжущими свойствами либо требовать незначительного введения активизатора для усиления их вяжущих характеристик.

ЗШО 3-й и 4-й групп способны служить основой для производства вяжущих веществ автоклавного твердения, а также использоваться в качестве кремнеземистого компонента. В зависимости от минералогического состава используемого топлива, способа и условий его сжигания, конструкции топок, способа улавливания и удаления золы и шлака ЗШО отличаются широким многообразием химического и минерально-фазового составов.

Мелкодисперсная зола-унос (ЗУ) выносится из топки вместе с дымовыми газами и улавливается в процессе очистки в циклонах и электрофильтрах. При этом гранулометрический состав улавливаемой золы варьируется в зависимости от конкретного поля электрофильтра и составляет от 5 до 100 мкм. Основным компонентом золы-уноса является стекловидная алюмосиликатная фаза, которая составляет 40–65 % от общей массы и представлена частицами шарообразной формы размером до 100 мкм. Удельная поверхность золы-уноса колеблется в пределах 1000–4000 см²/г, что во многих случаях приближается к удельной поверхности цемента. Благодаря стабильному химико-минералогическому составу зола-унос может использоваться для потребительских нужд без дополнительной подготовки [58].

Большинство электростанций, в том числе Бишкекская ТЭЦ, используют простой и надежный гидравлический способ, позволяющий перемещать ЗШО на расстояния 5–10 км от электростанции и совмещать гидротранспортирование и грануляцию шлака. В результате образуется золошлаковая смесь – механическая смесь золы и шлаков. Недостатком этого способа является большой расход воды [123].

Выбрасываемая из жерла трубопровода шлакозольная пульпа распределяется по площади отвала неравномерно: более крупные частицы оседают ближе к месту выброса, а более мелкие уносятся на значительные расстояния, формируя зольную зону отвала. В результате гранулометрический (зерновой) состав золошлаковой смеси варьируется по площади отвала. Эта неоднородность зернового состава также приводит к некоторой нестабильности химического состава, что снижает качество золошлаковых отходов как сырья для производства строительных материалов и осложняет их дальнейшее использование.

Из-за непостоянства состава и свойств ЗШО еще не создано единой их классификации и с целью наиболее рационального использования их классифицируют по различным признакам:

По физическому состоянию ЗШО представлены:

а) шлаком – продуктом спекания и оплавления наиболее легкоплавкой части золы с размером кусков до 15...25 см. В большинстве случаев шлак имеет малопористую стекловидную структуру. При сжигании бурых и смешанных каменных углей образуются пористые шлаки ячеистой структуры;

б) золой – техногенным отходом, образующимся на тепловых электростанциях в результате сжигания углей в пылевидном состоянии, с частицами размером менее 0,315 мм пористой структуры. Это тонкодисперсная масса с удельной поверхностью от 800 до 5000 см²/г;

в) золошлаковыми смесями (ЗШС) – техногенными отходами, образующимися при совместном гидроудалении золы и шлака.

По виду сжигаемого топлива золошлаковые отходы (ЗШО) классифицируют следующим образом:

– антрацитовые (А), образующиеся при сжигании антрацита, полуантрацита и тощего каменного угля;

– каменноугольные (КУ), образующиеся при сжигании каменного угля (за исключением тощего);

– буроугольные (Б), образующиеся при сжигании бурого угля.

По фазовому составу выделяют три основные составляющие:

- стекло , которое образуется при быстром охлаждении расплавленных компонентов топлива;
- частично закристаллизованная фаза , возникающая при медленном охлаждении шлакового расплава;
- аморфизованное вещество , представляющее собой неорганическую часть топлива.

Наиболее активной составляющей зол и шлаков является стекло. Аморфизованное глинистое вещество также обладает высокой активностью. В то же время частично закристаллизованная фаза характеризуется пониженной активностью. От соотношения этих трех фазовых составляющих и их индивидуальных свойств зависит гидравлическая активность зол и шлаков, что, в свою очередь, определяет возможные направления их использования.

В процессе сжигания твердого топлива (1200-1600 °С) минеральные примеси претерпевают изменения, образуя неорганические и органические фазы. Неорганическая фаза включает аморфную и кристаллическую составляющие. Аморфная составляющая может быть представлена стеклом и аморфизованным глинистым веществом. Кристаллическая составляющая включает, во-первых, слабоизмененные зерна минералов исходного топлива (кварц, полевые шпаты и другие термически устойчивые минералы), а во-вторых, кристаллические новообразования, (муллит, гематит, алюминат кальция и др.). Поэтому золы и шлаки ТЭЦ имеют сложный химический и минералогический составы [43].

В основе, лежит принцип генезиса. В соответствии с классификацией ЗШО, основанной на принципе генезиса, предложенной А. В. Волженским и соавт. [53] ЗШО относятся к третьей группе материалов, полученных путем твердофазовых реакций и взаимодействием твердых фаз с расплавом. Они делятся на высококальциевые ($\text{CaO} > 10\%$) и низкокальциевые ($\text{CaO} < 10\%$). Высококальциевые состоят из кристаллических фаз, низкокальциевые - из

аморфизованного глинистого вещества. Высококальциевые подразделяются на низкосульфатные ($SO_3 < 5\%$) от сжигания угля и торфа и сульфатные ($SO_3 > 5\%$) - от сжигания сланцев [121, 133, 134].

По химическому составу золы, т.е. по содержанию оксидов SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO и их соотношения делятся на два класса:

I – золы, затвердевающие в камневидное тело после смешения с водой;

II – золы, затвердевающие лишь после смешения с водой и известью, т.е. обладающие пуццолановыми свойствами.

По величине удельной поверхности золы делят на: тонкодисперсные ($S > 4000$ см²/г), среднелдисперсные 2000-4000 см²/г) и грубодисперсные ($S < 2000$ см²/г).

При насыпной плотности менее 800 кг/м³ золы считаются легкими, 800-1000 - средней плотности и более 1000 – тяжелыми.

Требования к химическому составу ЗШО, применяемые для производства различных видов бетонов и строительных растворов определены ГОСТ 25818-91 и ГОСТ 25592-91. Нормируется также содержание оксидов: оксида кальция CaO - 10 %, чтобы обеспечить равномерность изменения объема при твердении, свободного CaO - 5 %; оксида магния MgO - не более 5 %; верхний предел сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO₃ по требованиям сульфатостойкости - 3-6 % (в зависимости от вида исходного топлива); суммарное содержание щелочных оксидов Na₂O и K₂O - 1,5-3 % (в зависимости от вида сжигаемого топлива) во избежание деформаций при их реакции с заполнителями. В ЗШО присутствуют несгоревшие частицы твердого топлива (недожог). Потеря массы при прокаливании (п.п.п.) должна быть не выше 25 % в зависимости от вида исходного топлива.

Для определения возможности использования ЗШО необходимо знать основные классификационные признаки: модуль кислотности и основности, силикатный модуль и коэффициент качества. По данным показателям определяется тип зол и косвенно определяется их способность к самостоятельному твердению.

Показателем активности ЗШО как активных минеральных добавок является их гидравлическая активность, которая оценивается по коэффициенту качества $K = (CaO + MgO + Al_2O_3)/SiO_2$. Этот показатель указывает на способность взаимодействия оксидов SiO_2 и Al_2O_3 в щелочной среде гидроксида кальция, выделившегося при гидратации цемента с образованием в дальнейшем гидросиликатов и гидроалюминатов Ca. Причем, химическая активность ЗШО повышается с увеличением дисперсности стекловидной фазы, а кристаллическая фаза остается инертной.

Гидравлическая активность золошлаковых отходов может также оцениваться по «модулю активности» $M_a = Al_2O_3/SiO_2$, т.е. чем больше глинозема в ЗШО тем легче он гидратируется в щелочной среде. Интегральной характеристикой, обобщающей химический состав различных ЗШО является модуль основности $M_o = (CaO + MgO + Na_2O + K_2O)/(SiO_2 + Al_2O_3)$. Если $M_o < 1,0$, то ЗШО относится к кислым, при $M_o > 0,9$ сверхкислым. В данном случае важно знать количество стекловидной фазы, которая является носителем гидравлической активности. С повышением показателей M_a и M_o гидравлическая активность шлаков и зол возрастает.

Модуль кислотности: $M_k = (Al_2O_3 + SiO_2)/(CaO + MgO)$; Силикатный (кремнеземистый) модуль: $n = (SiO_2)/(Al_2O_3 + Fe_2O_3)$. В основном содержание $MgO + CaO$ до 40%, в том числе 5-20% свободного CaO, и кислые содержание SiO_2 более 45% и $(MgO + CaO)$ до 12%. Соблюдение нормативных требований к химическому составу зол ТЭС позволяет обеспечить надлежащую прочность и долговечность бетона.

Сравнительный анализ (табл. 1.1) Бишкекской золы и 11зол пылевидного сжигания каменных углей, показал, что по содержанию SiO_2 они относятся к кислым и не способны к самостоятельному твердению. Вяжущие свойства данных отходов могут проявляться при наличии щелочной среды, активации специальными добавками, условий твердения и т.п.

Таблица 1.1 – Химический состав зол ТЭС %

<i>Зола из отвалов</i>	<i>Si O₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃ + FeO</i>	<i>TiO₂</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>SO₃</i>	<i>K₂O+ Na₂O</i>	<i>П.п.п.</i>
Алма-Атинской ГРЭС	56,52	25,58	2,39	0,93	2,17	0,45	0,48	0,20	7,16
Бишкекской ТЭС	52,09	20,00	2,23	0,92	5,74	0,74	0,72	1,5	15,3
Карагандинской ТЭЦ	52,45	24,27	500,16	1,02	4,39	2,00	0,63	0,80	3,06
Жезказганской ТЭЦ	51,32	23,31	21,31	1,11	4,21	1,51	00,79	2,00	12,61
Целиноградской ТЭЦ	43,47	15,14	0,63	0,88	3,46	1,38	0,97	1,60	27,41
Ермаковской ГРЭС	60,00	25,47	0,18	1,14	2,22	0,90	0,82	-	0,70
Экибастузской ГРЭС	52,3	25,67	0,26	-	1,50	0,40	1,68	0,65	12,86
Павлодарской ТЭЦ-1	60,82	26,77	1,19	-	1,13	0,22	0,17	0,62	3,32
Петропавловской ТЭЦ	62,26	23,46	1,08	1,10	2,50	0,30	0,68	-	4,92
Усть-Каменогорской ТЭЦ	56,85	18,80	1,12	1,44	3,59	2,12	0,37	3,4	6,26
Новочеркасской ГРЭС	44,15	21,32	14,24	0,64	2,76	1,14	1,12	4,18	9,36

Наиболее рациональным решением для практической реализации утилизации ЗШО российскими исследователями предлагается установка оборудования для обогащения котельной золы ТЭЦ из золоотвала или непосредственно после узла мокрого золоудаления. Промышленные предприятия, образующие отходы ограничиваются их хранением или захоронением и не заинтересованы в получении стабилизированного продукта, соответствующего строительным СНиПам, ГОСТам для продажи потребителям. Из-за несовершенства технологической базы значительная часть перерабатываемого сырья переходит в категорию отходов.

Использование золошлаковых отходов (ЗШО) является актуальной темой в современной промышленности и экологии. В развитых странах индустрия вовлечения золошлаков в хозяйственный оборот планомерно развивается на протяжении нескольких десятилетий. В Германии технология использования летучей золы в производстве цемента применяется уже более 50 лет. В странах Евросоюза уровень утилизации зол ТЭЦ довели до 94,3 %, в Японии до 100 %, в Китае до 70,1 %, Индии до 67,0 %, США и Канаде до 54-56 %, Ближнем Востоке и Африке до 10,6 %. Во многих странах действуют программы, стимулирующие переработку промышленных отходов, включая ЗШО. За последние 40 лет в Австралии объем выбросов парниковых газов был снижен на 16 млн тонн благодаря использованию золошлаков при производстве цемента. В 2010 году страны Тихоокеанского региона (Китай, Индонезия,

Австралия) создали свою Азиатскую ассоциацию угольной золы (Asian Coal Ash Association), где регулярно публикуют отчеты и решения по переработке золошлаковых отходов.

Попытки систематизировать направления использования продуктов сжигания твердого топлива также можно найти и в отечественных исследованиях [41. 54. 67. ,113, 117 и др.].

В РФ вовлечения ЗШО в хозяйственный оборот на текущий момент составляет около 10 %. В Кыргызстане порядка всего 2-3%.

В столице Кыргызстана только Бишкекская ТЭЦ ежедневно выбрасывает в окружающую среду 20-25 тонн золы и различные соединения химических веществ. Среднегодовой объем золы и шлаковых отходов составляет 300-350 тысяч тонн и занимает 178 гектаров земель.

Как указано выше, строительная индустрия стоит на первом месте среди потенциальных потребителей данного техногенного продукта.

1.4 Особенности применения золы рисовой шелухи в составе вяжущих и бетонов

Зола рисовой шелухи (ЗРШ) является одной из наиболее эффективных активных минеральных добавок для цементных вяжущих и бетонных композитов. Она представляет собой побочный продукт сгорания рисовой шелухи и содержит высокое количество аморфного диоксида кремния (SiO_2), который активно участвует в процессах гидратации цемента.

Основным компонентом является аморфный кремнезём (SiO_2) (от 85% до 95%), который обладает высокой пуццолановой активностью и небольшие количества оксидов алюминия (Al_2O_3), железа (Fe_2O_3), кальция (CaO), калия (K_2O) и магния (MgO).

Высокая удельная поверхность ЗРШ (до $50 \text{ м}^2/\text{г}$) способствует эффективному взаимодействию с гидратными продуктами цемента.

Уникальность свойств ЗРШ в цементных композитах заключается в высокой пуццолановой активности, она вступает в реакцию с гидроксидом

кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образующимся при гидратации цемента, и способствует образованию дополнительного количества прочных гидросиликатов кальция (CSH-гелей). Это в свою очередь увеличивает прочность цементного камня, снижает его пористость и повышает долговечность. Уплотнение структуры цементного камня происходит вследствие того, что частицы золы обладают высокой дисперсностью и могут заполнять микропоры, улучшая плотность цементной матрицы. А это приводит к снижению пористости, повышению водонепроницаемости, морозостойкости и стойкости к агрессивным средам.

При возведении массивных бетонных конструкций ЗРШ снижает тепловыделение при его твердении, что соответственно уменьшает риск образования термических трещин. Также ЗРШ повышает коррозионную стойкость за счет снижения содержания свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в цементном камне, что повышает устойчивость бетона к сульфатной и щелочно-кремнезёмной коррозии, и улучшает сопротивляемость воздействию кислот и солей, продлевая срок службы конструкций.

Замещение части цемента ЗРШ позволяет снизить расход цемента, сокращая выбросы CO_2 и снижая затраты. Также утилизация рисовой шелухи решает проблему отходов в сельскохозяйственной и перерабатывающей промышленности.

Зола рисовой шелухи является уникальной активной минеральной добавкой для цементных вяжущих, обладающей высокой пуццолановой активностью и способствующей улучшению прочности, долговечности и экологичности строительных материалов. Оптимизация её применения в цементных композициях открывает перспективы создания эффективных и устойчивых строительных технологий.

1.4 Экологические и экономические аспекты использования отходов топливно-энергетического и растительного производств.

Использование отходов топливно-энергетического (золошлаковые отходы ТЭС) и растительного (зола рисовой шелухи, опилки, солома) производств в строительстве и других отраслях обладает значительными экологическими и экономическими преимуществами. Эти материалы, ранее считавшиеся отходами и загрязнявшими окружающую среду, теперь рассматриваются как ценные ресурсы. Ниже приведены ключевые аспекты и примеры их эффективного применения.

К экологическим аспектам относятся:

1. Снижение объема отходов на полигонах, поскольку золошлаковые отходы ТЭС и зола рисовой шелухи (ЗРШ) занимают значительные площади на полигонах, загрязняя почву, воду и воздух. Их использование в строительстве позволяет существенно сократить объемы захоронения. Например в Индии применение золы рисовой шелухи при производстве строительных блоков уменьшает объем её захоронения на 30–40%.
2. При использовании топливных отходов и золы рисовой шелухи в качестве частичной замены цемента или заполнителей позволяет снизить потребность в производстве цемента, сопровождающемся значительными выбросами CO₂. Например замена 10% цемента золой рисовой шелухи снижает выбросы CO₂ на 8–10%, учитывая, что производство 1 тонны цемента выбрасывает около 0,9 тонн CO₂.
3. Применение отходов в качестве альтернативных заполнителей (например, золошлаков вместо песка) уменьшает потребность в добыче природных ресурсов. Например в Китае золошлаковые отходы заменяют до 30% песка в бетоне, что снижает нагрузку на природные карьеры.
4. Переработка отходов предотвращает их попадание в окружающую среду, снижая уровень загрязнения почвы, воды и воздуха. В США, например, золошлаковые отходы используются для стабилизации грунтов, предотвращая

их вымывание в водоемы. Например, в Индии зола рисовой шелухи (ЗРШ) используется для стабилизации грунтов и производства бетонных блоков, что снижает затраты на 15–20%. В Китае и Вьетнаме ЗРШ применяют для изготовления легких бетонных блоков, что позволяет уменьшить их стоимость на 10–12%. В США золошлаковые отходы ТЭС используют для производства бетона с повышенной устойчивостью к сульфатной агрессии, увеличивая срок службы конструкций на 20–30%.

Экономические аспекты:

1. Снижение затрат на сырье, поскольку золошлаки и зола рисовой шелухи, обладают низкой стоимостью или предоставляются бесплатно, что удешевляет производство строительных материалов. Например в Индии применение золы рисовой шелухи при производстве бетонных блоков снижает их себестоимость на 15–20%. В США золошлаки применяются для производства бетона с высокой устойчивостью к сульфатной агрессии, что увеличивает срок службы конструкций на 20–30%.
2. Снижение затрат на утилизацию отходов за счет уменьшения расходов на их транспортировку и захоронение. Так в России применение золошлаковых отходов ТЭС при производстве цемента снижает затраты на их утилизацию на 20–30%.
3. Повышение эффективности производства при использовании отходов улучшает свойства строительных материалов, такие как прочность, долговечность и теплоизоляция, повышая их рыночную стоимость. В Китае, например, бетон с добавлением золы рисовой шелухи демонстрирует повышенную прочность и морозостойкость, что делает его более конкурентоспособным. В Индии ЗРШ используется для стабилизации грунтов и производства бетонных блоков, что сокращает затраты на 15–20%.
4. Создание новых рынков и рабочих мест в отрасли по переработке отходов. Так Индии и Вьетнаме переработка золы рисовой шелухи в строительные материалы открыла новые рабочие места в сельских районах.

В настоящее время остается весьма острой проблема утилизации золошлаковых отходов, которые десятилетиями лежат «мертвым грузом» и накапливаются в золошлакоотвалах. Золошлаковые отходы создают опасность загрязнения окружающей среды содержащимися в них токсичными веществами и тяжелыми металлами. В зонах воздействия золоотвалов создается неблагоприятная экологическая ситуация из-за пылеобразования, а также вымывания компонентов золы, попадания их в почву и подземные воды, что, в свою очередь, оказывает негативное воздействие на растительность и здоровье человека.

Так типичная угольная ТЭЦ мощностью 500 МВт ежегодно образует 740 тыс т. золы [21]. На Иркутской ТЭЦ [17], ежегодно выбрасывается более 2 млн т. золы и шлака при сжигании 12 млн т угля. Крупнейшая ТЭЦ в Индии мощностью 2100 МВт сжигает 9 - 10 млн т угля в год с образованием 3-4 млн т. золы [22, 23].

В Кыргызстане одной из крупнейших теплоэлектростанций является Бишкекская ТЭЦ ежегодно вырабатывает почти 1 млрд. кВт-часов электро- и более 2 млн гигакалорий тепловой энергии. Суточный расход угля летом составляет 3,5 тыс. тонн, а зимой достигает до 7 тыс. тонн. БТЭЦ ежедневно выбрасывает в окружающую среду 20-25 тонн золы и различные соединения оксидов углерода, азота, серы и других химических веществ. Среднегодовой объем золы и шлаковых отходов составляет 300-350 тысяч тонн. Кроме того, золоотвалы Бишкекской ТЭЦ занимают 178 гектаров земель. Количество образующихся золошлаковых отходов неуклонно растет.

Земельные участки, загрязненные золоотвалами, представляют собой значительные территории в Кыргызстане, лишенные возможности для других видов использования и требующие затрат ресурсов. Специалисты оценивают, что в частном секторе этой страны производится более 100 тысяч тонн золы ежегодно. Кроме того, воздух Кыргызстана насыщен обычной угольной пылью, образующейся при добыче угля на 41 месторождении по всей стране. Количество этой пыли достигает более 3 тысяч тонн ежегодно. К сожалению,

нет точной информации о том, сколько пыли выделяется углем в процессе его перемещения от месторождения до точек продажи, а также при массовых точках продажи. В общем, каждая тонна угля приносит ущерб Кыргызстану свыше 21 доллара США. Ежегодно страна причиняет природе и окружающей среде ущерб, оцениваемый примерно в 50 миллиардов долларов

Использование отходов топливно-энергетического и растительного производств в строительстве и смежных отраслях приносит значительные экологические и экономические выгоды. Оно позволяет снизить затраты на сырье и утилизацию, уменьшить выбросы CO₂, сохранить природные ресурсы и создать новые рынки. Международный опыт подтверждает, что такие технологии успешно применяются, принося реальную пользу экономике и экологии.

Таким образом, применение золошлаковых отходов ТЭС и золы рисовой шелухи в вяжущих и бетонах является экономически выгодным и экологически обоснованным решением.

Заключение по главе 1

- Опираясь на основные теоретические модели (Байкова, Волженского, Юнга и др.), объясняющие механизмы гидратации, спекания и коагуляционных контактов в дисперсных системах, имеются все предпосылки целенаправленно управлять микроструктурой цементного камня.

-использование зол ТЭС позволяет управлять процессами структурообразования, регулировать подвижность бетонной смеси, скорость твердения и прочность в заданном возрасте;

-использование активных минеральных добавок, к которым можно отнести золошлаковые отходы, обеспечивает снижение стоимости цементных вяжущих, повышение физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов на их основе;

-повышение эффективности применения золошлаковых отходов как наполнителя в цементы может быть достигнуто за счет использования

механохимических процессов активации и в качестве заполнителей при их классификации;

-использование топливных отходов в вяжущих и бетонах экологически и экономически целесообразно: во-первых, значительный ростом цен на цемент, природные заполнители, энергоносители и, во-вторых, ухудшение экологической ситуации в результате образования и накопления промышленных отходов. При этом на производство вяжущих из зольных отходов ТЭС затрачивается в 4 - 5 раз меньше электроэнергии и они в 2 - 3 раза дешевле цемента.

- Уникальность свойств золы рисовой шелухи (ЗРШ) в цементных композитах заключается в высокой пуццолановой активности, она вступает в реакцию с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образующимся при гидратации цемента, и способствует образованию дополнительного количества прочных гидросиликатов кальция (CSH-гелей). Это в свою очередь увеличивает прочность цементного камня, снижает его пористость и повышает долговечность.

- широкое вовлечение золошлаковых отходов и золы рисовой шелухи в состав композитных вяжущих веществ открывает перспективы создания инновационных, экономически выгодных и экологически безопасных строительных материалов, отвечающих современным требованиям к качеству и энергоэффективности.

- Использование отходов не только снижает себестоимость производимой продукции (до 2–3 раз дешевле традиционного цемента), но и существенно уменьшает затраты на утилизацию и транспортировку техногенных материалов.

- Применение активных минеральных добавок позволяет сократить выбросы CO_2 , снизить потребление природных ресурсов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду, что особенно актуально в условиях современных требований к экологической безопасности строительства.

ГЛАВА 2 ХАРАКТЕРИСТИКА СЫРЬЯ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Характеристика сырьевых материалов

Портландцемент

Для приготовления композиционного вяжущего вещества и бетонов на их основе использовался портландцемент Кантского цементного завода ПЦ 400 Д20 (ГОСТ 10178-85, 30515-97) следующего химического состава, %: SiO₂ - 22,44; Al₂O₃ - 4,65; Fe₂O₃ - 4,11; CaO - 65,59; MgO - 1,75; SO₃ - 0,33; п.п.п. - 0,2. Минералогический состав портландцемента, %: C₃S - 63,3; C₂S - 15,9; C₃A - 5,4; C₄AF - 12,5.

Нормируемыми показателями качества портландцемента являлись: тонкость помола, нормальная густота цементного теста, сроки схватывания, равномерность изменения объема, активность цемента при пропаривании, а также прочность при изгибе и сжатии (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Физико-механические характеристики портландцемента

Показатели	Цемент КЦЗ М 400
Тонкость помола, проход через сито 008, %	87
Нормальная густота, %	24
Начало схватывания, ч-мин.	1-36
Конец схватывания, ч-мин	7-27
Прочность на изгиб после ТВО, МПа	4,12
Прочность на сжатие после ТВО, МПа	19,32
Прочность на изгиб после 28 суток НУ, МПа	6,88
Прочность на сжатие после 28 суток НУ, МПа	33,46

Заполнители

- Песок полевошпатовый Васильевского месторождения. По минералогическому составу песок представлен, (%): кварц -56,69; полевой шпат -12,23; темноцветные минералы -18,8; слюда- 0,4. Гранулометрический состав представлен в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав Васильевского песка

1	№ сит, мм	Поддон	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14
2	Частный остаток на ситах, %	5,3	13,5	12,5	18,5	29,0	21,0
3	Полный остаток на ситах, %	99,8	13,5	26,0	44,5	73,5	94,5

- Песок искусственный Чуйский с насыпной плотностью $\rho = 1420$ кг/м³, содержанием илистых и глинистых частиц 6,8%, водонасыщенностью 1,2 % и модулем крупности $M_k - 2,55$ (ГОСТ 8735-88).

- Песок природный Аламединского месторождения с насыпной плотностью $\rho = 1420$ кг/м³. Содержание илистых и глинистых частиц 8,6% и водонасыщением 4,2 %. (ГОСТ 8736-2014). Модуль крупности 2,8–3,26 ГОСТ 8735-88. Гранулометрический составы песка Аламедин и ЧУ приведен в таблице 2.3, основные физико-механические характеристики в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Зерновые составы песков месторождения Аламедин и ЧУ

Песок	Параметр	Диаметры отверстий сит, мм						
		поддон	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5
Чу	Остаток на сите, г	70	100	155	205	110	360	0
	Частный остат., %	7	10	15,5	20,5	11	36	0
	Полный остат., %	100	93	83	67,5	47	36	0
	Полный прох., %	0	7	17	32,5	53	64	100
	Аламедин	Остаток на сите, г	10	100	500	210	80	100
дин	Частный остат., %	1,0	10,0	50	21	8	10	0
	Полный остат., %	100	99	89	39	18	10	0
	Полный прох., %	0	1	11	61	82	90	100

Композиционные вяжущие вещества

Композиционные вяжущие вещества готовились на основе портландцемента ПЦ-400 Д20 (табл. 2.1). В качестве наполнителя в цемент использовались ЗШО в виде золы гидроудаления, золошлаковой смеси и шлака.

Изучалось влияние топливных отходов (зола ГУ, ЗШС, топливный шлак) и отхода растительного производства – золы рисовой шелухи на основные физико-механические характеристики композиционного вяжущего при

различных способах (механическое перемешивание измельченных отходов или совместное измельчение с цементом) их введения в цемент:

1. ЦЗВ_м – механическая смесь просеянной золы гидроудаления и цемента;
2. ЦЗВ_и - активированная совместным помолом смесь золы гидроудаления и цемента;
3. ЦЗШВ_м - механическая смесь просеянной золошлаковой смеси и цемента;
4. ЦЗШВ_и- активированная совместным помолом смесь золошлаковой смеси и цемента;
5. ЦШВ_м - механическая смесь просеянного шлака и цемента;
6. ЦШВ_и- активированная совместным помолом смесь топливного шлака и цемента;
7. ЦШВ_{пм}- механическая смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;
8. ЦШВ_{пи} - активированная совместным помолом смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;
9. ЗРШВ - механическая смесь золы рисовой шелухи и цемента.

Химические добавки

- *пластифицирующая поликарбоксилатная добавка*. В качестве добавки выбрана пластифицирующая поликарбоксилатная добавка для сборного бетона (Neolit 303 - 0,4-0,8 %). Применяется для изготовления сборных бетонных и железобетонных изделий всех классов с использованием ТВО, для приготовления бетонных смесей при изготовлении монолитных буронабивных свай, а так же сборных бетонных изделий с 100% отпускной прочностью.

- *Высоководоредуцирующая добавка MasterGlenium 116 и 197* применяется при производстве как товарного бетона, так и сборного железобетона. Эффективно работает в смесях любого класса подвижности. Прекрасно подходит для производства высокопрочных бетонов. Рекомендуемая дозировка составляет 0,4- 2,0% от массы цемента. Точное количество добавки подбиралось путем проведения пробных замесов.

Активные минеральные добавки.

В работе для оценки направленности использования топливных и растительных отходов они подразделялись на: золошлаковую смесь (ЗШС), золу-гидроудаления (ЗГУ), топливный шлак (ТШ) и зола рисовой шелухи (ЗРШ).

- Зола гидроудаления Бишкекской ТЭЦ при влажностью 40-50% пневмонасосом транспортируется в измельченном виде в специально приготовленное место, находящееся в ж/м Бакай –Ата. Отобранные пробы для испытаний из золоотвалов после естественной сушки имели влажность -0,7%.

- Золошлаковая смесь, поступающая из топок котельных обычно хранится под навесом и периодически поливается водой для снижения запыленности (влажность -1%).

- Топливный шлак образуются при сжигании углей в пылевидном состоянии, и представляют собой плотную массу высокой прочности. Шлаки ТЭС, которые образуются в результате горения топлива на колосниковой решетке в виде кусков, имеют несколько большую пористость и меньшую прочность.

Анализ химического состава топливных отходов показывает, что пробы золошлаковой смеси и золы гидроудаления по содержанию кремнезема (SiO_2), глинозема (Al_2O_3) и оксидов железа ($\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$) идентичны. Химический состав: SiO_2 -52.09%; Al_2O_3 -20,0%; Fe_2O_3 -2,23; CaO -5,74 и др.н.ч. 11%.

Химический состав топливного шлака несколько иной, отличие весьма высокое содержание оксидов железа (5,2%), в т.ч. закиси железа -3,96%, что, по-видимому, обуславливает повышенное содержание расплава и образование топливного шлака.

Исследуемые золы гидроудаления (ЗГУ) Бишкекской ТЭС, являются продуктами жидкого шлакоудаления из топки и состоят из зольной составляющей (частицы золы и шлака размером менее 0,315 мм) и шлаковой, включающей песок – 0,315 до 5 мм и шлаковый щебень – зерна свыше 5 мм.

Химический состав золошлаковых материалов и золы рисовой шелухи приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Содержание основных оксидов в топливных отходах и золе рисовой шелухи, %

Наименование топливного отхода	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	ппп
Золошлаковая смесь	52,09	20,00	1,44	0,79	5,74	0,74	0,72	0,92	0,02	1,0	0,5	15,30
Зола-гидроудаления	52,00	21,58	0,97	1,30	6,47	1,14	0,21	1,05	0,01	1,7	0,9	12,13
Топливный шлак	54,95	20,56	1,06	3,96	7,67	2,22	0,17	0,88	0,10	1,2	2,4	4,07
Зола рисовой шелухи	81,3	4	4	-	5	3	-	-	-	-	-	-

Золошлаковые отходы БТЭЦ относятся к кислым золам, которые не обладают вяжущими свойствами, но в составе композиционного цементного вяжущего при его твердении приобретают способность взаимодействовать с гидроксидом кальция, т. е. проявляют пуццолановую активность при обычной температуре. Продуктами обжига в золе являются глины, которые представляют собой по результатам исследований, аморфизированное вещество в виде метакеолинита, алюмосиликатного вещества, аморфных SiO₂, Fe₂O₃ и Al₂O₃. Данные продукты обладают различной реакционной активностью к Ca(OH)₂. Большею активностью обладает метакеолинит высокой удельной поверхности и при взаимодействии с гидроксидом Ca образует гидросиликаты кальция и гидрогеленит. При повышенных температурах обжига продукты разложения каолинита образуют кремнезем и глинозем меньшей активности, которые вследствие спекания и кристаллизации имеют меньшую удельную поверхность. В золах алюмосиликатная фаза, кварц, полевые шпаты при обычной температуре малоактивны, но при повышенных температурах их реакционная способность возрастает.

Как отмечает А.В. Волженский, увеличение гидравлической активности аморфизированного глинистого вещества обусловлено его высокой удельной поверхностью, которая является результатом распада метакеолина (Al₂O₃ × 2SiO₂) на аморфный (SiO₂ и Al₂O₃) кремнезем и глинозем.

Известно, что количество растворимой кремнекислоты в золах изменяется в пределах 1,5 - 6,0%, а содержание свободного глинозема составляет 0,2 - 2,7%.

Оценка активности золы гидроудаления определялась по ее способности поглощать известь из известкового раствора, где установлено, что в течении 28 суток из известкового раствора поглощение CaO возрастало от 0 до 52,1 мг/зола, г.

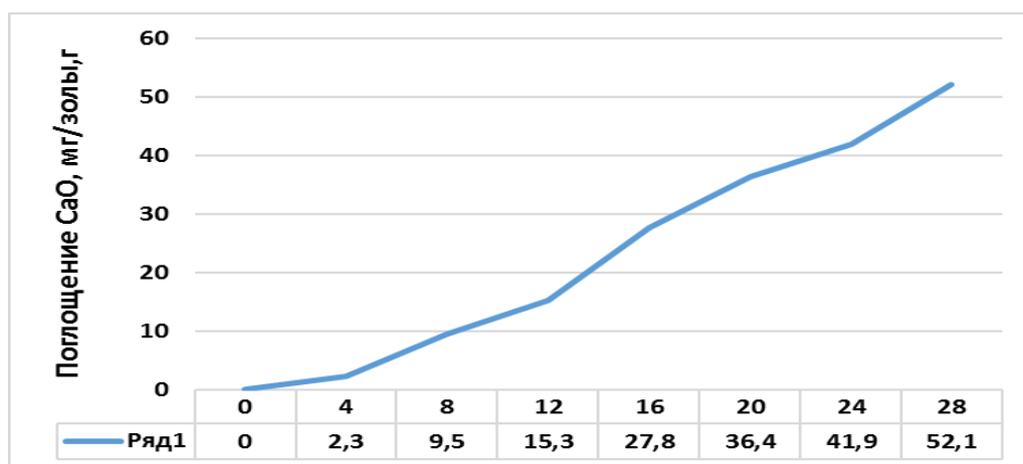


Рис. 2. 1. Поглощение CaO (активность) золой гидроудаления БТЭЦ

В процессе гидратации цемента с кислыми зольными отходами при повышенном содержании жидкой фазы (НГ= 26- 28 %) образуются гидросиликаты группы CSH(B) повышенной прочности.

Анализ химического состава исследуемой золы гидроудаления и золошлаковой смеси показывает, что в них практически отсутствует свободная известь. Содержание CaO в химическом составе обусловлено наличием кальцита. Зольные материалы характеризуются содержанием потерь при прокаливании (12,13...15,30); достаточно высоким содержанием глинозема (Al₂O₃) - 20,00...21,58. По содержанию в топливных отходах несгоревших угольных частиц (НУЧ) (11-12%) и водорастворимых сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO₃ (0,17-0,72%) золы соответствуют требованиям технической документации. Основные качественные показатели исследуемых ЗШО представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные показатели исследуемых ЗШО

Показатель	Норм, показатель	Вид топливного отхода		
		Зола ГУ	ЗШС	Топлив-й шлак
Удельная поверхность см ² г (в числителе немолотая зола, в знаменателе молотая)	Не менее 150 м ² /кг, а полный остаток № 008 не более 30%	223/390		
Содержание SiO ₂ +Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , по массе	содержание > 45% SiO ₂ - кислые	74,47	73,53	76,57
Содерж. сернистых и сернокислых соед. в пересчете на SO ₃ по массе	Не >3%	0,72	0,21	0,17
Содержание свободного CaO, по массе	Не > 10% по массе	6,47	5,74	7,67
Содержание MgO, % по массе	Не > 5% по массе	1,14	0,74	2,22
Содержание Al ₂ O ₃ , % по массе	Не норм-ся	21,58	20,00	20,56
Содержание % по K ₂ O+Na ₂ O массе	Не более >3%	2,6	1,5	3,6
Потери при прокаливании, % по массе	Не более >25%	12,13	15,30	4,07

Исследуемые ЗШО соответствуют ГОСТ 25592-91 «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов».

- Зола рисовой шелухи относится к высшему классу пуццоланов. Она обладает очень высокой удельной поверхностью и высоким содержанием диоксида кремния, что обеспечивает ее высокую пуццолановую активность. Пуццоланическая активность определяется присутствием в их составе аморфного кремнезема, который взаимодействует с Ca(OH)₂ с образованием высокодисперсных гидросиликатов кальция с повышенными вяжущими свойствами. Это способствует как увеличению прочности, уменьшению размеров пор и снижению проницаемости бетона. Благодаря своему химическому составу, т.е. высокому содержанию SiO₂ -81,3 ЗРШ использовалась в качестве наполнителя в цемент.

2.2 Методики проведения исследований

Таблица 2.11 – Методы проведения испытаний

Характеристика свойств	Методика испытаний
Определение НГ ЦЗВ.	ГОСТ 310.3-76 [14].
Определение водопотребности.	ГОСТ 310.4-81 [15].
Оценка гидравлической активности.	ГОСТ 310.4-81 [15].

Плотность, водопоглощение.	ГОСТ 12730.3-78 [6]
Содержание СаО _{св} .	ГОСТ 25818-91 [10];
Содержание (СаО _{св}) и (MgO).	ГОСТ 310.3-76, ГОСТ 23227-78 [8; 14].
Содержание НУЧ.	ГОСТ 11022-95 [5].
Тонкость помола	ГОСТ 310.2.76.
Цементы. Методы испытаний. Общие положения.	ГОСТ 310.1-76
Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии.	ГОСТ 310.4-81
Песок стандартный для испытаний цемента.	ГОСТ 6139-91
Песок для строительных работ. Методы испытаний.	ГОСТ 8735-88
Смеси бетонные. Методы испытаний.	ГОСТ 10181-2000
Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам	ГОСТ 10180-2012
Содержание несгоревших частиц	ГОСТ 25592-83; ОСТ21-60-84
Удельная поверхность на приборе ПСХ-2.	ГОСТ 310.2-80
Нормальная густота	ГОСТ 310.4-86
Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний (с Изменениями N 1, 2, с Поправкой)	ГОСТ 9758-86
Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний	ГОСТ 9758-2012

2.3 Физико-химические методы исследования

Химический анализ сырьевых материалов проводился в условиях Центральной лаборатории Государственного агентства по геологии и минеральным ресурсам при правительстве Кыргызской Республики. Химический анализ заключается в последовательном определении гигроскопической влаги сырья, потерь при прокаливании, определении нерастворимого остатка и последовательном определении оксидов кремния, алюминия и железа, кальция, магния, щелочей и серного ангидрида.

Для определения фазового состава сырьевых материалов и продуктов гидратации вяжущих были проведены рентгенографические исследования на установке ДРОН -2 при C_{α} K_{α} –излучении, фильтр Ni и дериватографический анализ основан на записи дифференциальной кривой, характеризующей

термические записи, протекающие в образце при соответствующих температурах. Запись проводится с помощью дифференциальной термопары.

2.4 Эффективность применения экспериментально-статистического моделирования для решения задач утилизации промышленных отходов в производстве композиционных строительных материалов

В последние годы математическая теория эксперимента в строительном материаловедении доказала свое преимущество и стала одним из действующих инструментов научно-исследовательских работ, повышающих их качество и эффективность [38, 39, 216 и др.].

Опыт использования экспериментально-статистических моделей (ЭСМ) для анализа и оптимизации композиционных материалов, содержащих вторичные продукты промышленности показал, что именно ЭСМ в виде многофакторных нелинейных полиномов являются предпочтительными для решения конкретных задач как повышения качества композитов, так и экономии материальных ресурсов, причем отмечаются две важные особенности /38/.

Первая – вторичные продукты, как правило, «замещают» некоторую долю основных структурообразующих компонентов; эта доля максимизируется при сохранении нормативных уровней R_j норм. качества материала. Однако такая максимизация возможна при одновременном введении новых рецептурных (добавки-катализаторы, пластификаторы и др.) и технологических (интенсификация гидродинамических, тепломассообменных и других процессов) факторов, «компенсационных» по отношению к уменьшающейся доле основных компонентов. Это приводит к решению компромиссных задач о выборе зоны факторного пространства, в которой обеспечивается комплекс R_j норм.

Вторая – замещение основных компонентов, имеющих достаточно стабильные (а нередко и гарантированные) показатели, производится «отходом», у которого

состав и свойства могут (без ущерба для качества основной продукции промышленности) флюктуировать весьма широких пределах, что приводит к нестабильности технологии и качества композиционных материалов. Поэтому модели должны включать факторы, отражающие важнейшие техногенные свойства вторичных продуктов; в ряде случаев это потребует для проведения «активных» экспериментов создания смесей с искусственными химсоставами и дисперсностями, отличающимися от получаемых на данном предприятии [35]. При решении задачи утилизации отходов промышленности и использования их в качестве компонентов композиционных строительных материалов неотъемлемым и ответственным этапом является проведение активного эксперимента. Одним из действующих инструментов, повышающих качество и эффективность научно-исследовательских работ, является математическая теория эксперимента в строительном материаловедении [38, 39, 216].

В нашей стране и за рубежом накоплен большой опыт исследований с использованием математической теории эксперимента и их использовании [38, 39, 97], позволяющих количественно решать технологические задачи, абстрагируясь от некоторых физико-химических явлений, происходящих в системе. Математическое описание технологических явлений требует минимального количества опытов, из которых информация извлекается с максимальной полнотой, что позволяет сократить расход времени и средств на экспериментальные работы.

Эффективность результатов при решении прикладных задач на основании идей и методов математической теории эксперимента возрастает при переходе к исследованию сложных композиционных материалов, к которым относятся исследуемые материалы, отличающиеся многовариантностью рецептов, особенно при использовании вторичного сырья.

Из общего множества феноменологических моделей строительного материаловедения с позиций решения конкретных инженерных задач эффективны экспериментально-статистические модели (ЭС-модели),

количественно связывающие параметры состава и технологии с показателями свойств материалов [1, 2]. Имеется значительный опыт ЭС моделирования и статистической оптимизации технологии бетона, а использование традиционного подхода к моделированию не позволяет обеспечить получения такого уровня информации, который бы способствовал углублению как технологического, так и материаловедческого знания о путях модификации бетона.

Для оптимизации рецептурно-технологических факторов композиционных вяжущих и мелкозернистых бетонов реализовывались экспериментальные исследования по двух и трех факторным планам, и после статистической обработки результатов получены экспериментально-статистические модели второго порядка свойств для принятия инженерных решений (гл. 3, 4, 5,).

2.5 Методика расчета оптимального зернового состава по программе «GRANUMETRIK»

В практике строительного материаловедения и технологии строительных композиционных материалов, для получения кривой просеивания смеси заполнителей, близкой к оптимальной, недостаточно одного (иногда и двух) природных минеральных компонентов ввиду того, что кривые просеивания каждого материала отличаются одна от другой и далеки от оптимальной кривой. Необходимо либо вводить дополнительный компонент, либо корректировать соотношения имеющихся компонентов в проектируемой смеси. Методики подбора состава минеральной части строительных конгломератов, применяемые в настоящее время и описанные в соответствующих справочных и учебных пособиях, основаны на ручном (экспериментальном) подборе соотношения компонентов, заведомо не обеспечивающем наилучшего результата и весьма трудоемком.

Наиболее эффективным методом проектирования оптимального соотношения различных компонентов известного фракционного состава и

приближения гранулометрического состава смеси к эталонной кривой распределения является метод сложения эмпирических распределений частиц исходных компонентов с возможностью изменения их объемных (или массовых) долей в смеси.

В качестве основного критерия оптимальности в такой задаче рассматривается величина расхождения рассчитанного гранулометрического состава смеси компонентов и эталонного гранулометрического состава, выраженного оптимальной кривой распределения/ «идеальная» кривая просеивания.

«Корректировка состава сырьевой смеси» является основной составляющей программного продукта. В правой части формы представлен гранулометрический график, на котором изображены интегральные кривые распределения размеров частиц эталонного состава, исходного состава и проектируемого (скорректированного) состава, а также величина расхождения проектируемой кривой и эталонной. Масштаб оси абсцисс («типоразмеры частиц») можно представлять в натуральном и логарифмическом виде.

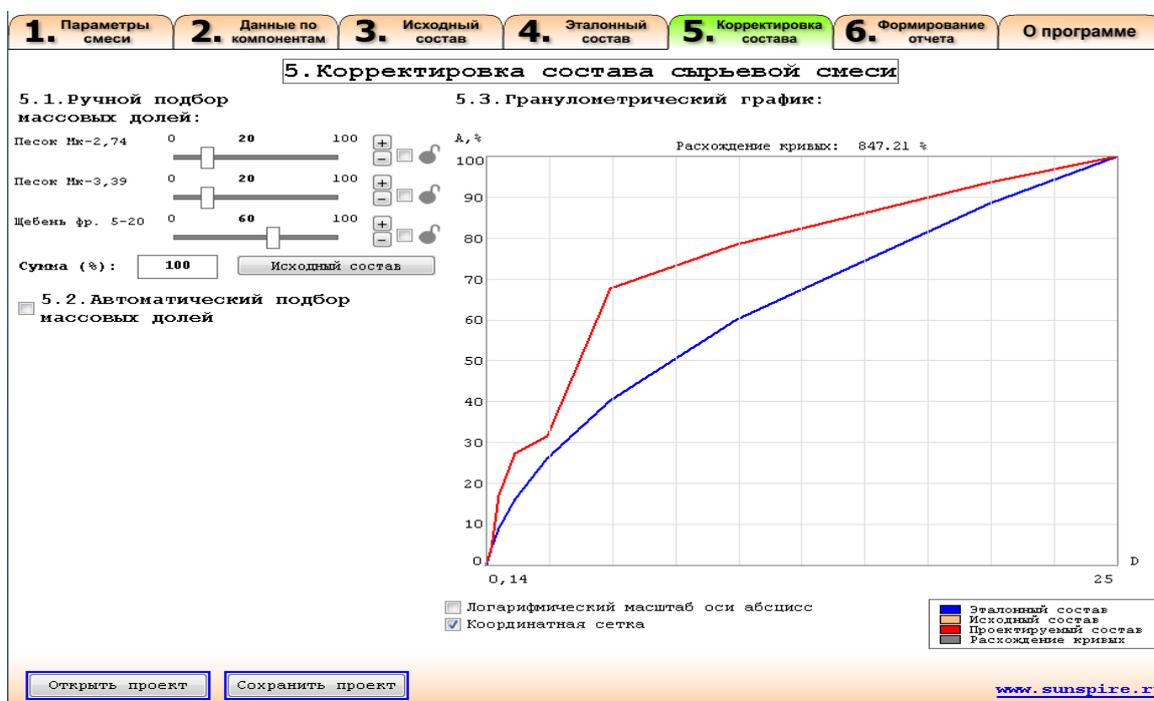


Рисунок 2.2 – Интерфейс программы «Granumetrik»

В процессе проектирования рассчитывается гранулометрический состав смеси, имеющий максимальное приближение к эталонной кривой, но поскольку результирующий состав определяется гранулометрией исходных компонентов, расхождение расчетной кривой и эталонной не всегда сводится к нулю, поэтому в работе применялся программа модуля корректировки зернового состава, позволяющий корректировать компоненты – «узких» фракций материала.

Данный модуль позволяет пересчитать зерновой состав проектируемой смеси с учетом добавления «недостающих» фракций в объемном и массовом соотношении Программный комплекс позволяет рассчитать эквивалентные зерновые составы исходных компонентов и итоговой смеси, аппроксимируя форму зерен материала идеальными сферами. Данная функция позволяет приблизительно оценить вероятную плотность упаковки выделенных в системе сферофракций, а также их удельную поверхность. Расчет количества эквивалентных сферофракций производится автоматически до того момента, пока дифференциальные гранулометрические графики исходного состава и эквивалентного полностью не совпадут [].

Заключение по главе 2

- золошлаковые отходы Бишкекской ТЭС можно отнести к 3 и 4 группе отходов и при соответствующей активации могут использоваться как наполнители к цементу и также как заполнители для бетонов различного назначения.
- для комплексного изучения возможности использования топливных отходов ТЭС в качестве наполнителя и мелкого заполнителя следует разделять их на: золошлаковая смеси, зола-гидроудаления, топливный шлак.
- Золошлаковые материалы (зола гидроудаления, ЗШС, топливный шлак) демонстрируют содержание SiO_2 примерно 52–55% и потери при прокаливании от 4,07% (топливный шлак) до 15,30% (ЗШС). Свободное CaO в этих материалах варьируется от 5,74% до 7,67%, что важно для их пуццолановой активности. По содержанию CaO не > 10%, MgO не > 5%, K_2O+Na_2O не >3%, SO_3 не >3%, потери при прокаливании не >25% соответствуют нормируемым

показателям согласно ГОСТ 25592-91. Технические условия «Смеси золошлаковые тепловых электростанций для бетонов».

- Зола рисовой шелухи отличается особенно высоким содержанием SiO_2 (81,3%), что обеспечивает ей высшую пуццолановую активность и делает её перспективным наполнителем для улучшения прочности и плотности цементного камня.

- проведение экспериментальных исследований при решении поставленных задач использования вторичного сырья необходимо реализовывать с применением комплексного подхода, состоящего из физико-химических, физико-механических и экспериментально-статистических методов исследования процессов и явлений.

- Использование методик планирования активного эксперимента исследований позволит построить экспериментально-статистические модели второго порядка, связывающие рецептурно-технологические параметры с конечными свойствами материалов, что позволит существенно сократить количество опытов без потери достоверности данных.

- Программный комплекс «GRANUMETRIK» применяется для расчёта оптимального зернового состава заполнителей, позволяя корректировать пропорции фракций для приближения гранулометрической кривой смеси к идеальной.

- Модуль корректировки позволяет пересчитывать объёмные и массовые доли «узких» фракций, что улучшает плотность упаковки смеси и, как следствие, повышает физико-механические свойства бетонов.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ И ЗОЛЫ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ И ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ СВОЙСТВ

Многочисленными исследованиями установлено, что в составе ЗШО различаются кристаллическая, стекловидная и органическая составляющие. Кристаллическое вещество представлено как первичными минералами топлива, так и новообразованиями, полученными в процессе сжигания, а также и при гидратации и выветривании в золоотвале. Всего в кристаллической составляющей ЗШО устанавливается до 150 минералов. Преобладающие минералы – мета и ортосиликаты, алюминаты, ферриты, алюмоферриты, шпинели, дендритовидные глинистые минералы, оксиды, в т.ч. кварц, тридимит, кристобалит, корунд, γ глинозем, окиси кальция, магния и др. Часто отмечаются в небольших количествах рудные минералы – касситерит, вольфрамит, станин и др., присутствуют сульфиды – пирит, пирротин, арсенопирит и др.; сульфаты, хлориды и очень редко – фториды. В результате гидрохимических процессов и выветривания в золоотвалах появляются вторичные минералы – кальцит, портландит, гидроокислы железа, цеолиты и др. [237,].

3.1 Исследование микроструктуры и основных физико-химических показателей золошлаковых отходов

Исследования топливных отходов ТЭЦ проводились на различных пробах, которые, в зависимости от метода отбора, условий горения и хранения, были разделены на золу гидроудаления, золошлаковую смесь и топливный шлак.

Детальный анализ золы гидроудаления (ГУ) с использованием электронного микроскопа позволил рассмотреть распределение сферических частиц и микроагрегатов в её микроструктуре при увеличениях $\times 246$, $\times 348$, $\times 718$, $\times 2210$ и $\times 37\,900$.

Видно, что поверхность частиц имеет остеклованную фактуру, а сами частицы в большинстве случаев имеют сферическую форму. Также наблюдаются стекловидные частицы неправильной формы (рис. 3.9–3.14). На

микрофотографиях немолотой золы гидроудаления при увеличении $\times 60$ и $\times 246$ видно, что зола состоит преимущественно из сферических дисперсных частиц с диаметром от 12 до 71 мкм (рис. 3.1).

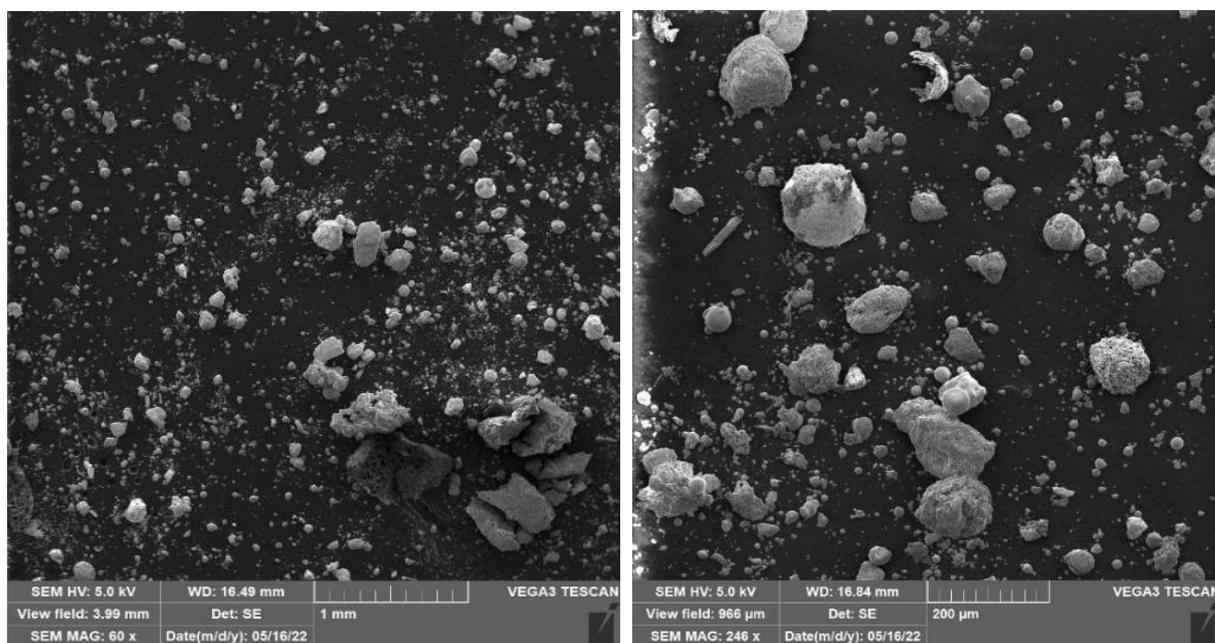


Рисунок 3.1 - Микроструктуры зола гидроудаления БТЭЦ ($\times 60$ и $\times 246$)

Наиболее ценным компонентом золы гидроудаления являются микросферы легкой фракции, представляющие собой мелкодисперсный порошок, состоящий из полых тонкостенных частиц сферической формы алюмосиликатного состава. Размер частиц варьируется в широком диапазоне: алюмосиликатные полые микросферы представляют собой дисперсный материал с размером частиц от 10 до 200 мкм.

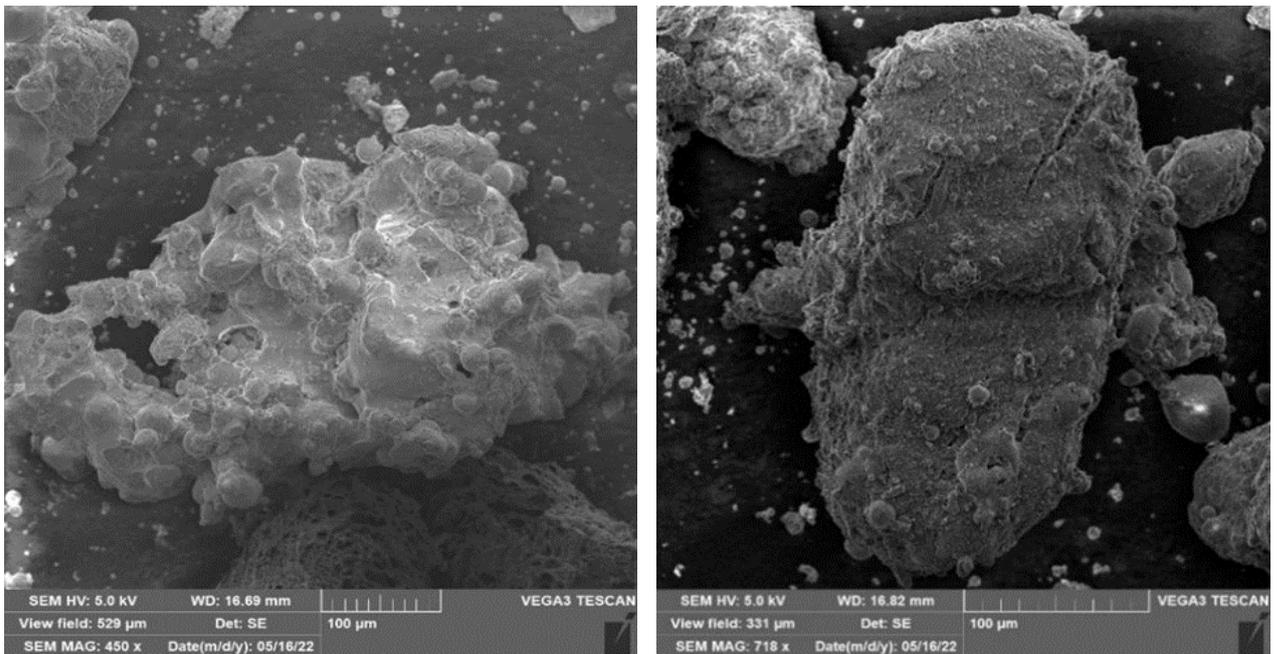


Рисунок 3.2 - Микроструктура золы гидроудаления БТЭЦ ($\times 450$ и $\times 718$)

При большем увеличении ($\times 450$ и $\times 718$) видно, что в золе гидроудаления присутствуют спекшиеся частицы неправильной формы, состоящие из мелких минеральных сферических частиц.

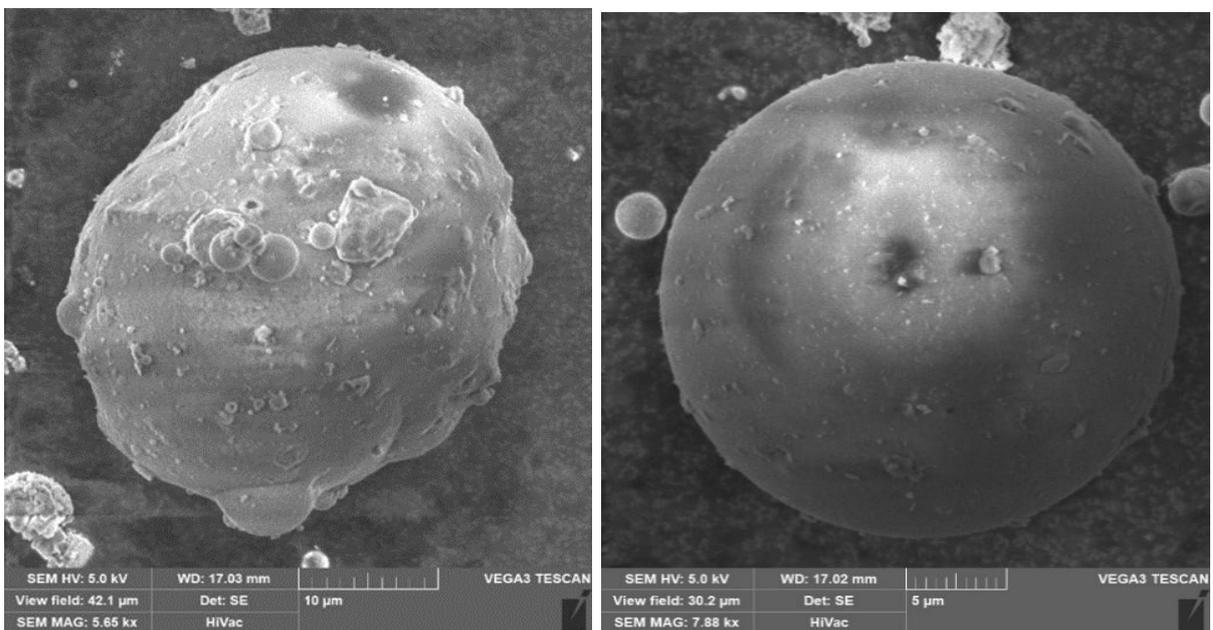


Рисунок 3.3 - Микроструктура золы гидроудаления БТЭЦ ($\times 5650$ и $\times 7880$)

На рис. 3.3 при увеличении $\times 5650$ и $\times 7880$ видно, что внешняя поверхность микросфер размером 50–500 мкм в основном гладкая или шероховатая и непористая. Светлый прозрачный оттенок стекла, вероятно, обусловлен стекловидной формой муллита или геленита. Цвет стекла

варьируется от желтого до бурого, что связано с его составом, который может быть силикатным, алюмосиликатным или, реже, железисто-алюмосиликатным.

При измельчении золы увеличивается удельная поверхность частиц, что способствует повышению их гидравлической активности. Средняя плотность составляет 815–845 кг/м³, а удельная поверхность — 2780–3050 см²/г.

б) шлак

в) золошлаковая смесь

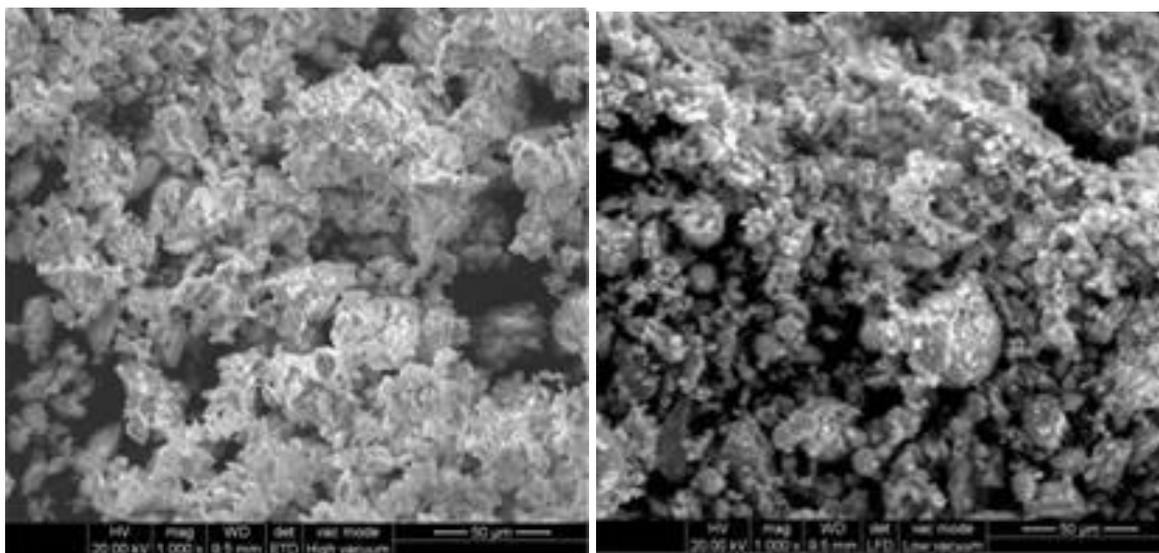


Рисунок 3.4 – Микрофотографии золошлаковой смеси и шлака

Шлак (рис. 3.4 (б)) представляет собой грубодисперсный материал с размером зерен от 0,315 до 40 мм, образующийся из минеральной части твердого топлива. Он формируется в нижней части топочного пространства тепловых агрегатов и удаляется в жидком, кусковом или частично порошкообразном состоянии [1]. В отличие от золы, шлак образуется при более высоких температурах (1300–1700 °С), практически не содержит несгоревшего топлива (углеродных частиц) и отличается большей однородностью. Шлаковый гравий из-за отсутствия условий равновесной кристаллизации и быстром охлаждении расплавленной минеральной части топлива приводит к образованию стекловидной фазы. В зависимости от химического состава шлаки содержат 40-60% стеклофазы, от структуры которой зависит активность шлака. Стекло желтоватое, относящееся к системе CaO –Fe₂O₃-SiO₂; стекло бурое,

темнобурое и черное, с содержанием стеклофазы (20-30%); отмечается кристаллические образования (кварц, кальцит, муллит, магнетит, C_2S ; CA и др.). При расплавлении минеральной части твердого топлива в устройствах с жидким шлакоудалением основное количество щелочных оксидов улетучивается, поэтому шлаки не содержат свободного CaO и практически не содержат несгоревшего топлива. Содержание в каменноугольных золах остатков несгоревшего топлива допускается в количестве не более 25%. Отличительной особенностью топливного шлака является весьма высокое содержание оксидов железа (5,2%), в т. ч. закиси железа - 3,96%, что, по-видимому, обуславливает повышенное содержание расплава.

При совместном удалении золы и шлака механизированным, гидро- или пневмотранспортом на золоотвал ТЭС образуется третий вид отходов — золошлаковая смесь (рис. 3.4 (в)).

Анализ химического состава (табл. 2.8) отобранных материалов показывает, что пробы золошлаковой смеси и золы гидроудаления практически идентичны по содержанию кремнезема (SiO_2), глинозема (Al_2O_3) и оксидов железа ($FeO + Fe_2O_3$). Незначительно отличается содержание CaO (5,74 и 6,47); MgO (0,74-1,14); K_2O+Na_2O (1,5 и 2,6). Сжигание топлива в промышленных установках осуществляется в условиях окислительной среды, что приводит к образованию в кусковых шлаках и пылевидных золах окисных соединений железа.

Зола БТЭЦ состоит из частиц, различающихся как по истинной, так и по насыпной плотности, что отражает их пористость и гранулометрический состав. Эти показатели в определенной степени связаны с химическим и минералогическим составом золы. Средняя насыпная плотность золы составляет 800–850 кг/м³, истинная плотность — 1,82–2,20 г/см³, а удельная поверхность — 2230–2250 см²/г. Эффективность использования золы повышается, если её дисперсность превышает дисперсность цемента на 150–170 м²/кг.

Для определения направления использования топливных отходов ТЭС (зола ГУ, ЗШС и шлак) определены основные классификационные признаки: модуль кислотности, модуль основности, силикатный (кремнеземистый модуль), модуль активности и коэффициент качества (табл. 3. 1).

Таблица 3.1 – Качественные показатели исследуемых ЗШО

№ пп	Показатель	Нормативный показатель	Топливный отход		
			Зола ГУ	ЗШС	Шлак
1	Уд. пов. покр., м ² /кг (немолотая/молотая))	Не ≤ 150 м ² /кг полный остаток на сите № 008 не ≥ 30%	223/390	-	84/220
2	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % по массе	При > 45% SiO ₂ –кислые	74,5/52,0	73,5/52,1	76,6/54,9
3	SO ₃ , % по массе	Не более 3 %	0,72	0,21	0,17
4	CaO, % по массе	Не более 10%	6,47	5,74	7,67
5	MgO, % по массе	Не более 5%	1,14	0,74	2,22
6	$M_o = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3}$	M _o = 1,0 ≤ кислые	0,14	0,11	0,18
7	НУЧ (потери при прокал.)	Не более 25%	12,13	15,30	4,07
8	Стойкость против распада, %	Силикатного > 8% Железистого > 5%	2,2/0	2,2-5,1/0	1,0 -1,8/0
9	Истинная плотность, г/см ³	-	2,44	2,39	2,86
10	Средняя плотность, кг/м ³	-	800-850		2200-2800
	Насыпная плотность, кг/м ³ Фракции 0-5; 5-10	Для легкого бетона не >1200	914-1045	578-692	940-1120

Из табл. 3.1 видно, что ЗШО относятся к кислому типу зол с не стабильным химическим составом, малым количеством свободного оксида кальция и большим содержанием оксида кремния. Такие золы не обладают самостоятельными вяжущими свойствами, но при добавлении интенсификаторов твердения они могут обладать вяжущими свойствами.

Одним из основных показателей оценки качества сырьевых материалов является их гранулометрический состав (кусковые материалы или пылевидные). По содержанию микродиспесных частиц можно предварительно судить о реологических характеристиках материала. Чем больше дисперсность

частиц тем выше его пластичность, соответственно сырье будет обладать высокой связанностью, адсорбционной способностью и прочностью готовых изделий.

По вещественному составу зола состоит из стекловидных и кристаллических фаз, которая состоит из аморфизированного глинистого вещества и зерен обломочного материала кварца, полевого шпата, карбоната кальция и магния, а также выделившихся из расплава двухкальциевого силиката, алюмината кальция, муллита.

Исследование фазового состава топливных отходов (ЗШС и композиционных вяжущих) проводилось рентгенографическим и дифференциально-термическими методами анализа.

На рентгенограмме исследуемых зол (рис. 3.5) имеются линии, характерные для кварца – $d\text{-SiO}_2$ $d = 4,24; 3,34; 2,44; 1,81; \text{Å}$, муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) $d = 5,39; 3,35; 2,86; 2,52; 2,19 \text{ Å}$ и карбонатов, представленных бесцветным мелким образованием кальцита (CaCO_3) и доломита ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$).

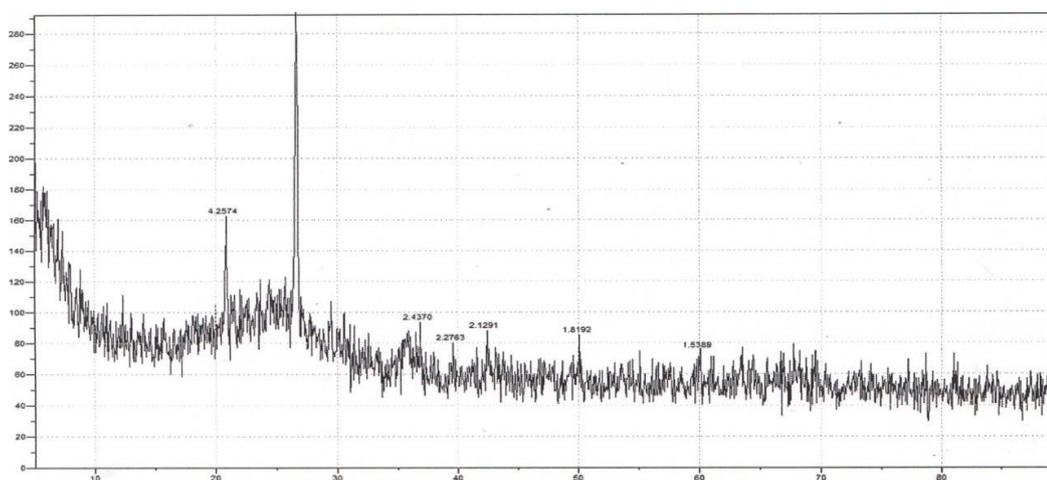


Рисунок 3.5 – Рентгенографический анализ ЗШС

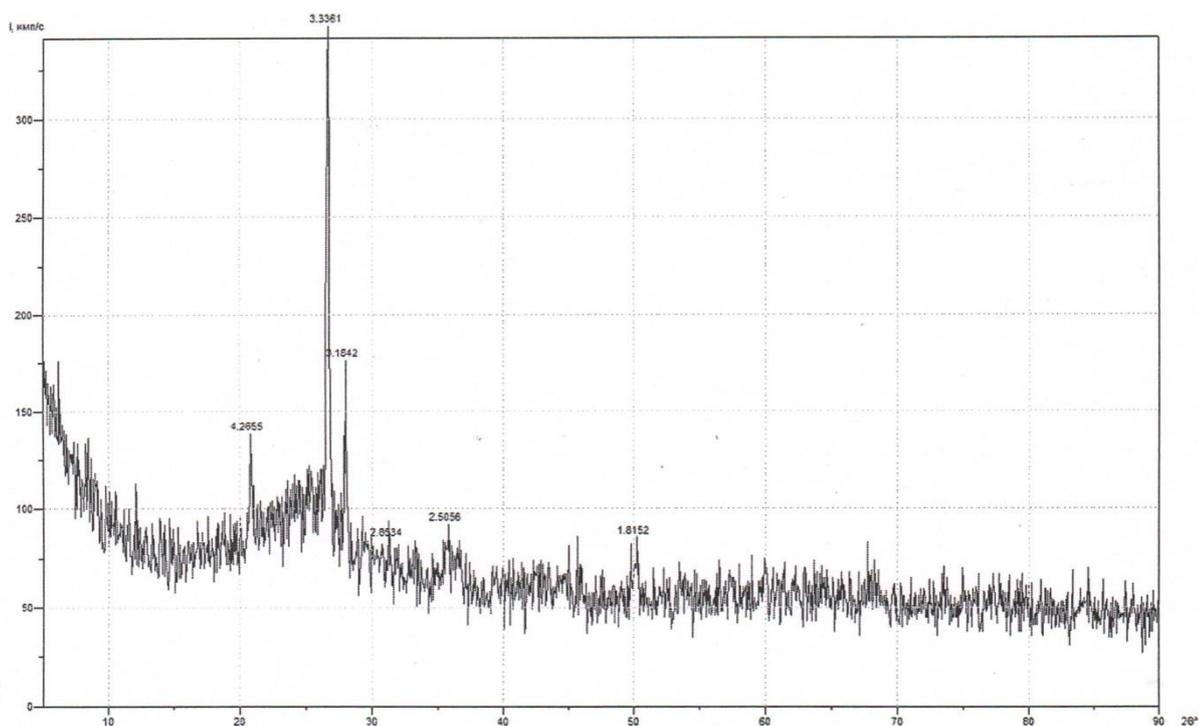


Рисунок 3.6 – Рентгенографический анализ ЗШС (измельчение 1 час)

Характерные линии $d=3,62$ и $2,88 \text{ \AA}$ на рентгенограмме весьма слабые, так как наличие карбонатов в золе незначительное. Большинство линий этих минералов накладываются, друг на друга и поэтому часть пиков носит размытый характер. Ввиду повышенного содержания в пробах золы оксидов железа в виде Fe_2O_3 (таблица 2.8) неорганической фаз золы присутствует также гематит ($d=2,69$; $2,68 \text{ \AA}$). Обнаружено наличие однокальциевого алюмината: $d=3,73$; $1,99$; что подтверждает алюминатный характер золы.

В процессе тонкого измельчения золошлаковой смеси с цементом активизируются составляющие золошлаковой смеси. При гидратации золосодержащих цементов моноалюминат кальция ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$); двухкальциевый силикат ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), содержащиеся в золе, вступают во взаимодействие с $\text{CaO}_{\text{св}}$, который выделяется при гидролизе трехкальциевого силиката кальция ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) цемента с образованием гидроалюминатов, гидросиликатов кальция, упрочняющих систему.

При тонком измельчении происходит активация кварца и аморфизированных глинистых частиц, содержащихся в ЗШС. Известь,

выделяющаяся при гидролизе C_3S цемента взаимодействует с аморфизированными глинистыми материалами с образованием дополнительного количества низкоосновных гидросиликатов кальция.

Механическая активация низкокальциевой золошлаковой смеси (10-50%) с цементом способствует получению цементнозольных композиционных вяжущих, которые могут быть альтернативой дорогостоящему портландцементу в некоторых видах строительных конструкций.

Механоактивация зольной составляющей активизирует полиминеральные частицы золы, которые вследствие высокой дисперсности противодействуют коагуляции зерен цемента и адсорбируясь на поверхности частиц цемента, вступают в реакцию взаимодействия с CaO , тем самым увеличивая количество центров кристаллизации и способствуя образованию мелкокристаллической структуры цементного камня. Гидравлическая активность зол в значительной степени характеризуется наличием свободных кремнекислоты и глинозема. Известно, что количество растворимой SiO_2 в золах изменяется в пределах 1,5-6,0%, а содержание свободного глинозема составляет 0,2-2,7%.

Проведенные исследования показали, что золошлаковая смесь от сжигания пылевидных каменных углей проявляет большую активность в процессе гидратации портландцемента особенно в условиях термообработки при температуре 95-100 °С, увеличивая степень его гидратации и улучшая структуру цементного камня.

3.2. Оценка микроструктуры и основных физико-химических показателей золы рисовой шелухи

Используемый зольный порошок из рисовой шелухи исследовался на сканирующем электронном микроскопе VEGA3 TESCAN. Микрофотографии с разрешением от $\times 133$ до $\times 2400$ показывают микроструктуру золы рисовой шелухи (3.7 -3.7).

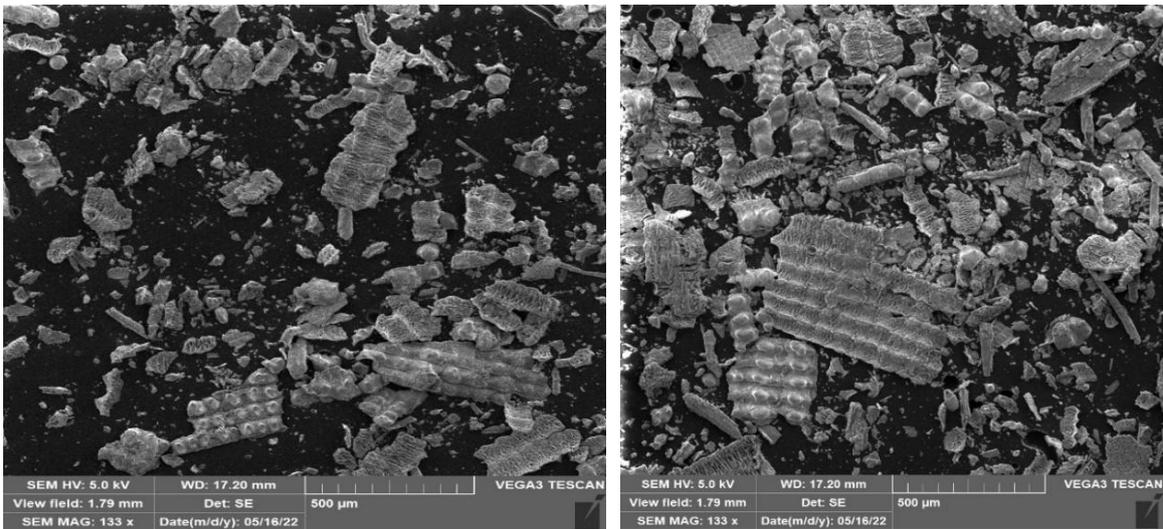


Рисунок 3.7 - Микроструктуры золы из рисовой шелухи ($\times 133$)

На микрофотографиях, представленных на рис. 3.5, показана структура ЗРШ при разрешении ($\times 133$), где видно большого количества мелких и пористых частиц, которые при правильном применении способствуют заполнению пор в цементной матрице.

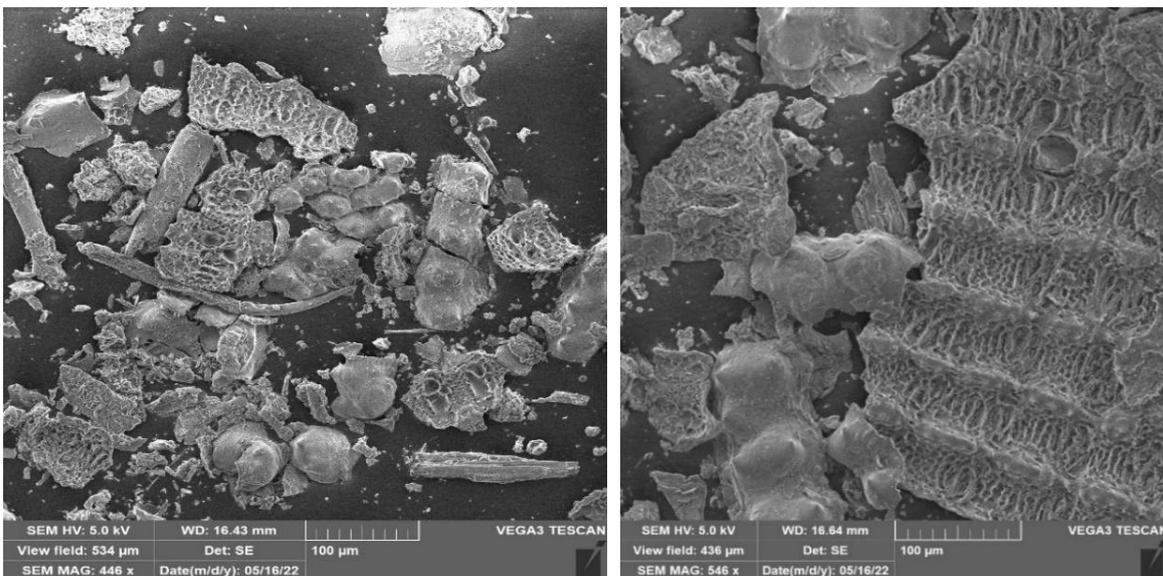


Рисунок 3.8 - Микроструктуры золы из рисовой шелухи ($\times 534$)

При сравнении микроструктуры на рис. 3.7 и 3.8 видно, что частицы ЗРШ имеют чешуйчатое строение и во много раз меньше, чем частицы цемента, имеющие кубическую форму. Причем, из-за чешуйчатой формы частиц ЗРШ на фотоснимке с 534-кратным увеличением не видны четкие границы отдельных частиц.

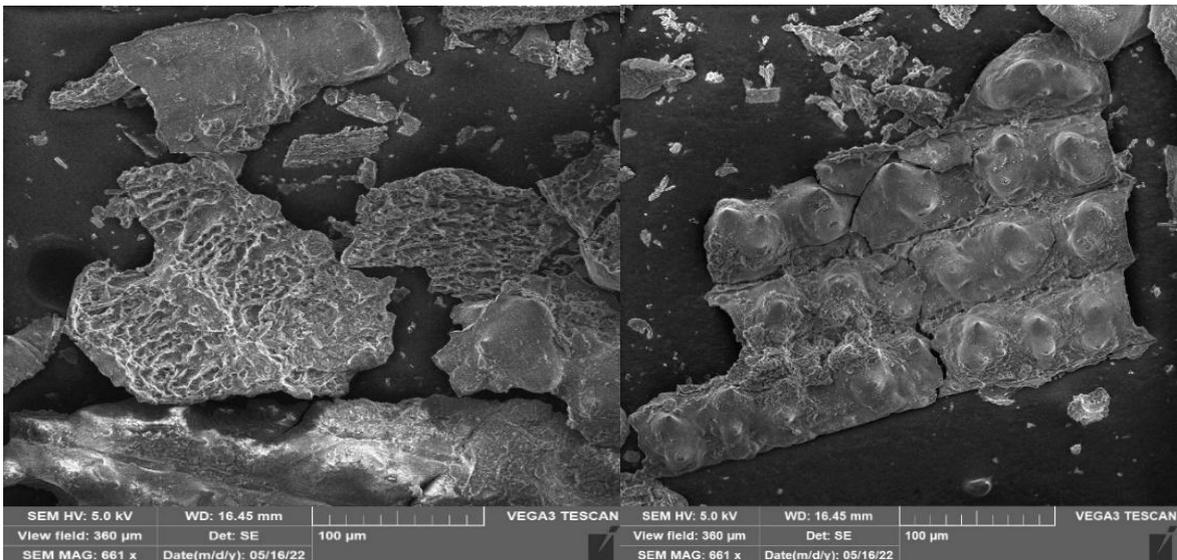


Рисунок 3.9 - Микроструктуры золы из рисовой шелухи ($\times 661$)

На рисунке 3.9 расширением $\times 661$ видна пористая структура и неровности на поверхности, которая указывает на реакционную способность золы. Пористость частиц ЗРШ играет важную роль в их поведении в цементной матрице. Микроскопия позволяет выявить наличие микропор и нанопор, что влияет на водопоглощение и взаимодействие с гидратированными продуктами цемента.

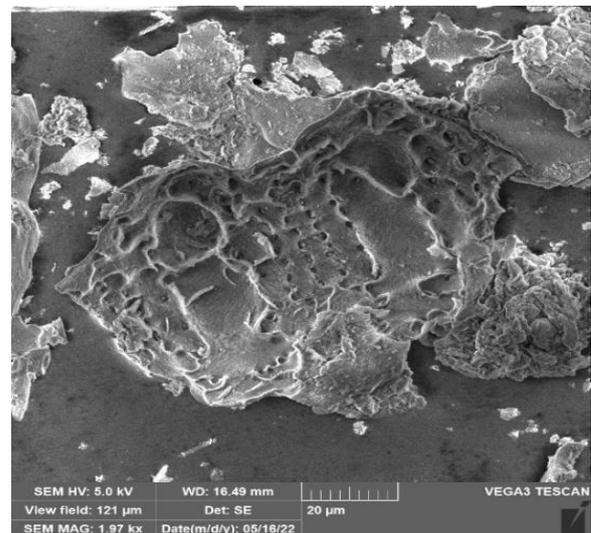
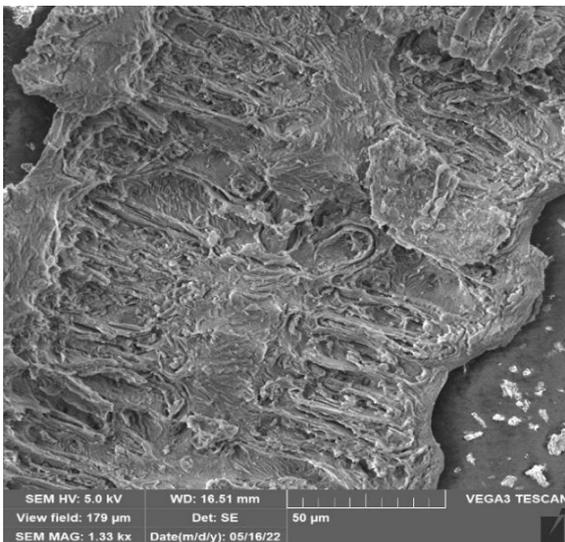


Рисунок 3.10 - Микроструктуры золы из рисовой шелухи ($\times 1970$)

Увеличение $\times 1970$ позволяет различить кристаллические и аморфные фазы в золе рисовой шелухи, частицы которые часто содержат аморфный диоксид кремния (SiO_2). На изображении ЗРШ видна ее неупорядоченная структура.

Исследованиями [33] установлены оптимальные условия сжигания ЗРШ при температурах в диапазоне $500\text{-}700^\circ\text{C}$, при которых образуется аморфный кремнезем, обладающий высокой реакционной способностью. При более высоких температурах $> 800^\circ\text{C}$ возможно образование кристаллических форм кремнезема, таких как кристобалит и тридимит. ЗРШ имеет высокую пористость и большую удельную поверхность, что делает её полезной в качестве адсорбента и носителя для катализаторов. Размер частиц золы варьируется, но часто находится в микронном диапазоне. Частицы могут быть как сферическими, так и неправильной формы. Зола из рисовой шелухи обладает высокой удельной поверхностью и высокой пористостью.

Пуццолановая активность золы из рисовой шелухи (ЗРШ) обусловлена высоким содержанием аморфного кремнезема (SiO_2) и ее реакционной способностью с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образующимся в процессе гидратации портландцемента. Аморфная форма SiO_2 , которая образуется при сжигании рисовой шелухи при температурах от 500 до 700°C , обладает высокой реакционной способностью. Она легко реагирует с гидроксидом кальция, образуя кальциевые силикатные гидраты (C-S-H), которые способствуют увеличению прочности и долговечности бетона.

Можно выделить несколько факторов, влияющие на пуццолановую активность. Чем мельче частицы ЗРШ, тем выше их удельная поверхность, что улучшает реакционную способность. Пуццолановая активность также зависит от дозировки ЗРШ в цементных смесях.

Известно, что рисовая шелуха состоит из органических и неорганических компонентов, содержащих кремнезем. Следовательно, смысл

сжигания рисовой шелухи заключается в том, чтобы удалить органические компоненты и получить кремнезем.

Многочисленные научные исследования изучения фазового состава ЗРШ показывают следующие характеристики [33]:

1. Аморфная структура – В большинстве случаев ЗРШ имеет выраженный аморфный характер, что подтверждается широкой галообразной (диффузной) линией в интервале $2\theta \approx 20\text{--}25^\circ$ на рентгенограмме. Это свидетельствует о высоком содержании аморфного диоксида кремния (SiO_2), который обладает высокой пуццолановой активностью.

2. Кристаллические фазы – В зависимости от температуры обжига могут появляться кристаллические фазы: - Крестобалит и тридимит – при термообработке выше $800\text{--}1000^\circ\text{C}$;

- Кварц – может присутствовать в исходном материале или появляться при кристаллизации кремнезёма.

3. Зависимость от температуры – При температурах до $700\text{--}800^\circ\text{C}$ сохраняется в основном аморфный кремнезем с высокой реакционной способностью.

4. - При температурах выше $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ происходит кристаллизация кремнезёма, что снижает пуццолановую активность.

На рис. 3.11 представлена рентгенограмма золы рисовой шелухи, отображающая интенсивность дифракции в зависимости от угла 2θ (градусов). Основной пик при 22° соответствует аморфной фазе диоксида кремния (SiO_2), которая является основной составляющей золы рисовой шелухи. Ширина пика указывает на преимущественно аморфную структуру материала. Второстепенные пики при 36° и 44° свидетельствуют о наличии небольшого количества кристаллических фаз, таких как кристаллический диоксид кремния или соединения кальция, которые могут присутствовать в золе после сжигания рисовой шелухи. Эти пики указывают на менее выраженные кристаллические структуры в материале. Рентгеноструктурный

анализ показал, что ЗРШ представлена аморфным кремнеземом с включениями кристаллических фаз.

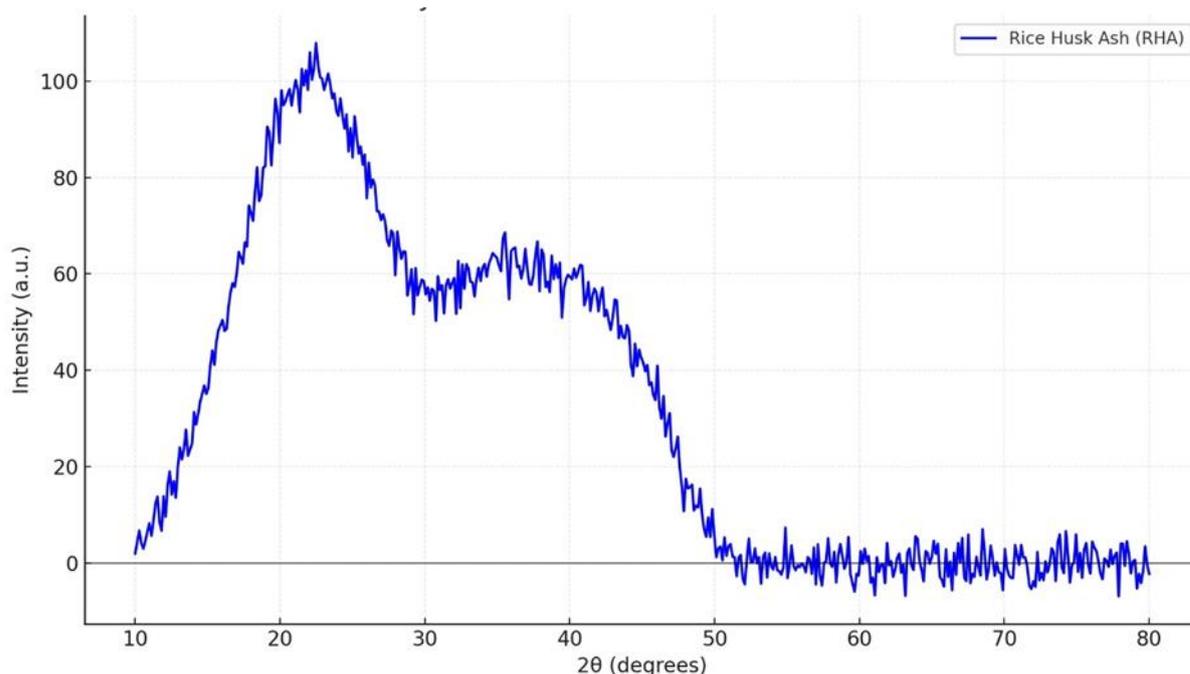


Рисунок 3.11 - Рентгенограмма золы из рисовой шелухи

Таким образом, ЗРШ представляет собой перспективный материал, и благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая доля аморфного диоксида кремния (SiO_2) и пуццолановая активность может быть эффективно использована в качестве наполнителя в цемент. При взаимодействии с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образует дополнительные вяжущие соединения в виде фазы C-S-H, что повышает прочность и долговечность бетона, улучшает такие свойства бетона как прочности на сжатие и изгиб, устойчивость к химической агрессии (например, к сульфатам), снижает проницаемость бетона, что повышает его водостойкость и морозостойкость. Экологические преимущества от ее использования заключаются в снижении выбросов CO_2 за счет сокращения использования цемента и утилизация данного отхода снижает нагрузку на окружающую среду.

3.3 Исследование основных свойств композиционных вяжущих веществ с использованием золошлаковых отходов

Наиболее широкое применение в производстве строительных материалов нашли золы сухого отбора, не требующие предварительной обработки перед использованием. Однако ее общий объем составляет всего лишь 10%. Основные же выбросы составляют ЗШО, которые образуются в результате слипания размягченных частиц золы в камере топки и накапливаются в шлаковом бункере под топкой, затем удаляются гидравлическим или пневматическим способом. Серьезное ограничение на применение ЗШО для производства строительных материалов накладывает неподготовленность ЗШО как сырья.

Золошлаковые продукты уже в виде паст, образовавшихся в отвалах после отсоса или испарения воды из суспензий, являются прогидратированными и приведены к равновесию с окружающими условиями (температурой, давлением и минимальной свободной поверхностной энергией) или к состоянию инертности. Слежавшиеся после длительного хранения эти продукты не могут быть эффективно использованы без дополнительной технологической обработки, т.е. вывода их из установившегося термодинамического равновесия. Для бетонов с отходами промышленности неприемлемы зависимости и методы, применяемые для классических бетонов, так как они лишены оперативности, а значительное изменение свойств отходов промышленности требует постоянной корректировки, так как не учитывается полный комплекс факторов, влияющих на свойства бетонных смесей и бетона [202].

Золы Бишкекской ТЭС характеризуются практически отсутствием $\text{CaO}_{\text{св}}$, поэтому представляет интерес исследование ЗШО в производстве цементных вяжущих, что возможно осуществить по двум направлениям:

- в качестве активной минеральной добавки к клинкеру непосредственно на цементном заводе не снижая марку цемента и не изменяя его нормативные характеристики;

- в качестве наполнителей в цемент с предварительной или совместной активацией отходов ТЭС.

В данных исследованиях ЗШО, подготовленные тем или иным способом, использовались в качестве наполнителей в цемент и заполнителей в МЗБ. Все ЗШО были классифицированы и изучены в виде золы гидроудаления, золошлаковой смеси и шлака.

Изучались физико-механические характеристики, полученных композиционных вяжущих при различных способах их введения в цемент (механическое перемешивание измельченных отходов или совместное измельчение с цементом) и классифицировались на:

1. ЦЗВ_м – механическая смесь просеянной золы гидроудаления и цемента;
2. ЦЗВ_и - активированная совместным помолом смесь золы гидроудаления и цемента;
3. ЦЗШВ_м - механическая смесь просеянной золошлаковой смеси и цемента;
4. ЦЗШВ_и- активированная совместным помолом смесь золошлаковой смеси и цемента;
5. ЦШВ_м - механическая смесь просеянного шлака и цемента;
6. ЦШВ_и- активированная совместным помолом смесь топливного шлака и цемента;
7. ЦШВ_и_м- механическая смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;
8. ЦШВ_и - активированная совместным помолом смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;

3.3.1 Композиционные цементные вяжущие вещества с золой гидроудаления

Ценность используемой золы заключается в её явной или скрытой способности проявлять вяжущие свойства, которые активизируются в процессе измельчения. При этом гранулы золы разрушаются, активизируются и увеличивается её удельная поверхность. При помолу в шаровой мельнице удельная поверхность золы с 223-225 м²/кг за полчаса достигает

дисперсности цемента $310 \text{ м}^2/\text{кг}$. Измельчение в течении 1 часа дисперсность золы достигает $360 \text{ м}^2/\text{кг}$, а после 1,5 часа — $380 \text{ м}^2/\text{кг}$. Дальнейшее измельчение приводит к замедлению роста дисперсности, и после трех часов помола не превышает $390 \text{ м}^2/\text{кг}$. Таким образом, после 1,5 часов измельчения в шаровой мельнице рост дисперсности замедляется, что свидетельствуют о легкой размалываемости золы ГУ (рис. 3.12).

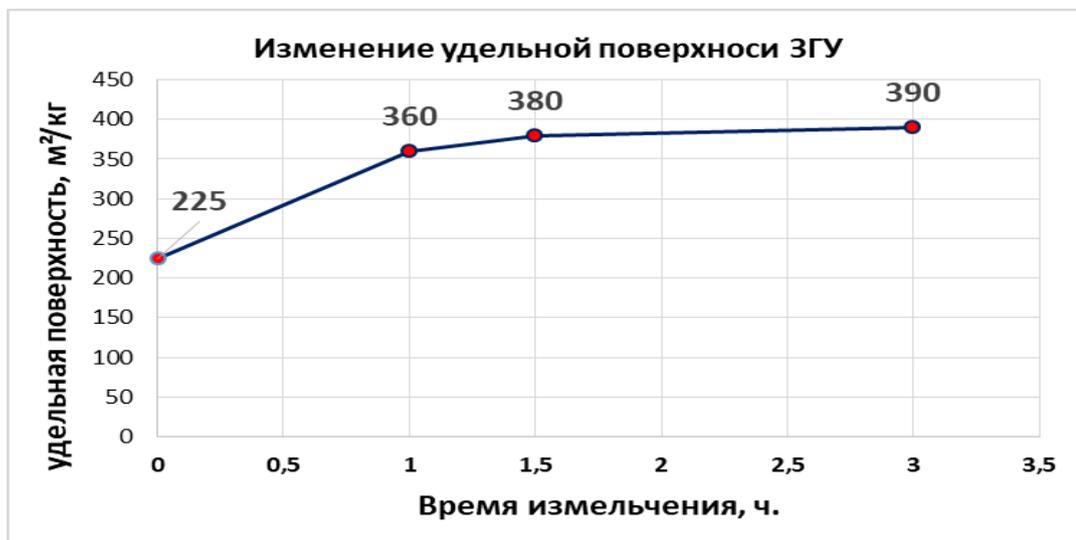


Рисунок 3.12 – Изменение удельной поверхности золы от времени помола

Предполагается, что при оптимальной дисперсности и соотношении цемента и наполнителя образуется мелкозернистая структура вяжущего, при этом прочность и скорость твердения увеличиваются, пока зерна наполнителя окружены продуктами гидратации. При избытке наполнителя по мере роста кристаллов могут образовываться неоднородности микроструктуры и трещины. Наполнитель уменьшает пустотность цемента и обладает когезионной прочностью с цементом, при этом степень наполнения должна обеспечивать необходимые реологические параметры смеси. А.В. Волженский связывает высокую гидравлическую активность аморфизированного глинистого вещества с высокой его удельной поверхностью, которая создается в результате распада метаксаолина ($\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$) на аморфный кремнезем и глинозем.

В проведенных исследованиях оценка влияния количества золы ГУ на свойства композиционного вяжущего было рассмотрено на портландцементе

активностью 33.3 МПа. Полученные в результате помола композиционные цементы по составу являются малоклинкерными вяжущими, в составе которых содержание золы меняется от 10 до 50 %.

Результаты исследований свойств вяжущего ЦЗВ_м (механическая смесь цемента и просеянной золы ГУ) и вяжущего ЦЗВ_и совместно измельченной смеси в течение часа представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные показатели свойств вяжущих ЦЗВ_м и ЦЗВ_и

№ пп	Колич-во ЗШС в цементе, %	Норм-я густота, %	Тонкость помола, % сито 008	Сроки схватывания, мин.		Предел прочности, МПа			
				Начало	Конец	R ^{тво} _{изг} , МПа	R ²⁸ _{изг} , МПа	R ^{тво} _{сж} , МПа	R ²⁸ _{сж} , МПа
ЦЗВ_м									
1	0	24	87	96	446	4,12	6,88	19,32	33,46
2	10	28	87,7	100	261	4,82	4,28	18,1	21,4
3	30	30	88,5	110	403	4,11	3,2	13,6	18,29
4	50	32	89,2	146	390	3,3	2,8	10,6	10,14
ЦЗВ_и									
5	0	24	87	96	447	4,12	6,88	19,32	33,46
6	10	28	89	95	243	5,4	5,7	21,7	32,7
7	30	29	90	108	350	5,05	3,6	20	21,8
8	50	30	91	126	361	4,8	3,5	17,2	21,6

Анализ результатов испытаний композиционных вяжущих (таблица 3.2) показал, что при механическом перемешивании для ЦЗВ_м по мере наполнения золой ГУ с 10 до 50 % нормальная густота повышается с 28 до 32 %, а тонкость помола увеличивается незначительно. При добавке 10 % неизмельченной золы тонкость помола вяжущего ЦЗВ_м близка к тонкости помола взятого цемента (87,7 %). При увеличении до 50 % тонкость помола изменяется до 89,2%.

Однако вяжущее ЦЗВ_м характеризуется повышенной водопотребностью (до 32 %) из-за особенностей его микроструктуры и микрорельефа частиц. Это обусловлено наличием микро- и макропор, а также микротрещин в гидрофильных стекловидных частицах, которые создают дополнительные микрообъемы для заполнения водой.

При измельчении золы её водопотребность снижается с увеличением удельной поверхности, поскольку происходит усреднение гранулометрического и минералогического состава, возрастает однородность, снижается водопотребность, что в дальнейшем положительно скажется на прочности.

При добавлении 10 % золы нормальная густота зольных цементов ЦЗВ_М и ЦЗВ_И (табл. 3.2) остаётся неизменной (28 %). При 30 % золы водопотребность измельчённых вяжущих ЦЗВ_И несколько ниже 29 %, чем у ЦЗВ_М НГ =30 %, а при 50 % золы – 32 % и 30 % соответственно.

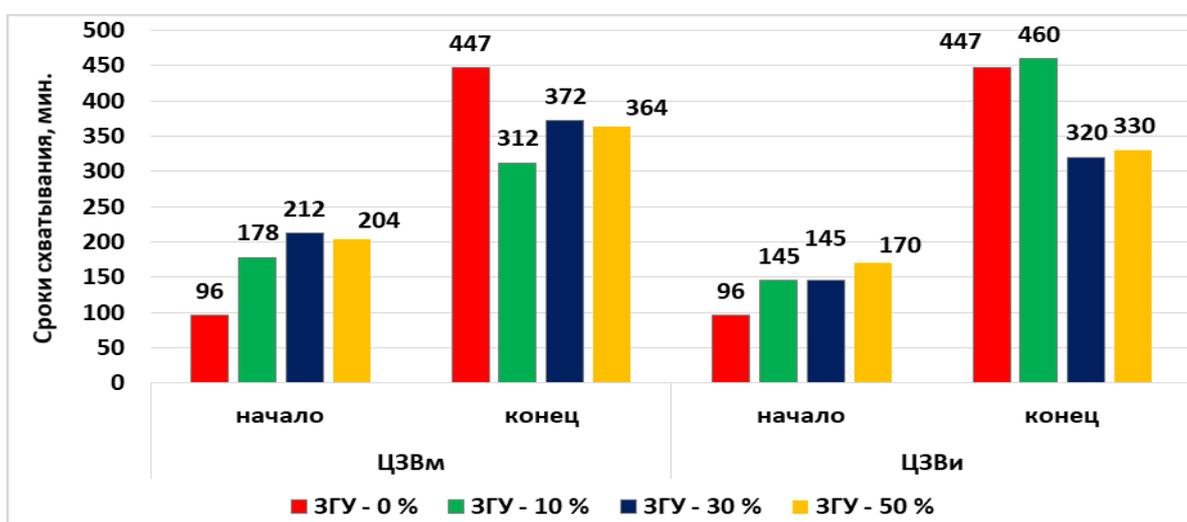


Рисунок 3.13 – Сроки схватывания композиционного вяжущего ЦЗВ_М и ЦЗВ_И

Наполнитель из ЗГУ для вяжущих ЦЗВ_М и ЦЗВ_И оказывает влияние на их сроки схватывания (рис.3.13), что связано с разбавляющим эффектом цемента. Также зола может сорбировать часть воды затворения, замедляя гидратацию цемента. Для механически смешанного ЦЗВ_М начало схватывания увеличивается от 96 до 212, 204 минут по мере наполнения от 10 до 30 и 50%. Время конца схватывания ЦЗВ_М по мере наполнения от 0 до 50% наоборот снижается от 447 до 312, 372 и 364 мин., что объясняется пуццолановой активностью золы. Аморфный кремнезём (SiO₂) в золе вступает в реакцию с продуктом гидратации цемента гидроксидом кальция Ca(OH)₂. Это способствует образованию дополнительных гидратных фаз

(например, CSH), что затрудняет структурообразование и завершение захватывания. Образуются дополнительные центры кристаллизации, где мелкие частицы золы являются затравочными центрами. Это особенно выражено, если зола имеет тонкий помол и высокую удельную поверхность. Для вяжущего ЦЗВ_и время конца схватывания по мере напоянения сокращается с 447 до 330 минут.

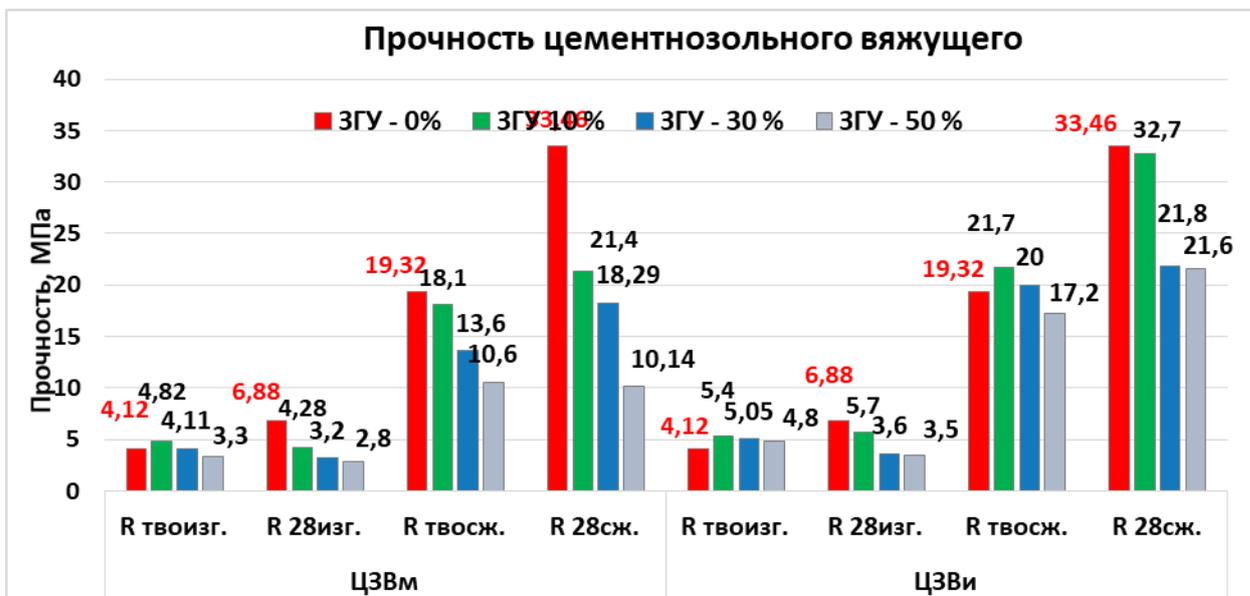


Рис. 3.14 – Прочность на сжатие и изгиб ЦЗВ_м и ЦЗВ_и после ТВО и 28 суток твердения

Предпочтительно использование зол с большей дисперсностью, т.к. они содержат немного невыгоревших частиц, более активны и не требуют дополнительного измельчения. Не совсем обязательным является тонкое измельчение золы, более существенным является разрушение или нарушение стекловидной оболочки частиц и получение необходимой поверхности для максимальной скорости и степени взаимодействия с Ca(OH)₂.

На рис. 3.14 видно, что увеличение прочности вяжущего по мере роста количества золы в естественном немолотом виде не наблюдается. Поскольку мелкие гранулы золы остаются нетронутыми пока не прогидратируется верхняя оболочка зольной частицы. Наблюдается эффективность использования золы, здесь при 10 % количестве золы дисперсностью 3000-

5000 см²/г практически не приводит к падению прочности вяжущего ЦЗВ_н нормального твердения. После ТВО активность при 10% практически равнозначна, поскольку при температурах (80°C и более) все потенциально реакционные составляющие золы заметно активизируются, чем выше концентрация жидкой фазы и t среды, тем активная зола, тем быстрее схватывается тесто и выше его прочность.

После 28 суток прочность вяжущего ЦЗВ_н при сжатии R_{сж} = 32,7 МПа выше в 1,53 раза прочности ЦЗВ_н R_{сж} = 21,4 МПа, несмотря на одинаковую водопотребность (28 %). С повышением содержания золы до 50% доминирующая роль в гидратационных процессах ЦЗВ_н принадлежит зольной составляющей.

Установлено, что образцы из ЦЗВ_н при 10% содержании золы имеют прочность 21,7 МПа, что составляет 70% от прочности нормального твердения (32,7 МПа); при содержании 30% золы (20 МПа) составляет 90 % от (21,8 МПа) и 50 % золы – 17,2 МПа 80 % от (21,6 МПа). Эти данные являются подтверждением более повышенной прочности активированного вяжущего ЦЗВ_н при тепловлажностной обработке.

Долговечность бетонов напрямую зависит от условий его эксплуатации. Под действием различных агрессивных сред (щелочная среда, пресная и минерализованная вода) состав и структура цементной матрицы бетона изменяется за счет вымывания гидроксида кальция, что приводит к повышению пористости, потере прочности и соответственно разрушению.

Введение активных минеральных добавок таких как золошлаковые отходы способствует снижению коррозионных процессов в бетоне.

Для определения коррозионной стойкости ЦЗВ_н рассчитывали коэффициент стойкости, представляющего собой отношение прочности эталонных образцов твердевших 28суток в нормальных условиях к прочности образцов, находившихся в водной агрессивной среде 3 месяца.

Результаты испытаний показали (табл.3.3.), что с наполнением цемента ЗГУ повышается коррозионная стойкость. При выдерживании образца

вяжущего с золой 10% в растворе 0,5 % Na_2SO_4 коэффициент $K_{\text{ст}} = 1,06$; $K_{\text{ст}} = 1,2$ при содержании 30% золы и $K_{\text{ст}} = 0,9$ при наличии 50% золы.

Табл. 3.3 Коррозионная стойкость (ЦЗВи) после 3 х месяцев выдерживания

Содерж. золы ГУ в вяжущем, %	Твердение в воде 28 сут., МПа		Выдержка в 0,5% раст-ре Na_2SO_4 3 мес., МПа		$K_{\text{ст}}$	Выдержка в 3% раст-ре Na_2SO_4 3 мес., МПа		$K_{\text{ст}}$	Выдержка в воде 3мес. МПа		$K_{\text{ст}}$
	$R_{\text{изг}}$	$R_{\text{сж}}$	$R_{\text{изг}}$	$R_{\text{сж}}$		3 мес	$R_{\text{изг}}$		$R_{\text{сж}}$	3мес	
10	5,7	32,7	6,3	34,6	1,06	7,2	36,8	1,12	6,9	35,4	1,08
30	5,05	21,8	5,85	27,3	1,2	5,89	27,9	1,2	5,63	25,3	1,1
50	3,5	21,6	4,7	20,5	0,9	3,9	23,8	1,1	3,9	22,3	1,03

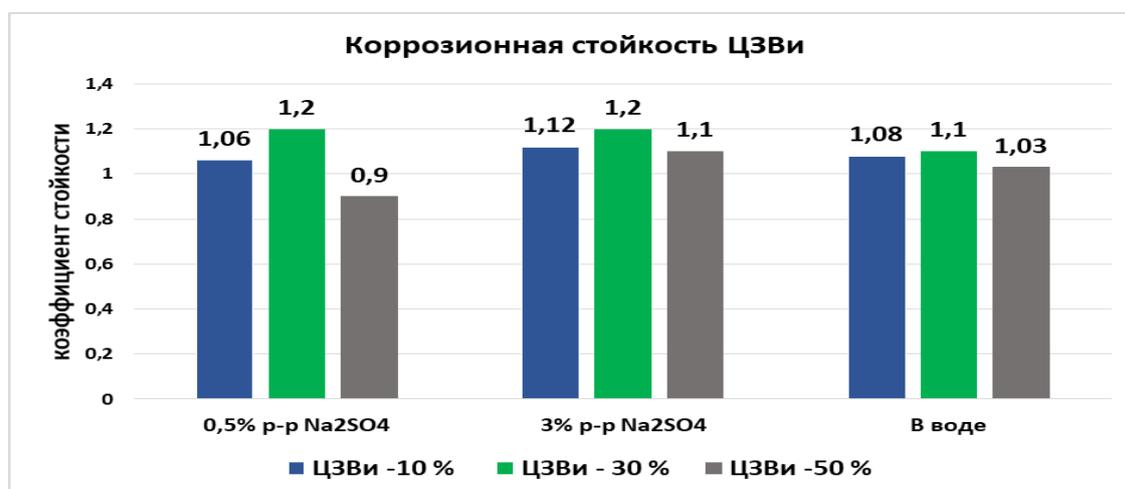


Рис. 3.15. Стойкость ЦЗВи в агрессивных средах 3 месяца.

При испытании в 3% растворе Na_2SO_4 стойкость цементозольного вяжущего (ЦЗВи) характеризуется коэффициентом стойкости ($K_{\text{ст}}$) со значениями 1,12; 1,2; 1,1 при содержании золы 10, 30 и 50 % соответственно (рис. 3.15). При твердении образцов 3 месяца в водопроводной воде значения $K_{\text{ст}}$ растут с увеличением содержания золы от 1,08 до 1,2. Это указывает на длительность протекания процесса гидратации вяжущего ЦЗВи. Наличие золы ГУ способствует связыванию свободной извести и снижению основности гидросиликатов Са, которые являются более стойкими против коррозии выщелачивания. Гидросиликаты и гидроалюминаты кальция имеют тем большую равновесную растворимость, чем выше их основность. Следовательно отщепление гидратов сначала происходит от высокоосновных гидратов, их основность при этом понижается, а устойчивость в данной среде

повышается. Таким образом, вяжущие ЦЗВ_н обладают более высокой коррозионной стойкостью, чем цементные.

3.3.2 Оптимизация рецептурно-технологических факторов вяжущего с использованием золы гидроудаления

На предварительном этапе изучалась возможность утилизации золы-гидроудаления в цемент и влияние предварительной ее активации на основные физико-механические свойства вяжущего.

Для более глубокого изучения количества активированной золы на свойства вяжущего был проведен двухфакторный эксперимент (таблица 3.4), где в качестве варьируемых факторов было взято: X_1 - количество золы $20 \pm 10\%$ и X_2 - время измельчения 1 ± 1 час.

В качестве выходных параметров экспериментов были выбраны: сроки схватывания, час. (начало - Y_1), (конец - Y_2), плотность после ТВО (Y_3) и после 28 суток (Y_6) и прочность на изгиб и сжатие, МПа (Y_4 - $R^{тво}_{изг}$; Y_5 - $R^{тво}_{сж}$; Y_7 - $R^{28сут}_{изг}$ МПа; Y_8 - $R^{28сут}_{сж}$), Y_9 - коэффициент размягчения Кр.

После проведения эксперимента и статистической обработки его результатов получены математические модели вышеуказанных свойств вяжущего и их графические образы в виде номограмм.

Таблица 3.4 – План и результаты двухфакторного эксперимента

№ опыта	План эксперимента				Результаты эксперимента								
	Кодированные перемен-е		Натурал-е величинны		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9
	x_1	x_2	X_1 - зола, %	X_2 - время изм., ч	Нач. схват., час	Конец схват., час	$\rho^{тво}$, г/см ³	$R^{тво}_{изг}$ МПа	$R^{тво}_{сж}$ МПа	ρ^{28} , г/см ³	$R^{28сут}_{изг}$ МПа	$R^{28сут}_{сж}$ МПа	Кр
1	-1	-1	10	0	3,98	10,55	2,21	5	18,4	2,17	5,33	21,4	1,18
2	1	-1	30	0	5,28	11,62	2,16	5,92	14,2	2,14	5,87	18,32	1,02
3	-1	1	10	2	3,57	9,23	2,2	5,07	24,9	2,19	5,95	37,15	1,12
4	1	1	30	2	2,67	9,2	2,18	5,88	22,8	2,17	5,51	30,41	1,13
5	1	0	30	1	4,42	10,83	2,18	6,23	20,6	2,13	5,32	28,8	1,14
6	-1	0	10	1	2,5	9,97	2,23	5,52	22,1	2,19	5,37	35,71	1,12

7	0	1	20	2	4,22	9,25	2,22	5,51	23,4	2,18	5,51	32,45	1,41
8	0	-1	20	0	5,5	9,58	2,19	5,14	16,6	2,17	5,52	22,92	1,03
9	0	0	20	1	3,43	9,06	2,2	5,5	21,2	2,15	5,25	30,94	1,08

$$Y_1 (\text{нач.схв.}) = 3,88 + 0,39 x_1 - 0,65x_1^2 - 0,72 x_2 + 0,75 x_2^2 - 0,55 x_1x_2 \quad (3.1)$$

$$Y_2 (\text{конец.схв.}) = 9,33 + 0,32 x_1 + 0,94x_1^2 - 0,68 x_2 + 0,05 x_2^2 - 0,28 x_1x_2 \quad (3.2)$$

$$Y_3 (\rho^{\text{ТВО}}) = 2,21 - 0,02 x_1 - 0,001x_1^2 - 0,007 x_2 + 0,01 x_2^2 + 0,007 x_1x_2 \quad (3.3)$$

$$Y_4 (R^{\text{ТВО}}_{\text{изг}}) = 5,60 + 0,41 x_1 + 0,22x_1^2 + 0,07 x_2 - 0,03 x_2^2 - 0,03 x_1x_2 \quad (3.4)$$

$$Y_5 (R^{\text{ТВО}}_{\text{сж}}) = 21,23 - 1,3 x_1 + 0,1x_1^2 + 3,65 x_2 - 1,25 x_2^2 + 0,53 x_1x_2 \quad (3.5)$$

$$Y_6 (\rho^{28}) = 2,158 - 0,018 x_1 - 0,002x_1^2 + 0,01 x_2 + 0,013 x_2^2 + 0,002 x_1x_2 \quad (3.6)$$

$$Y_7 (R^{28\text{сут}}_{\text{изг}}) = 5,23 + 0,01 x_1 + 0,13x_1^2 + 0,04 x_2 + 0,30 x_2^2 - 0,25 x_1x_2 \quad (3.7)$$

$$Y_8 (R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}) = 31,91 - 2,79 x_1 - 0,14x_1^2 + 6,23 x_2 - 4,71 x_2^2 - 0,92 x_1x_2 \quad (3.8)$$

$$Y_9 (\text{Кр}) = 1,15 - 0,02 x_1 - 0,06x_1^2 + 0,0762 x_2 + 0,04 x_2^2 + 0,042 x_1x_2 \quad (3.9)$$

Анализ коэффициентов моделей 3.1 и 3.2 показал, что длительный помол ($x_2 = +1$) золы с цементом снижает сроки схватывания вяжущего линейный эффект при втором факторе составляет ($b_2 = - 0,72$ и $b_2 = 0,68$), а максимальная концентрация золы ($x_1 = +1$) приводит к удлинению показателей Y_1 и Y_2 ($b_1 = 0,39$ и $b_1 = 0,32$).

Анализ прочностных свойств вяжущего по моделям 3.4, 3.5 и 3.7, 3.8 показал, что максимальное количество добавки золы ($x_1 = +1$) несколько снижает прочность на сжатие после ТВО и в 28-суточном возрасте ($b_1 = - 1,3$ и $b_1 = - 2,79$). Но при совместном измельчения золы с цементом прочность повышается ($b_2 = 3,65$ и $b_2 = 6,23$).

Коэффициент размягчения вяжущих во всех 9 ти точках эксперимента являлся удовлетворительным $\text{Кр} \geq 1,0$.

Наиболее наглядно изменение свойств вяжущего в зависимости от количества золы и времени измельчения можно пронаблюдать на рис. 3.16.- 3.11.

На рис. 3.16 видно, что наличие золы в вяжущем приводит к увеличению времени начала схватывания, что видно на рис. 1а. Так без ($x_1 = - 1$; $x_2 = -1$) помола при содержании золы 10% оно составляет 3,9 часа и увеличивается до 5,5 часа при количестве золы 20...22% . А конец

схватывания такого вяжущего составляет 10...11 часов. Однако наличие золы 30% и время помола 1 час снижает сроки схватывания от 5,5 до 3,6 часа. Дальнейший помол до 2 часов не приводит к снижению начала схватывания. Конец схватывания в этом случае снижается от 11,5 до 9,5 часа.

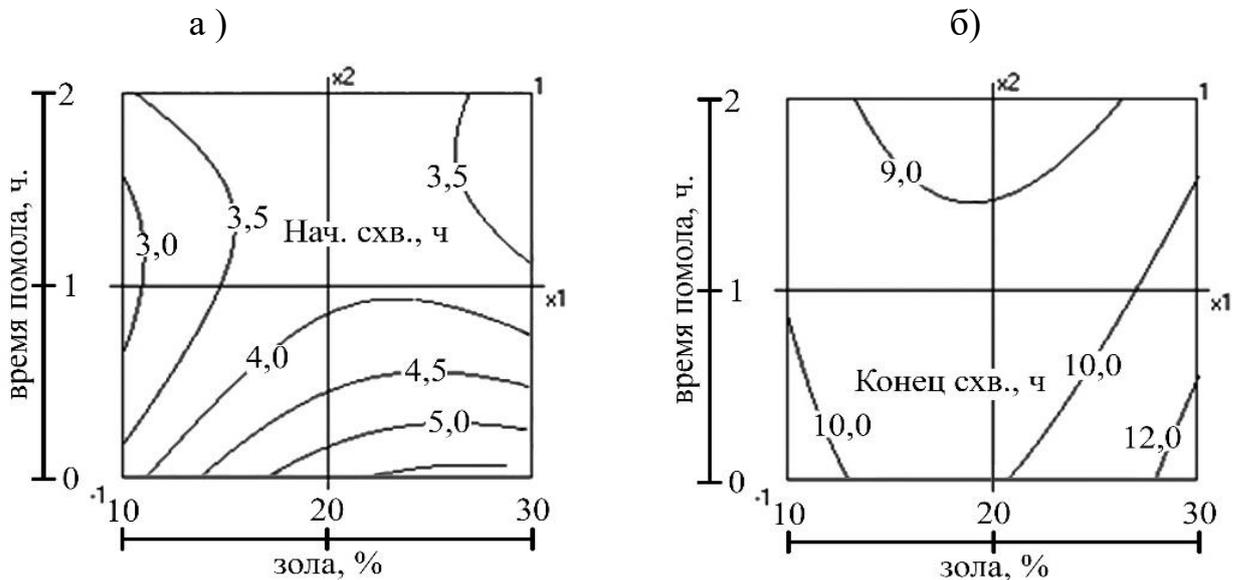


Рисунок 3.16 – Номограммы (а) начала и конца схватывания (б) вяжущего $Y_1, Y_2 = f(x_1, x_2)$

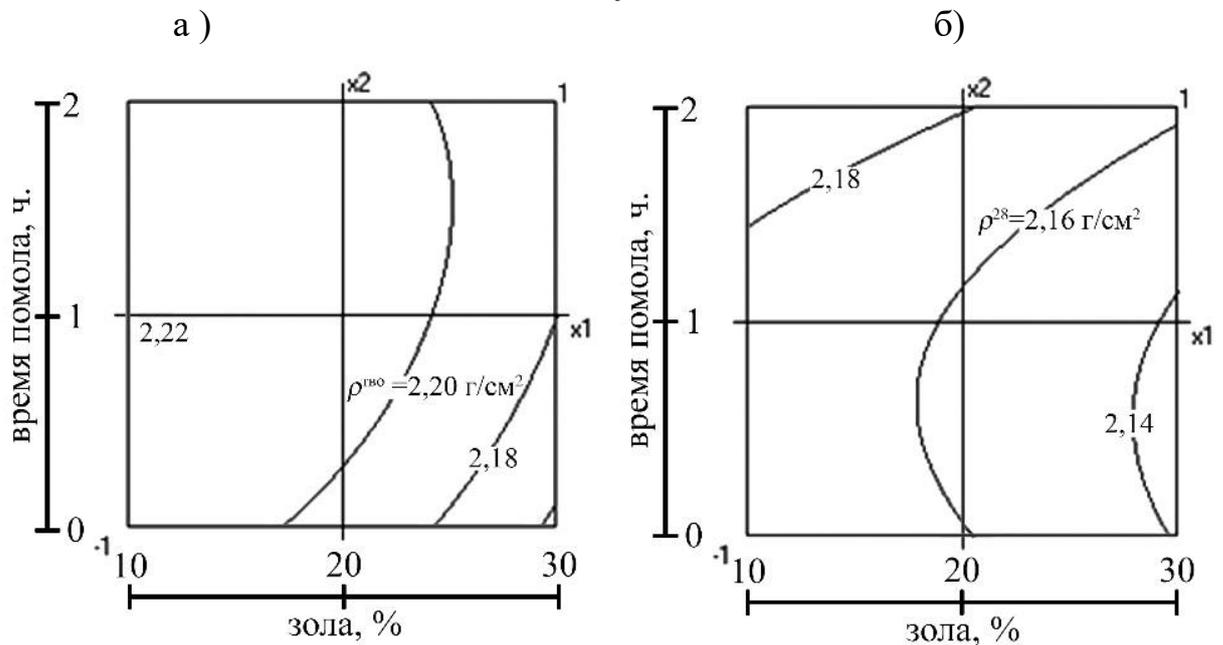


Рисунок 3.17 – Номограммы (а) плотности $Y_3 (\rho^{TBO}) = f(x_1, x_2)$;

(б) $Y_6 (\rho^{28}) = f(x_1, x_2)$

Показатели плотности вяжущего после ТВО (рис.3.18) несколько снижаются по мере наполнения вяжущего золой от 2,2 до 2,16 г/см³, а при 28 суточном твердении эти показатели изменяются от 2,17 до 2,14 г/см³.

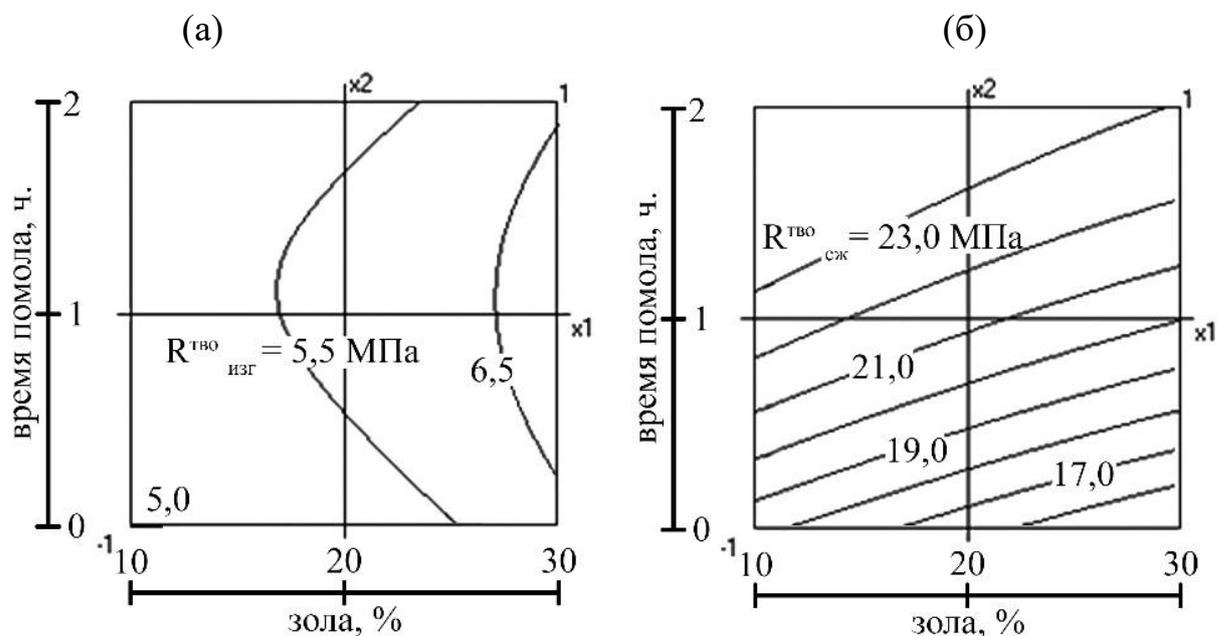


Рисунок 3.18 – Номограммы (а) прочности на изгиб после ТВО

$$Y_4 (R^{\text{тво}}_{\text{изг}}) = f(x_1, x_2); \quad (б) \quad Y_5 (R^{\text{тво}}_{\text{сж}}) = f(x_1, x_2)$$

С увеличением количества золы до 30% показатель $R^{\text{тво}}_{\text{изг}}$ после ТВО повышается незначительно от 5,0 до 6,0 МПа при разных уровнях измельчения. Однако прочность на сжатие $R^{\text{тво}}_{\text{сж}}$ по мере наполнения вяжущего золой без помола снижается от 18,5 до 16,0 МПа. Однако совместный помол вяжущего с золой 30% до 2 часов значительно увеличивает прочность от 16 до 23 МПа, т.е. на 50%, т.е. чем больше в вяжущем наполнителя тем длительнее должен быть помол для обеспечения максимальной прочности композиционного ЦЗВ (рис. 3.18).

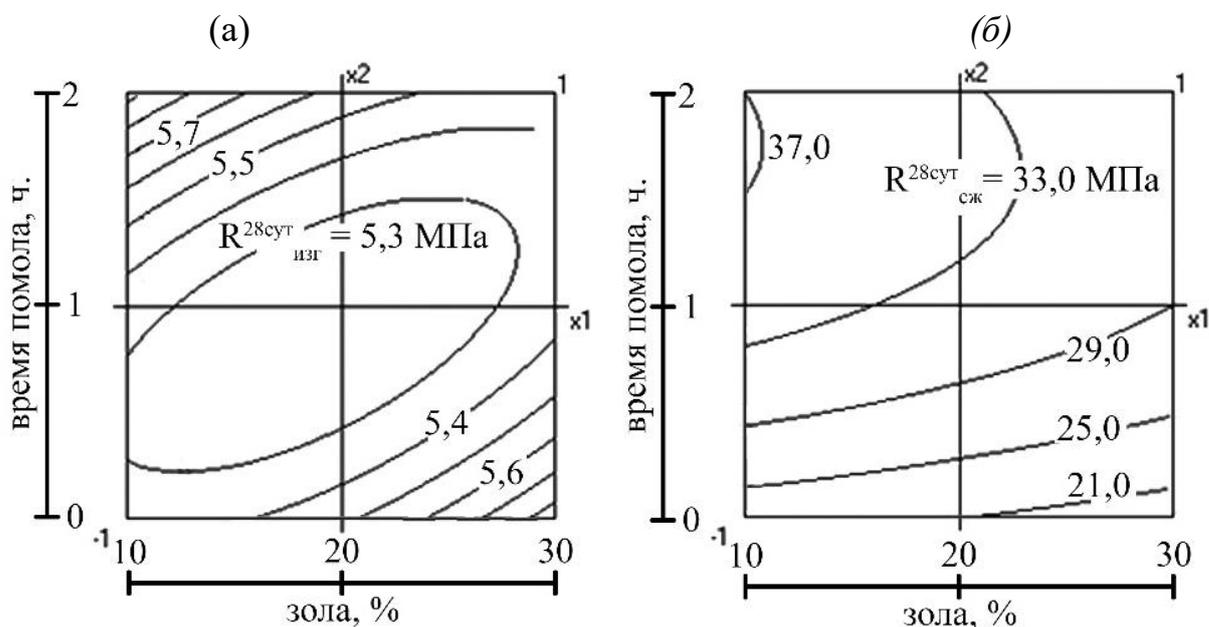


Рисунок 3.19 – (а) Прочность на изгиб 28 суток $Y_7 (R^{28\text{сут}}_{\text{изг}}) = f(x_1, x_2)$;
 (б) $Y_8 (R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}) = f(x_1, x_2)$

На рис. 3.19 видно, как после 28 суток твердения вяжущего без предварительного помола меняется $R^{28\text{сут}}_{\text{изг}}$ с увеличением количества золы до 30% от 5,3 до 5,85 МПа. А прочность $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}$ вяжущего без помола при 30% количестве золы незначительно снижается от 23 до 21 МПа. Но 2-х часовой помол вяжущего с золой 10% резко повышает прочность до 37 МПа, т.е на 60%. Для вяжущего с 30% содержанием золы при помоле 1 час обеспечивается $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 33$ МПа, а при помоле 2 часа значительный эффект повышения прочности не наблюдается и составляет $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 31$ МПа.

Для решения задачи максимальной утилизации золы 30% при совместном помоле с цементом в течение 1 часа $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}$ повышается от 19,0 до 29,0 МПа, при дальнейшем помоле до 2 часов наблюдается рост прочности до 33 МПа. Наиболее высокий технический эффект повышения прочности до 37 МПа достигается при совместном помоле 2 часа и количестве золы 10%.

Коэффициент размягчения (табл. 3.4) практически для всех серий 2-х факторного эксперимента составляет $K_p \geq 1,0$ и будет увеличиваться в дальнейшем, поскольку кислые золы замедляют набор прочности в начальный период твердения и максимальное значение достигается в период 90 суток и более.

Отмечается эффективность использования золы гидроудаления при твердении в условиях тепловлажностной обработки, но при условии ее активации с цементом.

Основные выводы по разделу 3.3.2

- **Сроки схватывания:**
 - Повышение содержания золы (от 10% до 30%) удлиняет начало схватывания (модель показывает увеличение на +0,39) и конца схватывания (+0,32).
 - Увеличение времени измельчения (на 1 час) снижает сроки схватывания (коэффициенты –0,72 и –0,68), особенно заметно при оптимальном содержании золы.
- **Прочностные характеристики:**

- При увеличении содержания золы без дополнительного измельчения наблюдается снижение прочности: ранняя прочность на сжатие уменьшается примерно на 1,3 МПа, а прочность через 28 суток – на 2,79 МПа.
- Совместный помол золы с цементом значительно повышает прочность (коэффициенты +3,65 для ранней прочности и +6,23 для 28-дневной), что приводит к увеличению прочности на 50–60%. Например, при 10% золы 28-дневная прочность может достигать 37 МПа.
- **Оптимизация состава:**
 - Для максимальной утилизации золы (30%) совместный помол в течение 1 часа повышает 28-дневную прочность до 33 МПа, тогда как для наивысшего эффекта (37 МПа) оптимальными являются 10% золы при помоле 2 часа.
- **Плотность и стабильность свойств:**
 - Плотность вяжущего после ТВО снижается незначительно (с 2,2 до 2,16 г/см³), а после 28 суток – с 2,17 до 2,14 г/см³.
 - Коэффициент размягчения остается удовлетворительным ($K_r \geq 1,0$) во всех экспериментальных сериях.
- **Общий вывод:**
Эффективное использование золы гидроудаления в композиционных вяжущих возможно при её активации совместным помолом с цементом. Такой подход позволяет оптимизировать сроки схватывания, улучшить прочностные характеристики и обеспечить стабильность вяжущих свойств при тепловлажностной обработке.

3.3.3 Композиционные цементношлакозольные вяжущие вещества с использованием золошлаковой смеси

При оценке влияния количества и способа введения золошлаковой смеси (ЗШС) на основные свойства цементозолошлакового вяжущего (ЦЗШВ) рассматривались 2 способа введения ЗШС в цемент: механическое перемешивание предварительно измельченной ЗШС с цементом (ЦЗШВ_м) и совместное их измельчение (ЦЗШВ_и).

В таблице 3.5 указаны свойства вяжущего (ЦЗШВ_м) и (ЦЗШВ_и) с различным наполнением ЗШС от 0 до 50%. Можно отметить, что водопотребность (НГ) вяжущих с добавкой 10-50 % из золошлаковой смеси при механическом перемешивании повышается с 27 до 32 %, а тонкость помола повышается незначительно.

Таблица 3.5 – Основные свойства композиционных цементных вяжущих веществ ЦЗШВ_М и ЦЗШВ_И

№ пп	Колич-во ЗШС в цементе, %	Норм-я Густота, %	Тонкость помола, % сито 008	Сроки схватывания, мин.		Предел прочности, МПа			
				Начало	Конец	R ^{тво} _{изг} , МПа	R ²⁸ _{изг} , МПа	R ^{тво} _{сж} , МПа	R ²⁸ _{сж} , МПа
<i>ЦЗШВ_М</i>									
1	0	24	87,0	96	447	4,12	6,88	19,32	33,46
2	10	27	87,0	178	312	5,15	6,3	21,7	33,04
3	30	28	88,3	212	372	4,18	5,4	19,4	27,8
4	50	32	89,0	204	364	4,63	4,47	17,1	16,6
<i>ЦЗШВ_И</i>									
5	0	24	87	96	447	4,12	6,88	19,32	33,46
6	10	26,8	87,6	145	460	4,4	6,4	20,1	34,44
7	30	29	89	145	320	5,08	7,95	19,8	28,86
8	50	29	89,3	170	330	4,8	5,9	18,4	28,16

Установлено, что водопотребность активированного вяжущего ЦЗШВ_И ниже, чем у механически смешанного ЦЗШВ_М и изменяется в пределах 26,8% до 29% при количестве добавки 10-50%.

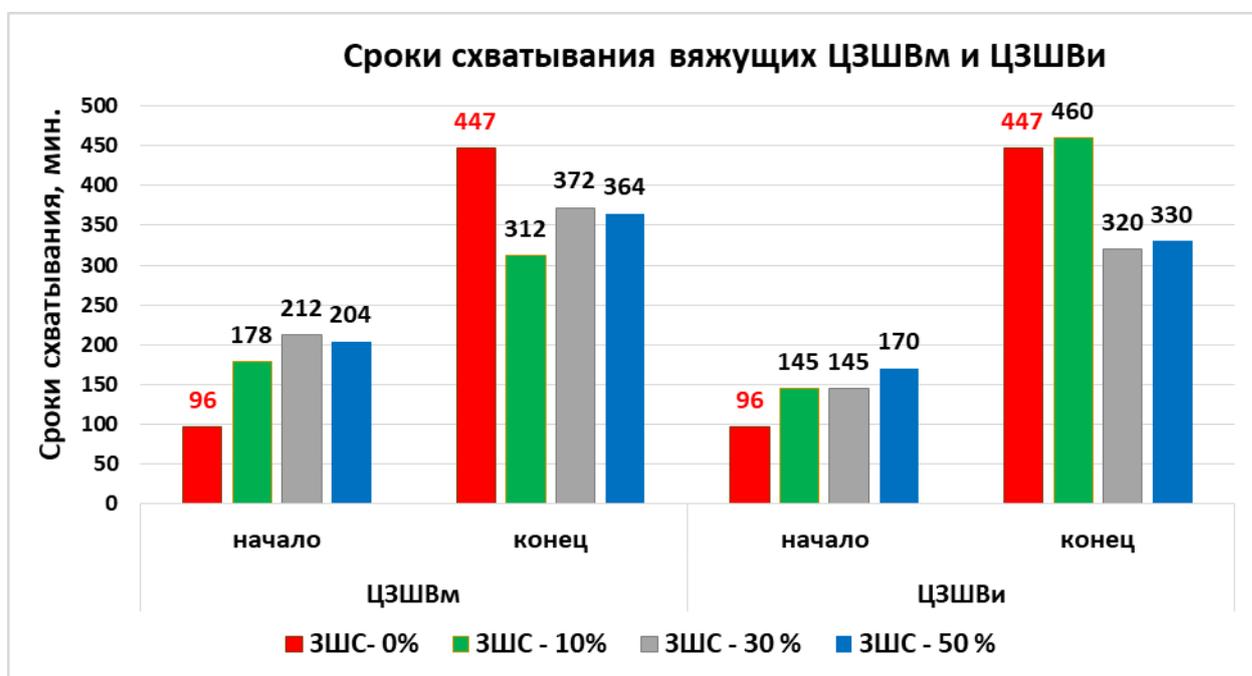


Рисунок 3.20 Сроки схватывания вяжущих ЦЗШВ_М и ЦЗШВ_И

На рис. 3.20 видно, что начало схватывания вяжущих ЦЗШВ_м, модифицированных золошлаковой смесью (10, 30 и 50 %) значительно удлиняются от 96 до 212, 214 минут. А конец схватывания наоборот сокращается от 447 до 364 минуты с 50% ЗШС. Те же изменения сроков схватывания наблюдаются и у активированного вяжущего ЦЗШВ_и.

Показатели прочности вяжущего, твердеющего в нормальных и условиях ТВО отличаются значительно при малых концентрациях золы и выравниваются при ее максимальном содержании. Прочность на сжатие ($R_{сж}$) образцов 28 суточного возраста при добавке 10% ЗШС остаются в пределах прочности взятого цемента как у ЦЗШВ_м, так и ЦЗШВ_и (33,04 МПа и 34,4 МПа, соответственно). Дальнейшее повышение содержания ЗШС до 50% снижает прочность $R^{ТВО}_{сж}$ вяжущего в два раза от 33,04 до 16,6 МПа (рис. 3.20).

По современным представлениям, пуццолановая реакция золы с цементом начинается довольно рано, но сказывается это на повышении прочности не сразу. Исследования ученых [21, 22, 26 и др.] показали, что пропаривание обуславливает заметную коррозию поверхности частиц золы через 7-8 часов, при твердении в нормальных условиях лишь на 28 суток.

Как известно, кинетика химических реакций зависит от температуры среды, вследствие чего в тепловлажностных условиях создается благоприятная среда для гидратации клинкерных минералов и взаимодействия ЗШС с продуктами гидратации цемента. Для ЦЗШВ_м количество ЗШС до 30 % практически не сказалось на прочности при изгибе и сжатии. После ТВО прочность ЦЗШВ_м вяжущего с 10 % ЗШС составила $R^{ТВО}_{изг} = 21,7$ МПа, что выше прочности чистого цемента 19,4 МПа. При твердении 28 суток прочность с ЗШС 10 % ЦЗШВ_м равна 33,04 МПа и цемента 33,46 МПа.

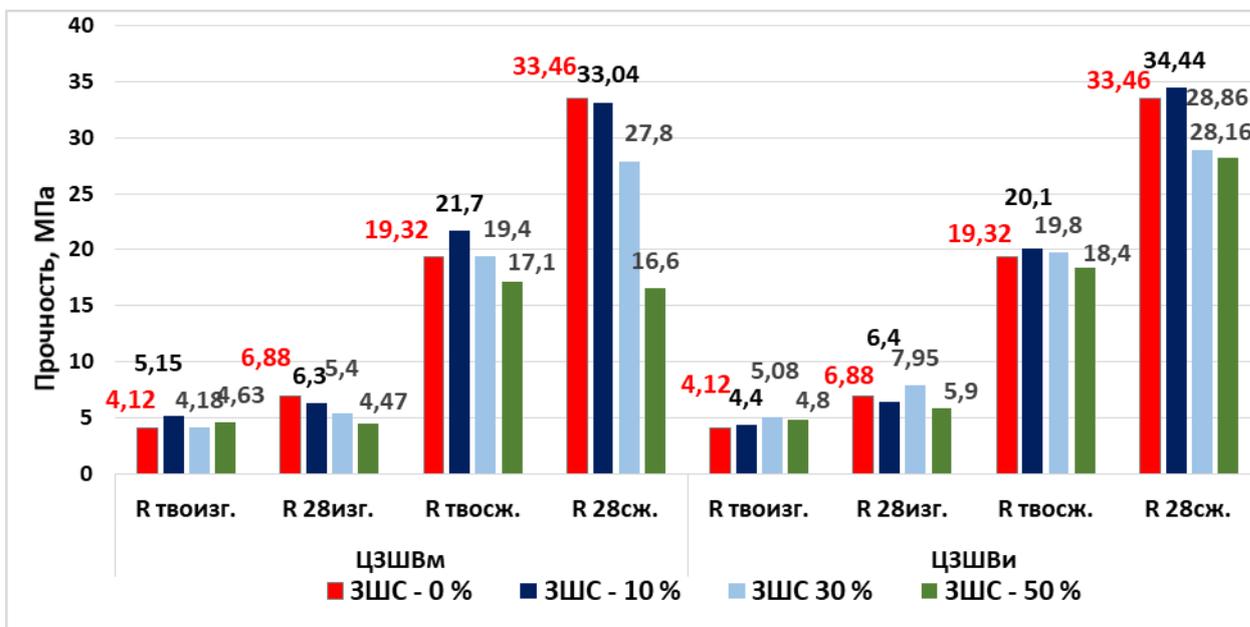


Рисунок 3.21 – Прочность при изгибе и сжатии ЦЗШВ_м и ЦЗШВ_и после ТВО и 28 суток твердения.

Проведенные испытания свойств композиционного вяжущего подтвердили, что для активированного вяжущего ЦЗШВ_и прочность практически не снижается по мере наполнения цемента ЗШС, если у чистого цемента $R_{сж}^{ТВО} = 19,32$ МПа, то у наполненного до 50 % прочность $R_{сж}^{ТВО} = 18,4$ МПа. При твердении 28 суток у вяжущего с 10 % ЗШС $R_{сж}^{28} = 34,44$ МПа, т.е. несколько выше прочности чистого цемента $R_{сж}^{28} = 33,46$ МПа.

Отмечается, что для обоих видов цемента ЦЗШВ_м и ЦЗШВ_и характерна повышенная прочность на изгиб как при твердении в нормальных условиях, так и при тепловлажностной обработке. Причины изменения рассмотренных цементов с ЗШС обусловлены теми же факторами, что и у цементов с использованием ЗГУ.

Совместное измельчение также способствует увеличению прочности активированного золоцементного камня по сравнению с механически перемешанными смесями, что подтверждает эффективность механической активации золы.

3.3.4 Оптимизация состава цементнозолошлакового вяжущего

Оптимизация состава вяжущего с добавкой к цементу (ЗШС) была проведена после реализации двухфакторного эксперимента (табл. 3.6), где в качестве варьируемых факторов были взяты: X_1 - количество золошлаковой смеси $30 \pm 20 \%$ и X_2 - время измельчения 1 ± 1 час.

В качестве выходных параметров качества для цементного вяжущего с добавкой ЗШС были выбраны: сроки схватывания, час. (начало - Y_1), (конец - Y_2), прочность на изгиб и сжатие, МПа после ТВО (Y_3 - $R^{тво}_{изг}$; Y_4 - $R^{тво}_{сж}$); и 28 суточном твердении в нормальных условиях (Y_5 - $R^{28сут}_{изг}$ МПа; Y_6 - $R^{28сут}_{сж}$).

Проведение эксперимента и статистическая обработка результатов позволила получить экспериментально-статистические модели второго порядка свойств вяжущего (3.10-3.15) и их графическое образы в виде номограмм (рис. 3.22-3.23).

Таблица 3.6 – План и результаты исследований вяжущего с ЗШС

№ опыта	План эксперимента				Результаты эксперимента					
	Кодированные переменные		Натуральные величины		Y_1	Y_2	$Y_{(3)}$	$Y_{(4)}$	$Y_{(5)}$	$Y_{(6)}$
	x_1	x_2	X_1 - ЗШС, %	X_2 - время изм.,ч	Нач. схват., час	Конец схват., час	$R^{тво}_{изг}$ МПа	$R^{тво}_{сж.}$ МПа	$R^{28сут}_{изг}$ МПа	$R^{28сут}_{сж}$ МПа
1	-1	-1	10	0	2,97	5,02	5,15	21,7	6,3	33,04
2	1	-1	50	0	3,4	6,07	4,63	17,1	4,47	16,6
3	-1	1	10	2	1,9	4,1	6,8	27,21	7,6	38,8
4	1	1	50	2	2,3	5,2	4,9	20	5,1	32,1
5	1	0	50	1	2,8	5,5	4,8	18,4	5,9	28,16
6	-1	0	10	1	2,4	4,7	4,4	20,1	6,4	34,4
7	0	1	30	2	2,2	5,8	5,6	22,9	6,1	32,8
8	0	-1	30	0	3,53	6,2	4,18	19,4	5,4	27,8
9	0	0	30	1	2,4	5,3	5,08	19,8	7,95	28,86

$$Y_1 (\text{нач.схв.}) = 2,59 + 0,21 x_1 - 0,08x_1^2 - 0,58 x_2 + 0,18 x_2^2 - 0,01 x_1x_2 \quad (3.10)$$

$$Y_2 (\text{конец.схв.}) = 5,61 + 0,49 x_1 - 0,67x_1^2 - 0,37 x_2 + 0,23 x_2^2 + 0,01 x_1x_2 \quad (3.11)$$

Анализ коэффициентов и графических образов ЭСМ сроков схватывания композиционного вяжущего с использованием ЗШС позволил установить зависимость их в первую очередь от времени активации. Так с увеличением времени измельчения от 0 до 2 часов время начала схватывания вяжущего снижается от 3,0 до 2,2 часа при содержании ЗШС 10%. Для составов с ЗШС 30% этот показатель падает от 3,3 до 2,2 часа. И при 50% содержании ЗШС время начала схватывания вяжущего падает от 3,4 до 2,4 часа. В ЭСМ (3.10) на это указывает коэффициент $b_2 = -0,58$. Некоторое повышение сроков начала схватывания вяжущего наблюдается в зависимости от концентрации ЗШС ($b_1 = 0,21$). При 10% $Y_1 = 3,0$ часа, при увеличении времени помола до 2 часов этот показатель составляет 3,4 часа (рис. 3.22а).

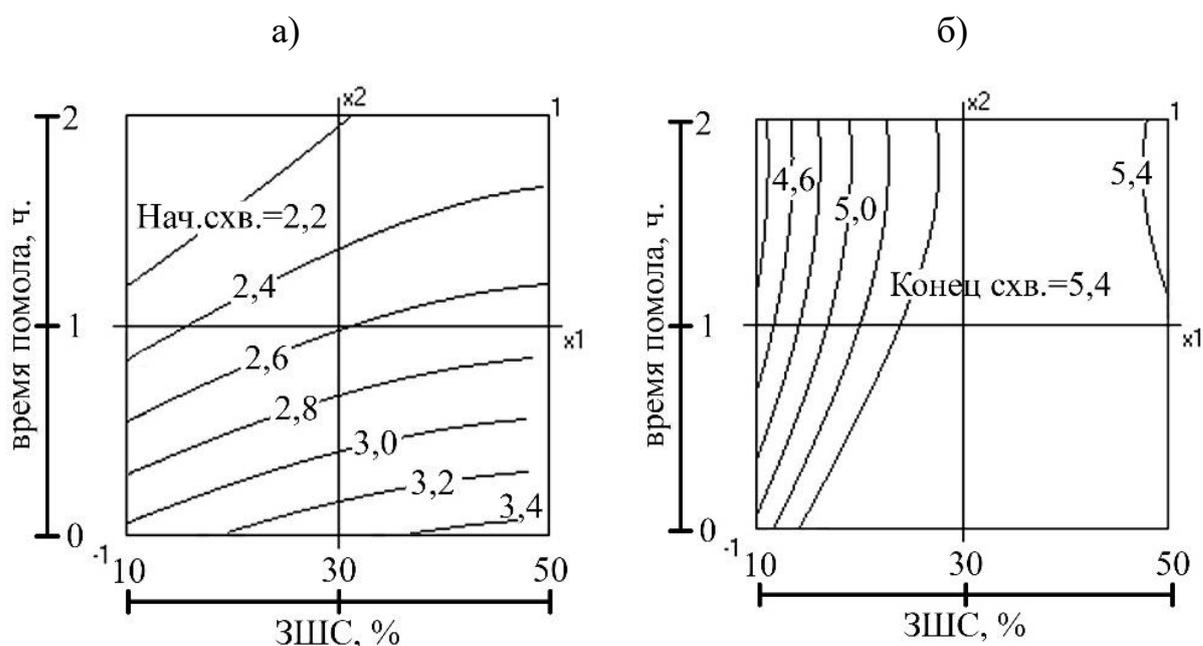


Рис. 3.22 – (а) Начало и конца схватывания (б) вяжущего ЦЗШВ_и
 $Y_1, Y_2 = f(x_1, x_2)$

Конец схватывания вяжущего несколько сокращается при малых концентрациях ЗШС 10-30% в вяжущем от 5,4 до 4,6 часа. Концентрация ЗШС 30-50% при изменении времени помола вяжущего от 0 до 2 часов значительного влияния на конец схватывания не оказывает и составляет 5,4 часа (рис.3.22 б).

$$Y_{(3)} (R^{TBO}_{изг}) = 4,65 - 0,34 x_1 + 0,16x_1^2 + 0,56 x_2 + 0,45 x_2^2 - 0,35 x_1x_2 \quad (3.12)$$

$$Y_{(4)} (R^{TBO}_{сж}) = 19,4 - 2,25 x_1 + 0,05x_1^2 + 1,99 x_2 - 1,96 x_2^2 - 0,65 x_1x_2 \quad (3.13)$$

По моделям (3.12, 3.13) можно отметить, что время (x_2) помола повышает прочность на изгиб $Y_{(3)} (R^{TBO}_{изг})$ ($b_2 = +0,56$) и для $Y_{(4)} (R^{TBO}_{сж})$ ($b_2 = +1,99$). На номограммах (рис. 3.23а) видно, что при 10% содержании ЗШС $Y_{(3)} (R^{TBO}_{изг})$ растет от 4,8 до 6,4 МПа. А при 50% содержании рост прочности не значителен от 4,6 до 5,2 МПа, коэффициент при x_1 ($b_1 = - 0,34$). Прочность $Y_4 (R^{TBO}_{сж})$ снижается по мере увеличения концентрации ЗШС: при механическом перемешивании от 20,5 до МПа 17,5 МПа; при помоле 1 час прочность ($R^{TBO}_{сж}$) снижается от 22 до 17 МПа; при помоле 2 часа это снижение составляет от 25 до 20 МПа (рис. 3.23 б).

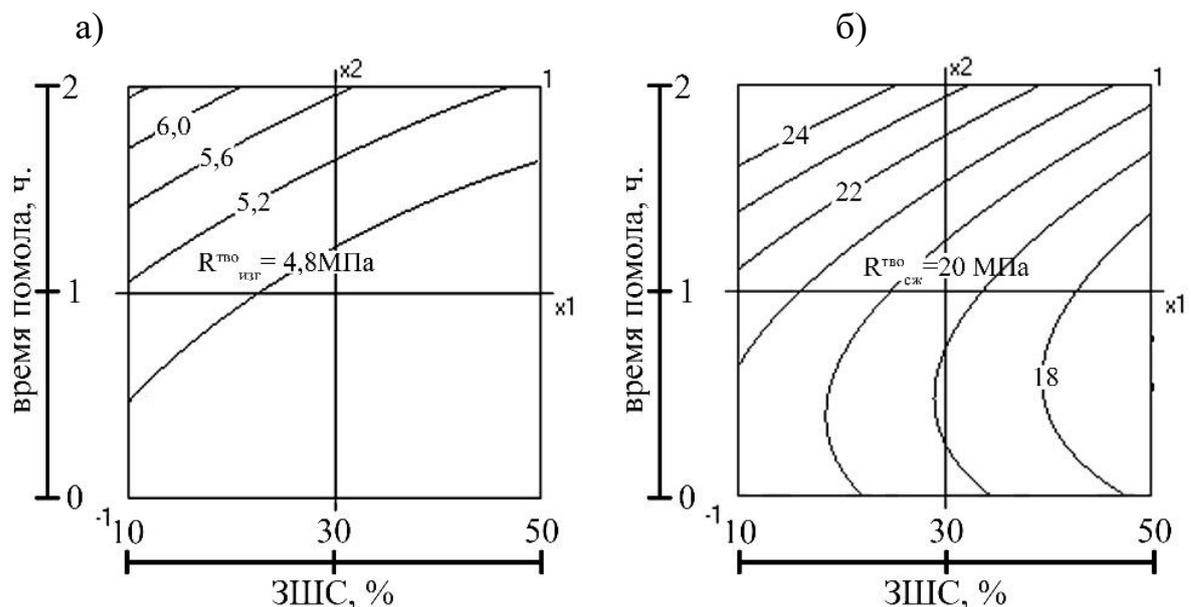


Рисунок 3.23 – Номограммы (а) прочности вяжущего (ЗШС+Ц) на изгиб после

$$TBO Y_3 (R^{TBO}_{изг}) = f(x_1, x_2); \quad (б) Y_4 (R^{TBO}_{сж}) = f(x_1, x_2)$$

Повысить прочность вяжущего при 10% содержании ЗШС возможно увеличив время помола до 2 часов от 20,5 до 25 МПа. А при концентрации ЗШС 50% при совместном помоле 2 часа рост прочности незначителен от 18 до 20 МПа (рис.3.23б).

$$Y_{(5)} (R^{28сут}_{изг}) = 7,10 - 0,81 x_1 - 0,52x_1^2 + 0,44 x_2 - 0,92 x_2^2 - 0,17 x_1x_2 \quad (3.14)$$

$$Y_{(6)} (R^{28сут}_{сж}) = 29,88 - 4,90 x_1 + 0,90x_1^2 + 4,28 x_2 - 0,38 x_2^2 + 2,44 x_1x_2 \quad (3.15)$$

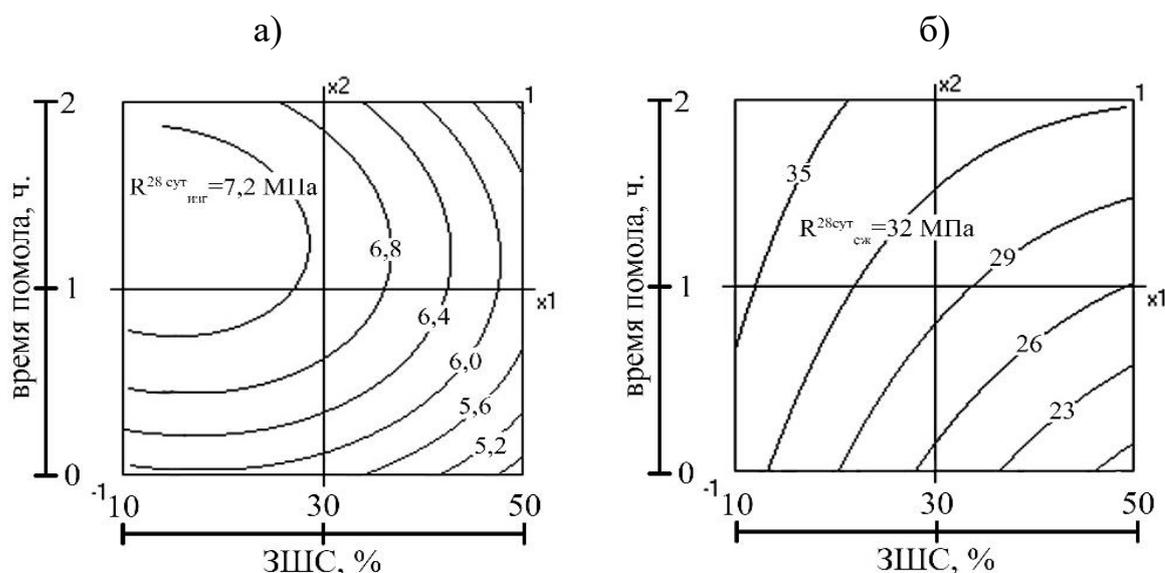


Рисунок 3.24 – Номограммы (а) прочности вяжущего (ЗШС+Ц) на изгиб 28 суток $Y_5 (R^{28сут}_{изг}) = f(x_1, x_2)$; (б) $Y_6 (R^{28сут}_{сж}) = f(x_1, x_2)$

По моделям (3.17 и 3.18) видно, что ЗШС снижает прочность вяжущего для $Y_{(5)} (R^{28сут}_{изг})$ линейный эффект при x_1 составляет $b_1 = -0,81$, для $Y_{(6)} (R^{28сут}_{сж})$ линейный эффект $b_1 = -4,9$. На рис. 3. 124а видно, что с увеличением концентрации ЗШС прочность вяжущего $R^{28сут}_{изг}$ снижается: для механически перемешанного вяжущего от 33 до 20 МПа; при помоле 1 час снижение составляет 35 до 26 МПа; при помоле 2 часа от 38 до 32 МПа.

Таким образом, максимальное наполнение 50% ЗШС в вяжущее должно сопровождаться обязательно совместным помолом. При помоле 1 час прочность $R^{28сут}_{сж}$ составляет 26 МПа, при 2 часа прочность растет до 32 МПа.

3.3.5 Композиционные цементно-шлаковые вяжущие

Техногенные топливные отходы, такие как зола-унос, зола гидроудаления, золошлаковая смесь, топливный шлак отличаются большим разнообразием физико-технических и химико-минералогических свойств, фазового, гранулометрического составов и соответственно по-разному будут влиять на

качество получаемой продукции на их основе. Поэтому для каждого вида топливного отхода необходимо разрабатывать индивидуальные методы их подготовки для их использования.

В работе при анализе качественных характеристик топливного шлака не смотря на небольшие различия в химическом составе с золошлаковой смесью и золой гидроудаления установлено, что в основном он представлен стеклофазой (85-98 %) и устойчивыми кристаллическими фазами (кварц SiO_2 , муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, гематит Fe_2O_3 , магнетит Fe_3O_4). Особенность топливного шлака это низкое содержание НУЧ, высокая плотность и преимущественно крупнозернистая структура.

При выполнении исследований оценивались различные виды композиционного цементношлакового вяжущего, полученного различными способами:

- ЦШВ_М – механическая смесь дробленого и просеянного через сито 0,16 топливного шлака с цементом;
- ЦШВ-_И - совместное измельчение дробленного шлака и цемента 1 час;
- ЦШВ_М - механическая смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;
- ЦШВ_И совместный помол тонкоизмельченного шлака с цементом 1 час.

Поскольку топливный шлак имеет наибольшее содержание стеклофазы, то дробление и измельчение будет способствовать повышению его активности.

Результаты испытаний вяжущих ЦШВ-_М и ЦШВ-_И, наполненных топливным приведены в табл. 3.7 и вяжущих ЦШВ_М и ЦШВ_И приведены в табл. 3.8. В составе цементных вяжущих изменялось содержание топливного шлака от 10 до 50%.

Таблица 3.7 – Основные свойства ЦШВ-_М, ЦШВ-_И (просеянный шлак) и ЦШВ-_М и ЦШВ-_И (шлак измельченный)

№ пп	Колич-во ЗШС в цементе,	Норм -я	Густота	Тонк ость помо па 0%	Сроки схватывания, мин.	Предел прочности, МПа
------	-------------------------	---------	---------	----------------------	-------------------------	-----------------------

	%			Начало	Конец	R ^{ТВО} _{изг} , МПа	R ²⁸ _{изг} , МПа	R ^{ТВО} _{сж} , МПа	R ²⁸ _{сж} , МПа
ЦШВ-I_м									
1	0	24	87,0	96	447	4,12	6,8	19,32	33,46
2	10	26	88,2	180	370	5,1	0	24,18	0
3	30	26	88,7	183	326	4,14	0	14,63	0
4	50	25	88,3	203	308	3,33	0	11,29	0
ЦШВ-I_и									
5	0	24	87	96	447	4,12	6,88	19,32	33,46
6	10	25	89,5	230	304	4,8	4,9	22,8	23,1
7	30	26	89,0	224	314	3,08	3,5	13,48	14,8
8	50	27	88	197	295	3,05	3,1	10,1	10,5
ЦШВ-II_м									
9	0	24	87	96	447	4,12	6,88	19,32	33,46
10	10	25	87,5	192	314	3,98	3,8	16,18	33,7
11	30	25	88,5	203	325	3,35	3,5	12,58	32,5
12	50	24	89	184	325	3,1	3,1	11,22	20,01
ЦШВ-II_и									
13	0	24	87	96	447	4,12	6,88	19,32	33,46
14	10	28	91	133	288	4,58	5,1	16,34	34,28
15	30	27	89	201	293	3,97	5,68	15,6	32,9
16	50	25	88	202	293	2,98	5,1	14,1	20,2

Для вяжущих ЦШВ-I_м при наполнении шлака нормальная густота (НГ) и тонкость помола несколько повышена по сравнению с НГ исходного цемента 24 %. Для вяжущего ЦШВ-I_м при наполнении 10, 30 и 50 % НГ составляет 26, 26 и 25%, а для вяжущего ЦШВ-I_и при наполнении 10, 30 и 50 % НГ равно 25, 26 и 27 %.

На рис. 3.26 и 3.27 показано, что время начала схватывания вяжущих с наполнителем из шлака значительно удлиняются не зависимо от способа приготовления. Что касается времени конца схватывания то у всех составов вяжущего наблюдается сокращение и наибольшее отмечается у ЦШВ - II_и от 447 до 293 минут.

Водопотребность и тонкость помола вяжущего (ЦШВ-I_и) с добавкой шлака 10-50% изменяются незначительно. Образцы характеризуются почти одинаковой прочностью как при твердении в 28 суточном возрасте так и при ТВО, что подтверждает гидравлическую активность шлака.

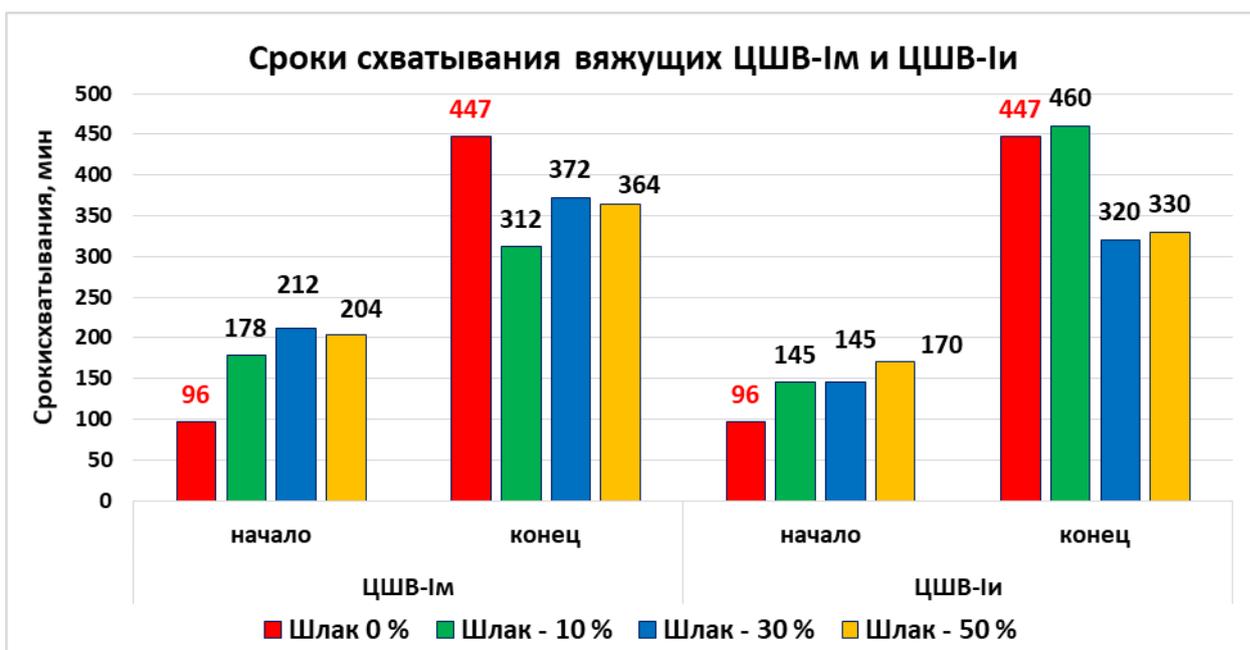


Рисунок 3.26 Сроки схватывания вяжущих ЦШВ-І_м и ЦШВ-І_и

Сроки начала схватывания вяжущих ЦШВ-І_м и ЦШВ-І_и значительно увеличиваются от 96 минут до 178, 212 и 204 минуты в зависимости от наполнения топливным шлаком, а конец схватывания наоборот сокращается. При максимальном наполнении сокращается от 447 минут до 364 и 330 при 50% наполнителя.

Поэтому следующая серия образцов готовилась из вяжущего, содержащего цемент с добавлением тонкоизмельченного шлака до тонкости помола, соответствующей тонкости помола цемента ЦЩВ-ІІ_м.

В табл. 3.7 приведены результаты испытания вяжущих ЦЩВ-ІІ_м и ЦЩВ-ІІ_и. На рис. 3.27 видно, что наличие наполнителя значительно удлиняет время начала схватывания вяжущего ЦЩВ-ІІ_м от 96 до 203 мин., для вяжущего ЦЩВ-ІІ_и от 96 до 293 мин. Время конца схватывания наоборот сокращается от 447 до 325 мин и от 447 до 293 мин., в зависимости от наполнения цемента.

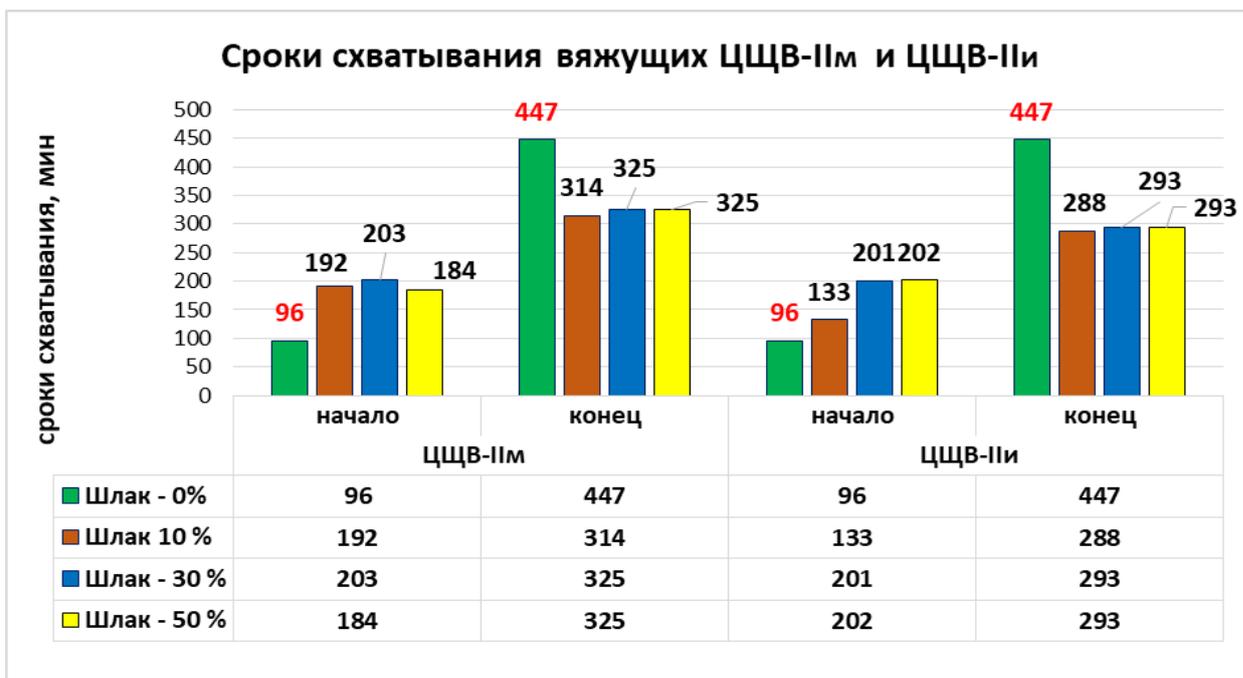


Рисунок 3.27 Сроки схватывания вяжущих ЦЩВ -II_м и ЦЩВ - II_и

В вяжущем ЦЩВ -I_м, твердеющего 28 суток в нормальных условиях количество цемента в составе смеси оказалось недостаточным для связывания частиц шлака в конгломерат и они разрушились. Однако при ТВО происходит активация составляющих шлака и образцы характеризуются достаточной прочностью. При добавке 10% шлака наблюдается некоторое повышение прочности образцов в 1,3 раза.

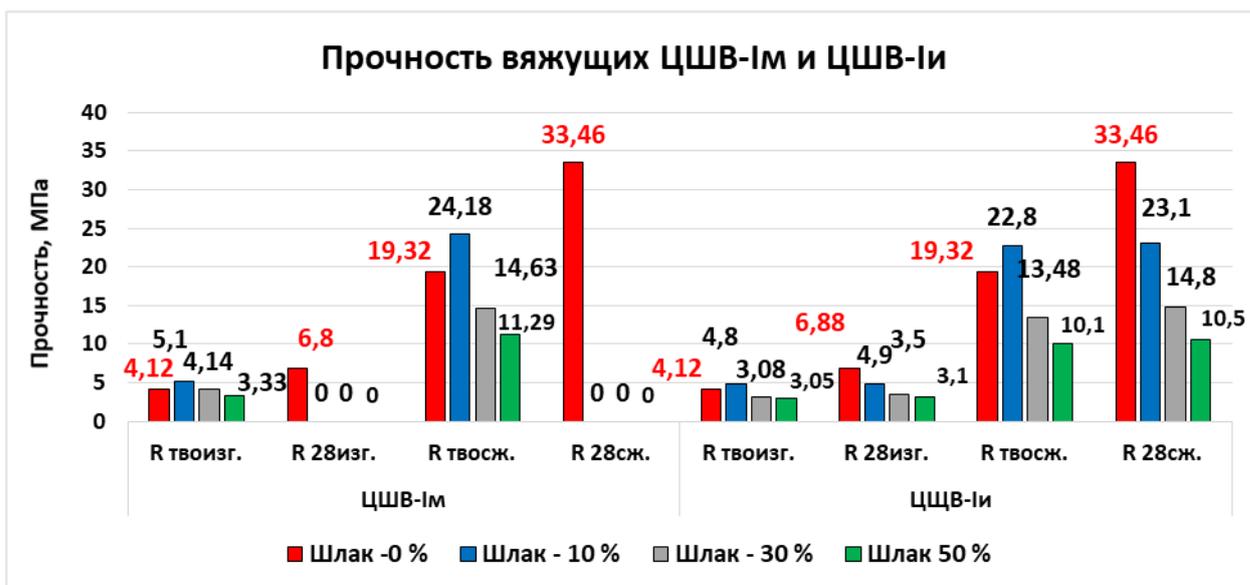


Рисунок 3.28 – Прочность на сжатие после ТВО и 28 суток нормального твердения вяжущего ЦЩВ -I_м и ЦЩВ - I_и

Это показывает гидравлическую активность топливного шлака, что подтверждается результатами испытания образцов, изготовленных из смесей цемента и шлака, подвергнутых совместному измельчению.

Повышенные прочности образцов, перемешанных путем дополнительного совместного измельчения показывают эффективность механоактивации шлака для ЦШВ - I_и: по мере наполнения $R^{TBO}_{сж} = 22,8; 13,48$ и 10,1 МПа. В условиях нормального твердения 28 суток $R^{28}_{сж} = 23,1; 14,8$ и 10,5 МПа. Отставание прочности при ТВО можно объяснить пониженной температурой обработки (80°C).

Результаты выше приведенных исследований позволили установить, что для повышения пуццоланической (гидравлической) активности шлака необходима дополнительная его активация измельчением. Активация шлака измельчением способствует стабилизации его физико-химических характеристик.

Дальнейшие исследования проводились на образцах вяжущего (ЦЩВ-Пи) полученного совместным измельчением цемента и тонкоизмельченного шлака в течение 1 часа (таблица 3.7). Результаты испытаний показали некоторое повышение прочности вяжущего при 10% содержании шлака и при 30% прочность практически неизменна.

Результаты испытаний подтвердили положительное влияние механоактивированного шлака на свойства вяжущего. Прочность вяжущего к 28 суткам практически равнозначна образцам на чистом цементе, что указывает на эффективность введения тонкоизмельченного шлака.

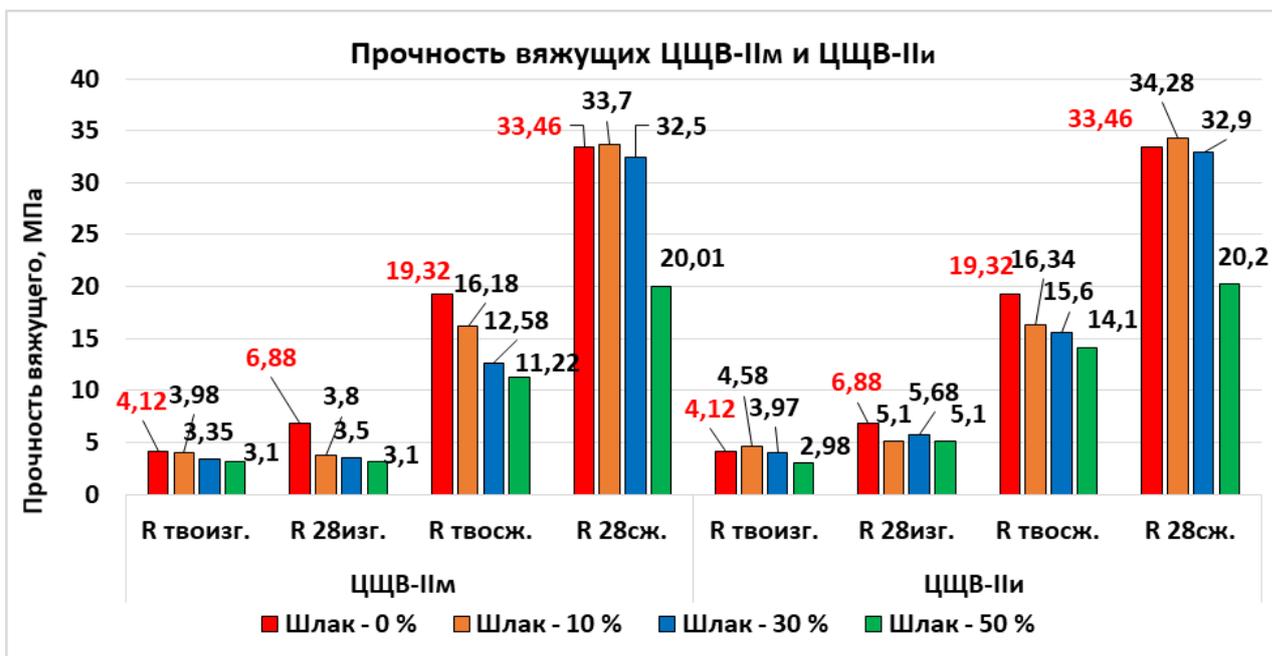


Рисунок 3.29 – Прочность на сжатие вяжущего ЦЩВ-II_м и ЦЩВ-II_и после ТВО и 28 суток нормального твердения

При содержании шлака 0; 10; 30% $R_{сж}^{28}$ составляет 33,46; 33,7; 32,5 МПа соответственно. Отставание прочности вяжущего после ТВО объясняется пониженной температурой обработки (80⁰С).

Рассматривая различные приемы введения топливного шлака к цементу установлено, что наиболее эффективно использовать активированные измельчением шлаки, что значительно увеличит их гидравлическую активность и стабилизирует физико-химические свойства.

Таким образом, выявлено, что для получения композиционных цементно-шлаковых вяжущих необходимо использовать активированные совместным помолом дисперсные топливные шлаки с цементом. Прочность на сжатие вяжущих ЦЩВ-II_м и ЦЩВ-II_и после 28 суток нормального твердения практически равнозначна даже при 30 % содержании топливного шлака. Прочность исходного цемента $R_{сж}^{28}$ составляет 33,46 МПа, а прочность композиционных вяжущих при этом 32,5 и 32,9 МПа.

3.3.6 Оптимизация состава цементношлакового вяжущего

Для проведения сравнительной оценки цементношлаковых вяжущих, полученных различными способами приготовления проведены исследования для определения их рецептурных факторов по комплексу основных свойств.

Оптимизация состава вяжущих с наполнителем к цементу из топливного шлака была проведена при реализации двухфакторного эксперимента. В качестве варьируемых факторов были взяты: X_1 – вид вяжущего ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и; X_2 – количество наполнителя из шлака 10, 30 и 50 % (табл. 3.8).

Выходными характеристиками качества для цементношлаковых вяжущих (ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и) с наполнителем из шлака были выбраны: сроки схватывания, мин. (начало), (конец), прочность на изгиб и сжатие, МПа после ТВО - $R^{TBO}_{изг}$; - $R^{TBO}_{сж}$; и 28 суточном твердении в нормальных условиях - $R^{28сут}_{изг}$ МПа;- $R^{28сут}_{сж}$ (табл.3.9).

Таблица 3.8 – Уровни варьирования факторов

Уровни/ Факторы	X_1 – вид вяжущего	X_2 количество Наполнителя, %
-1	ЦШВ-I _и	10
0	ЦШВ-II _м	30
1	ЦШВ-II _и	50

Таблица 3.9 – План и результаты эксперимента 2^3

№ опыта	План и результаты эксперимента				Результаты эксперимента					
	Кодир-ные переменные		Натуральные величины		Y_1	Y_2	$Y_{(3)}$	$Y_{(4)}$	$Y_{(5)}$	$Y_{(6)}$
	x_1	x_2	X_1 вид ЦШВ	X_2 кол. шлака, %	Нач. схв., мин	Конец схв., мин	$R^{TBO}_{изг}$ МПа	$R^{TBO}_{сж}$ МПа	$R^{28сут}_{изг}$ МПа	$R^{28сут}_{сж}$ МПа
1	-1	-1	ЦШВ-I _и	10	230	304	4,8	22,8	4,9	23,1
2	1	-1	ЦШВ-II _и	10	133	288	4,58	16,34	5,1	34,28
3	-1	1	ЦШВ-I _и	50	197	295	3,05	10,1	3,1	10,5
4	1	1	ЦШВ-I _и	50	202	293	2,98	14,1	5,1	20,2
5	1	0	ЦШВ-II _и	30	201	293	3,97	15,6	5,68	32,9
6	-1	0	ЦШВ-I _и	30	224	314	3,08	13,48	3,5	14,8

7	0	1	ЦШВ-II _М	50	184	325	3,1	11,22	3,1	20,01
8	0	-1	ЦШВ-II _М	10	192	314	3,98	16,18	3,8	33,7
9	0	0	ЦШВ-II _М	30	203	325	3,35	12,58	3,5	32,5

$$Y_1 (\text{Нач.схв.}) = 206 - 19 x_1 + 4,8 x_1^2 + 4,7 x_2 - 19,7 x_2^2 + 25 x_1 x_2 \quad (3.16)$$

$$Y_2 (\text{Конец.схв.}) = 326 - 6,5 x_1 - 23,5 x_1^2 + 1,2 x_2 - 7,5 x_2^2 + 3,5 x_1 x_2 \quad (3.17)$$

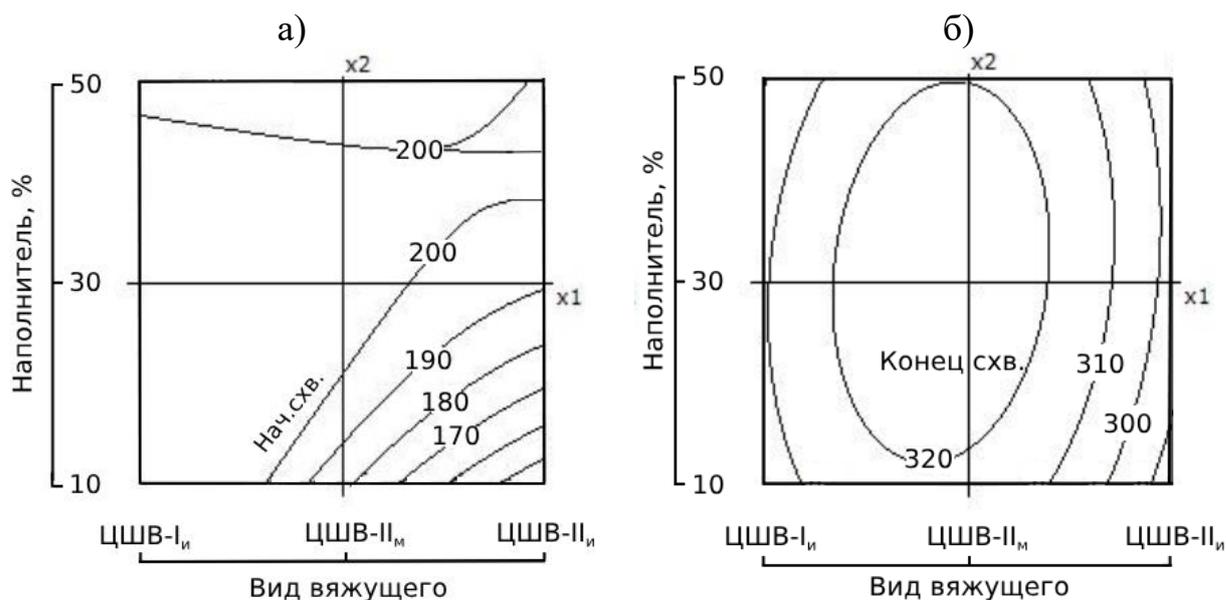


Рис. 3.30 - Сроки схватывания вяжущих ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и (а) начало и (б) конец схватывания.

При содержании в вяжущих шлака 10 % больший прирост начала схватывания наблюдается у вяжущего ЦШВ-I_и, далее у ЦШВ-II_м и затем у вяжущего ЦШВ-II_и. Конец схватывания равнозначен для вяжущих ЦШВ-I_и и ЦШВ-II_м, для более активированного вяжущего ЦШВ-II_и конец схватывания короче на 20 – 30 минут (рис. 3.30).

Прочность на изгиб и сжатие после ТВО падает по мере наполнения цемента шлаком. Об этом свидетельствует коэффициент ($b_2 = -0,7$) ($b_2 = -3,33$) при втором факторе x_2 (модели 3.18 и 3.19).

$$Y_{(3)} (R^{\text{TBO}}_{\text{изг}}) = 3,29 + 0,1 x_1 + 0,27 x_1^2 - 0,7 x_2 + 0,28 x_2^2 - 0,04 x_1 x_2 \quad (3.18)$$

$$Y_{(4)} (R^{\text{TBO}}_{\text{сж}}) = 12,5 - 0,04 x_1 + 2,06 x_1^2 - 3,33 x_2 + 1,22 x_2^2 + 2,64 x_1 x_2 \quad (3.19)$$

На рис. 3.31 наглядно видно, что с увеличением количества шлака от 10 до 50% прочность $R^{\text{TBO}}_{\text{изг}}$ падает от 4,5 до 3 МПа. Для прочности $R^{\text{TBO}}_{\text{сж}}$

интенсивное снижение от 20 до 10 МПа наблюдается у вяжущего ЦШВ-I_и. Для вяжущих ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и прочность $R_{сж}^{ТВО}$ изначально низкая порядка 16...17 МПа и падает до 12 МПа.

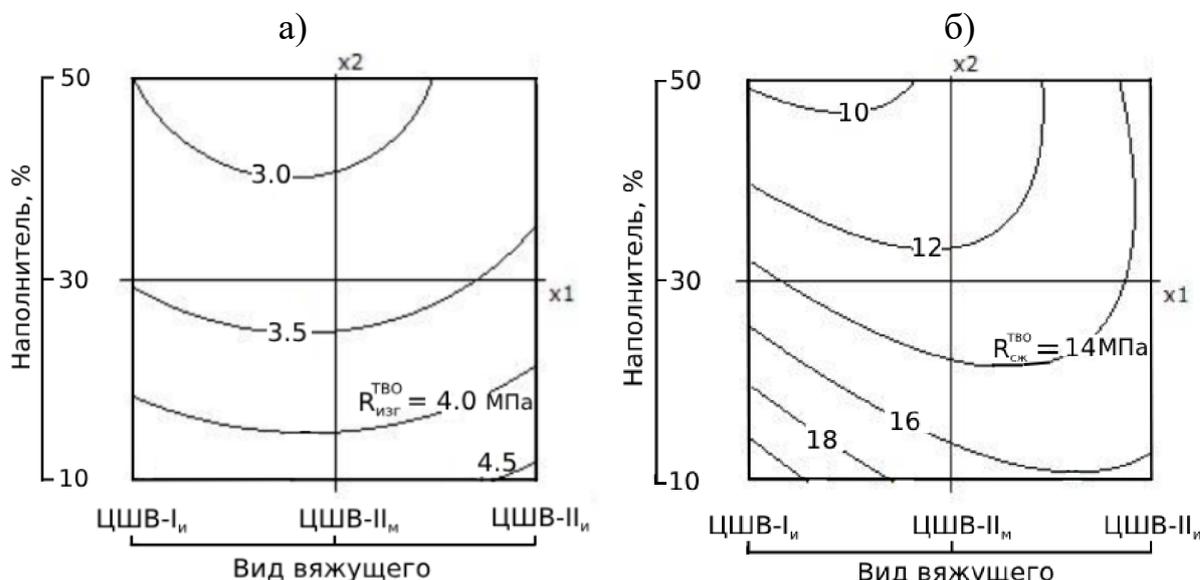


Рис. 3.31. Номограммы (а) прочности вяжущих ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и после ТВО $Y_3 (R_{изг}^{ТВО}) = f(x_1, x_2)$; (б) $Y_4 (R_{сж}^{ТВО}) = f(x_1, x_2)$

Для всех вяжущих ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и при 10 % прочность равнозначна $R_{изг}^{28сут} = 4,5$ МПа, при увеличении шлака до 30% $R_{изг}^{28сут} = 3,5$ МПа, а при 50 % шлака прочность незначительно снижается до $R_{изг}^{28сут} = 3$ МПа (рис. 3.31а).

Резкое падение прочности $R_{сж}^{ТВО}$ наблюдается у вяжущего ЦШВ-I_и от 20 до 10 МПа, т.е в 2 раза с увеличением количества шлака от 10 до 50 %. Для вяжущего ЦШВ-II_м прочность $R_{сж}^{ТВО}$ также снижается от 17 до 11 МПа и для вяжущего ЦШВ-II_и падение не значительно от 16 до 14 МПа (рис. 3.31б).

Та же тенденция снижения прочности $R^{28сут}$ наблюдается у вяжущих, твердеющих 28 суток. Коэффициент ($b_2 = - 0,42$) ($b_2 = - 6,7$) при втором факторе x_2 (модели 3.20 и 3.21).

$$Y_{(5)} (R_{изг}^{28сут}) = 3,5 + 0,73 x_1 + 1,1 x_1^2 - 0,42 x_2 - 0,04 x_2^2 + 0,45 x_1 x_2 \quad (3.20)$$

$$Y_{(6)} (R_{сж}^{28сут}) = 30,8 + 6,5 x_1 - 6,1 x_1^2 - 6,7 x_2 - 3,1 x_2^2 - 0,37 x_1 x_2 \quad (3.21)$$

На рис. 3.32а показано, что после 28 суток твердения снижение $R_{изг}^{28сут}$ для вяжущих ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м незначительно от 4... 4,5 до 3 МПа по мере

наполнения шлаком от 10 до 50%, а для вяжущего ЦШВ-II_и вообще не наблюдается снижение прочности и $R_{изг}^{28сут} = 5$ МПа.

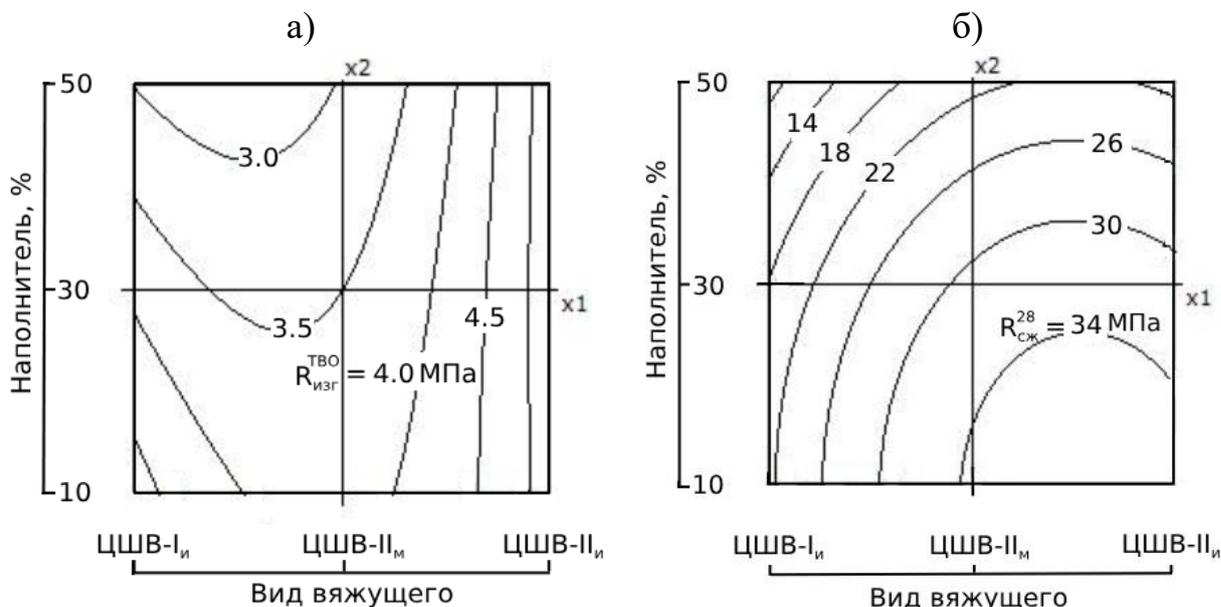


Рис. 3.32 – Номограммы (а) прочности вяжущих ЦШВ-I_и, ЦШВ-II_м и ЦШВ-II_и на изгиб и сжатие после 28 суток $Y_5 (R_{изг}^{28сут}) = f(x_1, x_2)$;

$$(б) Y_6 (R_{сж}^{28сут}) = f(x_1, x_2)$$

Прочность вяжущего ЦШВ-I_и на сжатие $R_{сж}^{28сут} = 22$ МПа при 10% шлака, а при 30 и 50% составляет 18 и 10 МПа соответственно. У вяжущего ЦШВ-II_м прочность снижается от 34 до 18 МПа, а для ЦШВ-II_и снижается от 34 до 22 МПа, т.е. наименьшее из всех вяжущих. Максимальная прочность $R_{сж}^{28сут} = 34$ МПа наблюдается у вяжущего ЦШВ-II_м при 10 – 12 % шлака, а для вяжущего ЦШВ-II_и 10-20%. Максимальное наполнение 50% обеспечивает у них прочность $R_{сж}^{28сут} = 22$ МПа.

Таким образом, можно отметить, что наибольшая прочность $R_{сж}^{28сут} = 34$ МПа установлена у вяжущего ЦШВ-II_и с содержанием шлака 20 %, что равнозначно прочности исходного чистого цемента 33 МПа. Учитывая повышенное содержание стеклофазы в топливном шлаке, для его активизации рекомендуется совместное измельчение цемента с молотым шлаком.

3.4 Оценка эффективности использования золошлаковых отходов в композиционных вяжущих веществах

Интерес к тонкодисперсным промышленным отходам в последнее время вызван не только проблемой их утилизации, но и их способностью принимать участие в процессах структурообразования композиционных материалов, к которым относятся цементы и бетоны.

Многие исследователи считают, что эффект наполнения проявляется не только в экономии цемента в равнопрочных бетонах, но и в ряде случаев повышением их эксплуатационных характеристик.

Эффективность использования минеральных добавок и возможность замены ими части клинкерных цементов основаны на их пластифицирующем и уплотняющем действии. При смешении цемента с тонкодисперсными наполнителями, происходит самоупорядочение гранулометрического состава вяжущего с получением гомогенного пластичного теста с плотной упаковкой частиц. Многие исследователи считают, получение долговечных бетонов с высокими эксплуатационными свойствами невозможно без использования вторичных цементирующих материалов.

Самым востребованным в гражданском строительстве являются бетоны общестроительного назначения ($R_{сж}=15-50$ МПа), за редким исключением высокопрочные ($R_{сж}=100-150$ МПа), сверхпрочные ($R_{сж}=150$), бетоны повышенной прочности ($R_{сж}=50-100$ МПа). Так называемые бетоны нового поколения предполагают освоение производства высокоэкономичных бетонов марок 150–700 общестроительного назначения с низким содержанием вяжущего (расход цемента 150–300 кг на 1 м³ бетона) [1, 2, 3, 4, 5].

Основной задачей данных исследований является показать возможность использования моногтоннажных топливных отходов как наполнитель в цементы и получения низкомарочных цементов и бетонов на их основе для гражданского строительства.

Для широкомасштабного использования и повышения эффективности использования вяжущих с техногенными отходами предполагается переоборудование дозировочных отделений старых бетоносмесительных узлов, рассчитанных на дозирование трех сухих компонентов бетонной смеси. Прецеденты такого переоборудования имеются в г. Рязани, где сдан в эксплуатацию новый завод ЖБИ с несколькими бункерами для дозирования 6–8 компонентов. В г. Тольятти на бетоносмесительном узле установлено 8 бункеров для компонентов бетона, приобретены дробилка и мельница для дробления и помола.

Какие бы научные исследования не проводились с целью создания эффективных бетонов, оценочным критерием по мнению авторов должен стать удельный расход цемента на единицу прочности [7].

В данных исследованиях для оценки эффективности использования ЗШО в цемент изучалось влияние их количества (10, 30, 50 %) и способа их введения в цемент на основные физико-механические характеристики композиционных вяжущих. Рассмотрены 2 способа введения ЗШО - механическое перемешивание и совместное измельчение в течение 1 часа:

1. ЦЗВ_м – механическая смесь просеянной золы гидроудаления и цемента;
2. ЦЗВ_и - активированная совместным помолом смесь золы гидроудаления и цемента;
3. ЦЗШВ_м - механическая смесь просеянной золошлаковой смеси и цемента;
4. ЦЗШВ_и- активированная совместным помолом смесь золошлаковой смеси и цемента;
5. ЦШВ_м - механическая смесь просеянного шлака и цемента;
6. ЦШВ_и- активированная совместным помолом смесь топливного шлака и цемента;
7. ЦШВ_и_м- механическая смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;
8. ЦШВ_и - активированная совместным помолом смесь тонкоизмельченного шлака и цемента;

При выполнении экспериментальных исследований были определены прочность на сжатие серии образцов после ТВО и 28 суток нормального твердения на различных наполнителях из ЗШО и разных способах их введения в цемент активностью $R_{сж} = 33,4$ МПа.

Установлено, что прочность композиционных вяжущих механически перемешанных с цементом после ТВО зависит от вида отхода ТЭС. Механическое введение различных отходов не снижает прочность композиционного вяжущего при минимальном количестве ЗШО 10%. При наполнении цемента просеянным топливным шлаком и золошлаковой смеси $R_{сж}^{ТВО}$ составляет 24,18 и 21,7 МПа, что равнозначно 70% прочности чистого цемента.

При твердении 28 суток в нормальных условиях наполнитель из тонкоизмельченного шлака остается инертным и не проявляет гидравлической активности. Прочность композиционного вяжущего с ЗШС (10%) практически не изменилась и составила 33,04 МПа

Композиционное вяжущее на цементе и тонкоизмельченном шлаке 10-30% показали аналогичные результаты, т.е. равнозначные активности чистого цемента 33,7 и 32,5 МПа.

Для композиционных вяжущих полученных помолом наполнителей с цементом наблюдается повышение их активности. Для золы ГУ и ЗШС при 30% обеспечивается удовлетворительная прочность образцов после ТВО.

При твердении 28 суток образцов композиционных вяжущих, активированных совместным помолом, наблюдается даже некоторое повышение прочности на наполнителе 10% ЗШС и измельченном шлаке до 34,46 и 34,28 МПа. Вяжущие с наполнителем из золы ГУ (10%) и измельченного шлака (30%) прочность равнозначна с активностью чистого цемента и составляет 32,7 и 32,9 МПа

Для оценки роли вида золошлаковых отходов, используемых в составе композиционных цементных вяжущих был использован коэффициент эффективности использования цемента в вяжущем: $K_{эф} = R_{сж}/Ц_0$,

где C_0 - относительный расход цемента в вяжущем, %.

Для расчета $K_{эф}$ были использованы результаты прочности на сжатие ($R_{сж}^{28}$) образцов, твердеющих 28 суток в нормальных условиях на композиционных вяжущих с 10; 30; 50 % ЗШО и различным способе их приготовления. Исследования проводились для образцов с заменой цемента ЗШО в дозировках 10, 30 и 50 % и с разными способами приготовления.

При умеренной замене цемента (10–30 % ЗШО) наблюдается сохранение или даже повышение $K_{эф}$, что свидетельствует о том, что золошлаковые отходы способствуют формированию прочной структуры, позволяя снизить расход цемента без потери механических свойств.

Высокая замена (50 % ЗШО) при значительном снижении содержания цемента $K_{эф}$ может уменьшиться, что указывает на необходимость оптимизации технологического процесса. Особое внимание следует уделять способам приготовления композиционных вяжущих, которые существенно влияют на развитие прочности. Оптимизация технологических режимов (смешивание, применение активаторов и т.д.) позволяет достигать высоких значений $K_{эф}$ даже при значительной замене цемента. Коэффициент $K_{эф}$ является полезным показателем для определения оптимального соотношения цемента и золошлаковых отходов. При правильном подборе дозировки и технологического режима использование ЗШО позволяет снизить расход цемента, сохраняя или улучшая прочностные характеристики композиционных вяжущих, что способствует экономии материалов и повышению эксплуатационных свойств бетона. (табл. 3.15, рис.3.27).

Таблица 3.15 – Коэффициент эффективности использования цемента в композиционных вяжущих с содержанием золошлаковых отходов ТЭС.

Вид вяжущего/ содерж. ЗШО	Ц + зола ГУ		Ц + ЗШС		Ц+ шлак просеян-й		Ц + шлак измелъч.	
	ЦЗВм	ЦЗВи	ЦЗШВм	ЦЗШВи	ЦШВІм	ЦШВІи	ЦШВІІм	ЦШВІІи
0	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335	0.335
10	0.238	0.363	0.367	0.383	0	0.257	0.374	0.381
30	0.261	0.304	0.397	0.412	0	0.211	0.464	0.47
50	0.203	0.432	0.332	0.563	0	0.21	0.402	0.41

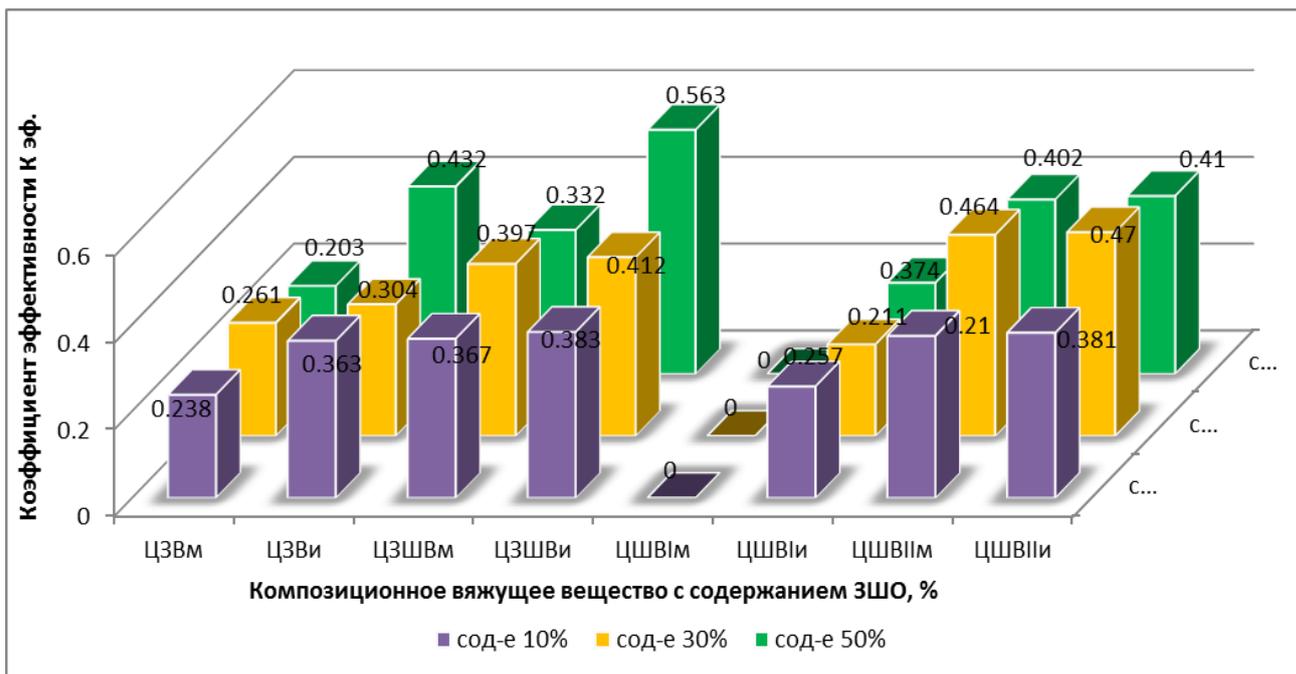


Рисунок 3.27 – Коэффициент эффективности ($K_{эф}$) использования цемента в вяжущих: ЦЗВ, ЦЗШВ, ЦШВ, ЦШВШ.

По результатам исследований установлено (табл. 3.15, рис.3.27), что для цементнозольных вяжущих (Ц + зола ГУ) при 10% замене наблюдается противоречивый эффект – одно значение (0.238) ниже базового уровня (0.335), другое (0.363) – выше. При 30% замене оба показателя (0.261 и 0.304) ниже нормы, а при 50% – одно значение значительно снижается (0.203), а второе возрастает (0.432). Это указывает на чувствительность эффективности к способу подготовки золы гидроудаления.

У цементнозолошлаковых вяжущих (Ц + ЗШС) при замене 10% значения $K_{эф}$ (0.367, 0.383) и 30% (0.397, 0.412) преимущественно выше базового уровня. При 50% замене наблюдается значительный разброс – одно значение почти на уровне (0.332), а другое существенно выше (0.563). Это говорит о потенциале повышения эффективности цементного вяжущего при оптимальной дозировке ЗШО данного типа.

Для цементношлакового вяжущего ЦШВІ (Ц + шлак просеянный) $K_{эф}$ крайне низкий – при 10% и 30% замены одно из значений равно 0, а второе

составляет 0.257 и 0.211 соответственно. Это свидетельствует о неэффективном использовании просеянного шлака в составе вяжущего.

Для цементношлакового вяжущего ЦШВШ (Ц + шлак измельч.) значения $K_{эф}$ стабильны и выше базового уровня: при 10% – 0.374 и 0.381, при 30% – 0.464 и 0.47, а при 50% – 0.402 и 0.41. Это указывает на высокую эффективность измельчённого шлака, способствующую повышению прочности композиционных вяжущих.

Таким образом, можно утверждать, что эффективность использования цемента в композиционных вяжущих зависит от вида и подготовки золошлаковых отходов. Измельчённый шлак и шлаковая смесь (Ц + ЗШС) демонстрируют повышенные $K_{эф}$, особенно при 30–50% замене, что позволяет снизить расход цемента без ущерба прочности. Просеянный шлак показывает низкую эффективность, а зола гидроудаления характеризуется переменным поведением, требующим дальнейшей оптимизации технологических параметров.

Заключение по главе 3

- Анализ химического состава пробы золошлаковой смеси и золы гидроудаления по содержанию кремнезема (SiO_2), глинозема (Al_2O_3) и оксидов железа ($FeO+Fe_2O_3$) практически идентичны. Некоторое отличие по содержанию CaO (5,74 и 6,47); MgO (0,74-1,14); K_2O+Na_2O (1,5 и 2,6);
- минералогический состав ЗШО представлен стекловидной и кристаллической фазами, аморфизированные зерна кварца, полевого шпата, карбоната кальция и магния, и выделившиеся из расплава двухкальциевый силикат, алюминат кальция, муллит и др.
- содержание $SiO_2+Al_2O_3 + Fe_2O_3$ по массе составляет 73,53 - 76,57% и по нормированному показателю, содержащие > 45% SiO_2 ЗШО относятся к кислому типу зол с не стабильным химическим составом, малым количеством свободного CaO и большим содержанием SiO_2 . Такие золы не

обладают самостоятельными вяжущими свойствами, но при добавлении интенсификаторов твердения они могут обладать вяжущими свойствами;

- Средняя насыпная плотность золы составляет 800-850 кг/м³, истинная плотность 1,82-2,20 г/см³, удельная поверхность золы составляет 2230-2250 см²/г. При помоле в шаровой мельнице 0,5 часа удельная поверхность золы достигает дисперсности цемента (310 м²/кг) далее в течении одного часа, дисперсность 360 м²/кг, 1,5 часа 380 м²/кг и при измельчении в течении трех часов, дисперсность остается в пределах 390 м²/кг, что характеризует легкую размалываемость золы;

- Зола рисовой шелухи, благодаря своим уникальным свойствам: повышенному содержанию диоксида кремния в аморфной форме (SiO₂ 81,3%) и дисперсности, обладает высокой пуццолановой активностью и перспективна в качестве наполнителя в цементные вяжущие. Она легко реагирует с гидроксидом кальция, образуя кальциевые силикатные гидраты (C-S-H), которые способствуют увеличению прочности, плотности цементного камня и соответственно долговечности бетона.

- отмечается эффективность использования золы при твердении в условиях ТВО. При замене 10 % цемента золой дисперсностью 3000- 5000 см²/г практически не наблюдается снижения прочности бетона нормального твердения, а после ТВО наблюдается повышение на 14 %;

- прочность образцов $R_{сж}^{ТВО}$ по мере наполнения вяжущего золой без помола снижается от 18,5 до 16,0 МПа. При совместном помолу цемента с золой 30% 2 часа увеличивает прочность от 16 до 23 МПа, т.е. на 50%;

- установлено, что чем больше в вяжущем наполнителя тем длительнее должен быть помол. Наиболее высокий технический эффект повышения прочности до 37 МПа достигается при совместном помолу 2 часа и количестве золы 10%, а при наполнении вяжущего 30% золой $R_{сж}^{28сут} = 33$ МПа;

- плотность ЦЗВи колеблется в пределах 2,14-2,18 г/см³. Выявлено, что увеличение времени помола ЦЗВ сокращается время начала схватывания от 5,5 до 3,5 часов. А конец схватывания сокращается от 12 до 9 часов;
- показана эффективность использования активизированной золы гидроудаления при твердении композиционного вяжущего в условиях ТВО;
- Установлено, что способ введения ЗШС в цемент влияет на водопотребность и сроки схватывания ЦЗШВ: При механическом перемешивании (ЦЗШВ_м) при добавке золошлаковой смеси от 10% до 50% водопотребность повышается с 27% до 32%, а время начала схватывания увеличивается с 96 минут до 212–214 минут. А при совместном измельчении вяжущее (ЦЗШВи) водопотребность остаётся ниже – от 26,8% до 29% – при аналогичных концентрациях, а тенденция увеличения сроков схватывания схожа с ЦЗШВ_м.
- Установлено, что при содержании ЗШС 10 % прочность ЦЗШВ_м $R^{28}_{сж}$ составляет 33,04 МПа, что равнозначно с прочностью исходного цемента (33,46 МПа). Тепловлажностная обработка значительно активизирует пуццолановую активность ЗШС. Так при 10 % ЗШС в ЦЗШВ_м прочность достигает 21,7 МПа, что выше, чем у исходного цемента (19,4 МПа).
- Установлено, что совместное измельчение ЗШС с цементом (ЦЗШВи) способствует улучшению прочностных характеристик по сравнению с простым механическим перемешиванием (ЦЗШВ_м), что подтверждается стабильными значениями прочности даже при повышенных дозировках (до 50% ЗШС).
- Выявлено, способ введения топливного шлака влияет на водопотребность и сроки твердения. Для ЦШВ I_м, ЦШВ I_н с введением шлака от 10% до 50% приводит к удлинению начала схватывания с 96 минут до 178–212 минут, при этом конец схватывания сокращается с 447 до 364–330 минут.
- Композиционные цементно-шлаковые вяжущие (ЦШВи) не способны твердеть в нормальных условиях и после 28 суток практически были разрушены, т.к. частицы шлака не участвовали в процессе гидратации. Это

- объясняется тем, что шлак имел достаточно грубые фракции до 016 мм и не активизировался, а выделяемый гидроксид кальция не был связан;
- твердение образцов ЦШВ_м в условиях ТВО при 10% топливного шлака обеспечивает рост прочности от 19,32 до 24,18 МПа. Дальнейшее увеличение его до 50% снижает прочность образцов в два раза.
 - для вяжущего (ЦШВ-I_и) при содержании шлака 0; 10; 30% $R_{сж}^{28}$ составляет 33,46; 33,7; 32,5 МПа соответственно.
 - для вяжущего (ЦШВ-II_и), полученного совместным помолом цемента и тонкоизмельченного шлака в течении 1 часа $R_{сж}^{28}$ практически неизменна и при 0-10-30% и составляет 33,46; 34,28 и 32,98 МПа;
 - время начала схватывания ЦШВ-II_и удлиняется почти в 2 раза, а конец схватывания сокращается от 447 до 293 мин. по мере увеличения содержания шлака до 50%;
 - Для достижения оптимальных эксплуатационных характеристик композиционных цементно-шлакозольных вяжущих рекомендуется использовать активированные дисперсные топливные шлаки с содержанием наполнителя в пределах 10–20%. Это позволяет сохранить или даже немного повысить прочность (R_{28} сжатия \approx 33–34 МПа) при приемлемых сроках схватывания и водопотреблении, что особенно важно при тепловлажностном твердении.
 - установлено, что наибольший $K_{эф}$ характерен для вяжущих, полученных совместным измельчением цемента и золошлаковой смеси. В зависимости от концентрации ЗШС $K_{эф}$ меняется от 0,383 до 0,563. Для вяжущего на основе цемента и золы ГУ $K_{эф}$ коэффициент эффективности изменяется от 0,335 до 0,432; Для вяжущих при 30 % наполнении шлаком ЦШВ-II_м $K_{эф} = 0,464$ и для ЦШВ-II_и $K_{эф} = 0,47$.

Глава 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ПРИРОДНЫХ МЕЛКИХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ И ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ БЕТОНА

Основные преимущества и эффективность использования золошлаковых отходов (ЗШО) в качестве мелкого заполнителя для бетона заключается в следующем:

1. Уплотнении структуры бетона, за счет заполнения пор мелкодисперсными ЗШО между цементными зернами и крупными заполнителями. Вследствие снижается пористость и водопоглощение повышается плотность, водонепроницаемость и прочность бетона.

2. Повышению прочности и долговечности способствуют активные компоненты ЗШО, участвующие в пуццолановых реакциях и способствуя образованию дополнительных гидратных соединений. За счет снижения капиллярной пористости уменьшаются усадочные деформации и повышается морозостойкость.

3. Экономический эффект достигается за счет замены (полной или частичной) природного песка ЗШО, что снижает затраты на сырье. А пуццолановая активность ЗШО позволяет уменьшить расход цемента, сокращая производственные расходы.

4. Экологическая устойчивость в использовании ЗШО заключается в уменьшении объем отходов на полигонах и снижает экологическую нагрузку. Также сокращение добычи природного песка способствует сохранению природных ресурсов.

5. Улучшение технологических свойств обеспечивается за счет повышенной дисперсности ЗШО, что улучшает удобоукладываемость смеси, снижая водоотделение и расслаиваемость. А возможность уменьшения водоцементного отношения положительно влияет на прочность и долговечность бетона.

4.1 Оценка гранулометрического состава заполнителей из природного сырья и топливных отходов.

Зерновой состав заполнителей влияет на получение бетона заданной прочности при минимальном расходе цемента. Цементное тесто расходуется на обволакивание поверхности зерен и заполнение пустот между ними. Наименьший расход цемента достигается, когда удельная поверхность и пустотность зерен стремятся к минимуму.

Теоретически пустотность заполнителя не зависит от крупности зерен, но для её уменьшения в состав вводят более мелкие частицы, заполняющие промежутки между крупными. Однако это увеличивает удельную поверхность, что может привести к перерасходу вяжущего. Поэтому соотношение зерен разных размеров должно быть оптимальным, обеспечивая минимальные пустотность и суммарную поверхность для получения нерасслаиваемой смеси и бетона заданной плотности и прочности.

Одним из способов улучшения свойств композиционных материалов является подбор оптимального гранулометрического состава заполнителей. Наиболее плотная упаковка зерен достигается при приближении состава к эталонной кривой просеивания минеральной части тяжелого бетона [2, 3, 4, 5]. Это минимизирует пористость системы, что позволяет сократить расход цемента [227, 228]. Методика оптимизации упаковки частиц заполнителя с использованием компьютерного метода моделирования, основанная на алгоритме перекатывающих частиц «drop and roll», дает количественную оценку полученной упаковки [8, 230, 231].

Также на свойства бетонной смеси и прочность бетона влияет характер поверхности заполнителей. Смеси на гладких заполнителях (например, гравии) обладают лучшей удобоукладываемостью, а на шероховатых (например, щебне) — хуже укладываются, но дают более прочный бетон. Это связано с большей площадью сцепления шероховатого заполнителя с цементным камнем.

Основываясь на вышеизложенные предположения после изучения основных свойств топливных отходов и природных песков в работе был изучен их гранулометрический состав с использованием компьютерной программы для принятия технологических решений на предмет использования в качестве заполнителей.

В исследованиях использовались пески, применяемые заводами стройиндустрии для производства бетона и железобетона: песок отходов дробления Чуйский (МК-2,55) и природный песок Аламединского карьера (МК-3,26).

На заводах оптимизация гранулометрии достигается смешиванием этих песков в пропорции 50/50. Результаты испытаний приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Гранулометрический состав песков месторождений ЧУ

<i>Исходный зерновой состав песка местор. Чу ($M_k=2,55$)</i>					
Отверстия в ситах, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Частн.ост. + дельта, %	Полные остатки, %	Полный проход, %
5,0	0	0	0	0	100
2,5	240	24	115	24	76
1,25	60	6	85	30	70
0,63	230	23	60	53	47
0,315	380	38	61	91	9
0,16	70	7	45	98	2
0	20	2	40	100	0
всего	1000	100	407		
<i>Скорректированный зерновой состав песка местор. Чу</i>					
5,0	0	0		0	100
2,5	283	28,3		28,3	71,7
1,25	209	20,9		49,2	50,8
0,63	147	14,7		63,9	36,1
0,315	150	15,0		78,9	21,1
0,16	113	11,3		90,2	9,8
0	98	9,8		100	0
всего	1000	100			

Для оценки влияния гранулометрического состава на основные свойства МЗБ был проведен расчет оптимального зернового состава,

который заключался в подборе массовой доли исходных мелких заполнителей таким образом, чтобы расчетная кривая зернового состава проектируемой смеси сблизилась (или полностью совпала) с кривой эталонного зернового состава.

Исходное распределение частиц песка ЧУ ($M_k = 2,55$) по данным ситового анализа следующее; преобладает фракция – 0,315 мм (38%), при этом доля промежуточной фракции 1,25 мм всего 6%, что указывает на избыток очень мелких частиц и недостаток среднего размера. А избыточное содержание мелких частиц обеспечивает более плотную упаковку, но недостаток средних фракций способствует неэффективному заполнению пустот, что влечёт за собой увеличение расхода цемента для достижения требуемой плотности бетона.

Песок Аламедин ($M_k = 3,26$) обладает более выраженной крупной фракции – 2,5 мм, что составляет 36%, а доля фракции 1,25 мм – 11%. При этом мелкие частицы размером 0,315 мм и ниже представлены в меньшем объёме по сравнению с ЧУ. При использовании данного песка в исходном виде может привести к нежелательным последствиям. Однозначно, что более крупные зерна обеспечивают устойчивость бетонной смеси, но недостаток мелких заполнителей может привести к повышенной пустотности, поэтому необходимо принятие соответствующих технологических решений. Либо скорректировать зерновой состав и обеспечить присутствие мелкодисперсной части.

На рисунках 4.1 и 4.2 показано различие между кривыми гранулометрического состава песков после отсева и скорректированного составов. Приведены данные по количеству мелкого заполнителя каждой фракции (частные и полные остатки), необходимые для плотной упаковки мелкозернистого бетона (МЗБ).

Методика и программа оптимизации была реализована для разработанного МЗБ на композиционном цементно-золашловом вяжущем и

мелком заполнителе оптимальной granulometрии и сравнивалась с заводским бетоном (контрольный) одного класса М200 В15 (ЗАО ЖБИ «Кум-Шагыл»).

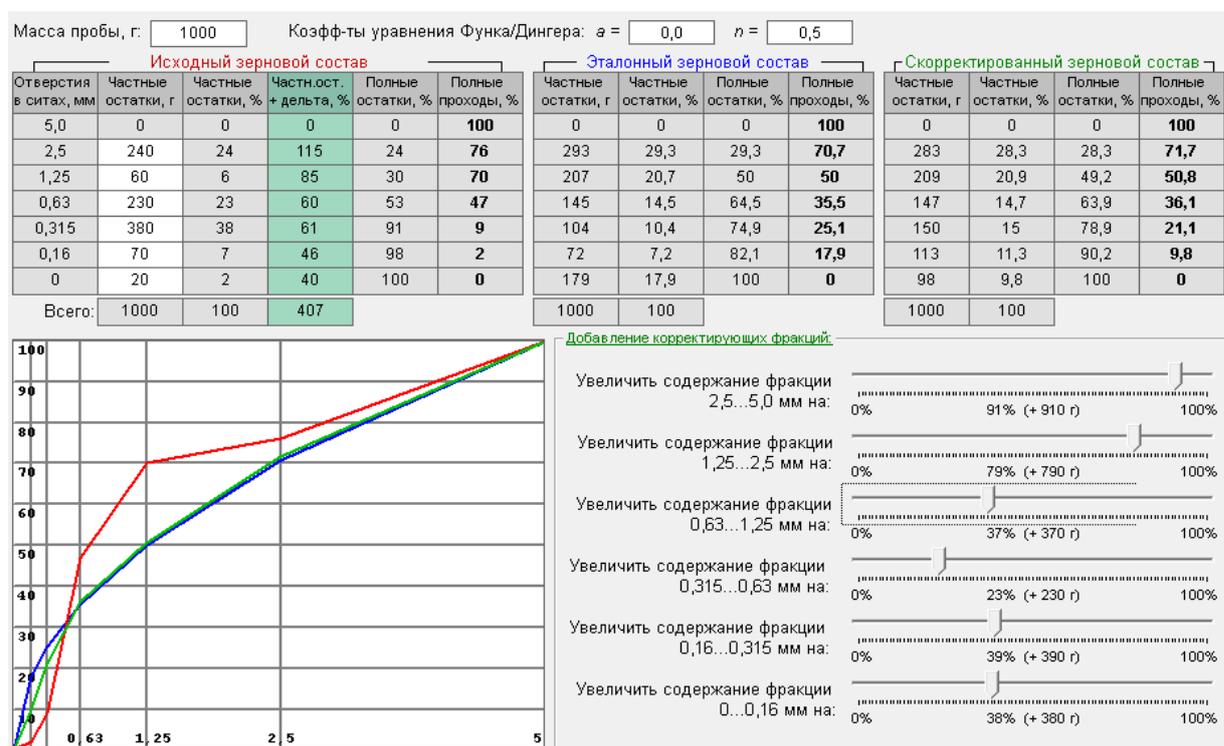


Рисунок 4.1 – Оптимальный состав искусственного природного песка месторождения ЧУ.

1. Исходный зерновой состав песка месторождения ЧУ.

По данным таблицы, в исходном варианте песка наблюдается неравномерное распределение фракций. Основная масса зёрен концентрируется на ситах 2,5 мм (24%) и 0,315 мм (38%), тогда как промежуточная область (1,25 мм) представлена в недостаточном количестве (около 6%).

Подобная диспропорция может привести к избыточным пустотам между относительно крупными зёрнами (2,5 мм), которые не успевают заполнить более мелкие фракции. Для компенсации пустотности требуется большее количество цемента при приготовлении мелкозернистого бетона, поскольку. Также неравномерное распределение частиц в структуре бетона может сказаться на его прочности и стойкости к внешним воздействиям.

2. Скорректированный зерновой состав песка месторождения ЧУ.

Скорректированный песок демонстрирует более сбалансированное содержание всех фракций. В частности, заметно увеличилась доля промежуточной фракции (1,25 мм) до 20,9%, что способствует уплотнению структуры и снижению объёма пор. Кроме того, распределение зёрен по ситам стало плавнее: на сите 2,5 мм доля выросла до 28,3%; на более мелких ситах (0,63 мм и 0,315 мм) содержание отрегулировано таким образом, чтобы выровнять кривую распределения зерен песка. Часть очень мелкой фракции (ниже 0,16 мм) доведена до 11,3% и 9,8% соответственно, что даёт более «заполняющий» эффект.

Благодаря этим изменениям общая кривизна гранулометрической кривой становится ближе к оптимальной, уменьшая пустотность песка и улучшая его сочетаемость с цементным тестом.

Таблица 4.2 – Гранулометрический состав песков месторождений Аламедин

<i>Исходный зерновой состав песка местор Аламедин ($M_k=3,26$)</i>					
Отверстия в ситах, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Частн.ост. + дельта, %	Полные остатки, %	Полный проход, %
5,0	0	0	0	0	100
2,5	360	36	60	36	64
1,25	110	11	44	47	53
0,63	205	20,5	30,5	67,5	32,5
0,315	155	15,5	24,5	83	17
0,16	100	10,0	31	93	7
0	70	7,0	16	100	0
всего	1000	100	206		
<i>Скорректированный зерновой состав песка местор. Чу</i>					
5,0	0	0		0	100
2,5	291	29,1		29,1	70,9
1,25	214	21,4		50,5	49,5
0,63	148	14,8		65,3	34,7
0,315	119	11,9		77,2	22,8
0,16	150	15,0		92,2	7,8
0	78	7,8		100	0
всего	1000	100			

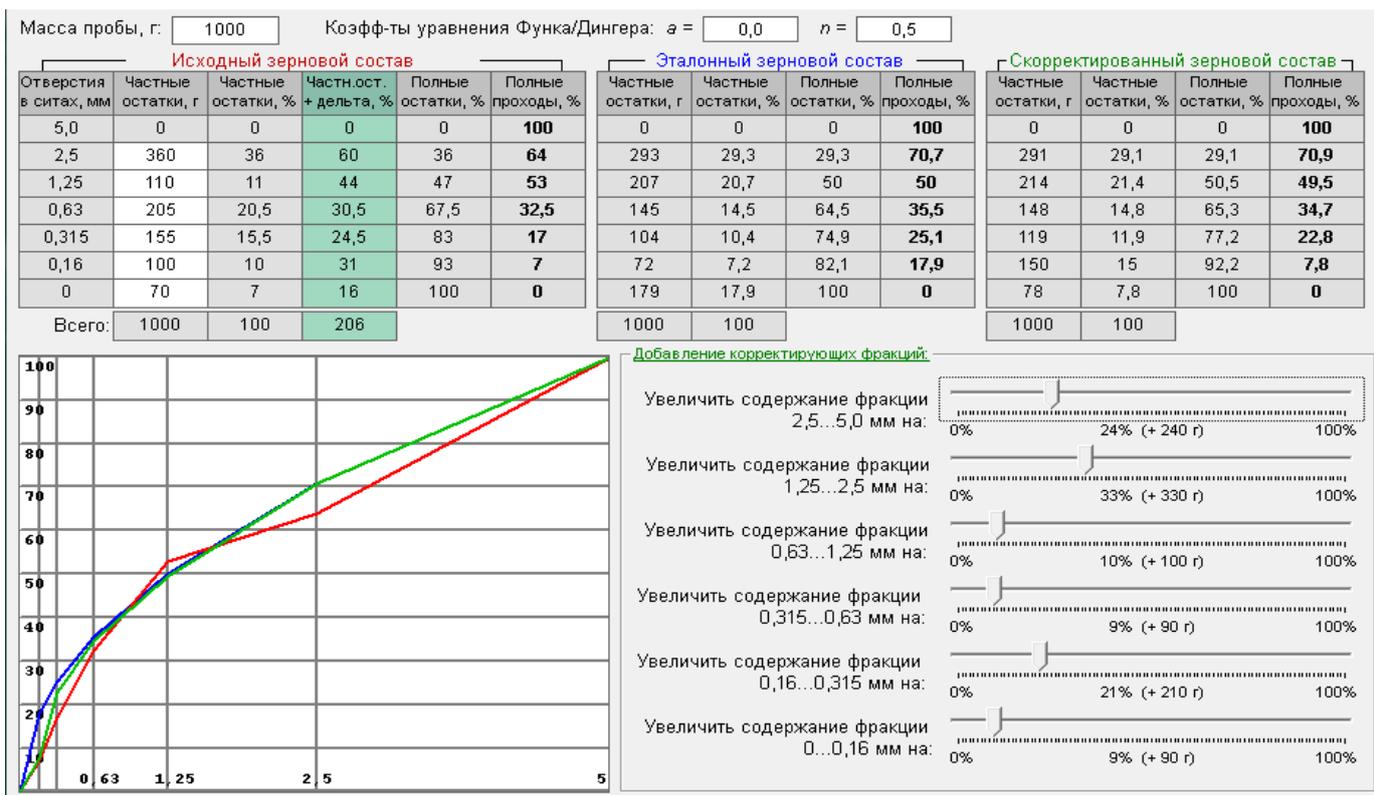


Рисунок 4.2 – Оптимальный состав природного песка месторождения Аламедин.

1. Исходный зерновой состав песка Аламедин

Исходный гранулометрический состав песка Аламедин характеризуется следующими особенностями: Крупная фракция (2,5 мм): Значительная доля – 36% материала задерживается на сите 2,5 мм. Такая преобладающая крупная фракция может приводить к формированию крупных пустот в структуре бетонной смеси. Промежуточная фракция (1,25 мм): Лишь 11% песка приходится на эту фракцию, что создаёт дефицит средних частиц, способствующих эффективной упаковке зёрен. Мелкие фракции (0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм и остаточные частицы): Общее распределение мелких частиц складывается следующим образом: 20,5% на 0,63 мм, 15,5% на 0,315 мм, 10% на 0,16 мм и 7% – остаток. Кумулятивно до получения полного прохода через сито 5,0 мм состав достигает 100%.

В сумме получаем негладкую гранулометрическую кривую с выраженным скачком между крупными и средними фракциями. Это может

приводить к увеличению пустот в бетонной смеси и, как следствие, к повышенному расходу цемента для достижения требуемой плотности и прочности.

2. Скорректированный зерновой состав песка Аламедин

После корректировки зерновой состав был изменён следующим образом: Фракция 2,5 мм: Доля уменьшается с 36% до 29,1%, что снижает избыточное содержание крупных частиц. Фракция 1,25 мм: Значительно возрастает до 21,4%, что помогает восполнить дефицит средних частиц и создать более непрерывное распределение. Фракция 0,63 мм: Доля немного снижается – до 14,8%, однако в совокупности с изменениями в других диапазонах обеспечивает более равномерную упаковку. Фракции 0,315 мм, 0,16 мм и остаточные частицы: Значения остаются в пределах 11,9%, 15,0% и 7,8% соответственно, что вместе формирует плавное кумулятивное распределение до 100%.

Обе корректировки зернового состава песков направлены на достижение оптимальной плотности заполнения, что позволяет снизить расход вяжущего, улучшить механико-технические характеристики бетонной смеси и обеспечить стабильное качество конечного продукта.

В результате скорректированная гранулометрическая кривая становится более равномерной, отсутствуют резкие скачки между крупными и мелкими частицами, что позволяет достичь оптимальной упаковки зерен. В заводских условиях мелкий заполнитель должен быть классифицирован по фракциям, которые в дальнейшем в определенной пропорции вводятся в процессе приготовления для обеспечения оптимальной плотной упаковки частиц заполнителя в бетоне. В реальных заводских условиях это требует дополнительного капиталовложения и определенной культуры производства.

Для решения задачи приведения крупнозернистых песков к идеальной упаковке в МЗБ представляется возможность введения тонкодисперсных топливных отходов.

4.2 Исследование основных свойств и гранулометрического состава заполнителей из топливных отходов.

Использование золошлаковых отходов (ЗШО) в качестве заполнителей в бетоне требует комплексной оценки их характеристик для обеспечения высокого качества и долговечности конструкций. Основные преимущества применения ЗШО включают снижение потребления природных ресурсов (песка, щебня), улучшение удобоукладываемости смеси, повышение долговечности бетона благодаря пуццолановой активности и снижение веса конструкций. Ключевые характеристики ЗШО, определяющие их пригодность для бетона: гранулометрический состав, плотность и удобоукладываемость смеси. Мелкие частицы золошлаков способствуют заполнению пустот между крупными заполнителями, повышая плотность бетона.

Шлак по зерновому составу представляет собой смесь частиц размером 0,14–30 мм с отдельными включениями более крупных фракций, что позволяет рассматривать его как естественную комбинацию мелкого и крупного заполнителей. Благодаря этому шлаки ТЭС целесообразно использовать в легких и тяжелых бетонах в качестве основного заполнителя, для частичной замены щебня (20–50%) или улучшения гранулометрического состава песков.

Результаты испытаний (гл. 2) показали, что исследуемые топливные отходы по содержанию сернокислых и сернистых соединений в пересчете на SO_3 не превышает 3% массы, что могло бы вызвать разрушение бетона.

Для предотвращения распада топливные отходы использовались после длительного вылеживания в отвалах (3–6 месяцев), что способствовало гашению свободного оксида Са, выщелачиванию растворимых солей и окислению топливных остатков.

В отличие от природных заполнителей топливные отходы не содержат практически лещадных и игловатых зерен, глинистых и вредных примесей и должны обеспечить улучшение прочностных характеристик.

Замена природных заполнителей топливными отходами позволит снизить расход цемента благодаря улучшению granulometрии смеси и упрочнению контактной зоны между ними и цементным камнем.

Кроме того, применение золошлаковых смесей в качестве основного заполнителя бетона более экономично, поскольку шлаковые фракции, заменяя часть мелкого песка и щебня, улучшают зерновой состав, а пылевидная зола, играя роль активного микрозаполнителя, улучшает пластичность бетонной смеси, повышает коэффициент эффективности использования цемента.

Основные физико-механические характеристики заполнителя из топливных отходов приведены в таблице 4.3, 4.4.

Таблица 4.3 – Физико-механические свойства дробленого топливного шлака и золошлаковой смеси.

Материал	Показатели									
	$\rho_{нас}$, г/см ³		Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа		Стойкость к силикатному распаду		Стойкость к железистому распаду		Вп, %	
Фракции	5-10	10-20	5-10	10-20	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10
Заполнители из шлака	7,46	4,67	1,64	1,02	2,2	5,1	0	0	14,83	9,5
Заполнители из ВШС	16,4	10,23	0,38	0,31	1,8	4,5	0	0	12,3	9,0

Водопотребность дробленого шлака выше, чем у заполнителей из горных пород: для песка средней крупности – 6–8%, для мелкого – 12%. Шлаковый песок значительно отличается от природного, одной из его ключевых особенностей является увеличение пористости зерен с ростом их размера. В природном же песке содержание пылевидных частиц ограничено 2–3%, так как они содержат вредные для бетона илестые и глинистые

примеси. В шлаковом песке такие частицы, напротив, выступают химически активным микрозаполнителем, способствуя экономии цемента.

В таблице 4.4. представлены свойства дробленого в щековой дробилке шлака: плотность в куске составила $2,86 \text{ г/см}^3$, далее по фракциям определялись плотность в куске ($\rho_{\text{ср}}$), плотность насыпная ($\rho_{\text{нас}}$), межзерновая пустотность ($V_{\text{пуст}}$), пористость (Π) и удельная поверхность ($S_{\text{уд}}$) и

Таблица 4.4 – основные характеристики шлака различных фракций

№ ПП	Фракции, мм	$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{нас}}$, кг/м ³	$V_{\text{пуст}}$, %	Π , %	$S_{\text{уд}}$, см ² /г
1	5-2,5	2200	940	55	29,5	84
2	2,5-1,25	2530	1060	53	24,0	96
3	1,25-0,63	2660	1080	51,5	19,5	108
4	0,63-0,31	2790	1100	48,5	11,0	120
5	0,31-0,16	2850	1120	42,3	5,2	220
6	<0,16	2920	1180	39	0	920

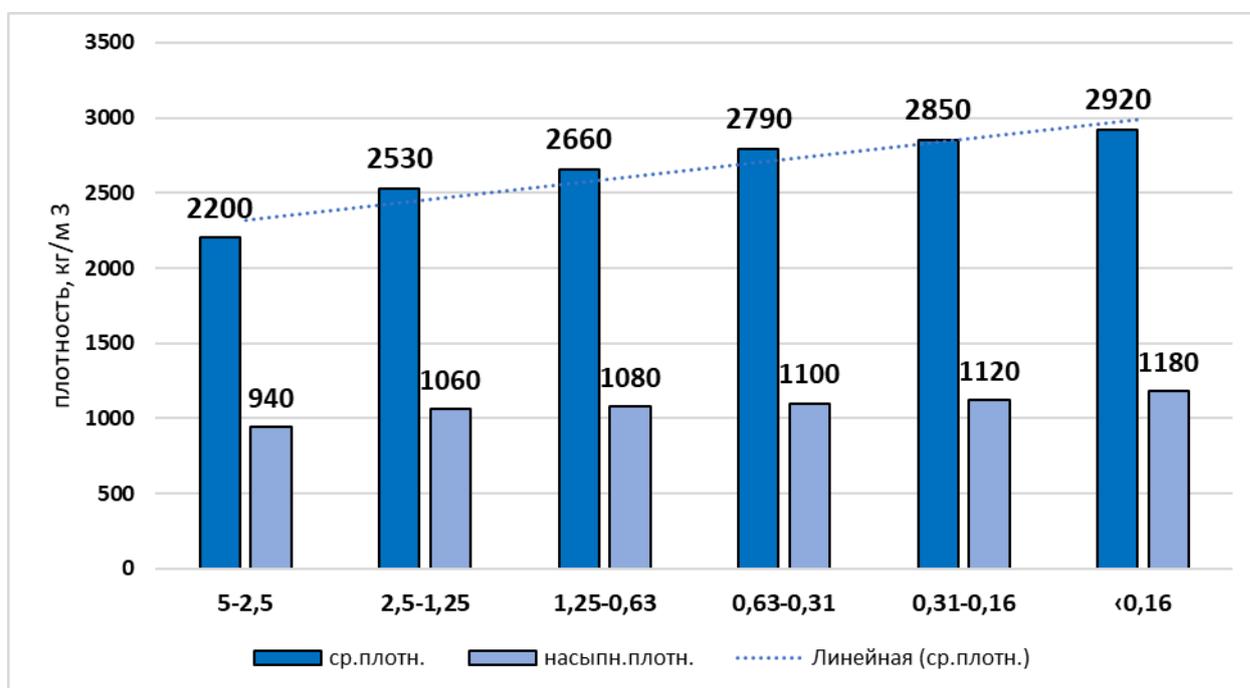


Рисунок 4.3 – Средняя и насыпная плотность заполнителя из шлака



Рисунок 4.4 – Пустотность и пористость топливного шлака

Средняя плотность ($\rho_{\text{ср}}$) зерен шлака в куске увеличивается с уменьшением фракции. С ростом насыпной плотности ($\rho_{\text{нас}}$) за счет увеличения мелких частиц возрастает и средняя плотность зерен. В результате пустотность ($V_{\text{пуст.}}$) мелкого шлакового песка остается практически неизменной (53–55%), что выгодно отличает его от природного песка, где этот показатель варьируется от 30 до 42% в зависимости от крупности.

Выбор оптимального соотношения известного фракционного состава заполнителей из топливных отходов заключался в приближении гранулометрического состава смеси к эталонной кривой распределения. Откорректированные зерновые составы ЗШС, золы ГУ и топливного дробленного шлака приведены на рис.4.5 – 4.7.

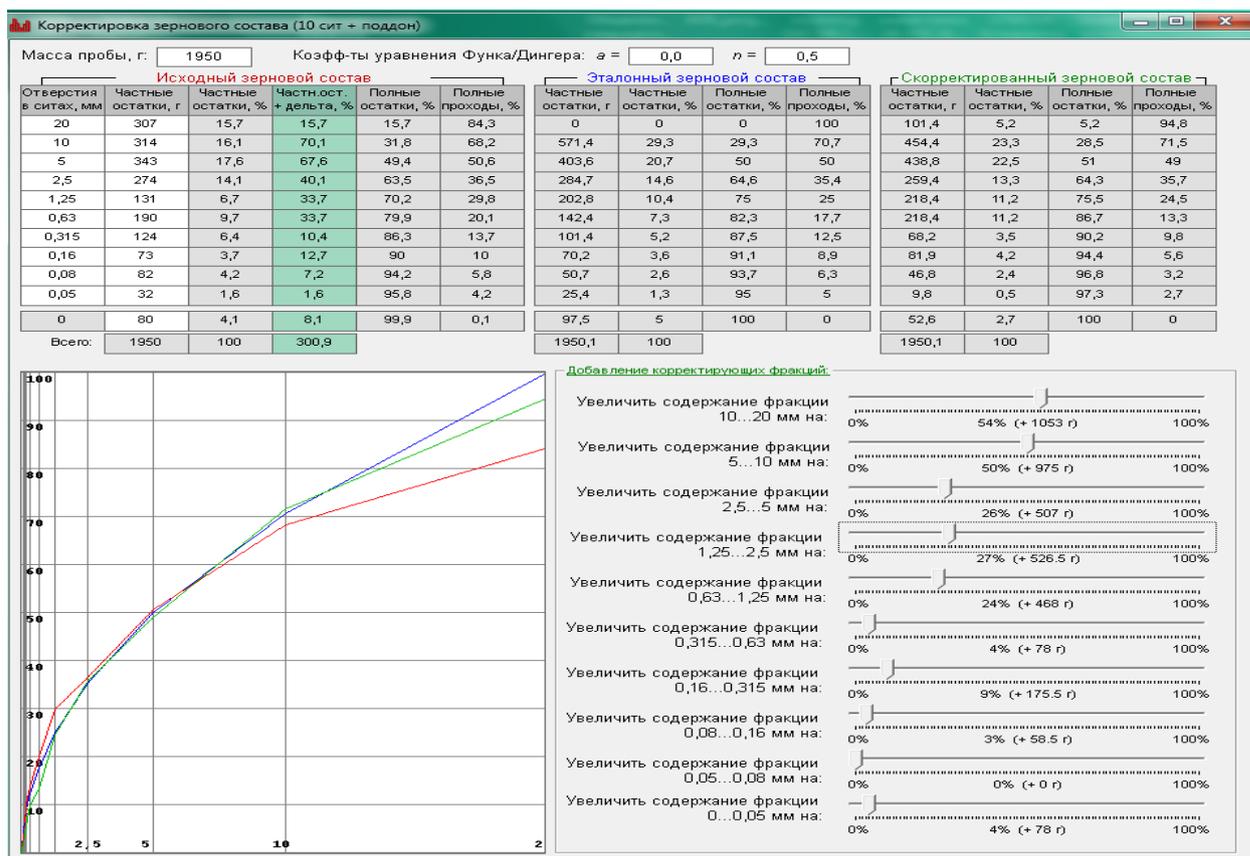


Рис. 4.5. Гранулометрический состав золошлаковой смеси

Исходный зерновой состав ЗШС					
Отверстия в ситах, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Частн.ост. + дельта, %	Полные остатки, %	Полный проход, %
20	307	15,7	15,7	15,7	84,3
10	314	16,1	70,1	31,8	68,25,6
5,0	343	17,6	67,6	49,4	50,6
2,5	274	14,1	40,1	63,5	36,5
1,25	131	6,7	33,7	70,2	29,8
0,63	190	9,7	33,7	79,9	20,1
0,315	124	6,4	10,4	86,3	13,7
0,16	73	3,7	12,7	90	10
0,08	82	4,2	7,2	94,2	5,8
0,05	32	1,6	1,6	95,8	4,2

0	80	4,1	8,1	99,9	0,1
всего	1950	100	300,9		
<i>Скорректированный зерновой состав песка местор. ЗШС</i>					
20	101,4	5,2		5,2	94,8
10	454,4	23,3		28,5	71,5
5,0	438,8	22,5		51	49
2,5	259,4	13,3		64,3	35,7
1,25	218,4	11,2		75,5	24,5
0,63	218,4	11,2		88,7	13,3
0,315	68,2	3,5		90,2	9,8
0,16	81,9	4,2		94,4	5,6
0,08	46,8	2,4		96,8	3,2
0,05	9,8	0,5		97,3	2,7
0	52,6	2,7		100	0
всего	1950,1	100			

Исходный зерновой состав ЗШС

В исходном составе Золошлаковой смеси наблюдается высокий процент крупнозернистых фракций. При просеивании через сито с отверстием 20 мм удерживается 15,7% материала, что указывает на заметное присутствие крупных частиц. Для сит с меньшими размерами (10 мм и 5 мм) также зафиксированы значительные доли – 16,1% и 17,6% соответственно. Такая концентрация крупных зерен может способствовать образованию крупных пустот в бетонной смеси. Отмечается нерегулярное распределение по фракциям. Так промежуточные фракции (2,5 мм и 1,25 мм) и более мелкие частицы распределены неравномерно, где фракция 2,5 мм составляет 14,1%, фракция 1,25 мм – всего 6,7%. При этом мелкие фракции (0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм и ниже) суммарно обеспечивают достаточный процент заполнителя, однако их переизбыток в совокупности с дисбалансом крупной и средней фракций приводит к «изломам» в гранулометрической кривой.

2. *Скорректированный зерновой состав (на основе ЗШС)* после корректировки показал снижение доли сверхкрупной фракции. Доля материала, задержанного на сите 20 мм, снизилась с 15,7% до 5,2%, что позволяет уменьшить влияние крупных частиц на общую пустотность смеси.

Перераспределение крупной и средней фракций. Фракция 10 мм увеличилась до 23,3%, а 5 мм – до 22,5%, что способствует более равномерному распределению размера частиц. Особо примечательно увеличение содержания фракции 1,25 мм (с 6,7% до 11,2%), которая играет ключевую роль в заполнении пустот между крупными зёрнами. Оптимизация мелких фракций. Мелкие частицы (0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм и прочие) также получили корректировку до оптимальных значений, что позволяет обеспечить достаточную заполняющую способность без избыточного содержания пылевидной фракции. Например, доля 0,63 мм осталась на уровне 11,2%, а фракции с размерами ниже – скорректированы таким образом, что полные остатки достигают 100% при прохождении через мельчайшие отверстия. Из рисунка 4.5 видно, что гранулометрический состав ЗШС (красная линия) не значительно отклонена от идеальной кривой. Сравнительный анализ исходного и скорректированного зернового состава Золошлаковой смеси показывает, что оптимизация гранулометрической кривой позволяет добиться более равномерного распределения фракций. Сокращение доли сверхкрупных частиц, увеличение содержания промежуточных фракций и точная настройка мелких частиц способствуют снижению пустотности бетонной смеси и повышению её прочностных характеристик. ЗШС практически идеально подходит для использования в качестве мелкого заполнителя для бетонов и растворов.

Исходный зерновой состав топливного шлака представлен преобладанием крупной фракции. На сите с отверстием 5,0 мм удерживается около 50,2% материала, что говорит о доминировании относительно крупных частиц. При этом через сито 10 мм проходит лишь 88% материала, что подтверждает значительную долю крупных фракций (на уровне 12% остатка). Промежуточные и мелкие фракции; доля частиц на ситах 2,5 мм составляет 18,6%, а на 1,25 мм – лишь 5,5%. Мелкие частицы (0,63 мм, 0,315 мм и 0,16 мм) вместе занимают от 2% до 6% по отдельности, суммарно давая менее 20% заполнителя в более мелком диапазоне.

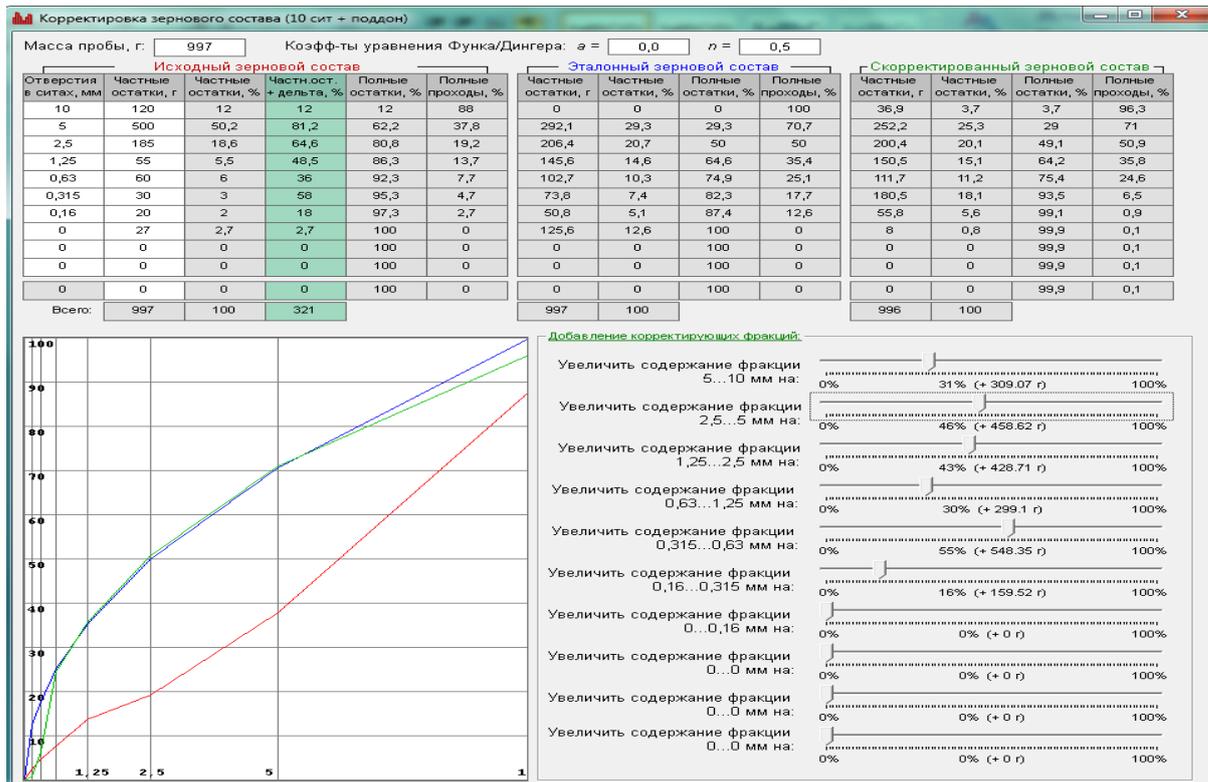


Рис. 4.6. Гранулометрический состав шлака

Исходный зерновой состав топливного шлака					
Отверстия в ситах, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Частн.ост. + дельта, %	Полные остатки, %	Полный проход, %
10	120	12	12	12	88
5,0	500	50,2	81,2	62,2	37,8
2,5	185	18,6	64,6	80,8	19,2
1,25	55	5,5	48,5	86,3	13,7
0,63	60	6	36	92,3	7,7
0,315	30	3	58	95,3	4,7
0,16	20	2	18	97,3	2,7
0	27	2,7	2,7	100	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0
всего	997	100	321		
Скорректированный зерновой состав песка топливного шлака					
10	36,9	3,7		3,7	96,3
5,0	252,2	25,3		29	71
2,5	200,4	20,1		49,1	50,9
1,25	150,5	15,1		64,2	35,8
0,63	111,7	11,2		75,4	24,6
0,315	180,5	18,1		93,5	6,5
0,16	55,8	5,6		99,1	0,9

0,08	8	0,8		99,9	0,1
0,05	0	0		99,9	0,1
0	0	0		99,9	0,1
всего	996	100			

Скорректированный зерновой состав топливного шлака показал снижение доли сверхкрупных частиц. Доля материала, задерживаемого на сите 10 мм, снизилась с 12% до 3,7% (в пересчёте по весу – с 120 г до 36,9 г). Это означает существенное уменьшение количества очень крупных частиц, которые могут создавать избыточные пустоты. Были перераспределены основные фракции. Здесь доля частиц на сите 5,0 мм уменьшилась до 25,3% (вес – 252,2 г), что значительно ниже исходного показателя в 50,2%. При этом фракции 2,5 мм и 1,25 мм получили более сбалансированное распределение: Фракция 2,5 мм – 20,1%, фракция 1,25 мм – 15,1%. Такой сдвиг в распределении свидетельствует о том, что состав стал более равномерным, а промежуточные размеры заняли большую долю, способствуя лучшему заполнению пространства между частицами. Мелкие фракции (0,63 мм, 0,315 мм и 0,16 мм) также скорректированы до оптимальных значений, что позволяет добиться более плавного кумулятивного распределения. Например, доля 0,315 мм составляет теперь 18,1%, а 0,16 мм – 5,6%. При этом остаточный процент, характеризующий полное заполнение, приближается к 100%.

Анализ исходного и скорректированного зернового состава топливного шлака показывает, что оптимизация гранулометрии направлена на снижение доли чрезмерно крупных частиц и увеличение содержания промежуточных фракций. Такие изменения приводят к уменьшению пустотности смеси, снижению расхода цемента, улучшению прочностных и эксплуатационных характеристик бетона, повышению технологичности производства.

Таким образом, скорректированный состав топливного шлака представляет собой более эффективный и экономически выгодный материал для применения в качестве заполнителя в мелкозернистых бетонах.

Рис. 4.6. Гранулометрический состав шлака

Шлаки ТЭЦ, образующиеся при сжигании угля представляют собой плотный, прочный материал и вполне могут использоваться в качестве частичной или полной замены природного заполнителя для бетона.

Согласно теории дробления, для хрупких материалов предпочтительно раскалывание или удар. Топливный шлак, будучи хрупким, разрушается без пластических деформаций, а его разрушение происходит за счёт развития трещин в дефектных зонах. Крупные зерна шлака содержат микротрещины, образовавшиеся при обжиге. Раздавливание и удар на первой стадии дробления вызывают раскалывание слабых зерен. По мере уменьшения их размера количество микротрещин сокращается, прочность частиц возрастает, увеличивая затраты энергии на дальнейшее измельчение.

Исследуемый топливный шлак предварительно измельчался в щековой дробилке. На рис. 4.4 для кривых зернового состава дробленного шлака характерно наличие крупных частиц 2,5-5мм. Это обусловлено избирательностью процесса дробления шлака, при котором в первую очередь разрушаются крупные трещиноватые зерна, образующие мелкие частицы, и зерна среднего размера (0,31-1,25 мм).

<i>Исходный зерновой состав золы гидроудаления</i>					
Отверстия в ситах, мм	Частные остатки, г	Частные остатки, %	Частн.ост. + дельта,%	Полные остатки, %	Полный проход,%
0,63	41	3,3	3,3	3,3	96,7
0,315	15	1,2	59,2	4,5	95,5
0,16	47	3,8	46,8	8,3	91,7
0,08	428	34,4	47,4	42,7	57,3
0,05	273	21,9	27,9	64,6	35,4
0	440	35,4	35,4	100	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0
0	0	0	0	100	0
всего	1244	100	220		
<i>Скорректированный зерновой состав золы гидроудаления</i>					

0,63	18,7	1,5		1,5	98,5
0,315	334,6	26,9		28,4	71,6
0,16	265	21,3		49,7	50,3
0,08	267,5	21,5		71,2	28,8
0,05	158	12,7		83,9	16,1
0	200,3	16,1		100	0
0	0	0		100	0
0	0	0		100	0
0	0	0		100	0
0	0	0		100	0
0	0	0	100	0	
всего	1244,1	100			

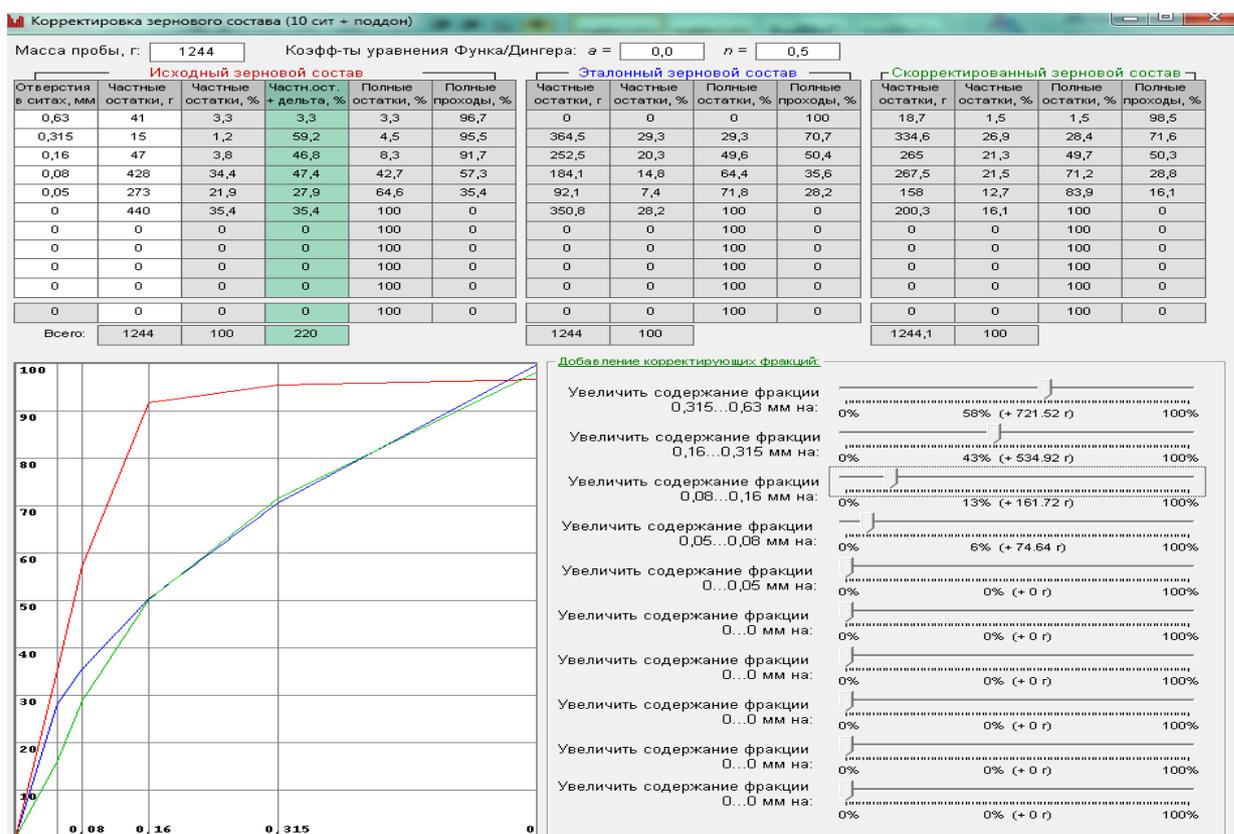


Рис. 4.7. Гранулометрический состав золы гидроудаления

В исходном составе золы гидроудаления наблюдается преобладание ультрамелких частиц. Фракция, не проходящая через сито (0 мм), составляет 35,4% (440 г), а материал, задерживаемый на сите 0,05 мм – 21,9% (273 г). А ультрамелкая часть (0,05 мм и 0 мм) занимает почти 57,3% массы, что свидетельствует о большом избытке пылевидной фракции. Отмечается

низкое содержание промежуточных фракций 0,315 мм и 0,16 мм – 1,2% (15 г) и 3,8% (47 г) соответственно. Доля самой крупной фракции (0,63 мм) незначительна всего 3,3% (41 г). Такая диспропорция приводит к тому, что материал обладает выраженной монофракционностью на ультрамелких размерах, что может создавать проблемы при формировании плотной упаковки: избыток мельчайших частиц зачастую приводит к увеличению потребления вяжущего за счёт высоких площадей поверхности. *Скорректированный зерновой состав* золы ГУ позволил изменить распределение в сторону промежуточных фракций. Фракция 0,315 мм резко возросла с 1,2% до 26,9% (334,6 г). Фракция 0,16 мм увеличилась с 3,8% до 21,3% (265 г). Сократилось количество ультрамелкой части. Доля частиц, не проходящих через сито (0 мм), снизилась с 35,4% до 16,1% (200,3 г). Фракция 0,05 мм уменьшилась с 21,9% до 12,7% (158 г). Небольшое снижение доли самой крупной фракции. Фракция 0,63 мм немного уменьшилась с 3,3% до 1,5% (18,7 г). Скорректированный состав смещён в сторону увеличения содержания средних частиц (0,315 мм и 0,16 мм) за счёт уменьшения избытка ультрамелких фракций. Таким образом, оптимизация гранулометрического состава золы гидроудаления улучшает её потенциал в качестве заполнителя для мелкозернистых бетонов, что может привести к повышению качества конечного продукта и экономии материалов при производстве.

Заключение по главе 4

- *Песок отходов дробления Чу (М_к-2,55)* после корректировки демонстрирует более сбалансированное содержание всех фракций. Увеличилась доля промежуточной фракции (1,25 мм) до 20,9%, что способствует уплотнению структуры и снижению объёма пор. Распределение зёрен по ситам стало плавнее: на сите 2,5 мм доля выросла до 28,3%, на более мелких ситах (0,63 мм и 0,315 мм) содержание отрегулировано таким образом, чтобы выровнять кривую, часть очень мелкой фракции (ниже 0,16 мм) доведена до 11,3% и 9,8% соответственно, что даёт более «заполняющий» эффект. Благодаря этим изменениям общая кривизна гранулометрической кривой становится ближе к

оптимальной, уменьшая пустотность песка и улучшая его сочетаемость с цементным тестом.

- *Природный песок Аламединского карьера (М_к-3,26)* относятся к крупнозернистым и после корректировки зерновой состав был изменён: фракция 2,5 мм уменьшилась с 36% до 29,1%, что снижает избыточное содержание крупных частиц. Фракция 1,25 мм значительно увеличилась до 21,4%, что помогает восполнить дефицит средних частиц и создать более непрерывное распределение.:

Доля фракция 0,63 мм немного снизилась до 14,8%, фракции 0,315 мм, 0,16 мм и остаточные частицы остались в пределах 11,9%, 15,0% и 7,8% соответственно. В результате скорректированная гранулометрическая кривая становится более равномерной, отсутствуют резкие скачки между крупными и мелкими частицами, что позволяет достичь оптимальной упаковки зерен.

- *Золошлаковая смесь* после корректировки снижение доли сверхкрупной фракции составило на сите 20 мм с 15,7% до 5,2%, что позволяет уменьшить влияние крупных частиц на общую пустотность смеси. Перераспределение крупной и средней фракций. Фракция 10 мм увеличилась до 23,3%, а 5 мм – до 22,5%. Такое перераспределение способствует более равномерному распределению размера частиц. Особо примечательно увеличение содержания фракции 1,25 мм (с 6,7% до 11,2%), которая играет ключевую роль в заполнении пустот между крупными зёрнами. Мелкие частицы (0,63 мм, 0,315 мм, 0,16 мм и прочие) также получили корректировку до оптимальных значений, что позволяет обеспечить достаточную заполняющую способность без избыточного содержания пылевидной фракции. Например, доля 0,63 мм осталась на уровне 11,2%, а фракции с размерами ниже – скорректированы таким образом, что полные остатки достигают 100% при прохождении через мельчайшие отверстия.

- *Зола гидроудаления* после корректировки зернового распределена в сторону увеличения содержания средних фракций (0,315 мм и 0,16 мм) за счёт сокращения доли ультрамелких частиц (0,05 мм и 0 мм). Что обеспечит более

эффективное заполнение пустот, снижение расхода цемента за счёт уменьшения удельной поверхности и улучшение прочностных и эксплуатационных характеристик бетонной смеси.

- *Топливный шлак*, представляющий собой плотный и прочный материал после дробления представлен в основном крупными фракциями 5-10 мм. Скорректированный зерновой состав топливного шлака представлен уменьшением доли сверхкрупных частиц: на сите 10 мм, снизилась с 12% до 3,7% (в пересчёте по весу – с 120 г до 36,9 г). Доля частиц на сите 5,0 мм уменьшилась до 25,3% (вес – 252,2 г), что значительно ниже исходного показателя в 50,2%. При этом фракции 2,5 мм и 1,25 мм получили более сбалансированное распределение: фракция 2,5 мм – 20,1%, фракция 1,25 мм – 15,1%. Мелкие фракции (0,63 мм, 0,315 мм и 0,16 мм) также скорректированы до оптимальных значений. Например, доля 0,315 мм составляет теперь 18,1%, а 0,16 мм – 5,6%. При этом остаточный процент, характеризующий полное заполнение, приближается к 100%.

Глава 5. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВАХ И ЗАПОЛНИТЕЛЕ ИЗ ТОПЛИВНЫХ ШЛАКОВ

В соответствии с рекомендациями [87] применение золы, золошлаковой смеси и шлака на цементном вяжущем могут изготавливаться бетоны марок по прочности М50 -М500, по водонепроницаемости В2- В 12 и по морозостойкости Мрз50 -Мрз300, следующих видов:

- а) тяжелый или легкий с добавкой золы взамен части цемента, а также части цемента и части заполнителей;
- б) мелкозернистый плотностью 1800—2200 кг/м³ на золошлаковой смеси взамен мелкого природного песка;
- в) тяжелый с комбинированными заполнителями из золошлаковой смеси или плотного шлака в сочетании с природными заполнителями.

Известно, что минеральные добавки в бетон могут вводиться двумя принципиально различными способами: взамен части цемента (позволяет снизить его расход) и взамен части песка (увеличивается содержание дисперсной фазы, что повышает плотность бетона). Существуют также другие варианты, когда добавка частично заменяет цемент, а частично песок. При этом пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, но наибольший эффект проявляется во втором случае [78]. Это объясняется тем, что песок является относительно инертным материалом в отличие от минеральных добавок. Введенные в состав цементных бетонов, они не только участвуют в процессах гидратации цемента, но и выполняют структурообразующую роль на уровне физико-химического взаимодействия частиц бетона как композиционного материала [79].

На прочность мелкозернистого бетона огромное влияние оказывают качественные характеристики песка: модуль крупности, содержание ПГЧ (пылевидных и глинистых частиц), межзерновая пустотность, насыпная плотность. При этом применение крупнозернистого песка в бетоне не рационально, поскольку приводит к перерасходу цемента из-за высокой межзерновой пустотности.

Один из главных технологических приемов для получения высокопрочного МЗБ – регулирование гранулометрического состава.

Эли, Ферэ, Веймут [31] считают, что наиболее выгодным с точки зрения создания условий для уменьшения расхода цемента и повышения прочности бетона являются смеси с прерывистой гранулометрией, в которых отсутствуют зерна среднего размера, Б.Т. Скрамтаев и др. [45] рекомендуют смеси с непрерывной гранулометрией, т.к. они менее склонны к расслоению.

С прерывной гранулометрией плотная укладка частиц смесей возможна лишь при определенном координационном числе контактов между зернами разных размеров, наилучшее значение, которого может быть достигнуто при соотношении мелких и крупных фракций от 1:2 до 1:4. Наивысшая плотность и прочность на сжатие ($R_{сж}$) пластичного раствора получается при

соотношении между мелкими зернами (0-0,5мм, включая цемент и добавки) и крупными (2-5мм), равном 1:2. В этом случае объем пустот воздушных и водоемких пор является минимальным. Однако при увеличении разницы в зернах начинает проявляться расслоение смеси, снижается удобоукладываемость, повышается плотность. При использовании непрерывной гранулометрии общим является повышенная пустотность в рыхлом состоянии, наименьшая раслаиваемость, лучшая удобоукладываемость.

Установлено, что наилучшими прочностными и деформативными свойствами обладает бетон с зернами $d_{\max}=10$ мм и 8-15 % зерен 5-10мм.

Закономерность свойственная МЗБ – при уменьшении соотношения Ц:Ш (от 1:3 к 1:2), оптимальное содержание в шлаке фракций $< 0,16$ мм постоянно увеличивается.

Для бетона 1:2 состава максимум прочности достигается при содержании в шлаке 10-15% частиц $< 0,16$ мм, для состава 1:6 – 20-30%. Мелкие и пылевидные частицы шлака в бетоне выполняют роль микрозаполнителя, способствующего улучшению его структуры и свойств. В случае отношения смеси эти частицы позволяют приблизить зерновой состав системы цемент-шлак к оптимальному, когда общее содержание цемента и мелких частиц шлака приближается к 35% (по абсолютному объему). Таким образом, оптимальный зерновой состав шлака следует назначать исходя из заданной прочности, т.е. соотношение Ц:Ш.

Оптимальными в зависимости от характеристик шлакового заполнителя являются составы 1:2-1:4. В данных составах наряду со значительным влиянием цемента в большей степени проявляется влияние шлака на структуру МЗБ, тогда она получается наиболее плотной с высоким насыщением зернами шлака разных размеров и форм, соединенными в монолит тонкими прослойками цементного камня.

Минимальное значение стабилизированной усадки шлакобетона получается в составе 1:2-1:3. Минимальным значениям усадки соответствует

максимальное значение прочности материала. Это подтверждает определяющее влияние гранулометрии цемент-шлак на структуру МЗШБ, от которого зависят прочность, деформативность и долговечность.

Рациональной является такая гранулометрия шлака, которая обеспечивает при минимальной водопотребности смеси получение бетона с наивысшей для данного соотношения Ц:Ш прочности и долговечности.

Дальнейшие исследования по разработке составов МЗБ проводилось на активированных совместным измельчением композиционных вяжущих с наполнителями из золы гидроудаления (ЦЗВ_и), золошлаковой смеси ЦЗШВ_и и тонкомолотого шлака ЦШВ_и.

5.1 Мелкозернистые бетоны на основе композиционного вяжущего с золой гидроудаления и заполнителе из шлака

Предварительные исследования (гл. 3) показали эффективность активации путем совместного измельчения зольных отходов разной концентрации с цементом.

В качестве мелкого заполнителя использовался природный песок Васильевского месторождения и различные предварительно раздробленный топливного шлака (фракции 5-10 мм и 0-5 мм).

Из таблицы 5.1. видно, что состав (1) отличается о остальных содержанием природного песка. Здесь при увеличении количества золу ГУ от до 50% подвижность смеси одинакова (5 см) для ЦЗВи с ЗУ 10 и 30%, а 50% содержании ЗУ подвижность растет до 6,5 см. Причем В/Ц находится в пределах 0,6-0,65. Плотность образцов максимальна (ρ 2000 кг/м³) и несколько снижается до 1970 по мере наполнения вяжущего золой до 50%. Показатели прочности МЗБ максимальны при 10% золы $R_{сж}^{тво} = 16,2$; при 30% $R_{сж}^{тво} = 15,82$ и при 50% $R_{сж}^{тво} = 11,92$ МПа. При твердении 28 суток в нормальных условиях эти показатели составляют - при 10% золы $R_{сж}^{28} = 28,8$; при 30% $R_{сж}^{28} = 17,7$ и при 50% $R_{сж}^{28} = 15,7$ МПа. Здесь наблюдается снижение

прочности по мере наполнения вяжущего золой после ТВО на 35% и после 28 суток на 78%.

Состав (2) при соотношении ЦЗВи:Ш = 1:2, где в качестве мелкого заполнителя использовался топливный шлак грубой фракции (5-10 мм) подвижность смесей 5,5 – 6 см при В/Ц = 0,6 - 0,7. Плотность составляет $\rho = 1860-1900 \text{ кг/м}^3$. Прочность $R_{сж}^{тво}$ снижается от 14,75 до 11,3 МПа, т.е на 30%. А $R_{сж}^{т28}$ от 21,2 до 16,2 также на 30%.

Состав (3) отличается от (2) тем, что количество заполнителя той же фракции (5-10 мм) увеличено при соотношении ЦЗВи:Ш = 1 : 3. Здесь подвижность смесей составляет 6 см при В/Ц = 0,71: 0,87 и 0,93, а плотность изменяется в пределах $\rho = 1760-1850 \text{ кг/м}^3$.

Таблица 5.1 – Физико-механические характеристики МЗБ на основе ЦЗВи (с золой гидроудаления 10, 30, 50%), песка природного и топливного шлака

№состава	Соотношение компонентов	Подвижность смеси, см			В/Ц			Плотность образца бетона (ρ) кг/м ³			Прочность при сжатии, МПа					
		% золы			% золы			% золы			После ТВО			28 сут. возрасте твердение в НУ.		
		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
1	ЦЗВи:Ш (5-0мм):П 1:2:1	5	5	6,5	0,65	0,6	0,6	2000	1990	1970	16,2	15,82	11,92	20,8	17,7	15,7
2	ЦЗВи : Ш (5-10мм) 1:2	6	5,5	6	0,7	0,6	0,65	1920	1900	1860	14,75	13,2	11,3	21,2	16,8	16,2
3	ЦЗВи : Ш (5-10мм) 1:3	6	6	6	0,71	0,87	0,93	1850	1780	1760	7,4	7,1	5,82	10,41	10,6	10,2
4	ЦЗВи : Ш (0-5мм) 1:3	5	4,5	5,5	1,07	0,8	0,83	1810	1800	1710	8,56	6,12	3,2	11,8	11,21	7,3
5	ЦЗВи: Ш (5-10мм): Ш (0-5мм) 1:3:1	5	5	5,5	1,0	0,93	1,0	1720	1700	1600	6,41	6,31	3,91	8,9	5,1	4,7
6	ЦЗВи : Ш (0-5мм) 1:2	4,5	4,6	4	0,61	0,6	0,59	1860	1840	1800	24,3	12,8	10,3	26,5	23,4	18,64
7	ЦЗВи : Ш (0-5мм) 1:3	6	4	4	0,7	0,65	0,78	1820	1800	1780	20,1	9,3	7,4	21,6	14,4	10,2

В составе (4) соотношение ЦЗВ и : Ш = 1 : 3 и шлак представлен фракцией (0-5 мм). Здесь повышенное содержание мелких фракций наполнителя и подвижность смесей 4,5-5,5 см, а В/Ц составляет 0,8-1,07, плотность изменяется в пределах $\rho = 1710-1810 \text{ кг/м}^3$. Прочность после ТВО $R_{\text{СЖ}}^{\text{ТВО}}$ снижается при увеличении в вяжущем золы ГУ от 8,56 до 3,2 МПа, т.е в 2,7 раза, а $R_{\text{СЖ}}^{\text{Т28}}$ от 11,8 до 7,3 в 1,6 раза.

В составе (5) мелкий заполнитель состоит из трех частей грубого шлака (5-10 мм) и одной части мелкого (0-5 мм). Подвижность смесей составляет 5-5,5 см при высоких В/Ц = 0,93-1,0. Плотность находится в пределах 1600-1720 кг/м^3 . Прочность после ТВО $R_{\text{СЖ}}^{\text{ТВО}}$ снижается при увеличении в вяжущем золы ГУ от 6,41 до 3,91 МПа, т.е почти в 2 раза, а $R_{\text{СЖ}}^{\text{Т28}}$ от 8,9 до 4,7 в 2 раза.

Составы (6) и (7) представлены различным соотношением вяжущего мелкого заполнителя- шлака (0-5 мм). В составе (6) ЦЗВи:Ш = 1:2, в (7) составе мелкого шлака больше ЦЗВи:Ш = 1:3. Подвижность в пределах 4 – 4,6 см, при В/Ц = 0,59 – 0,61. Наибольшая прочность после ТВО $R_{\text{СЖ}}^{\text{ТВО}} = 24,3$ Мпа и после ТВО $R_{\text{СЖ}}^{\text{ТВО}} = 26,5$ МПа приходится при содержании золы ГУ 10%, и по мере увеличения ее до 50% прочность падает в 2 раза. Плотность находится в пределах 1800 – 1850 кг/м^3 .

Таблица 5.2 – Прочность МЗБ на вяжущем ЦЗВ_и и шлакового заполнителя после ТВО

Количество наполнителя зола ГУ	№ состава						
	1	2	3	4	5	6	7
10	16,2	14,75	7,4	8,56	6,31	24,3	20,2
30	15,82	13,2	7,1	6,12	5,11	12,8	9,3
50	11,92	11,3	5,82	3,2	3,91	10,3	7,4

Состав (7) при В/Ц 0,65 – 0,78 подвижность изменяется от 4 до 6 см.

Плотность находится в пределах 1780 - 1820 кг/м³. Прочность после ТВО $R_{сж}^{ТВО}$ снижается при увеличении в вяжущем золы ГУ от 20,1 до 7,4 МПа, т.е почти в 3 раза, а $R_{сж}^{Т28}$ от 21,6 до 10,2 в 2 раза.

Из таблицы 5. 2 и рис. 5.1 видно, наибольшие показатели прочности после ТВО обеспечиваются при содержании в вяжущем золы 10% и тонкомолотого шлака (0-5 мм) для составов (6) $R_{сж}^{ТВО} = 24,3$ МПа и для состава (7) $R_{сж}^{ТВО} = 20,3$ МПа.

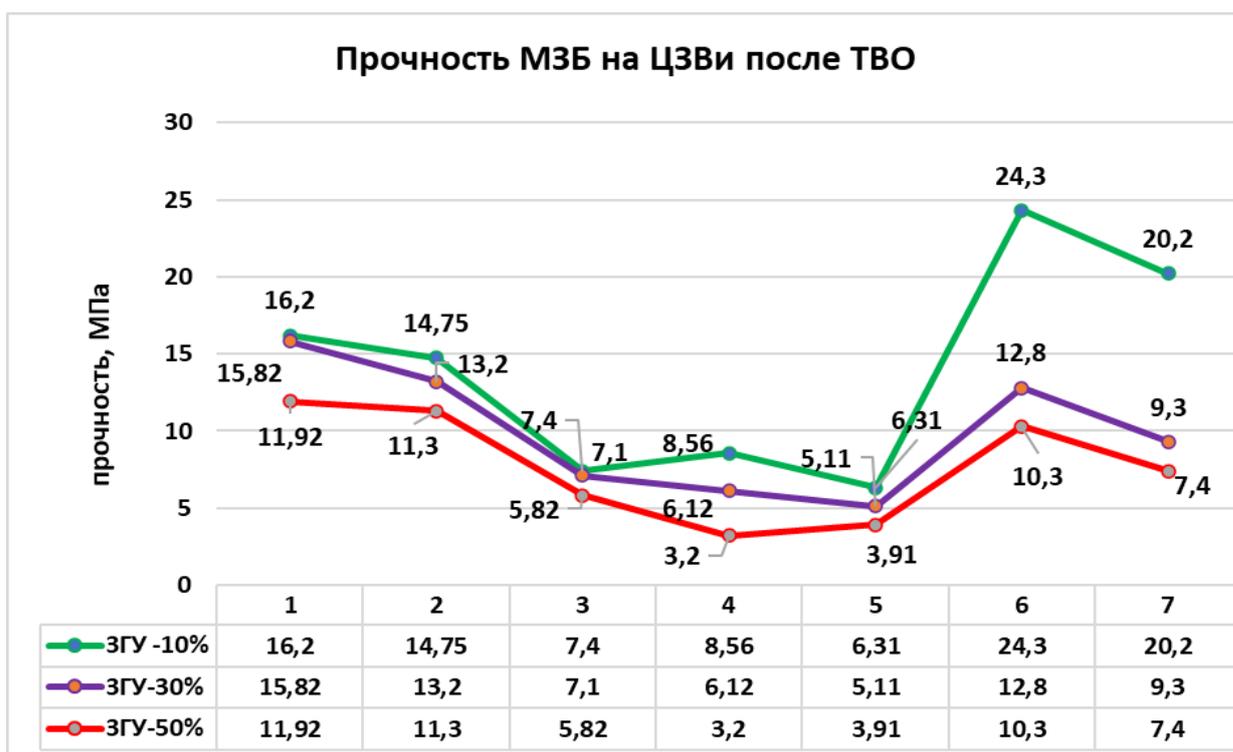


Рисунок 5.1 – Прочность МЗБ после ТВО на вяжущем ЦЗВи

Далее состав (1) обеспечивает $R_{сж}^{ТВО} = 16,2$ МПа и для состава (2) $R_{сж}^{ТВО} = 14,75$ МПа, здесь в качестве заполнителя использовался грубый шлак (5-10 мм). Плотность образцов на шлаковом заполнителе ниже плотности МЗБ на природных песках.

В таблице 5. 3 сведены данные прочностных показателей семи составов после 28 суток нормального твердения.

Составы (1 и 2) показали равнозначные прочности МЗБ после 28 суток твердения при различных степенях наполнения цемента золой гидроудаления.

Таблица 5. 3 – Прочность МЗБ на ЦЗВи и шлака как заполнителя после 28 суток твердения в нормальных условиях

Количество Наполнителя зола ГУ	№ состава						
	1	2	3	4	5	6	7
10	20,8	21,2	10,41	11,8	6,41	26,5	21,6
30	17,7	16,8	10,6	11,21	4,7	23,4	14,4
50	15,7	16,2	10,2	7,3	3,0	18,64	10,2

Максимальная прочность МЗБ составляет $R_{сж}^{т28} = 26,5$ МПа и обеспечивается соотношением ЦЗВи : Ш (0-5мм) = 1:2. Даже при содержании золы ГУ 50% $R_{сж}^{т28} = 18,64$ МПа.

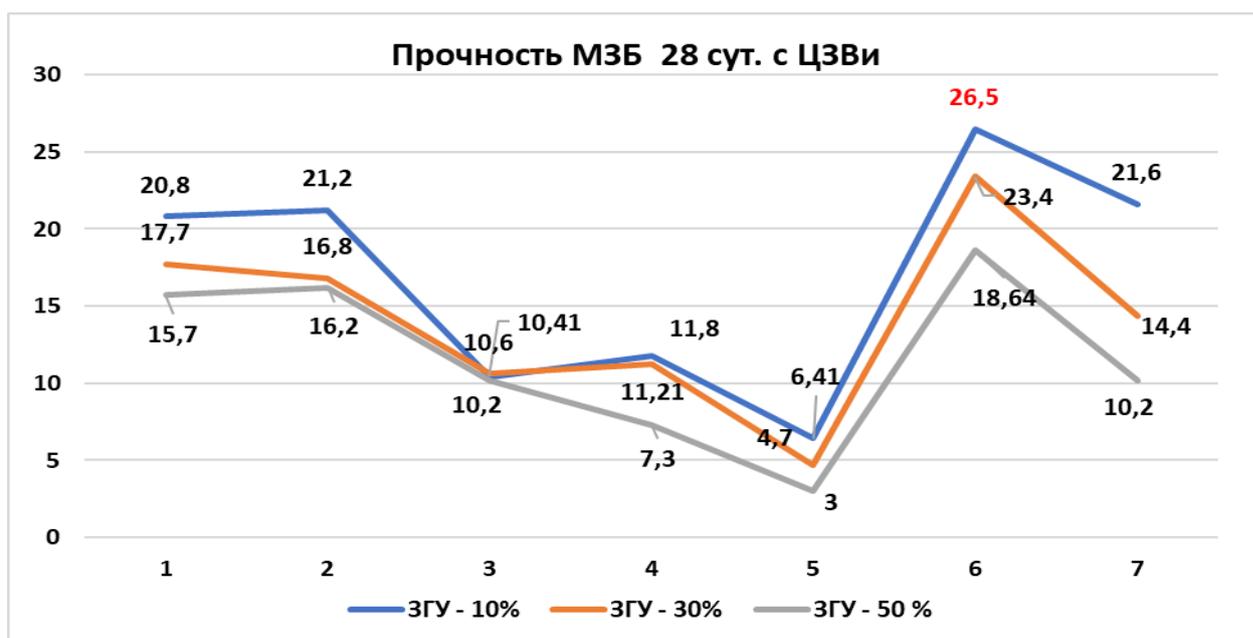


Рисунок 5.2 – Прочность МЗБ на вяжущем ЦЗВи (10, 30, 50%) и заполнителей - топливного шлака после 28 суток нормального твердения.

Образцы из МЗБ на основе композиционных цементных вяжущих с содержащем максимально золы гидроудаления (ЦЗВи) в соотношении 50:50 и топливном шлаке характеризуются достаточно высокой прочностью при

сжатии как при ТВО 6,25-12,94 МПа, так и в условиях нормального твердения от 6,57МПа до 18,5 МПа.

- Образцы МЗБ на композиционном вяжущем с содержанием золы ГУ (30 и 10%) характеризуются более высокой прочностью, что подтверждает доминирующую роль клинкерных минералов в упрочнении цементно-зольного камня.

- использование предварительно измельченных топливных шлаков в качестве мелкого заполнителя в составе МЗБ и композиционного цементно-зольного вяжущего позволяет получать изделия требуемой прочности (М100-200);

- высокая прочность МЗБ $R_{сж}^{т28} \geq 20$ МПа обеспечивается на составах (1) и (2) при минимальном содержании в вяжущем золы ГУ и прочность $R_{сж}^{тВО} \geq 20$ МПа обеспечивается на составах (6) и (7).

- более высокая прочность МЗБ $R_{сж}^{т28} \geq 25$ МПа обеспечивается при длительном твердении 28 суток в составе (6) на вяжущем с содержанием 10% золы ГУ и заполнителе из шлаковой смеси фракций 5-10 и 0-5, что обусловлено пуццолановой активностью золы ГУ и оптимальной упаковкой мелкого заполнителя.

5.2 Мелкозернистые бетоны на основе композиционных вяжущих с золошлаковой смесью и заполнителе из шлака

Для исследования основных характеристик МЗБ на основе композиционного вяжущего - совместно измельченного цемента и золошлаковой смеси (ЦЗШВи) были рассмотрены различные соотношения и фракции мелкого заполнителя из шлака и природного песка.

Номера составов с различным соотношением к вяжущему ЦЗШВи и содержанием заполнителей разных фракций в МЗБ показано в таблице 5.4

Таблица 5.4 – Содержание заполнителей в вяжущем ЦЗШВи

№ состава	Соотношение компонентов МЗБ
1	ЦЗШВи :Ш (5-10мм) :П - 1:2:1
2	ЦЗШВи : Ш (5-10мм) - 1:2
3	ЦЗШВи : Ш (5-10мм) - 1:3
4	ЦЗШВи : Ш (0-5мм) - 1:3
5	ЦЗШВи :Ш (5-10мм) :Ш(0-5мм) - 1:3:1
6	ЦЗШВи : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:2
7	ЦЗШВи : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) 1:3

Результаты испытаний МЗБ семи составов с различным наполнением вяжущего ЗШС 10, 30 ,50% показаны в таблице 4.5

В составе №1 в заполнителе часть шлака заменена природным песком подвижность смеси и В/Ц изменялись по мере введения количества ЗШС 10, 30, 50% в вяжущее ЦЗШВи. Для вяжущего с 10% ЗШС подвижность составила 6 см при В/Ц 0,65. При таком В/Ц 0,65 подвижность 3 см при 30% ЗШС в вяжущем. Для вяжущего с 50% ЗШС подвижность составила 4,5 см при В/Ц 0,77. Плотность образцов данного состава в зависимости от содержания ЗШС составила 1900, 1740 и 1970 кг/м³.

Изменение прочности в 1 составе по мере наполнения вяжущего ЗШС от 10 до 50% наглядно показано на рис. 4.3. Показатели прочности МЗБ максимальны при 10% золы $R_{сж}^{ТВО} = 17,12$ МПа; при 30% $R_{сж}^{ТВО} = 13,08$ и при 50% $R_{сж}^{ТВО} = 8,31$ МПа. В данном составе при увеличении содержания ЗШС от 10 до 50% $R_{сж}^{ТВО}$ снижается на 51,6 %, т.е. почти в два раза.

При твердении 28 суток в нормальных условиях (рис. 4.3)эти показатели составляют – при 10% золы $R_{сж}^{28} = 22,5$; при 30% $R_{сж}^{28} = 20,28$ и при 50% $R_{сж}^{28} = 10,31$ МПа. Здесь наблюдается снижение прочности по мере наполнения вяжущего золой после 28 суток на 54%.

Таблица 5.5 – Физико-механические свойства МЗБ на вяжущем с золошлаковой смесью 10;30;50% (ЦЗШВи)

№состава	Соотношение компонентов	Подвижность смеси,см			В/Ц			Плотность образца (ρ) кг/м ³			Прочность при сжатии, МПа					
		% золы			% золы			% золы			после ТВО			твердение 28 сут.		
		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
1	ЦЗШВи:Ш(5-10мм):П 1:2:1	6	3	4,5	0,65	0,65	0,77	1970	1900	1740	17,12	13,08	8,31	22,5	20,28	10,31
2	ЦЗШВи : Ш(5-10мм) 1:2	7	3,5	4	0,7	0,68	0,81	1900	1800	1690	12,55	11,41	10,64	18,64	18,43	11,8
3	ЦЗШВи : Ш (5-10мм) 1:3	5,5	3	3	1,0	1,0	1,15	1760	1500	1400	5,61	5,12	3,65	8,75	8,71	7,6
4	ЦЗШВи : Ш (0-5мм) 1:3	7	3	3,5	0,8	0,8	0,85	1800	1700	1600	5,7	5,34	4,41	8,81	8,3	7,35
5	ЦЗШВи:Ш (5-10мм): Ш(0-5мм) 1:3:1	5,5	3	3,8	1,0	1,2	1,0	1640	1620	1600	4,82	4,02	3,19	8,21	7,84	4,71
6	ЦЗШВи : Ш (0-5 и 5- 10 мм) 1:2	4	4	3	0,62	0,61	0,6	1850	1820	1800	19,69	13,3	10,49	20,91	16,1	12,49
7	ЦЗШВи : Ш (0-5 и 5- 10 мм) 1:3	4	3	2	0,8	0,8	0,78	1800	1780	1760	13,71	10,18	7,82	14,42	12,0	8,91

В составе 2 заполнителем являлся только грубый шлак фракции 5-10мм в соотношении к вяжущему ЦЗШВ_и - 1:2. Здесь подвижность смесей 7; 3,5 и 4 см при В/Ц = 0,7; 0,68 и 0,81соответственно. Плотность при этом составляет $\rho = 1800; 1690$ и 1900 кг/м³. Прочность $R_{сж}^{ТВО}$ снижается с увеличением ЗШС от 12,55 до 10,64 МПа, т.е. на 15,2 %. Для $R_{сж}^{Т28}$ от 18,64 до 11,8 также на 36,7%.

Состав (3) отличается от (2) тем, что количество заполнителя той же фракции (5-10 мм) увеличено при соотношении ЦЗШВ_и :Ш = 1 : 3. Здесь подвижность смесей составляет 5,5; 3; 3 см при В/Ц = 1,0; 1,0 и 1,15, а плотность изменяется в пределах $\rho = 1500; 1400$ и 1760 кг/м³.

Здесь для состава (3) также наблюдается изменение прочности для $R_{сж}^{ТВО}$ при ЗШС 10% $R_{сж}^{ТВО} = 5,61$ МПа и при 50% $R_{сж}^{ТВО} = 3,65$ МПа, т.е сброс прочности составляет 34,9%. При твердении образцов МЗБ 28 суток в нормальных условиях (рис. 4.4) эти показатели составляют – при 10% золы $R_{сж}^{28} = 8,75$; при 30% $R_{сж}^{28} = 8,71$ и при 50% $R_{сж}^{28} = 7,6$ МПа. Здесь наблюдается незначительное снижение прочности на 13 %.

Таблица 5.6 – Прочность $R_{сж}^{ТВО}$ семи составов МЗБ на ЦЗШВ_и после ТВО

Количество наполнителя ЗШС	№ состава						
	1	2	3	4	5	6	7
10	17,12	12,55	5,61	5,7	4,82	19,69	13,71
30	13,08	11,41	5,12	5,34	4,02	13,3	10,18
50	8,31	10,64	3,65	4,41	3,19	10,49	7,82

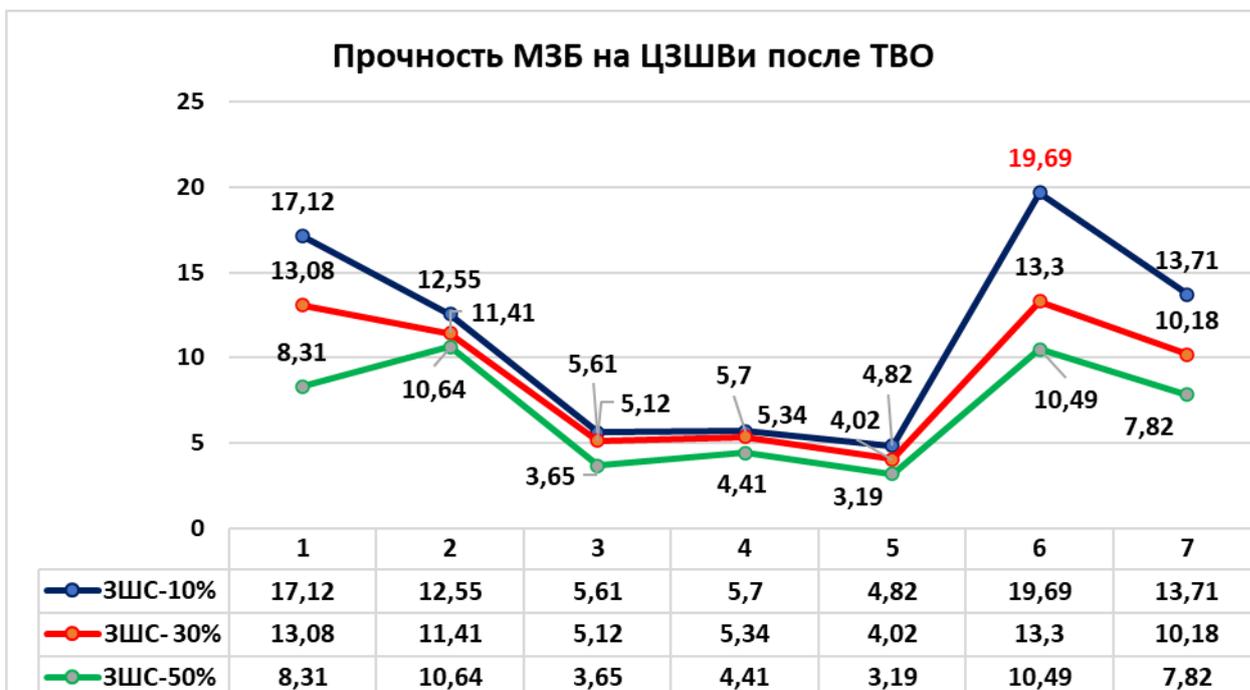


Рисунок 5.3 – Прочность МЗБ после ТВО на вяжущем ЦЗШВи.

В составе (4) соотношение ЦЗШВи : Ш = 1 : 3 и шлак представлен фракцией (0-5 мм). Здесь повышенное содержание мелких фракций наполнителя и подвижность смесей 7; 3; 3,5 см соответственно при В/Ц составляет 0,8; 0,8; 0,85. Плотность МЗБ изменяется в пределах $\rho = 1700-1800$ кг/м³.

Прочность после ТВО $R_{СЖ}^{ТВО}$ снижается при увеличении в вяжущем ЦЗШВи от 5,7 до 4,41 МПа, т.е. на 22,6 %. Но при твердении в нормальных условиях 28 суток прочность $R_{СЖ}^{Т28}$ снижается незначительно от 8,81 до 7,35 МПа, что обусловлено пуццолановой активностью ЗШС.

Таблица 5.7 – Прочность семи составов МЗБ на ЦЗШВи после 28 суток твердения в нормальных условиях

Количество наполнителя ЗШС	№ состава						
	1	2	3	4	5	6	7
10	22,5	18,64	8,75	8,81	8,21	20,91	14,42
30	20,28	18,43	8,71	8,3	7,84	16,1	12,0
50	10,31	11,8	7,6	7,35	4,71	12,49	8,91

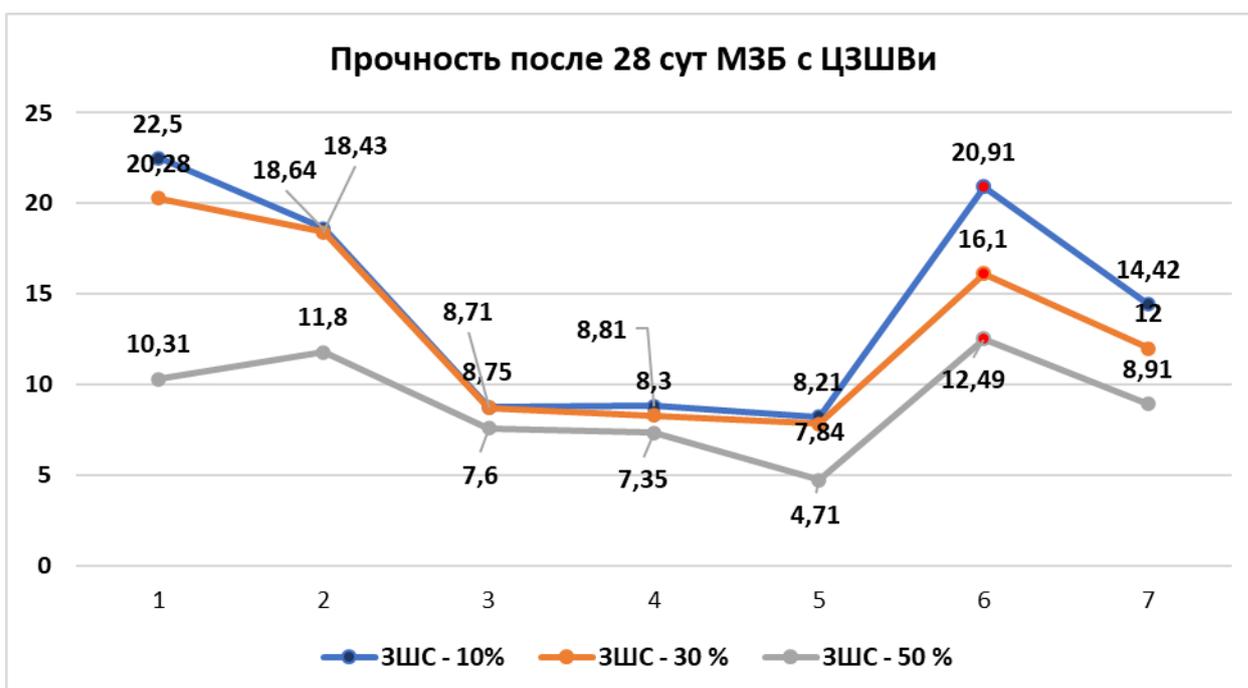


Рисунок 5.4 – Прочность МЗБ на ЦЗШВи после 28 суток твердения.

В составе (5) мелкий заполнитель также состоит из трех частей грубого шлака (5-10 мм) и одной части мелкого (0-5 мм). Подвижность смесей составляет 5; 3; 3,8 см при высоких В/Ц = 1,0; 1,2 и 1,0. Плотность составляет 1600 кг/м³. Прочность после ТВО $R_{СЖ}^{ТВО}$ снижается при увеличении в вяжущем количества ЗШС от 4,82 до 3,19 МПа, т.е. на снижается на 33,8%, а $R_{СЖ}^{Т28}$ от 8,21 до 4,71 на 42,6%.

Для составов (6) и (7) заполнителем является измельченный шлак и просеянный через сито 10 мм, т.е. он состоит из фракций 0-5 и 5-10 мм. Отличие состоит в том, что составе (6) соотношение ЦЗШВи : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:2. А для состава (7) соотношение ЦЗШВи : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) составляет - 1:3.

Из таблицы 5.5 можно пронаблюдать, что для состава (6) на вяжущих с содержанием ЗШС 10; 30; 50% подвижность смесей составляет 4; 4; 3 см и показатели В/Ц – 0,62; 0,61 и 0,6 соответственно.

Прочность образцов МЗБ после ТВО $R_{СЖ}^{ТВО}$ снижается от 19,69 до 10,49 МПа, т.е. в 2 раза при максимальном содержании в вяжущем ЗШС 50%.

Такая же зависимость наблюдается при испытании образцов после 28 суток твердения – $R_{сж}^{т28}$ от 20,91 до 12,49, снижается на 40 %.

У состава (7) на вяжущих с содержанием ЗШС 10; 30; 50% подвижность смесей составляет 4; 3; 2 см и показатели В/Ц – 0,8; 0,8 и 0,78 соответственно. Плотность несколько увеличивается и находится в пределах 1770 – 1800 кг/м³.

Прочность образцов МЗБ после ТВО $R_{сж}^{тво}$ снижается от 19,69 до 10,49 МПа, т.е. в 2 раза при максимальном содержании в вяжущем ЗШС 50%. Такая же зависимость наблюдается при испытании образцов после 28 суток твердения – $R_{сж}^{т28}$ от 20,91 до 12,49, снижается на 40 %.

Анализ физико-механических свойств МЗБ на шлаковом заполнителе при разном соотношении с композиционным вяжущим ЦЗШВи и сочетании различных фракций показал, что наилучшие показатели получены для составов (1) и (6) Рис. 5.3 и 5.4.

В (1) составе при 10% содержании ЗШС прочность МЗБ составила $R_{сж}^{тво} = 17,12$ МПа и $R_{сж}^{т28} = 22,5$ МПа. Соотношение ЦЗШВи :Ш (5-10мм) :П - 1:2:1 (на заполнителе – 2 части топливного шлака крупной фракции и 1 части тонкого природного песка). Наличие в вяжущем 30% ЗШС обеспечило прочность образцов МЗБ $R_{сж}^{тво} = 13,08$ МПа и $R_{сж}^{т28} = 20,28$ МПа. Для вяжущего с 50% ЗШС прочность $R_{сж}^{тво} = 8,31$ МПа и $R_{сж}^{т28} = 10,31$ МПа соответственно.

Для состава (6), где заполнителем является молотая смесь шлака из фракций 0-5 и 5-10 мм, при 10% содержании ЗШС в вяжущем прочность составила $R_{сж}^{тво} = 19,69$ МПа и $R_{сж}^{т28} = 20,91$ МПа. При 30% ЗШС $R_{сж}^{тво} = 13,3$ МПа и $R_{сж}^{т28} = 16,1$ МПа. Максимальное наполнение 50% обеспечивает прочности $R_{сж}^{тво} = 10,49$ МПа и $R_{сж}^{т28} = 12,49$ МПа.

Таким образом, анализируя физико-механические свойства МЗБ на композиционном вяжущем с содержанием ЗШС 10; 30 и 50% можно отметить:

- наибольшее значение прочности МЗБ установлено для составов 1 и 6, отличающихся различием количества и зернового состава мелкого заполнителя;

- для обеспечения максимальной прочности МЗБ состава (6) после ТВО $R_{сж}^{ТВО} = 19,69$ МПа при содержании в вяжущем ЗШС 10%, а соотношение ЦЗШВ_и и заполнитель из топливного шлака (фр.0-5; 5-10 мм) составляет 1:2.

- максимальная прочность МЗБ № 6 после 28 суток твердения в нормальных условиях составляет – $R_{сж}^{Т28} = 20,91$ МПа (10%). Для состава № 1 – $R_{сж}^{Т28} = 22,5$ МПа (10%) и – $R_{сж}^{Т28} = 20,28$ МПа (30% ЗШС) при соотношении ЦЗШВ_и:Ш(5-10мм):П = 1:2:1.

5.3 Мелкозернистые бетоны на основе цементношлаковых вяжущих и заполнителя из шлака

Во всём мире золошлаковые отходы угольных электростанций уже давно находят широкое применение в жилищном, дорожном и ландшафтном строительстве, в производстве строительных материалов, снижая их себестоимость минимум на 15-20 % [82].

В исследованиях [81] отмечалось, что при практически одинаковом химическом составе золы-уноса и шлака ТЭС, степень их кристалличности по результатам рентгенофазового анализа значительно отличается. Основные компоненты молотого шлака ТЭС находятся в рентгеноаморфном состоянии в отличие от золы, которая характеризуется наличием большого количества пиков различных соединений, представленных в основном в закристаллизованном состоянии.

Проведенные исследования (гл.3) подтвердили положительное влияние топливного шлака в составе композиционного вяжущего ЦЗШВ_и при условии совместного измельчения с цементом.

На основе ЦШВ_и были исследованы составы МЗБ и проведен анализ физико-механических характеристик. Серия испытаний образцов МЗБ была проведена на семи различных составах на ЦШВ_и с содержанием топливного шлака 10; 30 и 50%. Мелким заполнителем в МЗБ служил измельченный в щековой дробилке топливный шлак грубой (5-10 мм) и тонкой (0-5 мм) фракций. Результаты испытаний представлены в таблице 5.8.

Так в составе (1) в заполнителе часть шлака заменена природным песком, где подвижность смеси (1,5... 3,5 мм) и В/Ц (0,55-1,0) изменялись в зависимости от количества топливного шлака 10, 30, 50% в вяжущее ШЦВ_и. Плотность образцов данного состава изменялась в пределах 1780 - 1900 кг/м³. Прочностные характеристики МЗБ снижаются по мере использования в композиционном вяжущем топливного шлака от 10 до 50%. Так прочность после ТВО при 10% шлака в ШЦВ_и составляет $R_{сж}^{ТВО} = 10,31$ МПа; при 30% $R_{сж}^{ТВО} = 9,2$ и при 50% $R_{сж}^{ТВО} = 7,32$ МПа. Здесь показано (рис. 4.3.1), что при увеличении содержания шлака от 10 до 50% $R_{сж}^{ТВО}$ снижается почти на 29 %. При твердении 28 суток в нормальных условиях (рис. 4.3.2) эти показатели составляют – при 10% шлака $R_{сж}^{28} = 20,13$; при 30% $R_{сж}^{28} = 15,3$ и при 50% $R_{сж}^{28} = 9,71$ МПа, т.е. наблюдается также снижение прочности по мере наполнения вяжущего шлаком после 28 суток на 50%.

В составе (2) заполнителем является грубый шлак фракции 5-10мм в соотношении к вяжущему ШЦВ_и - 1:2. Подвижность смесей 2-4 см при В/Ц = 0,56-0,69 соответственно. Плотность при этом составляет $\rho = 1760 - 1680$ кг/м³. Прочность $R_{сж}^{ТВО}$ снижается от 10,42 до 8,8 МПа, т.е. на 15,5 %. Для $R_{сж}^{28}$ от 21,37 до 10,9 также на 49 %.

Состав (3) отличается от (2) тем, что количество заполнителя той же фракции (5-10 мм) увеличено при соотношении ШЦВ_и :Ш = 1 : 3. Здесь подвижность смесей составляет 1,5 - 2 см при В/Ц = 0,74-0,92, а плотность изменяется в пределах $\rho = 1300... 1450$ кг/м³.

Здесь для состава (3) также наблюдается изменение прочности для $R_{сж}^{ТВО}$ при количестве топливного шлака 10% $R_{сж}^{ТВО} = 3,79$ МПа и при 50% $R_{сж}^{ТВО} = 3,21$ МПа, т.е сброс прочности практически отсутствует. При твердении образцов МЗБ 28 суток в нормальных условиях (рис. 5.5) эти показатели практически равнозначны и составляют – при 10% золы $R_{сж}^{28} = 5,21$; при 30% $R_{сж}^{28} = 5,16$ и при 50% $R_{сж}^{28} = 4,85$ МПа. Здесь наблюдается незначительное снижение прочности.

Таблица 5.8 – Прочность семи составов МЗБ на ЦШВ_и после ТВО

Количество Наполнителя Шлак изм.	Прочность после ТВО ЦШВ _и , № состава						
	1	2	3	4	5	6	7
10	10,31	10,42	3,79	6,16	2,18	28,42	17,71
30	9,2	9,31	3,22	5,13	2,12	22,05	13,4
50	7,32	8,8	3,21	4,82	2,05	15,3	9,4

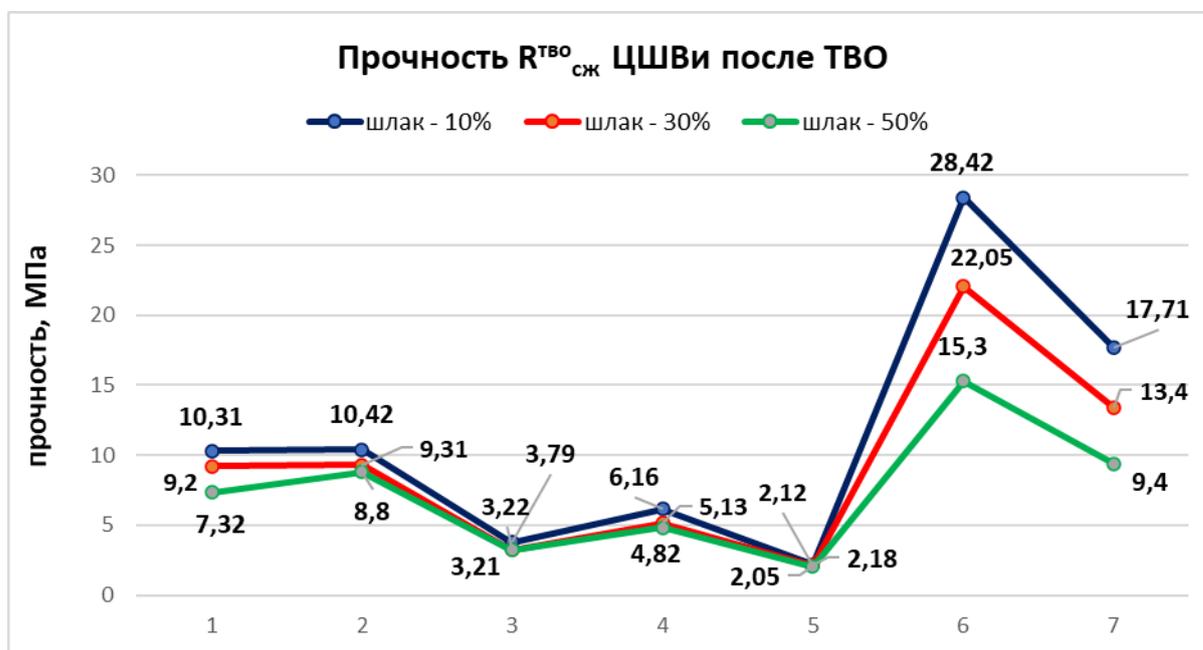


Рисунок 5.5 – Прочность МЗБ на измельченном шлако-цементном вяжущем (ЦШВ_и) после ТВО.

Таблица 5.8 - Физико-механические характеристики МЗБ на основе ШЦВи (с топливным шлаком 10, 30, 50%)

№ состава	Соотношение компонентов	Подвижность смеси, см			В/Ц			Плотность образца (ρ) кг/м ³			Прочность при сжатии, МПа					
		% шлака			% шлака			% шлака			ПослеТВО			28 сут. возрасте твердение в НУ.		
		10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
1	ЦШВи:Ш(5-10мм):П 1:2:1	1,5	1,5	3,5	1,0	0,55	1	1900	1800	1780	10,31	9,2	7,32	20,13	15,3	9,71
2	ЦШВи : Ш (5-10мм) 1:2	2	2	4	0,63	0,56	0,69	1770	1760	1680	10,42	9,31	8,8	21,37	15,72	10,9
3	ЦШВи : Ш (5-10мм) 1:3	2	1,5	2	0,85	0,74	0,92	1450	1400	1300	3,79	3,22	3,21	5,21	5,16	4,85
4	ЦШВи : Ш (0-5мм) 1:3	2	2	1,5	0,77	0,76	0,62	1690	1580	1500	6,16	5,13	4,82	9,3	7,02	4,77
5	ЦШВи:Ш (5-10мм): Ш(0-5мм) - 1:3:1	2,5	2,5	2	0,84	0,78	0,8	1450	1380	1300	2,18	2,12	2,05	3,87	3,57	3,5
6	ЦШВи : Ш (0-5; 5-10 мм) -1:2	5	3	4	0,55	0,5	0,62	1880	1800	1760	28,42	22,05	15,3	33,22	23,31	17,2
7	ЦШВи : Ш (0-5; 5-10 мм) 1:3	4	4	3	0,72	0,65	0,83	1870	1720	1700	17,71	13,4	9,4	21,71	15,6	11,2

В составе (4) соотношение ЦЩВи : Ш = 1 : 3 и шлак представлен мелкой фракцией (0-5 мм). Подвижность смесей 2; 2; 1,5 см соответственно

при В/Ц составляет 0,77; 0,76; 0,62. Плотность МЗБ изменяется в пределах $\rho = 1690-1500 \text{ кг/м}^3$. Прочность после ТВО $R_{\text{СЖ}}^{\text{ТВО}}$ снижается от 6,16 до 4,82 МПа, т.е. на 21,7 %. При твердении МЗБ в нормальных условиях 28 суток прочность $R_{\text{СЖ}}^{\text{Т}28}$ снижается от 9,3 до 4,77 МПа на 48,7 %. В составе (5) мелкий заполнитель состоит из 3-х частей грубого шлака (5-10 мм) и одной части мелкого (0-5 мм). Подвижность смесей составляет 2,5; 2,5; 2,0 см при В/Ц = 0,84; 0,78 и 0,8. Плотность составляет 1450- 1300 и кг/м^3 . Такая плотность относится к крупнопористому бетону и соответственно прочность МЗБ после ТВО $R_{\text{СЖ}}^{\text{ТВО}}$ составляет 2,18...2,05 МПа, а $R_{\text{СЖ}}^{\text{Т}28}$ 3,87...3,5 МПа.

Таблица 5.9 – Прочность семи составов МЗБ на ЦЩВи после 28 суток твердения в нормальных условиях

Количество Наполнителя Шлак изм.	28 сут. прочн.сжатие ЦЩВи, № состава						
	1	2	3	4	5	6	7
10	20,13	21,37	5,21	9,3	3,87	33,22	21,71
30	15,3	15,72	5,16	7,02	3,57	23,31	15,6
50	9,71	10,9	4,85	4,77	3,5	17,2	11,2

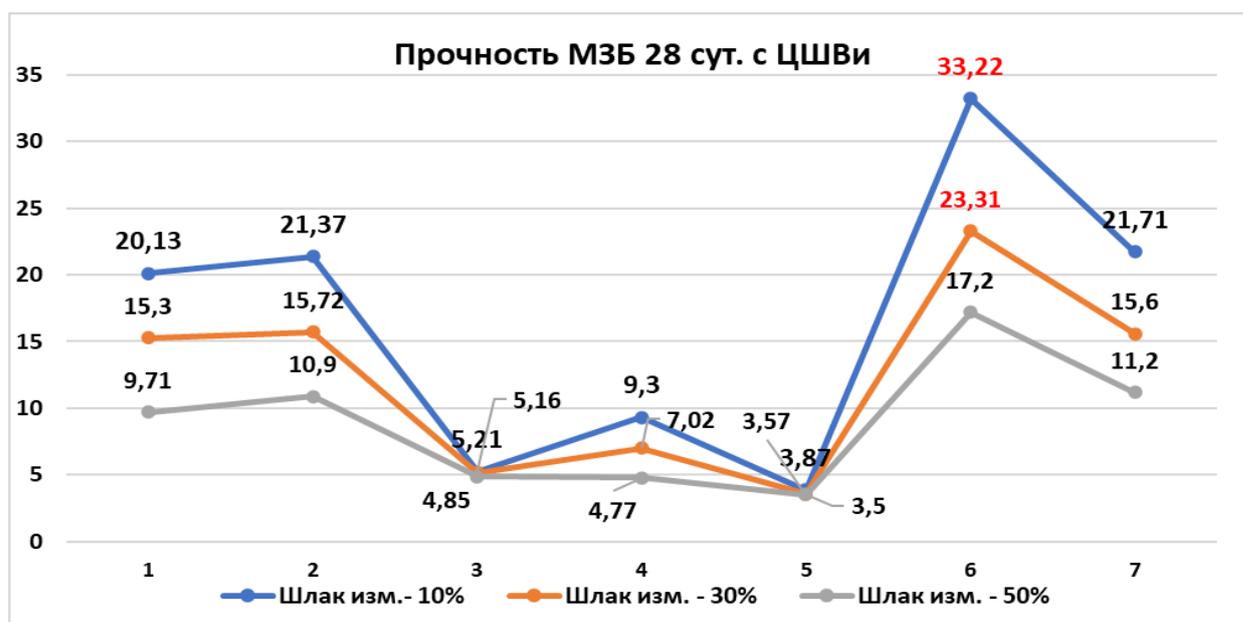


Рисунок 5.6 – Прочность МЗБ после 28 суток нормального твердения на измельченном шлако-цементном вяжущем (ЦШВ_и).

Для составов (6) и (7) заполнителем является измельченный шлак и просеянный через сито 10 мм, т.е. он состоит из фракций 0-5 и 5-10 мм. Отличие состоит в том, что составе (6) соотношение ЦШВ_и : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:2. А для состава (7) соотношение ЦШВ_и : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) составляет - 1:3.

Для состава (6) прочность составила $R_{сж}^{ТВО} = 28,42; 22,05$ и $15,3$ МПа и для $R_{сж}^{Т28} = 33,22; 23,31$ и $17,2$ МПа для плотности МЗБ 1880; 1800 и 1760 кг/м³ соответственно. На рис. 4.6 видно, что состав (6) показывает максимальную прочность из семи составов МЗБ при наполнении вяжущего топливным шлаком 10, 30 и 50%. Для состава (7) прочность составила $R_{сж}^{ТВО} = 17,71; 13,4$ и $9,4$ МПа и для $R_{сж}^{Т28} = 21,71; 15,6$ и $11,2$ МПа для плотности МЗБ 1870; 1700 и 1720 кг/м³ соответственно.

Таким образом, анализ физико-механических характеристик МЗБ на композиционном вяжущем с содержанием топливного шлака 10; 30 и 50% можно отметить:

- прочность после ТВО составила $R_{сж}^{ТВО} \geq 20$ МПа обеспечивается в составе (6) при содержании в вяжущем 10 ...30% топливного шлака;
- прочность $R_{сж}^{Т28} \geq 20$ МПа обеспечивается для составов (1), (2) и (7),отличающиеся различием в составе и количестве мелкого заполнителя;
- максимальная прочность МЗБ $R_{сж}^{Т28} \geq 30$ МПа обеспечивается для состава (6) при содержании в вяжущем шлака 10%.
- наиболее эффективным по показателям прочности и по степени использования топливного шлака является состав (6).

5.4 Оптимизация состава и оценка эффективности использования топливных отходов в мелкозернистом бетоне

Результаты рабочего этапа исследований основных свойств МЗБ показали возможность использования в качестве вяжущего различных композиций цемента с наполнителями из золы гидроудаления, золошлаковой смеси и топливного шлака. Мелким заполнителем для МЗБ может служить плотный топливный шлак или комбинированный из плотного шлака в сочетании с природным песком.

Бетон на золоцементном вяжущем в естественных условиях в первые сроки твердеет медленнее, чем бетон на цементе. С течением времени прирост прочности бетона с добавкой золы интенсифицируется и по истечении 28сут по прочности бетон с золой в первые сроки после ТВО несколько ниже, чем бетон на цементе. Однако в дальнейшем возрасте пропаренный бетон, изготовленный с золой имеет большую прочность, чем без добавки. Пропаренный бетон, после ТВО имеет не менее 80% проектной прочности, через месяц приобретает проектную прочность.

Составы МЗБ на композиционных вяжущих (ЦЗВи, ЦЗШВи, ЦШВи) с наполнителями 10, 30 и 50% представлены в таблице 4.9. Анализ показал, что МЗБ состава № 3, в котором в качестве заполнителя взят только топливный шлак фракции 5-10 мм и на композиционном вяжущем (ЦЗВи - с наполнителем 10, 30, 50%) можно отнести к крупнопористому бетону плотностью 1760-1850 кг/м³ с прочностью $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 10,41; 10,6; 10,2$ МПа и соответствует М 100(В 7,5). Бетонные смеси из этих составов характеризуются подвижностью бсм, удовлетворительной удобоукладываемостью при В/Ц (0,71; 0,87; 0,93). Так как составы бетонов (1:3) постоянны, водопотребность смеси обусловлена составом вяжущих (50:50; 70:30; 90:10). Из приведенных данных видно, что зола

оказывает пластифицирующее действие, т.к. водопотребность смеси ниже, чем больше в составе вяжущего золы гидроудаления.

МЗБ состава № 3 на вяжущем ЗШС наблюдается снижение плотности образцов 1400кг/м^3 - 1500кг/м^3 . Подвижность смесей изменяется в пределах 3-5,5см, соответственно, водопотребность 1,0-1,15. Причем, смесь с малым содержанием ЗШС (10%) оказалась более пластичной (5,5см), по прочности рассмотренные составы характеризуются $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 8,75; 8,71; 7,6$ МПа и соответствуют марке МЗБ M75 (B5).

Таблица 5.10 – Основные свойства МЗБ на композиционных вяжущих с золой ГУ, золошлаковой смеси и шлаком (составы 2, 3, 4).

№состава	Соотношение компонентов МЗБ	Плотность образца МЗБ (ρ) кг/м^3			Прочность МЗБ при сжатии, МПа					
					После ТВО			28 сут. возрасте твердение в НУ.		
		наполнитель, %			наполнитель, %			наполнитель, %		
		10	30	50	10	30	50	10	30	50
2	ЦЗВи : Ш (5-10мм)-1:2	1900	1900	1860	14,75	13,2	11,3	21,2	16,8	16,2
	ЦЗШВи : Ш (5-10мм)-1:2	1900	1800	1690	12,55	11,41	10,64	18,64	18,43	11,8
	ШЦВи : Ш (5-10мм)-1:2	1770	1760	1680	10,42	9,31	8,8	21,37	15,72	10,9
3	ЦЗВи : Ш (5-10мм)-1:3	1850	1780	1760	7,4	7,1	5,82	10,41	10,6	10,2
	ЦЗШВи : Ш (5-10мм)-1:3	1400	1500	1760	5,61	5,12	3,65	8,75	8,71	7,6
	ШЦВи : Ш (5-10мм)-1:3	1450	1400	1300	3,79	3,22	3,21	5,21	5,16	4,85
4	ЦЗВи : Ш (0-5мм)-1:3	1810	1800	1710	8,56	6,12	3,2	1,8	11,21	7,3
	ЦЗШВи : Ш (0-5мм)-1:3	1800	1700	1600	5,7	5,34	4,41	8,81	8,3	7,35
	ШЦВи : Ш (0-5мм)-1:3	1690	1580	1500	6,16	5,13	4,82	9,3	7,02	4,77

Тот же МЗБ состава № 3 на вяжущем на ШЦВи показывает некоторое облегчение образцов $\rho=1450$ - 1300кг/м^3 . Смесей при В/Ц (0,92; 0,74; 0,85)

характеризовались подвижностью 2; 1,5м; 2 см; что характеризует шлак, как наполнитель в цементе. Образцы прочностью $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 5,21; 5,16; 4,85$ МПа, изготовленные, на ШЦВ при 50; 30; 10% наполнении измельченного шлака можно отнести к МЗБ марки М50 (В3,5).

Таким образом, составы № 3 с соотношением композиционное вяжущее : Ш (5-10мм) = 1:3 с наполнением вяжущего зольными отходами 10; 30; 50% и топливного шлака в качестве заполнителя получен МЗБ М50; М 75; М100 с плотностью $\rho=1300-1400\text{кг/м}^3$, который можно рекомендовать для производства стеновых блоков.

Образцы из состава 2 и 4 отличаются содержанием шлака – 1:2 и 1:3.

Состав № 2 МЗБ при соотношении Вяжущее : Ш (5-10мм)-1:2 на характеризуется $\rho=1900-1860 \text{ кг/м}^3$ и $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 16,2 - 21,2$ МПа на основе ЦЗВи , т.е. М150-200 (В10-В15).

Такой же состав №2 на основе ЦЗШВи обеспечивает МЗБ плотностью $\rho=1690-1900\text{кг/м}^3$ и прочностью 11,8; 18,43; 18,64 МПа и соответствует М100-150 (В7,5-В10). МЗБ на основе ШЦВи плотностью $\rho=1680-1770 \text{ кг/м}^3$ и прочностью 10,9; 15,72; 21,37МПа соответствует маркам М100-200 (В7,5-В15).

Для состава №4 при соотношении Вяжущее: Ш (0-5мм) =1:3, показана возможность получения МЗБ марок 50-100 (В3,5-В7,5) с плотностью 1500-1880 кг/м^3 . Причем наибольшую прочность обеспечивает композиционное вяжущее ЦЗВи наполненное золой гидроудаления. Составы плотностью от 1700 до 2000 кг/м^3 можно отнести к конструкционным бетонам.

По результатам испытаний образцов МЗБ особое внимание обращают составы 6 и 7, изготовленные на основе шлака фракций 5-10 и 0-5 мм на композиционных цементных вяжущих с наполнением отходами (10,30,50%).

В этих составах использован шлак, дробленый в щековой дробилке и характеризуется гранулометрическим составом фракций: 5-10 – 62,0%; 0,16-5 мм-35,3% и >0,16-2,7 %.

Благодаря приведенному гранулометрическому составу обеспечивается высокая плотность образцов на различных вяжущих: ЦЗВ; ЦЗШВ; ШЦВ.

Отмечается закономерность, что образцы с меньшим содержанием зольных отходов, характеризуются более высокой прочностью и МЗБ относится к конструктивному и конструктивно-теплоизоляционному М100; М 200 .

По предварительным исследованиям гл. 4.1, 4.2., 4.3 повышенные физико-механические показатели при различных степенях наполнения добавками золы ГУ, ЗШС и Шлака обеспечиваются в составах 1,2 и 6, 7.

Дальнейшие исследования и анализ проводились при реализации 2-х факторного эксперимента. Переменными факторов были выбраны: X_1 - количество наполнителя в цемент (зола гидроудаления, золошлаковая смесь и топливный шлак 30 ± 20 %) и X_2 - вид вяжущего (ЦЗВи, ЦЗШВи и ШЦВи) (таблица 5.11, 5.12).

Планы и результаты экспериментов для различных соотношений вяжущее (ЦЗВи; ЦЗШВи; ШЦВи) и мелкий заполнитель в виде смеси Ш(шлак фр. 5-10мм) и П(песок) в соотношении 1:2:1 представлены в таблицах 4.10, 4.11. В качестве выходных параметров выбраны: Y_1 - плотность МЗБ, кг/м³, Y_2 - $R_{сж}^{тво}$, МПа и Y_3 - и $R_{сж}^{28сут}$ прочность после 28 суток.

Таблица 5.11 – Уровни варьирования факторов

Уровни/факторы	X_1 – количество наполнителя, %	X_2 - вид вяжущего
-1	10	ЦЗВи
0	30	ЦЗШВи
+1	50	ШЦВи

Таблица 5.12 – План эксперимента и результаты испытаний МЗБ состава № 1 на разных видах композиционного вяжущего

№ опыта	План эксперимента				Результаты эксперимента		
	Кодированные переменные		Натуральные величины		Y_1	Y_2	Y_3
	x_1	x_2	X_1 -напол., %	X_2 - вид вяжущего	ρ , кг/м ³	$R_{сж}^{тво}$ МПа	$R_{сж}^{28сут}$ МПа
1	-1	-1	10	ЦЗВи	2000	16,2	20,8

2	1	-1	50	ЦЗВи	1840	11,92	15,7
3	-1	1	10	ШЦВи	1900	10,31	20,13
4	1	1	50	ШЦВи	1780	7,32	9,71
5	1	0	50	ЦЗШВи	1740	8,31	10,31
6	-1	0	10	ЦЗШВи	1970	17,12	12,5
7	0	1	30	ШЦВи	1800	9,2	15,3
8	0	-1	30	ЦЗВи	1990	15,82	17,7
9	0	0	30	ЦЗШВи	1900	13,08	20,28

Проведение эксперимента и статистическая обработка результатов позволила получить экспериментально-статистические модели второго порядка свойств МЗБ (5.1- 5.3) и их графическое образы в виде номограмм (рис. 5.1-5.3).

$$Y_1 (\rho) = 1886,67 - 85,0 x_1 - 25,0x_1^2 - 58,33 x_2 + 15,0 x_2^2 + 10,0 x_1x_2 \quad (5.1)$$

$$Y_2 (R^{TBO}_{сж}) = 13,40 - 2,68 x_1 - 0,84x_1^2 - 2,85x_2 - 1,04 x_2^2 + 0,32 x_1x_2 \quad (5.2)$$

$$Y_3 (R^{28сут}_{сж}) = 18,52 - 4,62 x_1 - 1,24x_1^2 - 1,51x_2 - 1,14 x_2^2 - 1,33 x_1x_2 \quad (5.3)$$

По модели (4.1) плотности МЗБ состава №1 видно, она в большей степени зависит от количества наполнителя (x_1) отходов ТЭС в вяжущем и снижается по мере его накопления ($b_1 = -85,0$). Второй по значимости идет фактор (x_2), он показывает влияние на плотность МЗБ различных вяжущих ($b_2 = -58,33$).

На прочность МЗБ после ТВО (4.2) влияет равнозначно количество наполнителя ($b_1 = -2,68$) и вид вяжущего ($b_2 = -2,85$). И на верхних уровнях двух факторов снижает этот параметр. Та же закономерность наблюдается и для прочности МЗБ после 28 суток твердения (5.3). Но влияние фактора x_1 - количество наполнителя немного сильнее ($b_1 = -4,62$) чем вид вяжущего ($b_2 = -1,51$). Наглядно влияние двух факторов на показатели МЗБ состава №1 можно видеть на рис. 5.7.

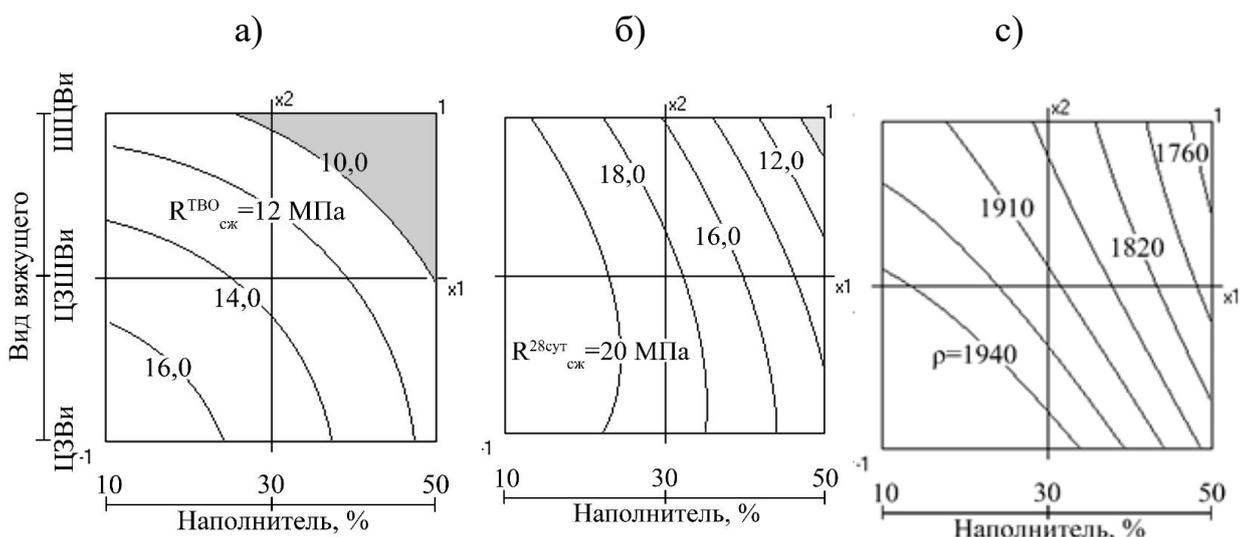


Рисунок 5.7 – МЗБ состав № 1: а) Прочность после ТВО $R^{TBO}_{сж}$, б) после 28 суток $R^{28сут}_{сж}$, в) плотность (ρ).

Прочность после ТВО минимальна для МЗБ на вяжущем ($x_2 = +1$), т.е. шлакоцементном вяжущем (ШЦВи). При содержании 10% шлака Y_2 ($R^{TBO}_{сж}$) составляет 10 МПа и при 50% $R^{TBO}_{сж} = 7,0$ МПа. После 28 суток Y_3 ($R^{28сут}_{сж}$) МЗБ имеет прочность порядка 20 МПа при 10% наполнителя и снижается в два раза до 10 МПа.

Таким образом, в составе №1 лучшие результаты показывает вяжущее с использованием золы гидроудаления и золошлаковой смеси (ЗШС). МЗБ на вяжущем с ЗШС 10-50% набирает прочность после ТВО в пределах 15-10 МПа. На вяжущем с золой ГУ в пределах 18-12 МПа. Та же тенденция сохраняется и после твердения МЗБ 28 суток, здесь $R^{28сут}_{сж}$ находится в пределах 22-14 МПа.

МЗБ состава № 2 представлен соотношением вяжущее : наполнитель в виде шлака крупной фракции (5-10мм) при соотношении 1:2.

Таблица 5.13 – План эксперимента и результаты испытаний МЗБ состава № 2 на разных видах вяжущего

№ опыта	План эксперимента		Результаты эксперимента		
	Кодированные	Натуральные	Y_1	Y_2	Y_3

	переменные		величины		ρ , кг/м ³	$R_{сж}^{тво}$ МПа	$R_{сж}^{28сут}$ МПа
	x_1	x_2	X_1 - напол. %	X_2 - вид вяжущего			
1	-1	-1	10	ЦЗВи	1920	14,75	21,2
2	1	-1	50	ЦЗВи	1860	11,3	16,2
3	-1	1	10	ЩЦВи	1770	10,42	21,37
4	1	1	50	ЩЦВи	1680	8,8	10,9
5	1	0	50	ЦЗШВи	1690	10,64	11,8
6	-1	0	10	ЦЗШВи	1900	12,55	18,64
7	0	1	30	ЩЦВи	1760	9,31	15,72
8	0	-1	30	ЦЗВи	1900	13,2	16,8
9	0	0	30	ЦЗШВи	1800	11,41	18,43

$$Y_1(\rho) = 1807,78 - 60,0 x_1 - 16,67x_1^2 - 78,33 x_2 + 18,33 x_2^2 - 7,5 x_1x_2 \quad (5.4)$$

$$Y_2(R_{сж}^{тво}) = 11,64 - 1,16 x_1 - 0,1x_1^2 - 1,79x_2 - 0,24 x_2^2 + 0,46 x_1x_2 \quad (5.5)$$

$$Y_3(R_{сж}^{28сут}) = 16,49 - 3,72 x_1 - 0,3x_1^2 - 1,04x_2 + 0,74 x_2^2 - 1,37 x_1x_2 \quad (5.6)$$

По модели (5.4) плотности МЗБ состава №2 установлено, что она зависит от вида вяжущего - фактор (x_2). Линейный коэффициент составляет ($b_2 = -78,33$). Для фактора количество наполнителя в вяжущем - фактор (x_1) ($b_1 = -60,0$), т.е второй по степени влияния на плотность МЗБ.

На прочность МЗБ после ТВО (5.5) влияет почти одинаково количество наполнителя ($b_1 = -1,16$) и вид вяжущего ($b_2 = -1,79$). Для прочности МЗБ после 28 суток твердения (4.6) наибольшее значение имеет количество наполнителя x_1 и его влияние сильнее ($b_1 = -3,72$) чем вид вяжущего ($b_2 = -1,04$).

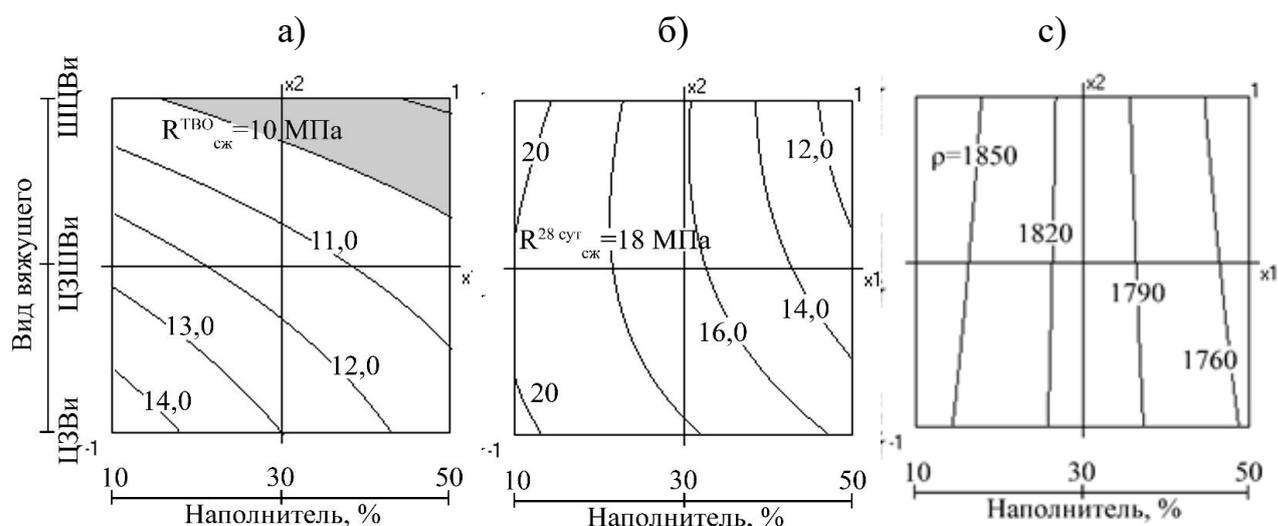


Рисунок 5.10 – Состав № 2: а) прочность $R_{сж}^{тво}$ после ТВО, б) $R_{сж}^{28сут}$ прочность после 28 суток; в) плотность (ρ) – (вяжущее):Ш(шлак фр. 5-10мм) = 1:2

На рис. 5.10 показано, что наибольшая прочность $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} \geq 20$ МПа обеспечивается на вяжущих ЦЗВи (с золой ГУ) и ШЦВи (с измельченным шлаком) при их содержании в пределах 10%.

МЗБ состава № 6 представлен соотношением вяжущее : заполнитель в виде шлака мелкой фракции (шлак фр. 0-5мм) при соотношении = 1:2.

Таблица 5.14 – План эксперимента и результаты испытаний МЗБ состава № 6 на разных видах вяжущего

№ опыта	План эксперимента				Результаты эксперимента		
	Кодированные переменные		Натуральные величины		Y_1	Y_2	Y_3
	x_1	x_2	X_1 - напол. %	X_2 - вид вяжущего	ρ , кг/м ³	$R^{\text{ТВО}}_{\text{сж}}$ МПа	$R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}$ МПа
1	-1	-1	10	ЦЗВи	1860	24,3	26,5
2	1	-1	50	ЦЗВи	1800	10,3	18,64
3	-1	1	10	ШЦВи	1880	28,42	33,22
4	1	1	50	ШЦВи	1760	15,3	17,2
5	1	0	50	ЦЗШВи	1800	10,49	12,49
6	-1	0	10	ЦЗШВи	1850	19,69	20,91
7	0	1	30	ШЦВи	1800	22,05	23,31
8	0	-1	30	ЦЗВи	1840	12,8	23,4
9	0	0	30	ЦЗШВи	1820	13,3	16,1

$$Y_1(\rho) = 1820 - 38,33 x_1 - 5,0x_1^2 - 10,0 x_2 - 15,0 x_1x_2 \quad (5.7)$$

$$Y_2(R^{\text{ТВО}}_{\text{сж}}) = 13,13 - 6,05 x_1 + 2,33x_1^2 + 3,06 x_2 + 4,37 x_2^2 + 0,22 x_1x_2 \quad (5.8)$$

$$Y_3(R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}) = 16,13 - 5,38 x_1 + 0,56x_1^2 + 0,87x_2 + 7,21 x_2^2 - 2,04 x_1x_2 \quad (5.9)$$

По модели (5.7) установлено, что плотность зависит от количества наполнителя в вяжущем - фактор (x_1) и линейный эффект при нем соответственно ($b_1 = - 38,33$). Второй по степени влияния на плотность МЗБ вид вяжущего - фактор (x_2). Линейный коэффициент ниже и составляет ($b_2 = - 10,33$).

Прочность $R^{\text{ТВО}}_{\text{сж}}$ МЗБ после ТВО (5.8) в первую очередь зависит от количество наполнителя ($b_1 = - 6,05$) и затем вид вяжущего ($b_2 = 3,06$).

Прочность МЗБ после 28 суток твердения (4.9) в большей степени зависит от количества наполнителя x_1 и его влияние сильнее ($b_1 = -5,38$) чем вид вяжущего ($b_2 = 0,87$).

На рис. 5.12. видно, что наибольшие показатели прочности МЗБ после ТВО $R^{ТВО}_{сж}$ и после 28 суток $R^{28сут}_{сж}$ обеспечиваются для бетонов на вяжущем ЦЗВи (с золой ГУ) и ШЦВи (с шлаком), но при нижних уровнях 10%. Но даже при 40% наполнителя обеспечивается $R^{28сут}_{сж} \geq 20,0$ МПа и плотности в пределах 1800-1820 кг/м³.

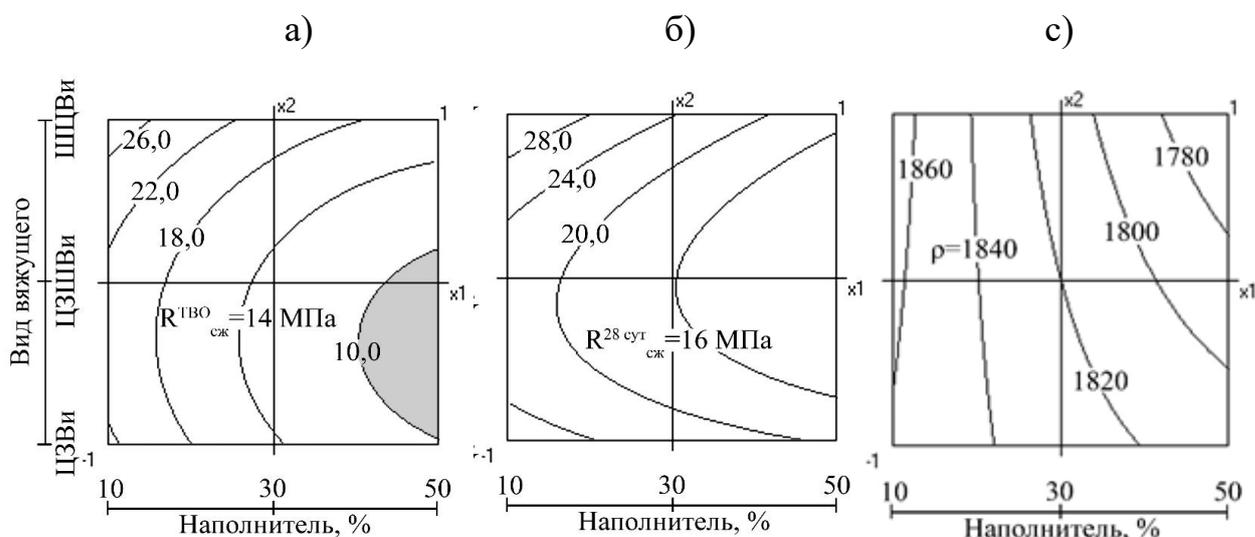


Рисунок 5.12 – МЗБ состав № 6: а) Прочность после ТВО $R^{ТВО}_{сж}$, б) после 28 суток $R^{28сут}_{сж}$, в) плотность (ρ). (вяжущее):Ш(шлак фр. 0-5,5-10мм)= 1:2.

МЗБ состава № 7 представлен соотношением вяжущее : наполнитель в виде шлака фракции (шлак фр. 0-5,5-10 мм) при соотношении 1: 3.

Таблица 5.15 – План эксперимента и результаты испытаний МЗБ состава № 7 – (ЦЗВи; ЦЗШВи; ЦШВи):Ш(шлак фр. 0-5мм) = 1:3 на разных видах вяжущего.

№ опыта	План эксперимента				Результаты эксперимента		
	Кодированные переменные		Натуральные величины		Y_1	Y_2	Y_3
	x_1	x_2	X_1 - напол. %	X_2 - вид вяжущего	ρ , кг/м ³	$R^{ТВО}_{сж}$ МПа	$R^{28сут}_{сж}$ МПа
1	-1	-1	10	ЦЗВи	1820	20,1	21,6
2	1	-1	50	ЦЗВи	1780	7,4	10,2
3	-1	1	10	ЦШВи	1870	17,71	21,71
4	1	1	50	ЦШВи	1700	9,4	11,2
5	1	0	50	ЦЗШВи	1760	7,82	8,91

6	-1	0	10	ЦЗШВи	1800	13,71	14,42
7	0	1	30	ЦШВи	1720	13,4	15,6
8	0	-1	30	ЦЗВи	1800	9,3	14,4
9	0	0	30	ЦЗШВи	1780	10,18	12,0

$$Y_1(\rho) = 1765,56 - 41,67 x_1 + 21,67 x_1^2 - 18,33 x_2 + 1,67 x_2^2 - 32,5 x_1 x_2 \quad (5.10)$$

$$Y_2(R_{сж}^{тво}) = 9,42 - 4,45 x_1 + 1,73 x_1^2 + 0,62 x_2 + 2,32 x_2^2 + 1,10 x_1 x_2 \quad (5.11)$$

$$Y_3(R_{сж}^{28сут}) = 11,33 - 4,57 x_1 + 0,67 x_1^2 + 0,39 x_2 + 4,01 x_2^2 + 0,22 x_1 x_2 \quad (5.12)$$

По модели (5. 10) видно, что плотность МЗБ в большей степени зависит от количества наполнителя (x_1) отходов ТЭС в вяжущем и снижается по мере его накопления ($b_1 = - 41,67$). Второй по значимости идет фактор (x_2), он показывает влияние вида вяжущего ($b_2 = - 18,33$).

После ТВО прочность МЗБ (5. 11) зависит от количества наполнителя ($b_1 = -4,45$), которая понижается при верхних показателях, а вид вяжущего существенно не меняет этот показатель ($b_2 = 0,62$). После 28 суток твердения (4.4.12) влияние фактора x_1 ($b_1 = -4,57$) сильнее, чем вид вяжущего x_2 ($b_2 = +0,39$).

Наглядно влияние двух факторов на показатели МЗБ состава №7 показано на рис. 5.13 и 5.14. В составе 7 содержание мелкого шлакового заполнителя увеличено, что привело к снижению плотности МЗБ до 1720-1820 кг/м³ и прочности до 10- 18 МПа. И наибольшие прочностные показатели МЗБ $R_{сж}^{28сут} = 20,0$ МПа обеспечиваются только при минимальном 10% содержании наполнителя в вяжущих ЦЗВи (с золой ГУ) и ШЦВи (со шлаком).

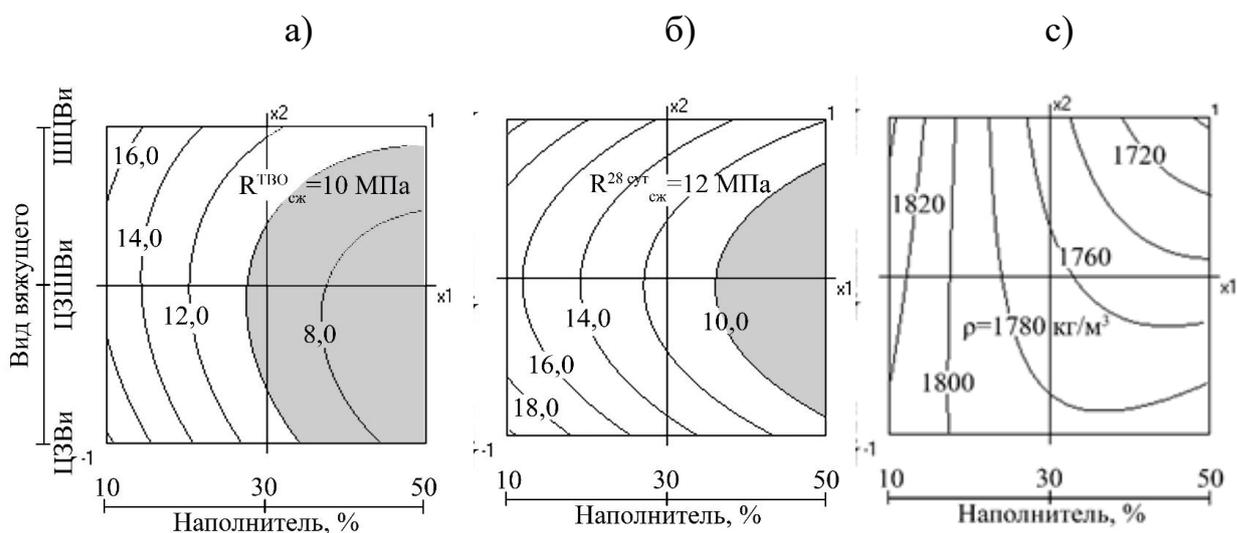


Рисунок 5.14 – МЗБ состав7: а) прочность $R^{TBO}_{сж}$ после ТВО, б) $R^{28сут}_{сж}$ после 28 суток; с) плотность (ρ). (Вяжущее) : Ш(шлак фр. 0-5мм) = 1:3.

Наиболее высокой плотностью (1800-1900кг/м³) и прочностью (М 200-300) характеризуются образцы МЗБ состава 2, 6 и 7 с 10% содержанием наполнителя.

Для МЗБ на основе вяжущего ЦШВ_и были определены также истираемость и морозостойкость (табл.5.17).

Таблица 5.17 – Основные физико-механические характеристики МЗБ на основе ЦШВ_и состава 90:10

№ состава	ρ , кг/м ³	$R_{сж}$, МПа	Истир., г/см ²	Мрз ,цикл
2	1770	21,25	0,11	150
6	1880	33,1	0,15	100
7	1870	21,5	0,35	75

Важной характеристикой легких и облегченных бетонов является теплопроводность, которые классифицировались по плотности. Характеристики коэффициента теплопроводности приведены в табл. 5.18.

Теплопроводность тяжелого бетона в воздушно – сухом состоянии 1,2 Вт/ м×К, т.е. в 2 - 4 раза больше, чем у МЗБ, полученного на основе шлака и золосодержащих цементов (табл. 5.18).

Таблица 5.18 – Коэффициент теплопроводности МЗБ на ЦЗВ_и и ЦШВ_и

Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводность,Вт/	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводность,
------------------------------	----------------------------------	------------------------------	-------------------------------

	(м×К)		Вт/ (м×К)
1300	0,35	1700	0,57
1400	0,40	1800	0,67
1500	0,43	1900	0,74
1600	0,48	2000	0,81

Причина пониженной теплопроводности МЗБ на основе шлака и золосодержащих цементов можно объяснить стекловидной структурой частиц золошлаковой смеси и микропористой структурой золошлака бетона.

Во всех составах кроме №1 мелким заполнителем в МЗБ являлся топливный шлак различных фракций и соотношений к композиционному вяжущему. На рисунке 5.15 для каждого класса бетона можно проследить степень использования топливных отходов (доля в МЗБ). Наименьшая величина соответствует составу № 1. Максимальная утилизация топливных отходов в виде наполнителя и заполнителя для МЗБ (М 100) обеспечивается в составах 2,6,7.

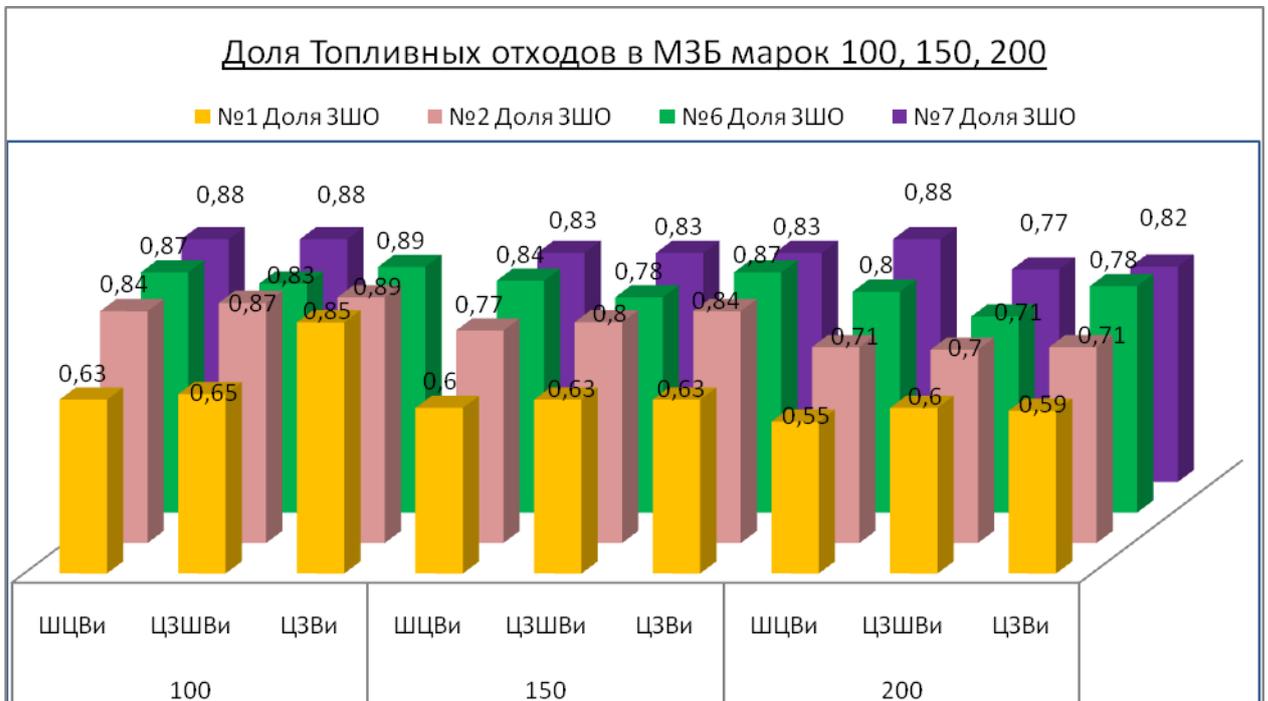


Рисунок 5.15 – Доля топливных отходов в МЗБ марок 100,150,200.

Таблица 5.16 – Составы МЗБ на композиционных вяжущих на 1 м³

№ Состав	Вид вяжущего	Марка/ класс бетона	Плотность МЗБ ρ, кг/м ³	Содержание ПЦ, мЗ	Содержание ПЦ, кг	содержание наполнителя, мЗ / (%)	содержание наполнителя, кг	количество мелкого заполнителя				
								топливный шлак, мЗ	топливный шлак, кг	песок, мЗ	песок, кг	
1	Состав № 1 МЗБ на композиционном вяжущем:Ш(шлак фр. 5-10мм):П(песок) = 1:2:1											
	ШЦВи	200 (В15)	1920	0,225	293	0,025 (10)	30	0,5	470	0,225	304	
		150 (В10)	1835	0,175	228	0,075 (30)	89	0,5	470	0,225	304	
		100 (В 7,5)	1760	0,15	195	0,100 (40)	118	0,5	470	0,225	304	
	ЦЗШВи	200 (В15)	1925	0,175	228	0,075(30)	62	0,5	470	0,225	304	
		150 (В10)	1835	0,15	195	0,100 (40)	82	0,5	470	0,225	304	
		100 (В 7,5)	1790	0,125	163	0,125 (50)	103	0,5	470	0,225	304	
	ЦЗВи	200 (В15)	1940	0,19	243	0,063(25)	51	0,5	470	0,225	304	
		150 (В10)	1910	0,15	195	0,100 (40)	80	0,5	470	0,225	304	
		100 (В7,5)	1760	0,09	117	0,163(65)	130	0,75	470	0,225	304	
	2	Состав № 2 МЗБ на композиционном вяжущем : Ш (шлак фр. 5-10мм) = 1:2										
		ШЦВи	200 (В15)	1860	0,29	377	0,040 (12)	47,2	0,66	620	—	—
150 (В10)			1800	0,231	300,3	0,099(30)	117	0,66	620	—	—	
100 (В7,5)			1730	0,165	214,5	0,165 (50)	195	0,66	620	—	—	
ЦЗШВи		200 (В15)	1870	0,297	386,1	0,033(10)	27,1	0,66	620	—	—	
		150 (В10)	1780	0,198	257,4	0,132(40)	121	0,66	620	—	—	
		100 (В7,5)	1730	0,132	171,6	0,198(60)	162	0,66	620	—	—	
ЦЗВи		200 (В15)	1860	0,29	377	0,039(12)	31,2	0,66	620	—	—	
		150 (В10)	1760	0,165	214,5	0,165(50)	132	0,66	620	—	—	
		100 (В7,5)	1730	0,12	150	0,214(65)	171	0,66	620	—	—	

№ Состав	Вид вяжущего	Марка/класс бетона	Плотность МЗБ ρ, кг/м ³	Содержание ПЩ, мЗ	Содержание ПЩ, кг	содержание наполнителя, мЗ / (%)	содержание наполнителя, кг	количество мелкого заполнителя			
6	Состав № 6 МЗБ на композиционном вяжущем:Ш(шлак фр. 0-5, 5-10мм)- 1:2										
	ЩЦВи	300 (В22,5)	1860	0,3	390	0,033(10)	38,9	0,67	710	—	—
		250 (В20)	1840	0,28	364	0,05 (15)	59	0,67	710	—	—
		200 (В15)	1780	0,198	257,4	0,132(40)	156	0,67	710	—	—
		150 (В10)	1760	0,165	214,5	0,165(50)	195	0,67	710	—	—
		100 (В 7,5)	1750	0,132	171,6	0,198(60)	234	0,67	710	—	—
	ЦЗШВи	200 (В15)	1850	0,29	377	0,04(12)	32,5	0,67	710	—	—
		150 (В10)	1810	0,224	291,2	0,105(32)	86,1	0,67	710	—	—
		100 (В 7,5)	1790	0,172	223,6	0,158(48)	130	0,67	710	—	—
	ЦЗВи	200 (В15)	1810	0,18	235	0,148(45)	118	0,67	710	—	—
		150 (В10)	1800	0,132	172	0,198(60)	158	0,67	710	—	—
		100 (В 7,5)	1780	0,12	150	0,214(65)	171	0,67	710	—	—
7	Состав № 7 МЗБ на композиционном вяжущем:Ш (шлак фр. 0-5, 5-10мм) = 1:3										
	ЩЦВи	200 (В15)	1840	0,222	288,6	0,027(11)	31,9	0,75	795	—	—
		150 (В10)	1740	0,172	223,6	0,077(31)	90,9	0,75	795	—	—
		100(В 7,5)	1700	0,12	156	0,130(52)	153	0,75	795	—	—
	ЦЗШВи	200 (В15)	1840	0,23	299	0,02(8)	16,4	0,75	795	—	—
		150 (В10)	1810	0,175	227,5	0,075(30)	61,5	0,75	795	—	—
		100(В 7,5)	1750	0,122	158,6	0,127(51)	104	0,75	795	—	—
	ЦЗВи	200 (В15)	1810	0,222	288,6	0,027(11)	21,6	0,75	795	—	—
		150 (В10)	1790	0,175	227,5	0,075(30)	60	0,75	795	—	—
100(В 7,5)		1780	0,1	130	0,15 (60)	120	0,75	795	—	—	

5.5 Оптимизация состава мелкозернистого бетона на вяжущем с золой рисовой шелухи и заполнителя с золой гидроудаления

Использование добавок ЗШО в бетоны обусловлено его определенными ценными свойствами: дисперсностью, позволяющей в цементе или мелком заполнителе повысить содержание дисперсных частиц, и пуццоланической активностью, способностью связывать CaO , выделившейся при гидратации цемента [218, 221, 222].

Результаты исследований кислых ЗШО показали, что их введение компенсирует недостаток дисперсных частиц в цементной матрице и благодаря их гидравлической активности и участию процессах структурообразования обеспечивается проектная прочность МЗБ класса В15 на цементнозолошлаковом вяжущем, а экономия цемента составляет 46 % и для класса В10 до 50% [218].

На юге Кыргызстана ежегодно скапливается огромное количество отходов рисового производства. Рисовая шелуха на 40 % состоит из диоксидов кремния и примесей других металлов в виде K_2O , Na_2O , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . А зола рисовой шелухи (ЗРШ) содержит значительное количество окиси кремния и в отличие от минерального кремнийсодержащего сырья имеет стабильный состав и низкое содержание тяжелых металлов. Исследования по использованию ЗРШ в Республике посвящены в основном вопросам использования ее в качестве сорбента и подложки для катализаторов и медицинских препаратов [219].

В технологии производства бетона для сокращения расхода портландцемента предлагается использовать различные ультрадисперсные наполнители. Микрокремнезем, например, оказывают положительное влияние на микроструктуру цементной матрицы, в бетоне снижается капиллярная пористость, повышается количество гелевых пор, увеличивается прочность контактной зоны между заполнителями и благодаря повышенной химической реакционной способности SiO_2 образуются более прочные и

устойчивые вторичные гидросиликаты Са.

Зола рисовой шелухи (ЗРШ) как наполнитель в цемент способствует повышению прочности бетона, что объясняется двойным эффектом микронаполнения цементной матрицы и пуццолановой реакционной способностью [220]. Поэтому ЗРШ благодаря повышенному содержанию аморфного SiO_2 может являться дешевой альтернативой микрокремнезему в производстве бетона.

Известно, что контактная зона между вяжущим и заполнителем является слабым элементом в структуре бетона и более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях при разности температур и влажности во время эксплуатации бетона. Введение же пуццолановых наполнителей и заполнителей положительно скажется на свойствах контактной зоны: снижение капиллярной пористости за счет уменьшения концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образование дополнительного количества $\text{CSH}(1)$ и образованием контактов срастания между кристаллогидратами [220, 222].

Поскольку тонкодисперсные минеральные добавки значительно повышают водопотребность бетонных смесей то технологически необходимым является использование пластификаторов с высокой водоредуцирующей способностью.

В Кыргызстане используется в основном тяжелый мелкозернистый бетон (МЗБ) классов В15...В25 для обычных несущих конструкций и некоторых случаях применяется МБ классов В30...В45. Для получения из местного сырья МЗБ класса В15 доля цемента на 1 м^3 составляет - 23,3 % и доля песка - 76,7%.

В исследованиях для изучения возможности использования техногенных отходов ЗГУ и ЗРШ, в качестве компонентов мелкозернистого бетона был проведен 3-х факторный эксперимент по плану В_3 .

В качестве нормализованных факторов выбраны: X_1 – содержание ЗГУ от количества песка (15 ± 15), %; X_2 – ЗРШ от количества цемента (4 ± 4), %; X_3 – количество пластификатора Neolit 303 (0.4 ± 0.4), % от массы вяжущего.

Таблица 5.17- План и результаты эксперимента

№	План эксперимента						Свойства МЗБ									
	x_1	x_2	x_3	ЗГУ, %	ЗРШ, %	Neolit 303, %	$R_{изг}^7$ МПа	$R_{изг}^{28}$ МПа	$R_{изг}^{90}$	$R_{сж}^7$ МПа	$R_{сж}^{28}$ МПа	$R_{сж}^{90}$ МПа	W^{28} , %	K_p^{28}	В/Ц	ρ^{28} суток
1	+	+	+	30	8	0,8	5,7	13,42	17,25	5,71	15,75	20,45	3,85	0,66	0,67	2,03
2	+	+	-	30	8	0	5,16	9,76	10,74	8,09	12,26	16,5	1,86	0,73	0,78	2,096
3	+	-	+	30	0	0,8	6,31	13,45	18,02	10,19	12,24	22,3	1,86	1,06	0,73	2,097
4	-	+	+	0	8	0,8	8,81	13,15	21,5	16,48	18,02	25,49	1,64	1,26	0,47	2,376
5	-	-	-	0	0	0	15,56	19,73	19,13	22,2	27,46	27,56	0,51	0,84	0,54	2,52
6	-	-	+	0	0	0,8	10,89	12,96	24,65	15,16	28,09	31,38	1,53	0,81	0,41	2,476
7	-	+	-	0	8	0	9,56	13,26	25,02	15,69	19,36	32,11	0,76	0,89	0,56	2,406
8	+	-	-	30	0	0	4,8	11,14	20,73	6,79	13,61	20,98	0,69	1,11	0,81	2,115
9	+	0	0	30	4	0,4	5,52	9,95	13,71	7,41	12,77	20,23	1,79	0,86	0,76	2,091
10	-	0	0	0	4	0,4	11,27	14,3	23	14,41	21	31,03	2,31	0,58	0,54	2,372
11	0	+	0	15	8	0,4	8,66	9,77	14,67	9,91	16,98	23,71	2,92	0,61	0,69	2,178
12	0	-	0	15	0	0,4	10,89	15,38	20,73	14,01	29,32	31,83	1,535	0,58	0,66	2,298
13	0	0	+	15	4	0,8	6,06	12,05	19,3	9,61	17,61	33,32	1,71	0,72	0,61	2,291
14	0	0	-	15	4	0	5,31	11,81	14,38	8,31	12,69	19,59	0,78	1,1	0,74	2,231
15	0	0	0	15	4	0,4	6,08	13,87	18,5	9,17	21,39	30,83	2,345	0,6	0,68	2,284

Распływ конуса смеси для всех 15 составов соответствовал 106 - 115 мм. Фиксировалось водовяжущее отношение (В/В) значение которого менялось от 0.4 до 0.8. Нижний уровень факторов соответствовал их нулевой концентрации, что позволило сравнить составы бездобавочного (контрольного) и модифицированного МЗБ. Контролируемыми параметрами являлись прочность на изгиб и сжатие ($R_{сж}$, $R_{изг}$) в 7, 28 и 90 суточном возрасте и плотность МЗБ.

По результатам эксперимента методом наименьших квадратов рассчитаны экспериментально-статистические модели (ЭС-модели) прочностных свойств, описывающих их зависимость от содержания золы ГУ, Золы РШ и химической добавки в МЗБ (1-7).

$$Y_1 (R^7_{изг}) = 7,27 - 2,86 x_1 + 0,83 x_1^2 + 0,98 x_1x_2 + 0,94 x_1x_3 - 1,06 x_2 + 2,21 x_2^2 + 0,37 x_2x_3 - 0,26 x_3 - 1,88 x_3^2 \quad (5.13)$$

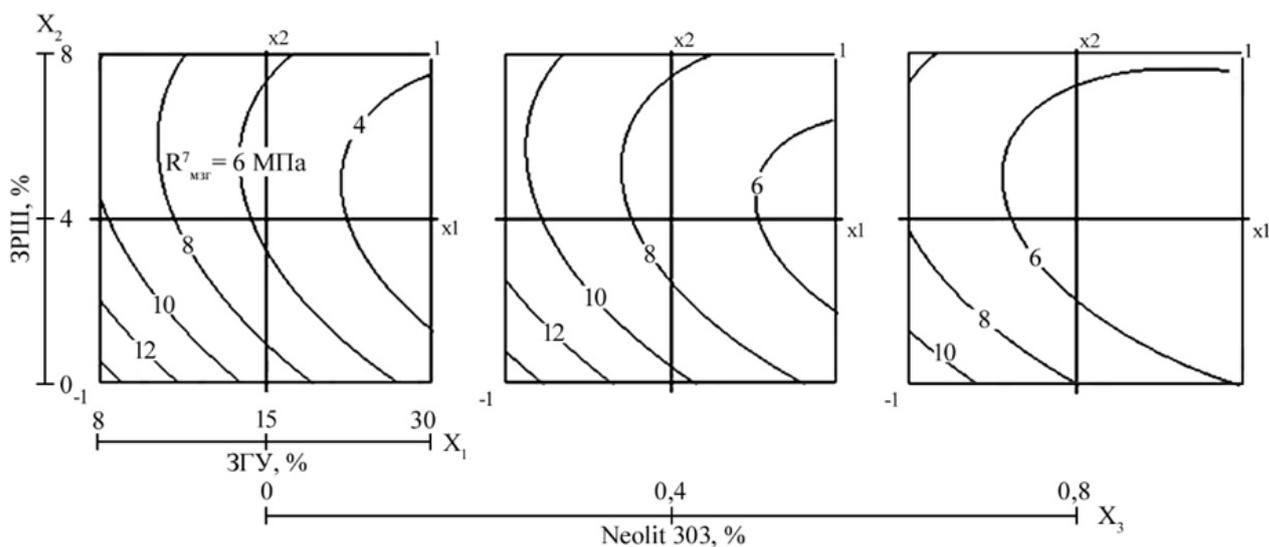


Рис. 5.16. Номограммы прочности МЗБ $R^7_{изг}$ при содержании Neolit 303 – 0; 0,4 и 0,8 % ($x_3 = -1; 0; 1$)

$$Y_2 (R^{28}_{изг}) = 12,28 - 1,57 x_1 + 0,25 x_1^2 + 0,69 x_1x_2 + 1,61 x_1x_3 - 1,33 x_2 + 0,69 x_2^2 + 1,0 x_2x_3 - 0,07 x_3 + 0,05 x_3^2 \quad (5.14)$$

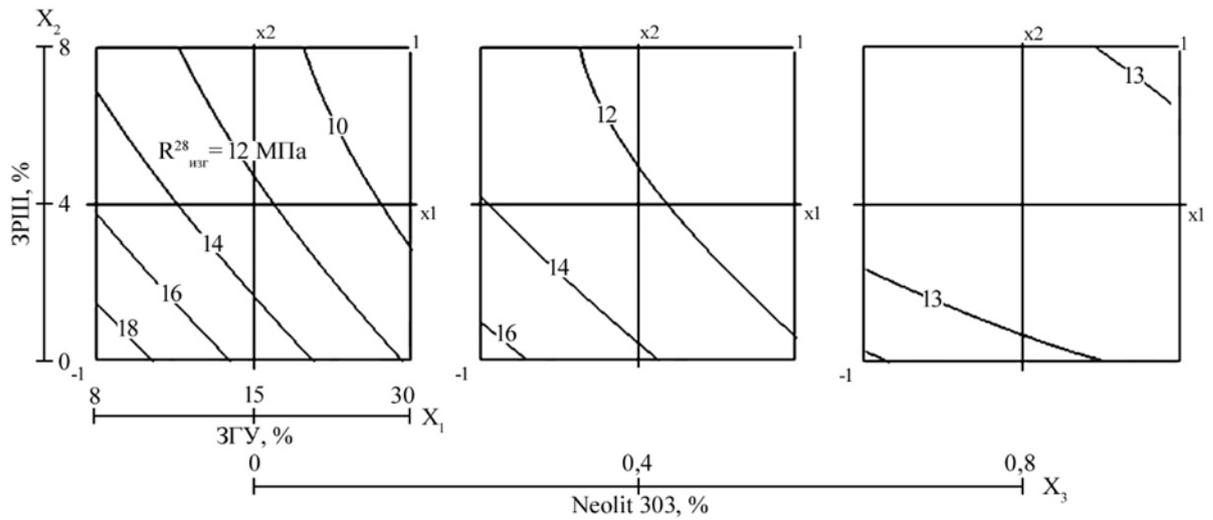


Рис. 5.17 - Номограммы прочности МЗБ $R_{изг}^{28}$ при содержании Neolit 303 – 0; 0,4 и 0,8 % ($x_3 = -1; 0; 1$)

$$Y_3 (R_{изг}^{90}) = 17,57 - 2,39 x_1 + 1,02 x_1^2 - 2,81 x_1 x_2 - 0,9 x_1 x_3 - 0,51 x_2 + 0,36 x_2^2 - 1,1 x_2 x_3 + 1,97 x_3 - 0,5 x_3^2 \quad (5.15)$$

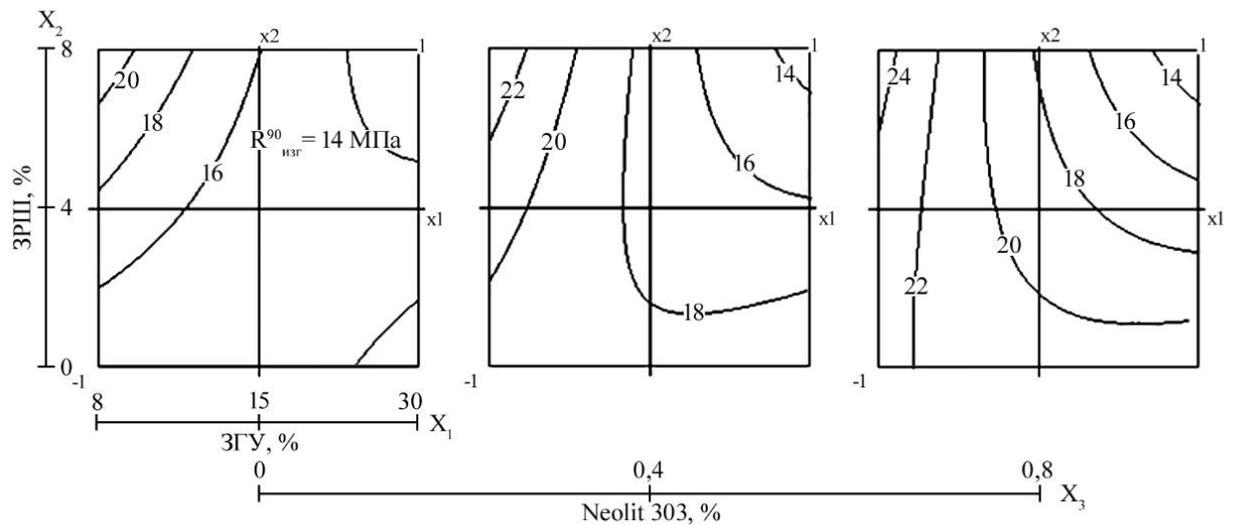


Рис. 5.18 - Номограммы прочности МЗБ $R_{изг}^{90}$ при содержании Neolit 303 – 0; 0,4 и 0,8 % ($x_3 = -1; 0; 1$)

$$Y_4 (R_{сж}^7) = 9,51 - 4,58 x_1 + 1,32 x_1^2 + 0,25 x_1 x_2 + 0,91 x_1 x_3 - 1,25 x_2 + 2,37 x_2^2 + 0,26 x_2 x_3 - 0,39 x_3 - 0,63 x_3^2 \quad (5.16)$$

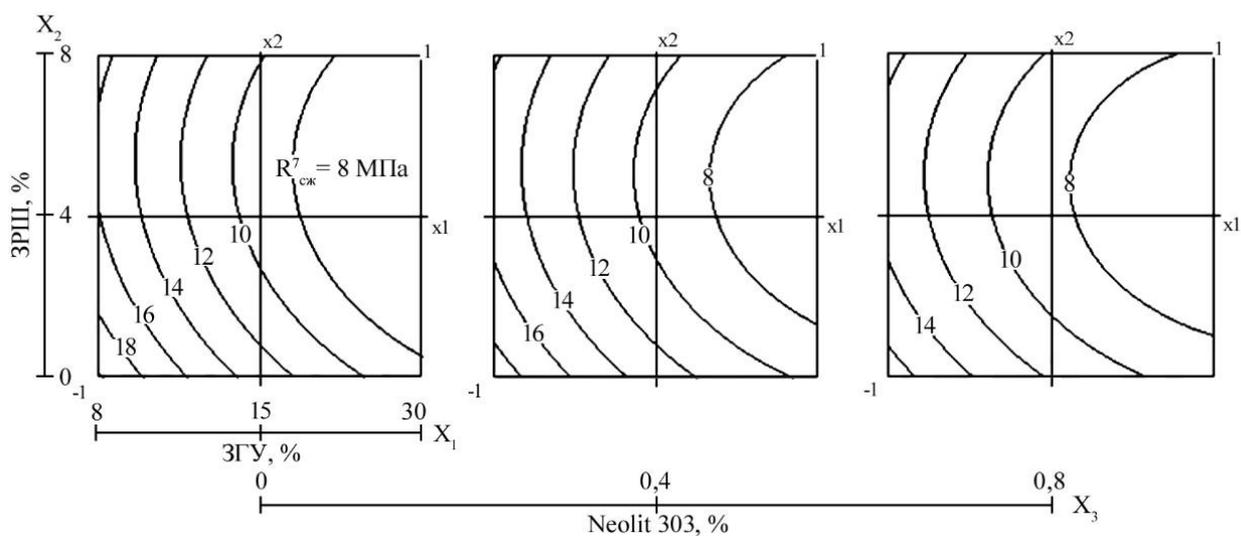


Рис. 5.18 - Номограммы прочности МЗБ $R^7_{сж}$ при содержании Neolit 303 – 0; 0,4 и 0,8 % ($x_3 = -1; 0; 1$)

$$Y_5 (R^{28}_{сж}) = 19,28 - 4,73 x_1 - 1,86 x_1^2 + 2,54 x_1 x_2 + 0,35 x_1 x_3 - 2,83 x_2 + 4,40 x_2^2 + 0,36 x_2 x_3 + 0,63 x_3 - 3,6 x_3^2 \quad (5.17)$$

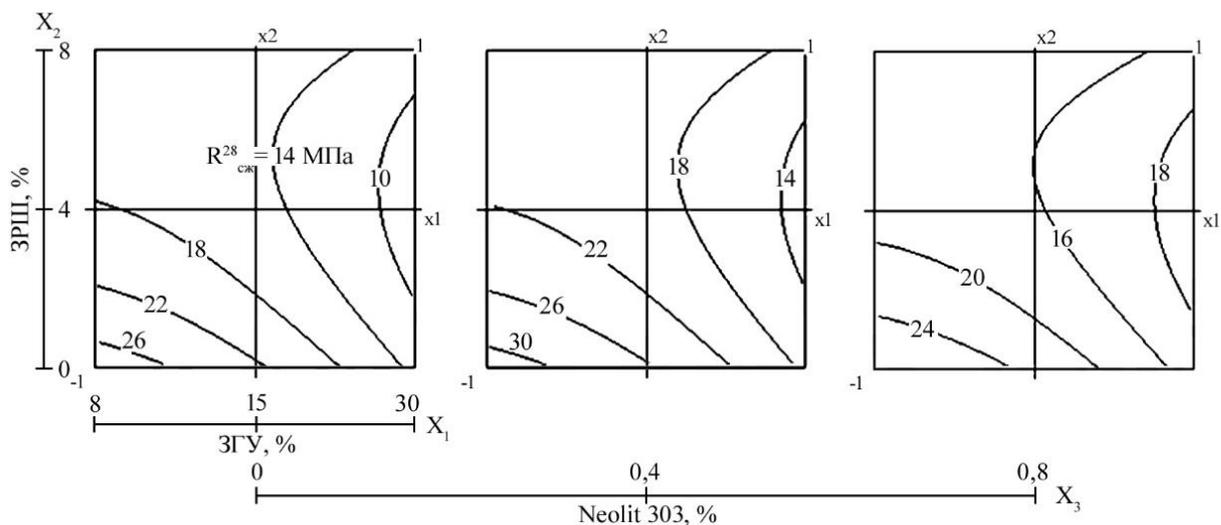


Рис. 5.19 - Номограммы прочности МЗБ $R^{28}_{сж}$ при содержании Neolit 303 – 0; 0,4 и 0,8 % ($x_3 = -1; 0; 1$)

$$Y_6 (R^{90}_{сж}) = 28,55 - 4,71 x_1 - 2,36 x_1^2 - 0,62 x_1 x_2 + 1,0 x_1 x_3 - 1,58 x_2 - 0,22 x_2^2 - 0,98 x_2 x_3 + 1,62 x_3 - 1,53 x_3^2 \quad (5.18)$$

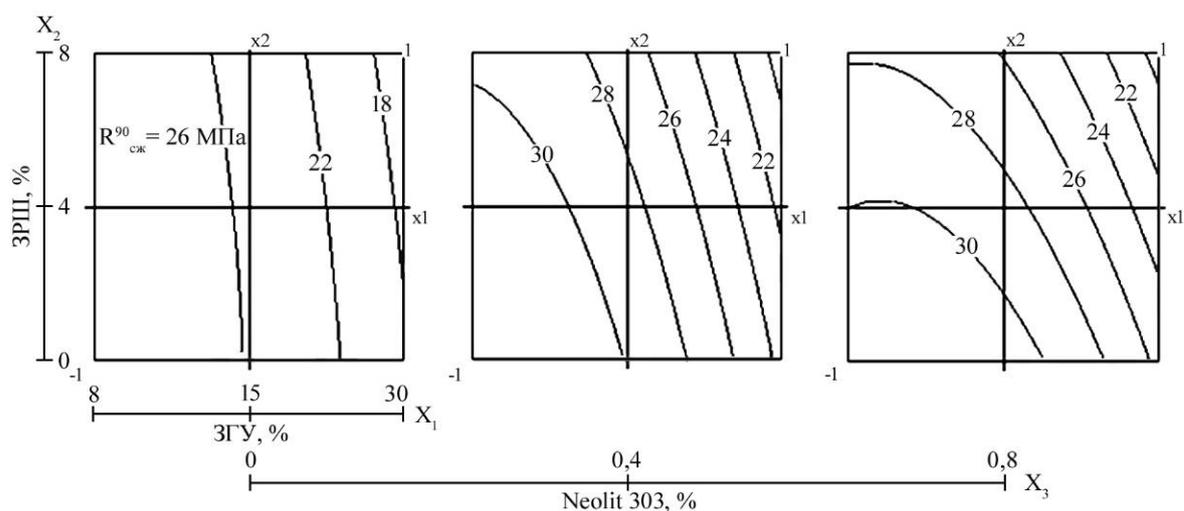


Рис. 5.20 - Номограммы прочности МЗБ $R_{сж}^{90}$ при содержании Neolit 303 – 0; 0,4 и 0,8 % ($x_3 = -1; 0; 1$)

$$\begin{aligned}
 Y_7 (p^{28}) = & 2,25 - 0,17 x_1 - 0 x_1^2 + 1,02 x_1 x_2 + 0 x_1 x_3 & (5.19) \\
 & - 0,42 x_2 - 0 x_2^2 - 0 x_2 x_3 \\
 & - 0,01 x_3 - 1,53 x_3^2
 \end{aligned}$$

Полученные полиномиальные уравнения регрессии отражают взаимосвязь прочностных свойств МЗБ от содержания наполнителя ЗРШ в цементе, мелкого заполнителя в виде ЗГУ в составе песка и химической добавки в разные сроки твердения (7, 28 и 90 суток).

Анализ моделей $R_{изг}$ (2-3) прочности на изгиб показал, что введение ЗГУ в МЗБ как часть мелкого заполнителя может привести к ее снижению. На что указывает отрицательный знак линейного коэффициента регрессии при первом факторе x_1 . Линейный эффект при x_1 для $R_{изг}^7$ равен ($b_1 = -2.86$), для $R_{изг}^{28}$ ($b_1 = -1.57$) и $R_{изг}^{90}$ ($b_1 = -2.39$). Что обусловлено повышенным количеством частиц мелкой фракции заполнителя и соответственно недостатком цементирующей «смазки». Аналогичная закономерность спада прочности наблюдается и при введении наполнителя в виде золы рисовой шелухи X_2 . Линейный эффект при x_2 для $R_{изг}^7$ равен ($b_2 = -1.06$), для $R_{изг}^{28}$ ($b_2 = -1.33$) и $R_{изг}^{90}$ ($b_2 = -0.51$). Причем в более поздние сроки 90 суток этот эффект менее выражен.

Подобная тенденция снижения прочности на сжатие МЗБ прослеживается у моделей (4 - 6). Линейный эффект при x_1 для $f_{ck.cube}^7$ равен ($b_1 = -4.58$), для $R_{сж}^{28}$ ($b_1 = -4.73$) и $R_{сж}^{90}$ ($b_1 = -4.71$). Для фактора x_2 $R_{сж}^7$ равен ($b_2 = -1.25$), для $R_{сж}^{28}$ ($b_2 = -2.83$) и $R_{сж}^{90}$ ($b_2 = -1.58$).

Квадратичные эффекты для моделей (1 - 4) не велики и имеют положительный знак, что указывает на наличие двух оптимальных значений фактора $R_{изг}^7$ равен ($b_{11} = 0.83$), для $R_{изг}^{28}$ ($b_{11} = 0.25$) для $R_{изг}^{90}$ ($b_{11} = 1.02$) и для $R_{сж}^7$ ($b_{11} = 1.32$). Уже для моделей (5 - 6) линейные эффекты меняют знак и равны для $R_{сж}^{28}$ ($b_{11} = -1.86$) и $R_{сж}^{90}$ ($b_{11} = -2.36$), что свидетельствует о наличии зоны оптимума для первого фактора – золы ГУ для обеспечения требуемой прочности. В моделях (1 - 5) квадратичные эффекты при факторе x_2 (ЗРШ) имеют знак «+» $R_{изг}^7$ равен ($b_{22} = 2.21$), для $R_{изг}^{28}$ ($b_{22} = 0.69$), $R_{изг}^{90}$ ($b_{22} = 0.36$), $R_{сж}^7$ ($b_{22} = 2.37$), $R_{сж}^{28}$ ($b_{22} = 4.40$), что указывает о наличии двух оптимальных значений. Для $R_{сж}^{90}$ знак квадратичный эффект минимальный с отрицательным знаком ($b_{22} = -0.22$).

Наличие химической добавки Neolit 303 практически не оказывает прямого влияния на прочность МЗБ, поскольку его функция заключается в регулировании В/Ц. Линейные эффекты модели (1 - 3) для третьего фактора $R_{изг}^7$ равен ($b_3 = -0.26$), для $R_{изг}^{28}$ ($b_3 = -0.07$) и $R_{изг}^{90}$ ($b_3 = 1.97$). Для моделей (4 - 6) для третьего фактора $R_{сж}^7$ линейный эффект равен ($b_3 = -0.39$), для $R_{сж}^{28}$ ($b_3 = 0.63$) и $R_{сж}^{90}$ ($b_3 = 1.62$).

По модели (7) ρ^{28} плотности МЗБ на 28 сутки видно, что она зависит в первую очередь от содержания золы ГУ (x_1), т.е. снижается плотность бетона ($b_1 = -17.20$). Далее зола рисовой шелухи также снижает ($b_1 = -4.71$). Плотность бетона повышается с введением пластификатора, но при оптимальной концентрации, на что указывает квадратичный коэффициент ($b_{33} = -2.2$).

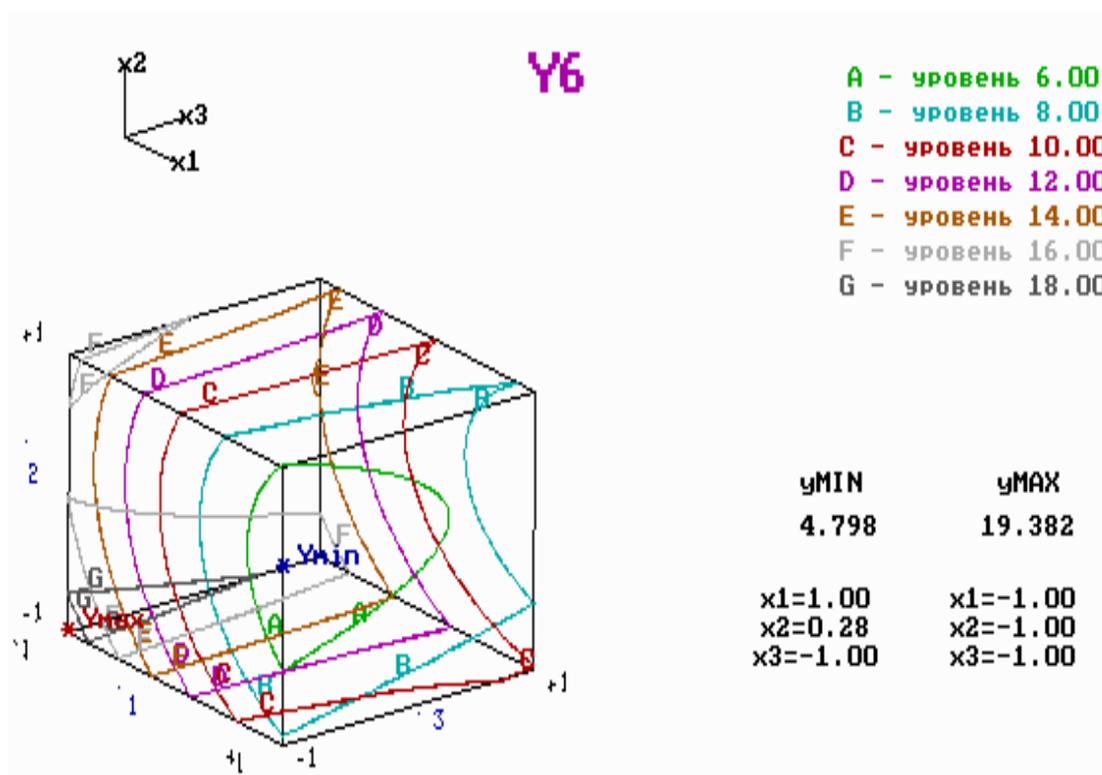
По механизму действия на процессы структурообразования МЗБ, используемые активные минеральные добавки существенно отличаются. Так наполнитель в виде тонкодисперсной ЗРШ предполагает заполнение пор

между частицами цемента, образование вторичных продуктов гидратации в процессе пуццолановой реакции с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и упрочнение цементной матрицы бетона.

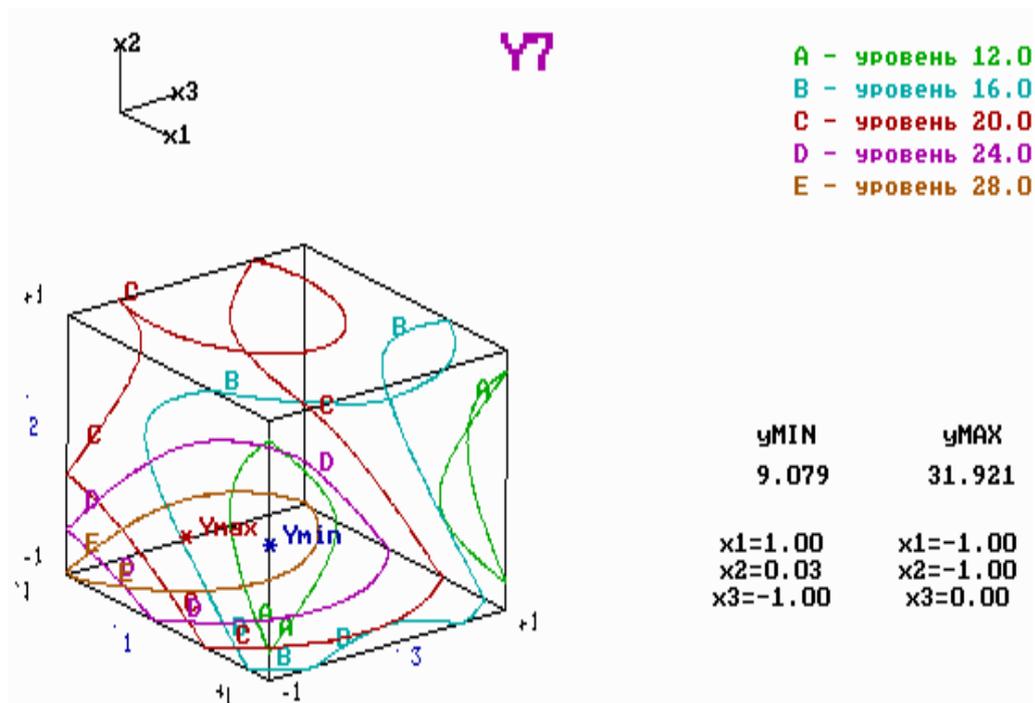
ЗГУ как часть тонкой фракции песка обеспечит получить оптимальный зерновой состав с плотной упаковкой зерен. Причем, являясь активной ЗГУ будет способствовать упрочнению и уплотнению контактной зоны «заполнитель-вяжущая часть» в МЗБ.

Анализ эффективности использования и влияния добавок ЗГУ и ЗРШ, в том числе пластификатора на прочностные свойства мелкозернистого бетона различного состава проводился по 3-х факторным моделям (табл.5.17) и их графическим образам (рис. 5.21).

а) прочность ($R^{7\text{сут}}_{\text{сж}}$)



б) прочность $R_{сж}^{28}$)



в) прочность $R_{сж}^{90}$

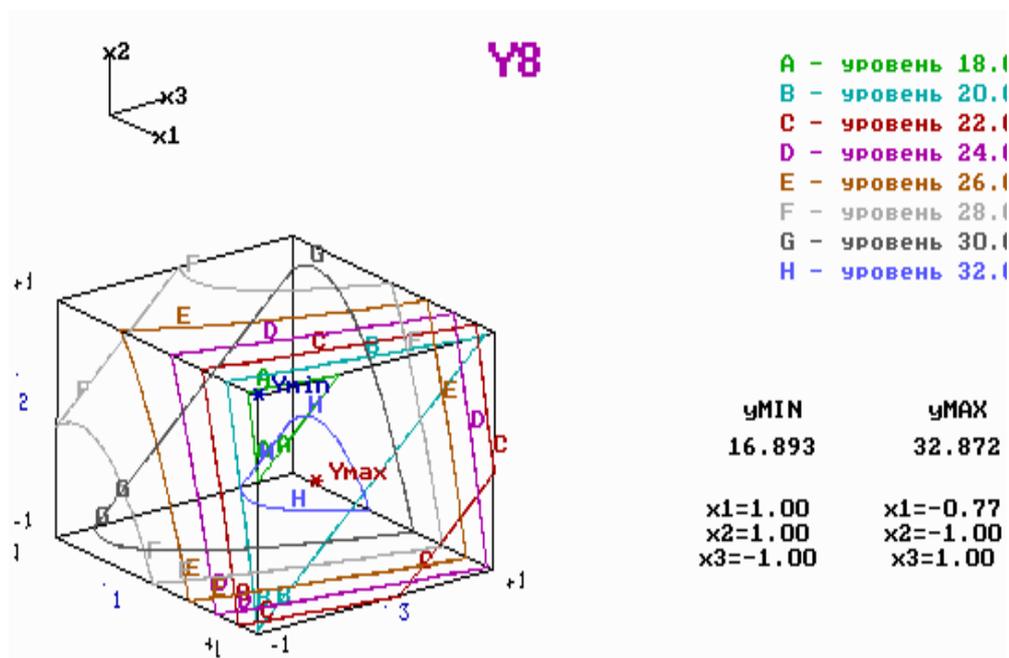


Рисунок 5.21 – Изоповерхности прочности на сжатие МЗБ 7, 28 и 90 суток

На рис. 5.21а. видно, что максимальная прочность $R_{сж}^7 = 18$ МПа соответствует координатам ($x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = -1$), т.е. бездобавочного МЗБ бетона, когда все факторы находятся на нулевом уровне концентрации. К 28 суточному возрасту такой бетон практически набирает 100% прочность $R_{сж}^{28}$

= 27.5 МПа и $R_{сж}^{90} = 27.6$ МПа при $V/B = 0.54$ и $\rho^{28} = 2.52$ г/см³. Следует отметить, что в присутствии пластификатора Neolit 303 снижается $V/B = 0.41$ и наблюдается некоторое повышение прочности до $R_{сж}^{28} = 28.1$ МПа и $R_{сж}^{90} = 31.4$ МПа (рис.1.б). При этом коэффициент деструкции $K_d = R_{изг}/R_{сж}$ бездобавочного МЗБ через 90 суток $K_d = 0.48$ и при наличии пластификатора увеличивается до $K_d = 0.78$.

Поскольку минеральные составляющие бетона ЗГУ и ЗРШ проявляют свою пуццоланическую активность в более поздние сроки, то на 28 сутки появляются области рецептур МЗБ (рис. 1.б), где $R_{сж}^{28} = 20 - 28$ МПа, а на 90 сутки при оптимальном сочетании ЗГУ и ЗРШ достигает $R_{сж}^{90} = 33.3$ МПа. В МЗБ, где присутствует в комплексе ЗРШ и ЗГУ либо в отдельности коэффициент деструкции значительно выше и составляет $K_d = 0.7...0.84$.

Роль наполнителя ЗРШ и заполнителя ЗРШ в формировании структуры МЗБ различна и соответственно *их участие как в химических процессах (взаимодействие с продуктами гидратации цемента) так и физико-химических явлениях (влияние поверхностной энергии частиц добавок ЗРШ и ЗГУ).*

Из представленных данных следует, что наполнитель ЗРШ и мелкий заполнитель ЗГУ оказывают положительный прочностной эффект $R_{сж}^{28-90}$ на МЗБ различного состава. Учитывая, что процесс гидратации и твердения бетона с золой гидроудаления и/или золой рисовой шелухи, вследствие пуццоланических реакций растягивается на более длительный период, поэтому проектная прочность рядовых МЗБ оценивались по $R_{сж}^{90} - 20.0 ... 30.0$ МПа.

Из представленных данных следует, что оптимальное значение фактора составляет $x_3 = 0$ и -1 , т.е. дозировка 0.4 и 0.8 % обеспечивает максимум прочности $R_{сж}^{90} \rightarrow \max$.

Прочность $R_{сж}^{90} = 30$ МПа соответствует области рецептур ($X_1 = 0...7$ %; $X_2 = 0...20$ %; $X_3 = 0.8\%$). Практически во всей области факторного пространства при условии, что пластификатор находится в пределах 0,4...0,8

% ($x_3 = 0 \dots 1$) прочность МЗБ обеспечивается в пределах $R^{90}_{сж} = 20 \dots 30$ МПа.

Следует отметить, что использование моделей (1-7) позволяет прогнозировать свойства МЗБ с наполнителем из ЗРШ подставляя значение $x_1 = -1$, т. е. содержание золы ГУ 0%. Также оценивать свойства МЗБ с использованием золы ГУ без золы рисовой шелухи подставив $x_2 = -1$ ($X_2 = 0$). На рис.2 видно, что при наполнении цемента золой рисовой шелухи до 7 % прочность МЗБ $R^{90}_{сж}$ составляет порядка 30...32 МПа. В случае, когда часть песка заменяется золой ГУ $R^{90}_{сж}$ – прочность МЗБ падает от 32 до 24 МПа.

Таким образом, возможно проектировать различные классы МЗБ (В15... В22.5), используя только наполнитель ЗРШ в пределах до 7 % или только ЗРШ до 25% или же одновременно ЗГУ и ЗРШ в оптимальном количестве. Очевидно, что необходимо максимально эффективно использовать ЗРШ, ЗГУ и пластификатор при обеспечении требуемого класса МЗБ (табл. 2).

5.5.1 Микроструктура мелкозернистого бетона с золой рисовой шелухи и золы гидроудаления.

При применении зол гидроудаления для производства МЗБ помимо влажности и содержания окислов частиц следует особое внимание уделять гранулометрическому составу и предельной крупности частиц.

Мелкие и мельчайшие фракции золы состоят в основном из плотных шарообразных частиц с гладкой поверхностью. Пластификация мелкозернистой бетонной смеси, наблюдаемая при использовании этих фракций, проявляется, несмотря на то, что они имеют более высокую удельную поверхность. Плотность укладки частиц в основном зависит от соотношения мелких и крупных фракций золы и расхода цемента.

На свойства МЗБ оказывают влияние не только физико-механические характеристики всех составляющих, но и степень их сцепления и взаимодействия, наличие трещин и пор как в самих составляющих, так и по границе их контакта. Контактная зона оказывает решающее влияние на

деформативные и прочностные свойства раствора. Прочность сцепления золы гидроудаления с песком и цементным камнем зависит от влажности, содержания ококсированных частиц, гранулометрического состава и предельной крупности частиц. Следует отметить, что нужно уделять внимание поверхности и виду песка, наличию глинистых, пылевидных частиц и другим факторам.

Прочностные свойства МЗБ изучались на образцах-балочках размером 4x4x16 см, после их твердения - в ваннах с гидравлическим затвором при комнатной температуре (20 ± 2 °C).

Зола ГУ (рис.3.16) в бетонах способствует формированию плотной структуры межзернового пространства заполнителей и менее дефектной контактной зоны заполнителей с цементным камнем. Это позволяет объяснить более высокую степень гидратации цемента и реакцией между гидроксидом кальция и компонентами золы с образованием дополнительного количества геля из гидросиликата кальция со скрытокристаллической структурой. Вокруг зольных частиц возникает оболочка новообразований гидросиликатов кальция. Над поверхностью этих оболочек возникают более упорядоченные, чем в объеме цементного камня, волокнистые структуры продуктов гидратации клинкерных минералов, вытянутые по направлению к поверхности зольных частиц. В образовании упорядоченных волокнистых структур заключается структурирующая роль золы ТЭЦ. Этот эффект усиливается с увеличением удельной поверхности золы. Применение мелкодисперсной золы влияет на плотность упаковки новообразований в структуре бетона. С увеличением доли мелких частиц в золе плотность упаковки будет повышаться за счет заполнения ими капиллярных промежутков, что, естественно, приводит к повышению плотности и нарастанию прочности мелкозернистого бетона.

Высокая дисперсность золы рисовой шелухи предопределяет повышенную химическую реакционную способность. Следствием этого является процесс формирования более дисперсной, по сравнению с обычным

бетоном, структуры цементного камня, а также увеличение содержания более прочных и устойчивых вторичных гидратов.

Зола гидроудаления в мелкозернистых бетонах способствует формированию плотной структуры межзернового пространства заполнителя и менее дефектной контактной зоны заполнителя с цементным камнем. Это объясняется более высокой степенью гидратации цемента и реакцией между гидроксидом кальция и компонентами золы гидроудаления с образованием дополнительного количества геля из гидросиликата кальция со скрытокристаллической структурой.

С увеличением доли мелких частиц в золе ГУ плотность упаковки будет повышаться за счет заполнения ими капиллярных промежутков, что, естественно, приводит к повышению плотности и нарастанию прочности бетона (рис. 5.17).



а) зола гидроудаления ТЭС - 30%,
зола рисовая шелуха - 8%, добавка
- 0.8 %



б) добавка - 0.8%

Рисунок 5.22 - Влияние ЗГУ, ЗРШ и добавки Neolit 303 на структуру мелкозернистого бетона.

Состав золы гидроудаления (ТЭС) в 30%, золы из рисовой шелухи - 8%, с добавкой в объеме 0.8% (рис. 3.17) может оказать разностороннее воздействие на структуру бетона в зависимости от многих факторов. Следует учесть несколько аспектов:

Прочностные характеристики: Зола гидроудаления и зола рисовой шелухи могут вносить вклад в улучшение прочностных характеристик

бетона. Присутствие минеральных компонентов в золах может укреплять связи между частицами цемента, что может привести к повышению прочности.

Долговечность: Зола гидроудаления и зола рисовой шелухи, уменьшая пористость бетона, способствуют повышению его долговечности. Это может сделать бетон менее подверженным воздействию агрессивных сред, таких как вода и химически активные вещества.

Физические свойства: Присутствие золы в МЗБ может влиять на его физические характеристики, такие как плотность, порозность и теплопроводность. Эти параметры могут быть важными при проектировании строительных конструкций.

Экологическая устойчивость: Использование золы гидроудаления и золы из рисовой шелухи может придать бетону экологическую устойчивость, поскольку это способствует утилизации отходов и снижению использования традиционных материалов.

Управление водопоглощением: Зола гидроудаления и зола рисовой шелухи могут влиять на водопоглощение бетона. Это важно для предотвращения проникновения влаги и обеспечения стойкости бетона к воздействию окружающей среды.

Мелкодисперсность и структура: Добавка в объеме 0.8% может влиять на мелкодисперсность частиц и общую структуру бетона. Оптимальная дозировка добавки может обеспечить более равномерное распределение частиц в матрице бетона.



а) зола гидроудаления –30 % зола
рисовая шелуха -8 %



б) зола гидроудаления -30 % зола
рисовая шелуха - 4%

Рисунок 5.23 - Влияние ЗГУ и ЗРШ на структуру мелкозернистого бетона. Смешивание золы гидроудаления ТЭС в объеме 30% и золы рисовой шелухи в объеме 4 и 8% в составе мелкозернистого бетона может оказать следующие влияния на его структуру:

- может повлиять на прочность мелкозернистого бетона. Присутствие минеральных компонентов в золах может укреплять связи между частицами цемента, что потенциально приведет к повышению прочности бетона;

- уменьшить пористость благодаря добавкам золы гидроудаления и золы рисовой шелухи, может способствовать повышению долговечности мелкозернистого бетона. Это особенно важно для уменьшения воздействия влаги и других агрессивных сред.

- могут воздействовать на водопоглощение бетона, что важно для контроля проникновения влаги и обеспечения долговечности конструкции.

Важно также учитывать, что добавка в объеме 30% золы гидроудаления и 8% золы рисовой шелухи может влиять на мелкодисперсность и структуру бетона, что имеет значение для равномерного распределения частиц в матрице МЗБ.

- могут дополнительные продукты гидратации, или стимулировать процессы гидратации цемента, что может проявиться в мелкозернистой структуре, особенно вокруг частиц цемента.

- могут воздействовать на поровую структуру бетона. Снижение пористости может способствовать образованию более компактной микроструктуры цементного камня и бетона, что важно для улучшения прочности и долговечности.

Заключение по главе 5:

- В *составе №1*, где КВВ :Ш (5-10мм) :П - 1:2:1 лучшие результаты показывает вяжущее с использованием золы ГУ и ЗШС. ЗШС 10-50 % обеспечивает прочность после ТВО $R_{сж}^{ТВО} = 15-10$ МПа. С золой ГУ в $R_{сж}^{ТВО} = 18-12$ МПа. Та же тенденция сохраняется для МЗБ 28 суток, здесь $R_{сж}^{28сут}$ в пределах 22 -14 МПа;

- для *МЗБ состава № 6* КВВ : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:2 установлено, что наибольшие $R_{сж}^{ТВО}$ и $R_{сж}^{28сут}$ обеспечиваются для МЗБ на вяжущем ЦЗВи (с золой ГУ) и ШЦВи (с шлаком), но при нижних уровнях 10%. При 40% наполнителя обеспечивается $R_{сж}^{28сут} \geq 20,0$ МПа и плотности 1800-1820 кг/м³;

- для *МЗБ состава № 7* КВВ : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:3 содержание мелкого шлакового заполнителя увеличено, что привело к снижению плотности МЗБ до 1720-1820 кг/м³ и прочности до 10- 18 МПа. $R_{сж}^{28сут} = 20,0$ МПа обеспечиваются при 10% содержании в вяжущих золы ГУ и шлака;

- выявлена единая закономерность: образцы твердеющие 28 суток в нормальных условиях, характеризуются более высокими показателями прочности, чем после ТВО, что обусловлено превалирующей ролью цементных минералов в процессе гидратации, нежели активированными частицами золы гидроудаления;

- анализ результатов прочности МЗБ на вяжущих с золой гидроудаления, золошлаковой смесью и шлака показал, что чем ниже марка бетона, тем большее количество цемента можно заменить топливными отходами;

- основе шлакового заполнителя и шлакоцементных вяжущих состава 1:2 получен облегченный МЗБ – М 200,300; $\rho=1800-1880$ кг/м³; Мрз 100; $\lambda=0,72$

Вт/мК, а из состава 1:3 – МЗБ плотностью 1700-1870 кг/м³; М150-200; Мрз 75; $\lambda=0,67$ Вт/мК;

– на основе шлакового заполнителя с использованием песка фр 0-5 и фр 5-10 и шлакоцементных вяжущих получен МЗБ - $\rho=1300-1380$ кг/м³; М 50; Мрз 20; $\lambda=0,35$ Вт/мК;

- изделия, изготовленные на основе композиционных шлакоцементных вяжущих веществ и заполнителей из шлака, отвечают требованиям ГОСТ 6133-99 «Камни бетонные стеновые».

- Зола гидроудаления и зола рисовой шелухи могут воздействовать на поровую структуру бетона. Снижение пористости может привести к более компактной микроструктуре, что важно для улучшения прочности и устойчивости материала.

ГЛАВА 6. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЕ БЕТОНЫ НА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И ПРИРОДНОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ

Применение мелкозернистого бетона обусловлено его уникальными свойствами. Данный материал обладает множеством плюсов по сравнению с традиционными такими как повышенное сопротивление изгибающему моменту при соответствующей нагрузке, возможность получать с помощью дополнительных присадок уникальные свойства (например, кислотостойкость или водонепроницаемость); повышенное сопротивление к воздействию вибрации; однородность бетонной смеси; возможность применения для заливки сложных элементов и конструкций; высокая пластичность и т.п. Наряду с преимуществами МЗБ имеет и ряд минусов: повышенный расход цемента и при наборе прочности материал дает заметную усадку.

МЗБ обладает следующими характеристиками: повышенное сопротивление работе на изгиб, однородность, виброустойчивость, морозоустойчивость, водонепроницаемость, пористость.

По основным характеристикам и сфере применения МБ подразделяют на два основных вида:

- МЗБ с традиционным содержанием компонентов.
- Мелкозернистый цемент, применяемый для наполнения форм конструкций с мелкоячеистым армированием.

Марки мелкозернистого бетона определяют по качеству используемых материалов и соотношению их в растворе. Существует пять марок для данного материала:

- М100 (используется для ремонтных работ);
- М200 (для ремонта и отливки изделий не несущих значительных нагрузок);
- М300 (для заполнения форм при отливке изделий с частым армированием);
- М350 и М400 (для отливки ответственных изделий и конструкций).

МЗБ например В25 с применением раствора марки М300 используют для оборудования фундаментов, отливки монолитных лестничных маршей и плит перекрытия, что говорит о его высоких прочностных возможностях. МБ класса В15 с применением раствора марки М200 используют для заливки стяжек, производства стеновых блоков и мелкоштучных изделий.

6.1. Разработка составов мелкозернистого бетона на композиционном вяжущем с золошлаковой смесью и природном заполнителе оптимальной гранулометрии

На предприятиях стройиндустрии для производства бетона и железобетона в основном используется природный песок различных месторождений. Например, на предприятии ЗАО «Кум-Шагыл» в качестве мелкого заполнителя для производства бетона используется смесь 50/50 двух песков Чу и Аламедин.

Завод построен еще в советское время и не приспособлен для использования фракционных заполнителей, поэтому одной из задач данных исследований изучить возможность получения равнозначных бетонов на мелком заполнителе оптимального состава и композиционном вяжущем с ЗШС.

При выполнении экспериментальных исследований был выполнен подбор состава мелкозернистого бетона на цементных и композиционных вяжущих с ЗШС. Для сравнения в качестве базовых составов выбраны производственные составы ЗАО «Кум-Шагыл» тяжелого бетона классов В15 (200) и В20 (250) и марки по подвижности П2 (осадка конуса ОК 5–9 см) (табл. 6.1).

Для получения МЗБ аналогичных марок использовались следующие сырьевые материалы: песок Аламединского с модулем крупности 3,26; песок месторождения Чу с модулем крупности 2,55; портландцемент М400 Д20 (ГОСТ 10178-85, 30515-97); золошлаковая смесь Бишкекской ТЭС; композиционное вяжущее ЦЗШВ_и (70% Цемент + 30% ЗШС); добавки (поликарбоксилатэфирный суперпластификатор MasterGlenium 116 и 917, ГОСТ 24211-08).

Таблица 6.1 – Производственные составы товарного бетона в расчете на 1 м³

Класс прочности бетона	Марка бетона	Цемент М400 Д20, кг	Песок с Мк 2,55-3,26, кг	Щебень фракции 5-20 мм, кг	Вода	Добавка ПФМНЛК, кг	Примечание
В15	М200	290	780	1080	200	3	Щебень фр. 5-20 Песок Чу+Аламединский (50х50%)
В20	М250	340	970	1000	205	4	

Контролируемыми параметрами качества были выбраны осадка конуса (ОК), прочность бетона при сжатии после ТВО и 7 суток ($R_{сж}^{ТВО}$, $R_{сж}^7$, $R_{сж}^{28}$), плотность (ρ), водопоглощение W%.

Портландцемент ПЦ-400 Д20 идеально адаптирован к тепловлажностной обработки (ТВО) изделий на производстве сборного железобетона. ТВО цемента с добавкой шлака позволяет полнее использовать активность клинкерной части цемента.

Исходными данными для расчета оптимального гранулометрического состава мелкого заполнителя по компьютерной программе «Granulometric» служили зерновые составы, полученные в результате гранулометрического анализа табл.

Для проведения исследований были подобраны составы МЗБ В15 и В20 на местных мелких заполнителях месторождений ЧУ и Аламедин.

Для обеспечения требуемых физико-механических характеристик МЗБ на композиционных вяжущих ЦЗШВ_и, особое значение уделялось достижению плотной упаковки частиц мелкого заполнителя. В таблице 6.2 представлены результаты экспериментальных исследований 8 составов МЗБ. Составы № 1, 2, 7 выполнены на песке неоптимального зернового состава. Состав № 7 - контрольный изготовлен на чистом цементе. В составе № 1 количество цемента выше на 100 кг. Составы 3, 4, 5, 6, 8 отличаются наличием добавки и изготовлены на заполнителе оптимального состава.

По результатам испытаний можно отметить, что наибольшие равнозначные значения прочности МЗБ после ТВО наблюдается у составов №1 – 28,4 МПа с повышенным содержанием цемента и № 8 – 27,4 МПа, где песок оптимального гранулометрического состава и оптимальное количество добавки Master Glenium 116 составило 0,8%. Дальнейшее повышение добавки Master Glenium 116 до 1,0% приводит к снижению прочности МЗБ до 21,0 МПа. Образцы МЗБ № 4, 5, 6, 7 с мелким заполнителем скорректированного зернового состава имеют равнозначную прочность после ТВО от 20,6 - 22,4 МПа. Образцы № 5 отличаются количеством добавки Mast. Glenium 917 - 0,8 ... 1 %. Причем образцы составов № 2 и 3 имели низкую прочность после ТВО - 4,5-6,4 МПа, т низкие значения плотности $\rho_2 = 2080$ кг/см³ и $\rho_3 = 2125$ кг/см³, отличаются тем,

что у состава № 2 отсутствуют химические добавки и уплотнение форм - кубов проведено обычным штыкованием. Состав № 3 содержит повышенное содержание добавки 1,2 % и вследствие высокую осадку конуса ОК = 22 см. вследствие повышения дозировки добавки Master Glenium 917 до 1,2%. Следует напомнить, что использовался скорректированный зерновой состав мелкого заполнителя.

Таблица 6.2 – Физико-механические свойства мелкозернистого бетона на песке месторождения Аламедин

№ п/п	Расход материалов на 1 м ³ бетона			Добавка, % от массы Ц		Осадка конуса, см	В/Ц	Прочность на сжатие, МПа		Плотность (ρ), кг/см ³	Водопоглощение (W), %
	КВВ/Ц	Вода, л	Песок, кг	Master Glenium 917	Master Glenium 116			После ТВО	28 суток		
1	-/520	280	1620	0	0	8,6	0,53	28,4	36,5	2240	2,23
2	440/308	270	1620	0	0	6,6	0,61	4,5	10,7	2080	1,92
3	360/252	250	1620	1,2	1,2	22	0,69	16,4	21	2125	1,79
4	440/308	210	1620	0	1	12,5	0,47	21,0	29,6	2245	1,55
5	440/308	260	1620	0,8	0	6,1	0,59	21,4	31,5	2255	1,99
6	440/308	245	1620	1	0	5,6	0,55	20,6	28,3	2175	2,07
7	-/440	265	1620	0	0	6,2	0,6	22,4	37,5	2280	1,53
8	440/308	215	1620	0	0,8	5,8	0,48	27,4	37,8	2270	1,38

* ЦЗШВ_и/Ц в числителе количество композиционного вяжущего вещества, в знаменателе содержание в нем цемента.

На 28 сутки равнозначные высокие показатели прочности наблюдались у составов № 1, 7 и 8. Оптимальные соотношения песка в зерновых составах МЗБ смеси заполнителей обеспечивают в составе № 8 максимальную прочность $R_{сж}^{28} = 37,8$ МПа и максимальная плотность 2270 кг/м³ при содержании ЦЗШВ 308 кг/м³. Эталонный состав № 7 имеет равнозначную плотность 2280 кг/м³ и прочность $R_{сж}^{28} = 37,5$ МПа и содержание чистого цемента 440 кг/м³.



Рисунок 6.1 – Прочность $R_{сж}^{твo}$ и $R_{сж}^{28}$ мелкозернистого бетона на ЦЗШВи (30% ЗШС) и песке составов 1-8

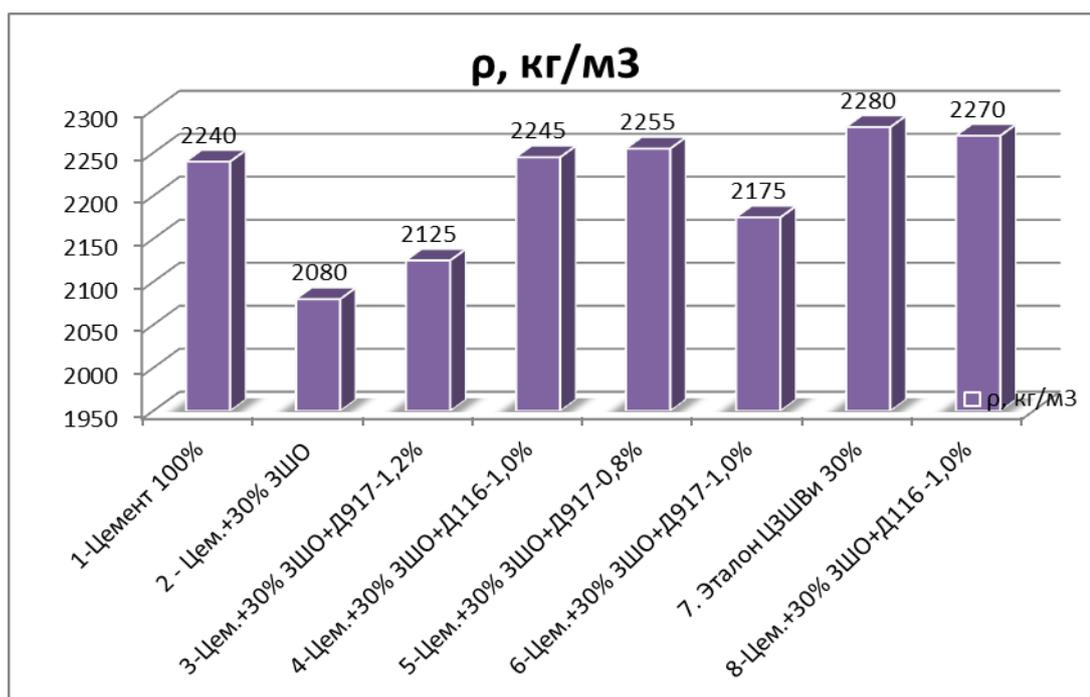


Рисунок 6.2 – Плотность мелкозернистого бетона составов 1-8

Наибольшая плотность обеспечивается в составе № 8, здесь при максимальной прочности 27,4 МПа достигается максимальная плотность бетона 2270 кг/м³. Эталонный состав имеет равнозначную плотность 2280 кг/м³, но прочность составляет 21,4 МПа. Что видимо обусловлено повышенной пористостью в связи с отсутствием добавки пластификатора.

Составы № 2 и № 3 по плотности имеют низкие значения. У состава № 2 отсутствуют химические добавки и уплотнение формы проведено обычным штыкованием, состав № 3 имел высокую осадку конуса. Поэтому в следующих составах подбиралось необходимое количество воды. Сравнительно одинаковые показатели прочности у состава № 1 и № 8, но их рецептура кардинально отличается. В составе № 1 использовано высокое содержание цемента. Состав № 8 достиг высоких значений путем оптимизации гранулометрического состава и добавление химической добавки, также в этом составе используется ЦЗШВ (30% ЗШС) вместо цемента. Четвертый, пятый и шестой состав отличаются только количеством добавки.

На диаграмме выделяются составы № 3 и № 6. Состав № 2 имеет отличие в уплотнении, так как ранее уже указывали, остальные составы уплотнялись на вибростоле в течении 30 секунд. Состав № 3 имеет высокую осадку конуса, большое количество воды и в последствии высокая пористость. Состав № 6 отличается не значительно, что обусловлено отсутствием оптимальной гранулометрии заполнителей.

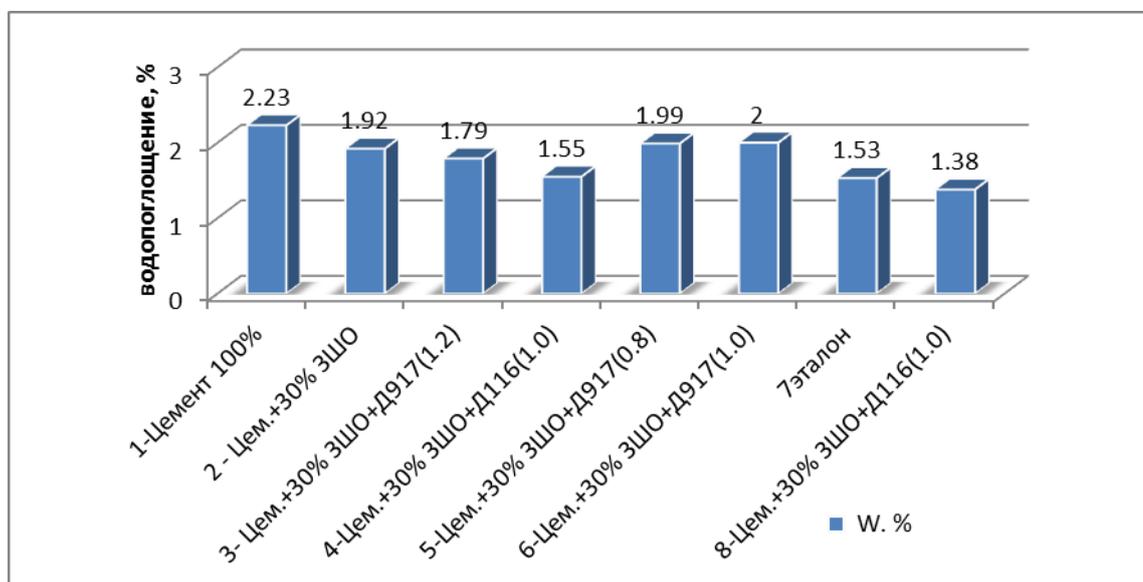


Рисунок 6.3 – Водопоглощение мелкозернистого бетона составов 1-8

Максимальное водопоглощение 2,23% соответствует составу №1, где плотность составляет 2240 кг/м³. Данный состав бетона выполнен на заполнителе неоптимального состава, т.е. имеет большую пористость, а высокое

значение прочности 28,4 МПа обусловлено повышенным содержанием цемента в МЗБ. Для состава на композиционном вяжущем (30% ЗШО) № 8 с прочностью $R_{сж}^{тво} = 27,4$ МПа водопоглощение составляет 1,38 %, что на 60% ниже, чем у состава №1 за счет наличия добавки Master Glenium 116.

Таким образом, для состава № 8 оптимальный зерновой состав песка и наличие добавки пластификатора обеспечивает равнозначное значение прочности МЗБ на вяжущем содержащем 30% ЗШО. На рис. 5.6 представлены составы МЗБ, который имеют одинаковую осадку конуса в диапазоне 5-7 см. Такие результаты достигаются регулированием количества воды за счет использования химических добавок, которые значительно уменьшают водопотребность бетона на композиционном вяжущем с 30% ЗШС.

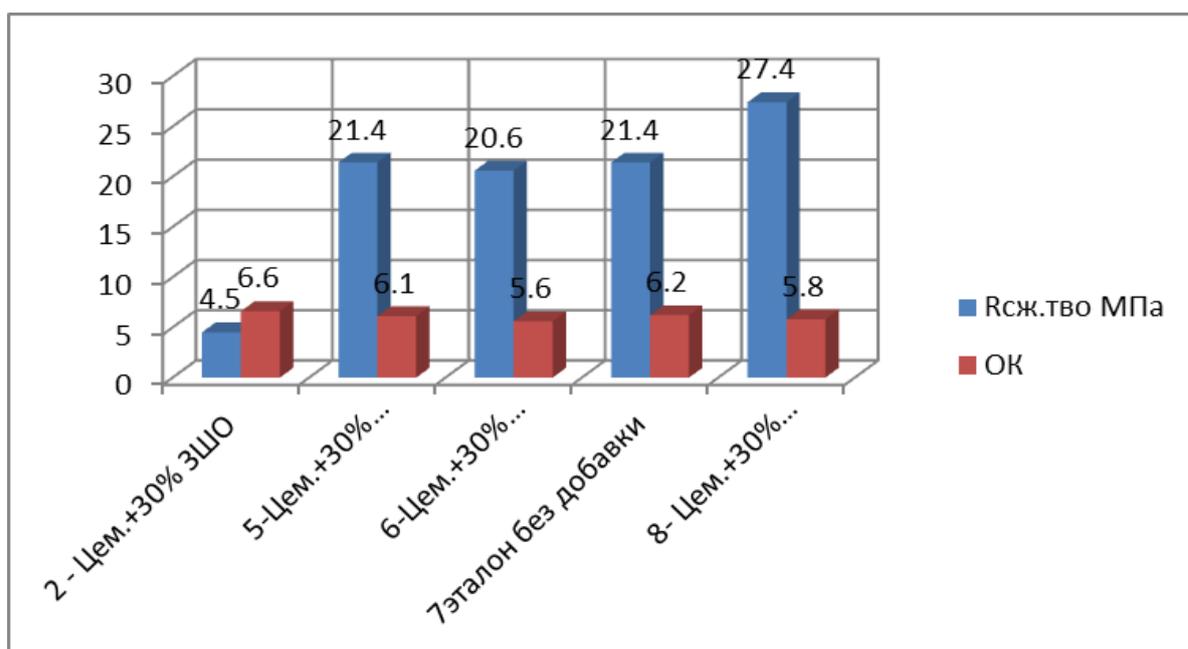


Рисунок 6.4 – Прочность и ОК для составов МЗБ равной подвижности

Наиболее лучшие физико-механические характеристики МЗБ получены с использованием химической добавки Master Glenium 116, с связи с чем дальнейшие исследования проводились с данной добавкой, но на другом песке месторождения ЧУ (табл. 6.3).

Таблица 6.3 – Физико-механические свойства мелкозернистого бетона на песке месторождения ЧУ

№ пп	Расход материалов на 1 м ³ бетона				В/Ц	Осадка конуса, см	Прочность на сжатие, МПа		Плотность (ρ), кг/м ³	Водопоглощение (W), %
	ЦЗШВ _и /Ц	Вода, л	Песок, кг	Master Glenium 116, % от Ц			После ТВО	28 суток после ТВО		
1	450/0	255	1750	0	0,57	7,1	20,4	34,5	2310	1,73
2	450/360	255	1750	0	0,57	5,9	15,2	36	2335	1,50
3	450/360	215	1750	0,8	0,47	6,1	19,7	41,3	2310	1,51
4	450/315	215	1750	0,8	0,47	5,4	21,5	34,7	2270	1,76

* ЦЗШВ_и/Ц в числителе количество композиционного вяжущего вещества, в знаменателе содержание цемента в нем

В таблице 6.3 состав № 1 является эталонным, где используется чистый цемент. В остальных составах МЗБ использовалось композиционное вяжущее с содержанием ЗШО 30%. Состав № 2 без химической добавки. В составах № 3 и № 4 содержится добавка Master Glenium 116 в количестве 0,8% и оптимальный гранулометрический состав песка месторождения ЧУ.

Заданная ОК в МЗБ в пределах 5-7 см обеспечивается оптимальным содержанием добавки 0,8% Master Glenium 116. Прочность после ТВО максимальна для составов 3 и 4 $R_{сж}^{ТВО}=19,7$ и $R_{сж}^{ТВО}=21,5$ соответственно. Как известно. Что показатель прочности МЗБ на таких вяжущих продолжает расти в длительное время.

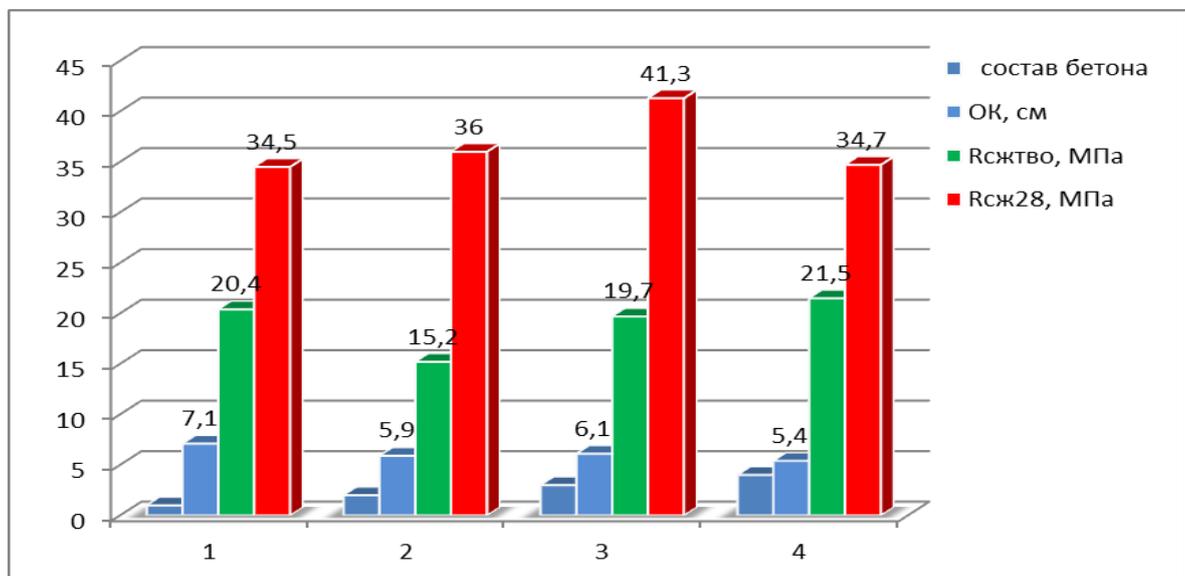


Рисунок 6.5 – ОК и прочность МЗБ с добавкой Master Glenium 116 на вяжущем ЦЗШВи и песке месторождения Чу

Так образцы МЗБ после ТВО и через 28 суток имеют прочность $R_{сж}^{28}=41,3$ и $R_{сж}^{ТВО}=34,7$ МПа соответственно. В составе 3 содержание цемента в вяжущем на 50 кг больше, что отразилось на прочности МЗБ через 28 суток, которая составила $R_{сж}^{28}=41,3$ МПа.

Таблица 6.4 – Расход материалов на мелкозернистые бетоны

Класс/ Марка МЗБ	Расход материалов на 1 м ³ бетона			Добавка, % от массы Ц		Осадка конуса, см	В/Ц	Прочность на сжатие, МПа		Плотность (ρ), кг/см ³	Водопоглощение (W), %
	КВВ/Ц	Вода, л	Песок, кг	Master Glenium 917	Master Glenium 116			После ТВО	28 суток после ТВО		
Бетон мелкозернистый на ЦЗШВи (30% ЗПС) и песке месторождения Аламедин											
В25/ М300	440/308	210	1620	0	1	12,5	0,47	21,0	29,6	2245	1,55
	440/308	260	1620	0,8	0	6,1	0,59	21,4	31,5	2255	1,99
	440/308	245	1620	1	0	5,6	0,55	20,6	28,3	2175	2,07
	440/308	215	1620	0	0,8	5,8	0,48	27,4	37,8	2270	1,38
Бетон мелкозернистый на ЦЗШВи (30% ЗПС) и песке месторождения Чу											
В25/ М300	450/360	255	1750	-	-	5,9	0,57	15,2	36	2335	1,50
	450/315	215	1750	-	0,8	5,4	0,47	21,5	34,7	2270	1,76
В25/ М300	450/360	215	1750	-	0,8	6,1	0,47	19,7	41,3	2310	1,51

Плотность МЗБ оптимального состава 3 и 4 составила 2310 и 2270 м³/кг.

Водопоглощение таких бетонов колеблется в пределах 1,51 -1,76, что объясняется плотной упаковкой мелкого заполнителя.

Сравнение заводских и экспериментальных составов показало, что для заводского бетона класса В20 (М250) на 1 м³ достижения прочности ≈ 20 МПа используется 340 кг цемента. В экспериментальных рецептурах, где 28-дневная прочность превышает 20 МПа, содержание цемента варьируется, так в составах МЗБ № 4, 5, 6, 8 = 308 кг/м³ при прочности от 29 до 38 МПа. Высокие показатели прочности для составов с расходом цемента №1(520 кг/м³) и 7 (440 кг/м³).

Таким образом, экспериментальные составы демонстрируют, что для получения бетонов с прочностью 20 МПа и выше можно снизить содержание цемента до уровня 252–308 кг/м³, что ниже заводского показателя (340 кг/м³).

При этом достигая равнозначных или лучших прочностных показателей, что указывает на необходимость оптимизации рецептур за счет корректировки соотношения компонентов и использования специальных добавок.

6.2 Мелкозернистые бетоны на низкомарочном цементе с золошлаковой смесью и природном песке

Цементные вяжущие являются весьма скоропортящимся товаром. Причем чем выше активность цемента, тем быстрее происходит потеря его активности.

Зачастую цемент приходит к потребителю уже потерявший исходную активность. Долгая перевозка, частая перегрузка пневмотранспортными машинами, аэрация, переувлажнение при перевозке или промежуточном хранении - все эти факторы способны в значительной степени снизить активность цемента и, соответственно, прочность цементного камня и как следствие привести к перерасходу цемента на производстве.

Даже при соблюдении условий хранения на него воздействует углекислота и пары воды, содержащиеся в воздухе, что способствует потере прочности: через 3 месяца хранения активность цемента падает на 15-20 %; через 6 месяцев уже на 20-30 % и более. А высокомарочный быстротвердеющий цемент: за 2-4 недели хранения он переходит в разряд обычных цементов. Всего за 2-5 суток хранения в цементном силосе при высоте слоя более 10 метров его объемная масса изменяется с 1.1 т/м³ до 1.6 т/м³.

Установлено, что после длительного хранения в течение 4 и 12 месяцев во влажных условиях портландцемента ПЦ 400 Д-20 повышается его водопотребность, удлиняются сроки схватывания, прочность цементного камня при сжатии снижается после 12 месяцев хранения на 60 %[210].

Основными причинами снижения активности цемента может быть воздействие влаги при хранении, что вызывает преждевременную гидратацию. Карбонизация, когда углекислый газ (CO_2) из атмосферы реагирует с гидроксидом кальция в цементной матрице с образованием углекислого кальция (CaCO_3), что снижает его долгосрочную прочность. Также частицы цемента иногда могут агломерировать и такой цемент может плохо рассеиваться при смешивании с водой, что может привести к неравномерной гидратации и снижению прочности.

Основной проблемой цементной промышленности Кыргызстана является низкое качество цемента при высокой себестоимости продукции за счет значительного удельного расхода топлива и электроэнергии на тонну цемента. Так при переходе на твердое топливо (угля) вместо газа на КЦК зачастую потребителям поставляется цемент марки ниже требуемой. Основной причиной в данном случае на наш взгляд, является износ технологического оборудования и стремление экономить топливно-энергетические и сырьевые ресурсы. Вследствие получается недожег клинкера или низкая тонина помола производимого цемента, что сказывается в дальнейшем на качестве поставляемой продукции ($250\text{-}300 \text{ м}^2/\text{кг}$ вместо $350\text{-}450 \text{ м}^2/\text{кг}$)

Другой причиной несоответствия фактической и заявленной марки цемента, является нарушение правил его транспортировки и хранения, что негативным образом отражается на качестве цемента. При использовании цемента, хранившегося длительное время, включая хранение во влажных условиях, снижается прочность, морозостойкость, коррозионная стойкость и долговечность изделий на его основе. На примере портландцемента ПЦ 400 Д-20 показано, что после длительного хранения в течение 4 и 12 месяцев во влажных условиях повышается его водопотребность, удлиняются сроки схватывания, прочность цементного камня при сжатии снижается после 12 месяцев хранения на 60 % [210].

Повысить марочность таких цементов возможно активированием в шаровой мельнице, что приводит к увеличению прочности цементного камня -

на 15-20 %. Результаты многих исследований показали, что при активации желательно использовать различные минеральные добавки природного или техногенного происхождения. Так при дополнительном введении добавки волластонита (7 -9 %) масс, прочность цементного камня повышается на 70 - 80 %, цементно-песчаного раствора - на 50 - 60 %.

В настоящее время применение однокомпонентных и многокомпонентных вяжущих невозможно без специальной предварительной подготовки, т.е. активации. Под активацией сухих строительных, а также жидкофазных растворных и бетонных смесей понимают различные способы воздействия как на отдельные компоненты, так и на их композиции, что приводит к интенсификации процессов структурообразования, модифицированию структуры и свойств композиционных материалов [203, 207].

Одно из перспективных прикладных направлений активации – механохимические методы воздействия на вяжущие системы с целью оптимизации их физико-химических и эксплуатационных характеристик. Данные методы приводят к получению более тонкодисперсных частиц, модификации поверхностной структуры частиц, созданию физических дефектов в подрешетках и решетках минералов, интенсифицирующих элементарные взаимодействия поверхностного слоя с водой затворения. Снижается время достижения цементом марочной прочности и обеспечения более полного использования химической энергии вяжущих веществ [205, 206].

По теории П.А. Ребиндера [138], задача механохимии заключается в применении или, наоборот, нейтрализации тех химических реакций, которые вызываются или интенсифицируются механическим воздействием.

При изучении топливных отходов ТЭЦ и котельных была подтверждена возможность их использования как наполнителя в цементы (гл.3, 4).

Использование высокомарочных цементов в МЗБ для малоэтажного строительстве является не эффективным и неоправданным. В связи с чем, при выполнении исследований для вяжущего был использован цемент не соответствующий заявленному качеству Д20М400, его активность составила

21,68 МПа. Такие цементы можно отнести к низкомарочным цементам и их использование возможно только при дополнительной активации. В данных исследованиях активация композиционного вяжущего заключалась в помоле низкомарочного цемента с наполнителем из ЗШС в шаровой мельнице в течении 1,5 часа. В качестве наполнителя использовалась высушенная и просеянная ЗШС в количестве 10, 30 и 50%.

При расчете элементов железобетонных конструкций в ряде случаев учитывают предельные деформации бетона при кратковременной нагрузке, т.е. такие деформации, которые могут быть достигнуты к моменту потери бетоном несущей способности или нарушения сцепления с арматурой. Обычно предельные деформации принимают при сжатии $\epsilon_{R_{сж}} = 200 \cdot 10^{-5}$, а при растяжении $\epsilon_{R_{сж}} = 15 \cdot 10^{-5}$. Для бетона с повышенными требованиями по трещиностойкости нормируются предельные деформации. Так, для гидротехнического бетона в 6-ти месячном сроке предельная растяжимость для бетона внутренних зон должна быть не менее $5 \cdot 10^{-5}$ и для внешних $7 \cdot 10^{-5}$. Предельные деформации бетона при осевом сжатии линейно возрастают с увеличением его призменной прочности $R_{пр}$. Г.И. Писанко и Е.Н.Щербаковым корреляционная связь между предельной деформацией сжатия и призменной прочностью бетона аппроксимирована аналитическим выражением: $\epsilon_{сж} = 1,0 R_{пр} + 11$. (1.100) Как следует из уравнения (1.100), предельные деформации бетона при сжатии $\epsilon_{сж}$ линейно возрастают с увеличением $R_{пр}$. Предельную сжимаемость бетона можно увеличить, применяя более деформативные компоненты и обеспечивая достаточно надежное сцепление между ними. Для предельной деформации бетона при растяжении, определенной прямым способом, затруднено получение достаточно обоснованной зависимости, связывающей ее с прочностными и другими параметрами бетона. В значительной мере это можно объяснить сложностью и трудоемкостью тензометрических определений деформативности, что делает, как правило, ограниченное число измерений, недостаточное для статистической обработки. Однако известны расчетные формулы для определения величины

т.н. условной деформативности, которая численно близка к величине предельной деформации бетона при растяжении

Условную деформативность ε_u предложено находить как отношение предела прочности при растяжении раскалыванием ($R_{p,p}$) к величине динамического модуля упругости (E_d): $\varepsilon_u = E_d / R_{p,p}$. (1.101) В процессе лабораторного контроля величину ε_u можно рассчитать, зная прочность при растяжении раскалыванием и при сжатии: $\varepsilon_u = R_{p,p} / R_{сж}$. (1.102) При неизвестных значениях $R_{p,p}$ можно, используя соотношения $R_{p,p} = 0.55 R_{сж}^{2/3}$, преобразовать зависимость (1.102): $\varepsilon_u = 0.55 R_{сж}^{2/3} / R_{сж}$. (1.103)

Бетон на активированном вяжущем составе имеет однородную объемную структуру; это снижает концентрацию напряжений на границе заполнитель–цементный камень, поэтому деформирование данного бетона под нагрузкой длительное время совершается без микроразрушений [204].

Учитывая вышеизложенное дальнейшие исследования были направлены на изучение возможности получения МЗБ для малоэтажного строительства на низкомарочных композиционных вяжущих.

Эффективным и более простым способом «оживления» старого цемента, особенно на промышленном уровне является совместное измельчение его с наполнителем.

В качестве вяжущего вещества использовали композиционное вяжущее, полученное совместным помолом низкомарочного цемента и зольного отхода. Используемый цемент Д20 М400 по результатам испытания не соответствовал заявленному стандарту по прочности и имел активность 21,68 МПа, который можно отнести к низкомарочным цементам.

Один из способов увеличить активность цемента это использование пуццолановых добавок, которые способны реагировать с гидроксидом кальция (побочным продуктом гидратации цемента) для образования дополнительного кальциевого силикатного гидрата (C-S-H) и других цементных соединений,

которые могут улучшить прочность и долговечность бетона. А совместное измельчение включает одновременное раздробление как старого цемента, так и добавок, что может привести к лучшему перемешиванию и гомогенизации. Это может быть более простым и эффективным процессом для оживления старого цемента, особенно на промышленном уровне.

В данном случае композиционный цемент (ЦЗШВ) получен при совместном помоле в лабораторной шаровой мельнице в течении 1,5 часа данного цемента и высушенной золошлаковой смеси (ЗШС). Заполнителем для МЗБ служил песок месторождения Чу с насыпной плотностью $\rho_n = 1420 \text{ кг/м}^3$ и модулем крупности $M_k = 2,55$.

Экспериментальные исследования проводились по плану V_3 при реализации 3-х факторного эксперимента переменными факторами выбраны: X_1 - композиционное вяжущее с ЗШС 10, 30 и 50 %; X_2 – расход вяжущего на 1м^3 МЗБ – 300, 350 и 400 кг; X_3 – суперпластификатор Глениум 116 - 0,8; 1,0 и 1,2 % от массы вяжущего (табл. 5.6). Количество природного песка месторождения Чу – остальное.

Параметры оценки качества МЗБ: прочность при изгибе и сжатии образцов МЗБ в 7, 14 и 28 суточном возрасте, плотность и коэффициент размягчения. Распływ конуса бетонной смеси находился в пределах 106 - 115 мм.

Таблица 6.5 – План и результаты трехфакторного эксперимента типа В₃

№	План нормализ. переменные			План эксперимента в натур-х переменных			Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y ₆	Y ₇	Y ₈	Y ₉	Y ₁₀	Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅
	x ₁	x ₂	x ₃	X ₁ сод-е ВШС в Вяжущ , %	X ₂ кол-во ЦЗШВи , кг	X ₃ Пластиф 116, %	В/В	R _{изг} ⁷ , МПа	R _{изг} ¹⁴ МПа	R _{изг} ²⁸ МПа	R _{изг} ⁹⁰ , МПа	R _{сж} ⁷ МПа	R _{сж} ¹⁴ МПа	R _{сж} ²⁸ МПа	R _{сж} ⁹⁰ МПа	K ²⁸ _p	ρ кг/м ³	W %	ε _y ×10 ⁻⁵ 28 сут	ε _y ×10 ⁻⁵ 90 сут
1	+	+	+	50	400	1,2	0.58	4,13	5,67	9,94	9,26	9,35	11,98	16,12	11,77	1.4	2219	3.2	16	11
2	+	+	-	50	400	0,8	0.55	5,25	5,6	5,72	9,38	12,29	13,14	17,81	14,84	1.3	2230	2.8	11,8	11,4
3	+	-	+	50	300	1,2	0.71	2,86	4,03	6,29	9,33	5,91	7,71	9,92	14,91	1.2	2170	4.9	10,8	11,4
4	-	+	+	10	400	1,2	0.55	7,31	9,91	12,31	16,41	12,08	14,4	16,65	16,41	1.4	2340	3.0	11,7	11,6
5	-	-	-	10	300	0,8	0.71	7,48	5,2	8,11	12,89	8,07	9,63	13,92	19,42	1.3	2305	1.9	11,3	12,1
6	-	-	+	10	300	1,2	0.71	3,91	4,1	9,52	10,95	6,77	10,47	15,75	18,59	1.5	2336	3.5	11,5	11,9
7	-	+	-	10	400	0,8	0.55	7,57	8,48	12,11	13,92	9,7	10,24	20,83	23,46	1.9	2402	4.1	12,3	12,7
8	+	-	-	50	300	0,8	0.71	1,88	4,64	4,95	7,05	3,47	4,72	9,24	11,57	1.6	2324	6.0	10,8	11
9	+	0	0	50	350	1,0	0.63	3,89	4,73	7,6	9,18	7,46	6,87	8,94	11,18	0.9	2387	4.9	10,8	11
10	-	0	0	10	350	1,0	0.55	2,91	6,33	7,69	10,90	7,08	14,05	15,47	16,40	1.0	2824	3.2	11,5	11,6
11	0	+	0	30	400	1,0	0.71	7,29	7,36	7,83	9,39	8,94	16,23	16,55	21,77	0.9	2434	2.9	11,6	12,4
12	0	-	0	30	300	1,0	0.71	3,33	4,59	7,38	8,32	7,42	13,73	16,54	12,12	1.1	2352	4.8	11,6	11,1
13	0	0	+	30	300	1,2	0.71	1,91	6,02	7,38	11,39	6,15	10,55	14,56	13,75	1.0	2340	3.1	11,4	11,32
14	0	0	-	30	300	0,8	0.71	6,61	6,96	7,94	5,77	7,01	10,71	14,26	12,28	1.2	2320	4.0	11,3	11,1
15	0	0	0	30	300	1,0	0.61	6,87	9,11	10,03	14,09	5,31	9,3	16,74	15,48	1.2	2406	2.2	11,7	11,5

Экспериментально-статистический метод моделирования позволил получить математические зависимости свойств МЗБ от выбранных трех основных факторов.

Предварительный анализ моделей прочности на изгиб $R_{изг}$ образцов МЗБ (6.1-6.3) показал, что фактор X_1 (содержание ЗШС в вяжущем) несколько снижает прочность. Линейный эффект для $R^{7сум}_{изг}$ равен ($b_1 = -1,118$), для $R^{14сум}_{изг}$ ($b_1 = -0,935$) и $R^{28сум}_{изг}$ ($b_1 = -1,52$), что связано со снижением цемента в вяжущем при замене его золошлаковой смесью. Однако этот показатель выравнивается фактором X_2 (количество вяжущего ЦЗШВ_и) при его максимальном количестве ($x_2=+1$) в бетоне 400 кг на 1м³. Здесь линейный эффект x_2 со знаком «+» и для $R^{7сум}_{изг}$ равен ($b_2 = 1,208$), для $R^{14сум}_{изг}$ ($b_2 = 1,44$) и $R^{28сум}_{изг}$ ($b_2 = 1,17$). Третий фактор – содержание химической добавки прямого влияния на прочность МЗБ не оказывает, поскольку его задача заключается в регулировании В/Ц. Но содержание добавки X_3 Глениум 116 должно быть на оптимальном уровне.

Аналогичное влияние на прочностные характеристики МЗБ при сжатии наблюдается у ЭСмоделей (6.4-6.6). Здесь видно, что второй фактор X_2 (количество вяжущего ЦЗШВ_и) оказывает большее воздействие на $R^{7-28сум}_{сж}$ чем X_1 (содержание ЗШС) в вяжущем. Для X_1 $R^{7сум}_{сж}$ линейный эффект равен ($b_1 = -0,822$), для $R^{14сум}_{сж}$ ($b_1 = -1,437$) и $R^{28сум}_{сж}$ ($b_1 = -2,06$). При факторе X_2 линейный эффект составил ($b_2 = 3,72$), для $R^{14сум}_{сж}$ ($b_2 = 1,973$) и $R^{28сум}_{сж}$ ($b_2 = 2,26$).

По модели (6.7) плотности видно, что она зависит в первую очередь от фактора X_1 (содержание ЗШС) ($b_1 = -37,7$), т.е. чем выше содержание ЗШС в композиционном вяжущем тем ниже плотность бетона. Факторы X_2 ($b_2 = 13,8$) и X_3 ($b_3 = -17,7$), здесь количество вяжущего и добавки при максимальной концентрации также снижают плотность МЗБ. Из табл. 6.5 можно проследить, что повышенная плотность $\rho = 2402$ кг/м³ и прочность $R^{28сум}_{сж} = 20,83$ МПа достигается в точке 7, но при оптимальной концентрации добавки ($b_{33} = -53,0$). По модели водопоглощения (5.8) видно, что этот показатель зависит от

вида вяжущего и его количества в МЗБ ($b_1 = 0,61$) и ($b_{12} = - 0,83$). Во всех экспериментальных точках W колеблется в пределах 1,9...4,9%. В точке 3(табл. 6.5) можно проследить, что меньшая плотность бетона 2170 кг/м^3 соответствует повышенному показателю $W=4,9\%$. Здесь максимальное количество золы в вяжущем 50% и химической добавки 1,2%, что видно по высокому показателю $B/C=0,71$.

Коэффициент размягчения (разупрочнения) характеризует степень понижения прочности материала насыщенного водой по сравнению с его прочностью в сухом состоянии. Показатель коэффициента размягчения (табл.6.5) во всех 15 опытных точках показал, что все МЗБ можно отнести к водостойкому материалу, здесь K_p изменяется в зависимости от состава от 0,9 до 1,9. Согласно классификации высокопрочные камни с $K_p = 0.9 - 1.0$ относят к водостойким, т.е. при данном значении МЗБ может быть использован для изготовления стеновых изделий.

Одной из особенностей цементозольных вяжущих и материалов на их основе является их повышенная прочность на растяжение при изгибе по сравнению с цементоминеральными материалами. При одинаковой марке (прочности при сжатии) зольные вяжущие имеют выше значения $R_{изг}$, чем портландцемент.

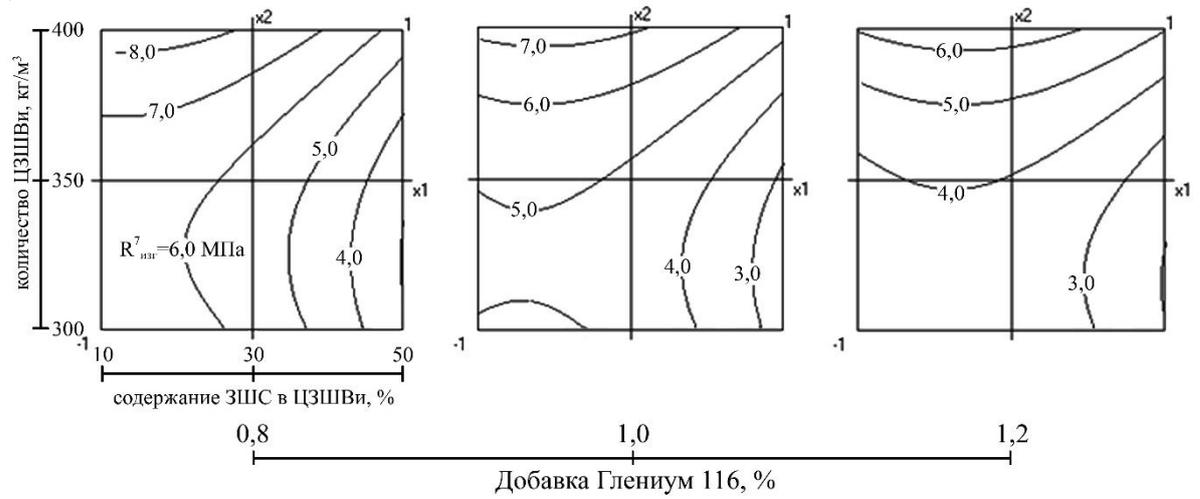
При анализе прочностных свойств МЗБ на основе вяжущего ЦЗШВи наблюдается повышенная прочность на изгиб по сравнению с бетонами на цементном вяжущем.

Работы А.В. Волженского и Л.Б.Гольдберга [208] также приводят данные, свидетельствующие о том, что добавки золы в цементный бетон способствуют увеличению прочности на растяжение при изгибе в большей степени, чем прочности при сжатии. Для портландцемента, согласно ГОСТ 10178-85, это соотношение изменяется от 0,15 до 0,11.

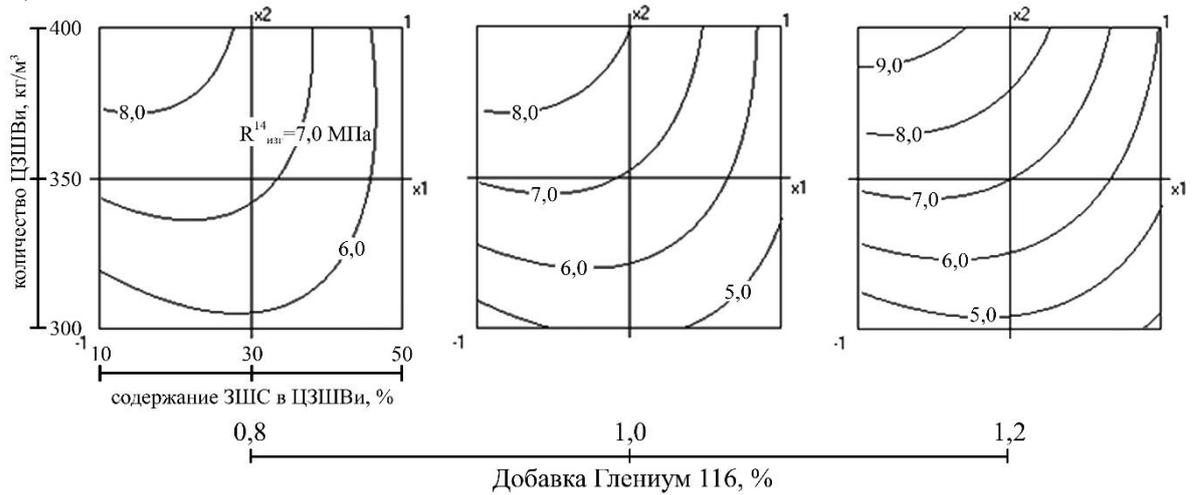
Идеальным был бы материал с соотношением $R_{изг}/R_{сж} = 1$, т.е. равные значения прочности на сжатие и изгиб. Но для реальных материалов это соотношение всегда меньше 1. Именно поэтому соотношение между этими

показателями используется как коэффициент деструкции структуры K_d .

а)



б)



в)

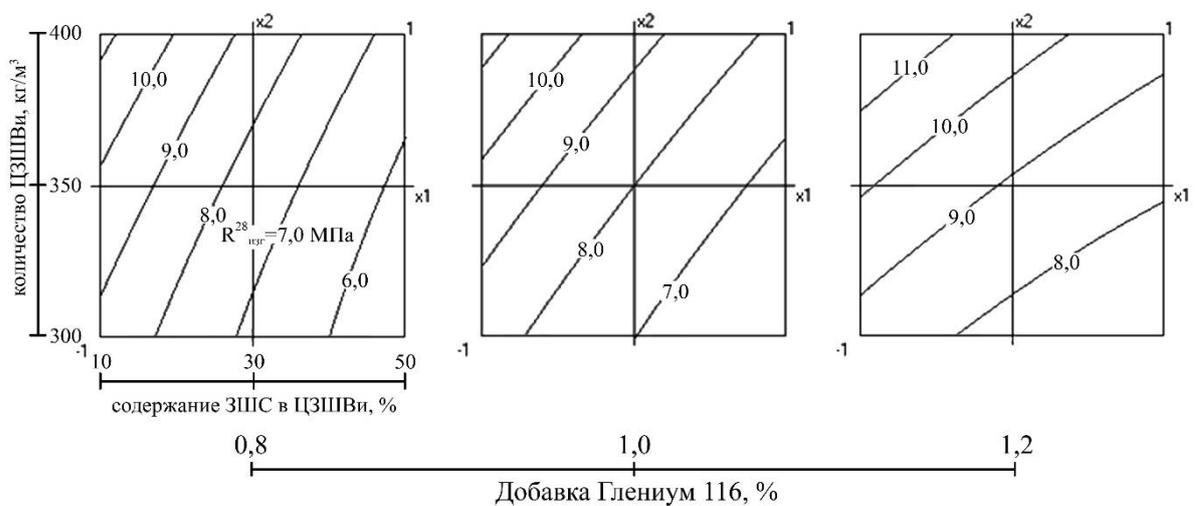


Рисунок 6.6 – прочность $R_{изг}$ на изгиб МЗБ на 7(а), 14(б), 28(в) суток нормального твердения при содержании

Известно, что чем выше этот коэффициент, тем однородней структура материала. Поэтому, по сравнению с бетонами на цементных вяжущих без добавки золы, бетоны на цементнозольных вяжущих обладают более высоким значением соотношения между прочностью при изгибе и прочностью при сжатии и отличаются однородностью и лучшими эксплуатационными свойствами.

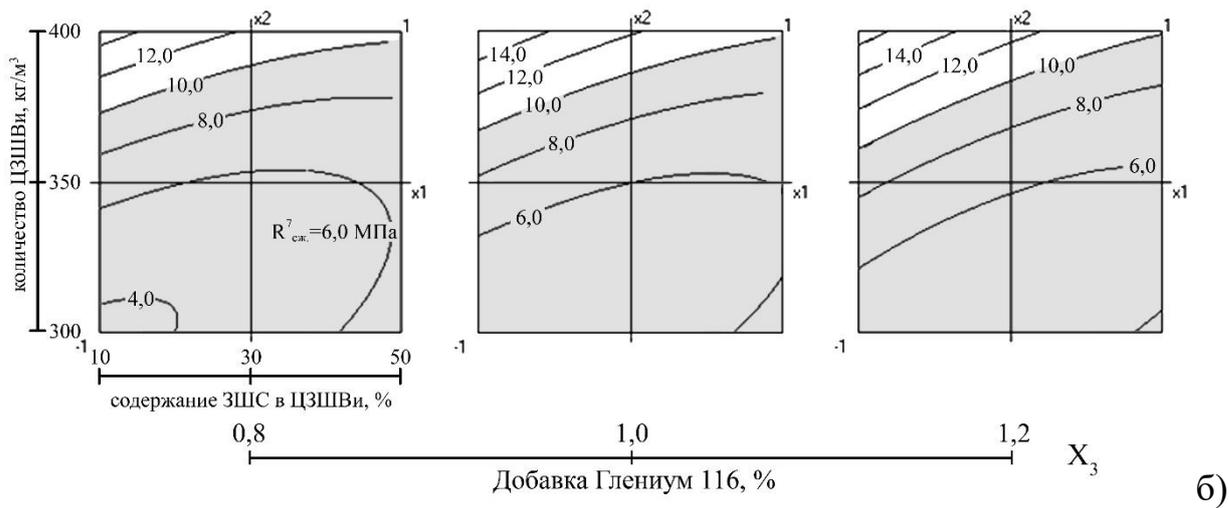
На рис. 6.6 (а,б,в) показано как изменяется прочность на изгиб образцов МЗБ на 7, 14 и 28 суток в зависимости от рецептуры.

Так для состава (рис.58а) МЗБ на ЦЗШВ_и (10%) и максимальном его содержании 400 кг уже на 7 суток обеспечивается $R_{изг} = 6,0 - 8,0$ МПа. При добавке $X_3 = 0,8\%$ $R_{изг} = 8,0$ МПа. Далее в возрасте 14 суток область данной прочности (рис.58б) расширяется и возможно использование минимального содержания ЦЗШВ_и 370 кг на 1 м³ бетона. Химическая добавка X_3 составляет 0,8; 1,0 и 1,2 %. На 28 суток прочность МЗБ имеет $R_{изг} \geq 10$ МПа (рис. 6.6в).

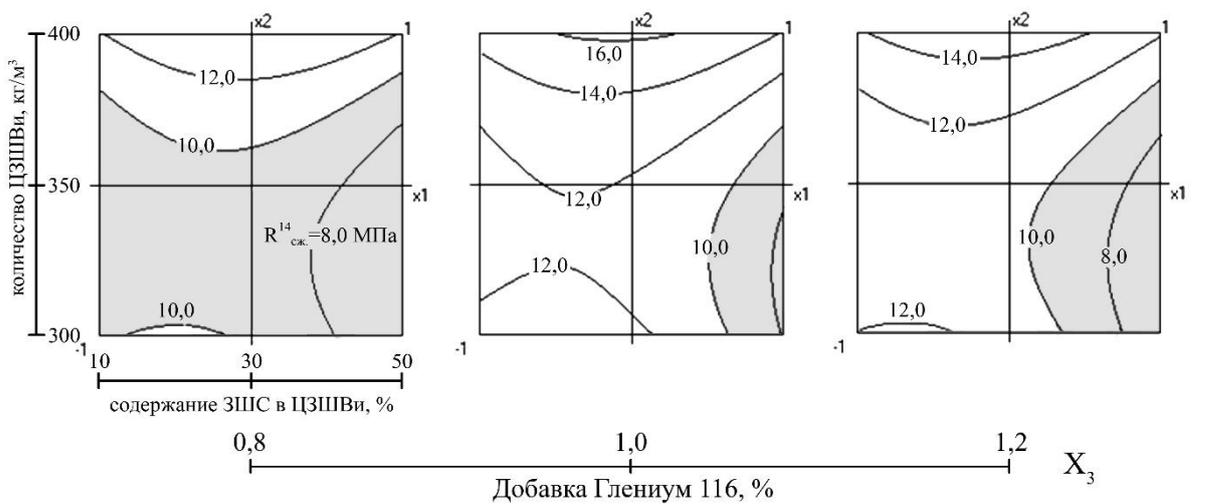
Следует отметить, что быстрое наставление прочности МЗБ наблюдается в первые 7 суток и в дальнейшем процесс структурообразования, т.е гидратации ЦЗШВ_и идет медленнее и будет продолжаться долгое время. Сравнивая одинаковые составы ($x_1=-1$; $x_2=1$; $x_3=-1$) можно увидеть, что в 7 суточном возрасте $R_{изг} = 8,0$ МПа и на 28 суток прочность данного образца возросла на 3 МПа $R_{изг} = 11,0$ МПа.

Что касается прочности на сжатие МЗБ (Рис. 6.6 а,б,в) можно отметить, что уже на 7 суток этот показатель в оптимальной области (не заштрихованное поле) $R_{сж.} \geq 10$ МПа. В данном случае содержание вяжущего ЦЗШВ_и должно быть максимальным 400 кг на 1 м³ для $R_{сж.} = 12-14$ МПа. Содержание ЗШС в вяжущем должно быть 10-30%. На 14 суток область рецептур, где $R_{сж.} \geq 10$ МПа расширяется и зависит от количества добавки. Прочность достигает $R_{сж.} = 16$ МПа. И на 28 суток прочность растет медленнее и достигла $R_{изг} = 20$ МПа.

а)



б)



в)

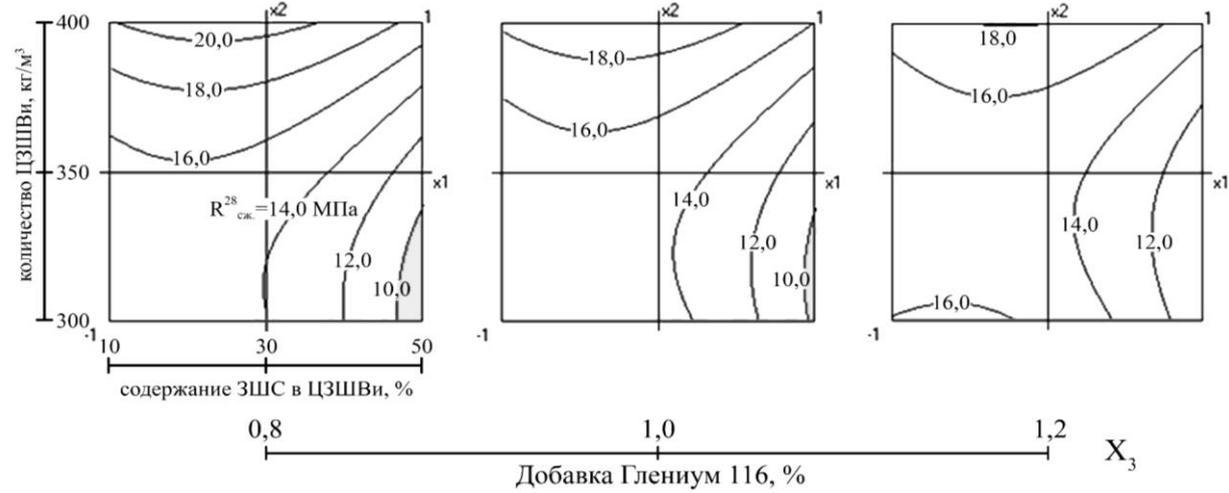


Рисунок 6.7 – Прочность на сжатие МЗБ на 7(а), 14(б), 28(в) суток нормального твердения при добавке Глениум 116 - 0,8; 1,0 и 1,2 %

Как отмечалось ранее при анализе коэффициентов ЭСмодели, что для достижения максимальной прочности содержание в ЦЗШВи золошлаковой

смеси должно быть минимальным 10%, а количество вяжущего максимальным 400 кг. Получение МЗБ марок 100-150 обеспечивается на вяжущих с ЗШС 10-30% и их количестве 300-400 кг, но при регулировании химической добавки. Уменьшением количества ЦЗШВ_и соответственно снижается марка бетона.

Требуемую прочность МЗБ с добавкой ЗШС можно также оценить коэффициентом конструктивного качества (*К.К.К*), т.е. отношением прочности при сжатии к единице плотности.

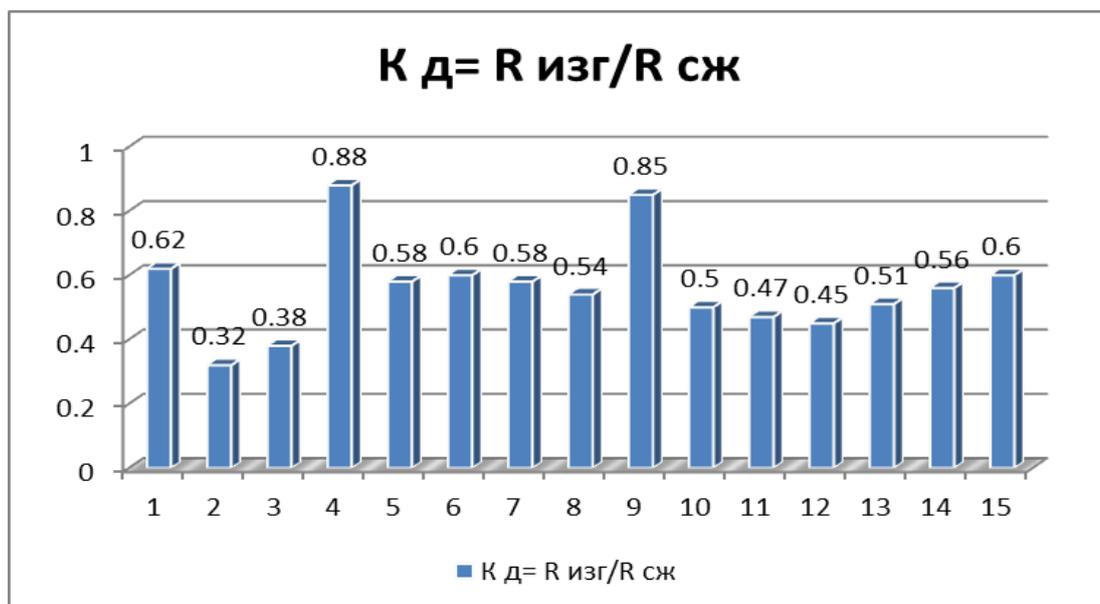


Рисунок 6.8 – Изменение коэффициента деструкции в мелкозернистом бетоне при различных x_1, x_2 и x_3

Повышенная прочность на растяжение при изгибе способствуют снижению вероятности появления трещин в золоцементных материалах при переменных температурах, о чём свидетельствует коэффициент деструкции K_d [209]. На рис. 6.8 показано, что МЗБ на вяжущих с содержанием ЗШС 10-30% значительно повышает прочность на изгиб по сравнению с цементными бетонами. Составы МЗБ с высокой прочностью и малой собственной плотности, являются наиболее оптимальными с точки зрения деструктивных процессов в структуре матрицы бетона.

а)

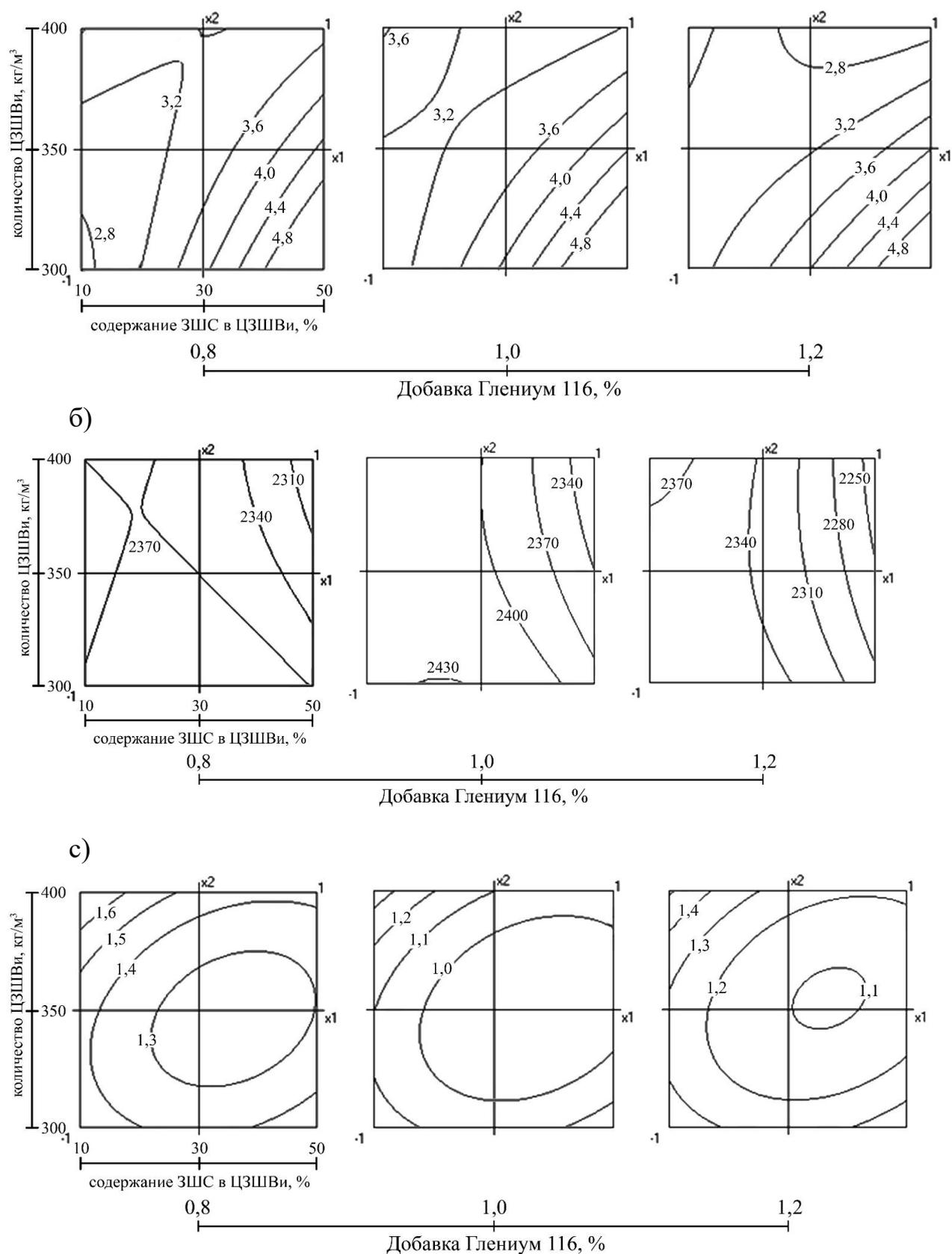


Рис. 6.9 – а) Водопоглощение (W), б) плотность (ρ) и с) коэффициент размягчения (K_p) МЗБ на 28 сутки нормального твердения

На рис. 6.9б видно, что плотность МЗБ снижается по мере наполнения

вяжущего ЗШС и количестве 350 – 400кг составляет 2250 кг/м³. Но для требуемой прочности бетона необходимо наличие оптимального количества химической добавки от которой зависит структура получаемого материала. Повышенные значения *К.К.К* можно добиться снижением плотности МЗБ и увеличением его прочности.

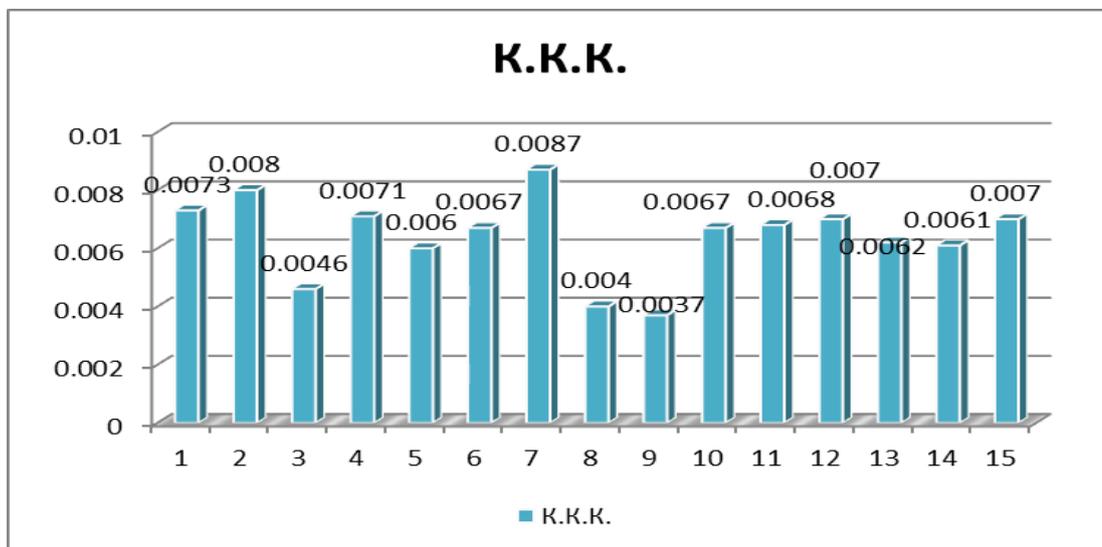


Рисунок 6.10 – Показатели коэффициента конструктивного качества

Таблица 6.6 – Расход материалов на мелкозернистые бетоны на песке ЧУ

Класс/ Марка МЗБ	Расход материалов на 1 м ³ бетона					Master Glenium 116, %	расплав конуса, см	В/Ц	Прочность на сжатие при норм. твердении, МПа		Плотность (ρ), кг/см ³	Водопоглощение (W), %
	ЦЗШВи 10	ЦЗШВи 30	ЦЗШВи 50	Вода, л	Песок, кг				14 суток	28 суток		
В7,5/ М100	300	-	-	213	2020	0,8	107	0,7	9,63	13,92	2305	2,0
	-	-	300	213	1880	1,2	107	0,7	7,71	10,0	2170	4,9
	-	300	-	213	2020	0,8	107	0,7	10,24	14,26	2320	4,0
В10/ М150	-	-	400	220	1920	0,8	107	0,55	13,14	17,8	2230	2,8
	400	-	-	220	1940	1,2	108	0,55	14,4	16,7	2340	3,0
	-	350	-	214	2050	1,0	107	0,61	10,1	16,7	2406	2,2
В15/ М200	400	-	-	220	2000	0,8	112	0,54	10,24	20,83	2400	4,1

Заключение по главе 6

1. Оптимальная структура МЗБ достигается при обеспечении наиболее плотной упаковки зёрен заполнителя, пористость зернисто дисперсной системы сводиться к минимуму, что даёт возможность сократить расход цемента.

3. Мелкозернистые бетоны с улучшенными характеристиками: малой усадки, низкой деформативности, повышенной трещиностойкости невозможно получить без использования пластификаторов. Пластификаторы на поликарбоксилатной основе MasterGlenium, значительно снижающий водопотребность бетона и способствует набору прочности в условии ТВО.

4. Результаты испытаний мелких заполнителей месторождений ЧУ и Аламедин которые используются заводами ЖБИ г.Бишкек показали, что модуль крупности песка Аламедин $M_K=3,26$ и песка ЧУ $M_K=2,55$. По классификации данные пески относятся к крупнозернистым и рекомендуются подбор оптимального зернового состава мелких заполнителей.

6. По результатам 8 различных составов МЗБ установлено: МЗБ на песке месторождения Аламедин показали, что прочность после ТВО максимально для состава № 8 имея прочность $R_{сж}^{ТВО} = 27,4$ МПа и ОК 5,8 см, плотность 2270 кг/м³. Оптимизация гранулометрического состава песка и использование добавки MasterGlenium 116 (1%) позволило снизить содержание цемента на 30%. По сравнению с эталонным составом прочность возросла на 6 МПа. Установленно, что со снижением добавки до 0,8% прочность снижается (состав № 4) прочность снижается до 23 МПа, осадка конуса снижается до 12,5 см, но в любом случае превышает эталонный состав № 7.

7. По результатам испытаний образцов МЗБ на вяжущем ЦЗШВи (30%) установлена оптимальная дозировка химической добавки MasterGlenium 917 - 0,8%. $R_{сж}^{ТВО} = 21,4$ МПа и ОК 6,1, и ρ 2255 кг/м³.

8. Мелкозернистый бетон на ЦЗШВи (30% ЗШО) и мелком заполнителе не оптимального состава не обеспечивает требуемых прочностных

характеристик. При $OK = 6,6\text{см}$, $R_{сж}^{ТВО} = 6,8\text{ МПа}$, $\rho = 2080$, что указывает на несовершенство структуры бетона.

Исследование основных физико-механических характеристик МЗБ показало возможность использования ЗШО для экономии цемента, но при оптимизации гранулометрического состава мелких заполнителей

9. Получение МЗБ на низкомарочных цементах представляется возможным при обязательной их активации с использованием ЗШС в течении 1-2 часов.

10. Анализ ЭСМ показал, что для достижения максимальной прочности содержание в ЦЗШВ_и золошлаковой смеси должно быть минимальным 10%, а количество вяжущего максимальным 400 кг. Получение МЗБ марок 100-150 обеспечивается на вяжущих с ЗШС 10-30% и их количестве 300-400 кг, но при регулировании химической добавки. Уменьшение количества ЦЗШВ_и соответственно снижает марку бетона.

ГЛАВА 7 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Затраты на складирование золошлаковых отходов (ЗШО) для предприятий, производящих топливные отходы, могут быть значительными и зависят от множества факторов, таких как объем отходов, регион, стоимость земли, транспортные расходы и экологические требования. Ниже приведены примеры затрат и их структура.

Основные статьи затрат на складирование ЗШО:

1. Создание и содержание золоотвалов.

- Строительство новых золоотвалов требует значительных капитальных вложений. Примерная стоимость строительства золоотвала объемом 1 млн тонн составляет 50–100 млн рублей ($\approx 0,7$ – $1,4$ млн долларов). Кроме того, ежегодное содержание и обслуживание составляет 5–10 млн рублей (≈ 70 – 140 тыс. долларов).

2. Транспортные расходы.

- Золошлаковые отходы транспортируются на золоотвалы с использованием специальной техники (например, гидротранспорт или автотранспорт). Примерная стоимость за транспортировку 1 тонны ЗШО составляет 100–300 рублей ($\approx 1,5$ – $4,5$ доллара).

Например для ТЭС мощностью 1000 МВт, производящей 300–500 тыс. тонн ЗШО в год, транспортные расходы составят 30–150 млн рублей ($\approx 0,4$ – 2 млн долларов) ежегодно.

3. Экологические платежи.

- Предприятия обязаны платить за размещение отходов и их негативное воздействие на окружающую среду. Примерная плата за размещение 1 тонны ЗШО равна 50–100 рублей ($\approx 0,7$ – $1,5$ доллара).

Например для ТЭС мощностью 1000 МВт ежегодные экологические платежи могут достигать 15–50 млн рублей ($\approx 0,2$ – $0,7$ млн долларов).

4. Рекультивация золоотвалов необходима после заполнения золоотвалов, которая выполняется для восстановления земель. Примерная стоимость работ на рекультивацию 1 га земли составляет 1–2 млн рублей (≈ 14 – 28 тыс. долларов). Так для золоотвала площадью 10 га затраты составят 10–20 млн рублей (≈ 140 – 280 тыс. долларов).

Например, для Бишкекской ТЭЦ объем ЗШО составляет 300 – 350 тыс. тонн в год. Затраты БТЭЦ в основном складываются из следующих статей:

1. Транспортные расходы.

- $300\ 000$ тонн \times 150 с/т = 45 млн сом.

2. Экологические платежи:

- $300\ 000$ тонн \times 75 сом/тонна = $22,5$ млн сом.

3. Содержание золоотвала.

- 10 млн сом.

5. Итого ежегодные затраты составляют $92,5$ млн сом.

Например, в России на Новочеркасской ГРЭС (Ростовская область) затраты на транспортировку и складирование ЗШО составляют около 120 млн рублей в год. На Сургутской ГРЭС-2 ежегодные затраты на содержание золоотвалов и экологические платежи достигают 200 млн рублей.

В Индии на ТЭС в штате Уттар-Прадеш затраты на складирование ЗШО составляют около 50–70 млн рупий ($\approx 0,7$ – 1 млн долларов) в год.

В США на ТЭС в штате Техас затраты на транспортировку и складирование ЗШО достигают 1,5–2 млн долларов в год.

Решением экологической проблемы по широкому использованию техногенных отходов должны быть заинтересованы общественные и государственные предприятия. Однако отсутствие целенаправленной государственной политики, несовершенство законодательной базы, незаинтересованность бизнеса и отсутствие мер государственной поддержки препятствуют формированию рынка переработки техногенных отходов.

Проведенные исследования подтверждают значительные технико-экономические преимущества использования топливных отходов и золы рисовой шелухи (ЗРШ) в производстве композиционных цементных вяжущих и бетонов, которые позволяют не только снизить затраты на производство, но и улучшить свойства бетона, а также уменьшить экологическую нагрузку.

Снижаются затраты на сырье, поскольку стоимость топливных отходов значительно ниже, чем у традиционных природных заполнителей (песка, щебня). Использование ЗШО позволит снизить затраты на заполнители на 20-30 %. Замена части песка ЗШО улучшает гранулометрический состав смеси, что позволяет снизить расход цемента. Систематическое вовлечение ЗШО позволит значительно сократить объемы потребления цемента.

Зола рисовой шелухи (ЗРШ) может успешно использоваться в качестве наполнителя в цемент, повышая при этом прочность, коррозионную стойкость, морозостойкость, водонепроницаемость бетонов.

Таким образом, затраты на содержание и складирование ЗШО для предприятий топливно-энергетического комплекса достигать значительных размеров. Переработка и использование ЗШО в строительстве и других отраслях не только снижают эти затраты, но и приносят дополнительный экономический и экологический эффект.

7.1 Технология производства цементозолошлаковых вяжущих

Технология производства бетонов с использованием в композиционных вяжущих золошлаковых отходов (ЗШО) несколько отличается от традиционного ряда основных организационных и технологических решений. Как показали исследования (глава 3), композиционные вяжущие с использованием золы гидроудаления и золошлаковой смеси в оптимальном количестве по основным свойствам не уступают традиционным цементам и могут использоваться в производстве бетонов и изделий для гражданского и промышленного строительства. При получении композиционных вяжущих

веществ золошлаковые отходы в определенном количестве после соответствующей подготовки (дробление, сушка, просев и т.п.) могут смешиваться с цементом в бетономешалках, либо предварительно подвергаться диспергации, т.е. активации в помольных агрегатах различного типа.

Для получения композиционного вяжущего ЦЗШВ при использовании золошлаковой смеси, образующейся в топках котлоагрегатов с твердым шлакоудалением, предусматривается механическое отделение дроблением крупных спекшихся кусков шлака, их классификация для отделения мелких фракций менее 2,5 мм и дальнейший совместный помол с цементом.

Отличительной особенностью технологии приготовления цементозолошлакового вяжущего (ЦЗШВ) отличается отсутствием необходимости в предварительной сушке золошлакового отхода.

Технологическая схема состоит из следующих операций (рисунок. 7.1.1).

Поставка золошлаковой смеси может осуществляться автосамосвалами на промежуточный склад сырья предприятия (1). Через приемный бункер (2) ленточным транспортером (3) ЗШС подается на дробление в щековую дробилку (4). Далее по ленточному транспортеру (5) через приемный бункер(6) с встроенным дозатором ЗШС поступает на грохота для отделения крупных фракции ≥ 5 мм (7). Мелкие фракции ЗШС через бункер питатель (8) в определенной дозировке поступают в шаровую мельницу (11) для дальнейшего измельчения с цементом, поступающего также через бункер-питатель (10). Из шаровой мельницы композиционное вяжущее подается в силос-слад (12) для дальнейшего хранения и упаковки в крафт-мешки.

В производственных условиях ЗАО «Кум-Шагыл» по предложенной технологической схеме получена партия цементозольного вяжущего в условиях предприятия выпущена опытная партия композиционного цементнозолошлакового вяжущего с содержанием золы ГУ 20 %. Результаты испытания цементнозолошлакового композиционного вяжущего представлены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Физико-механические свойства ЦЗШВ вяжущего

Номер Составов	Соотнош-е компон-в Ц:ЗШС, %	Ед.изм.	Норм. густота	Тонкость помола, %	Время схватывания час, мин.		Прочность после ТВО, МПа		Прочность после 28 суток твердения	
					нач.	кон.	R _{тво} изг., МПа	R _{тво} сж., МПа	R 28 _{изг.} , МПа	R 28 _{сж.} , МПа
1	100 : 0	%	24	87	1ч.29м	7ч.31м	4,12	19,32	6,88	33,46
3	80:20	%	27	87	2,4	5,4	4,8	21,0	7,2	32,0

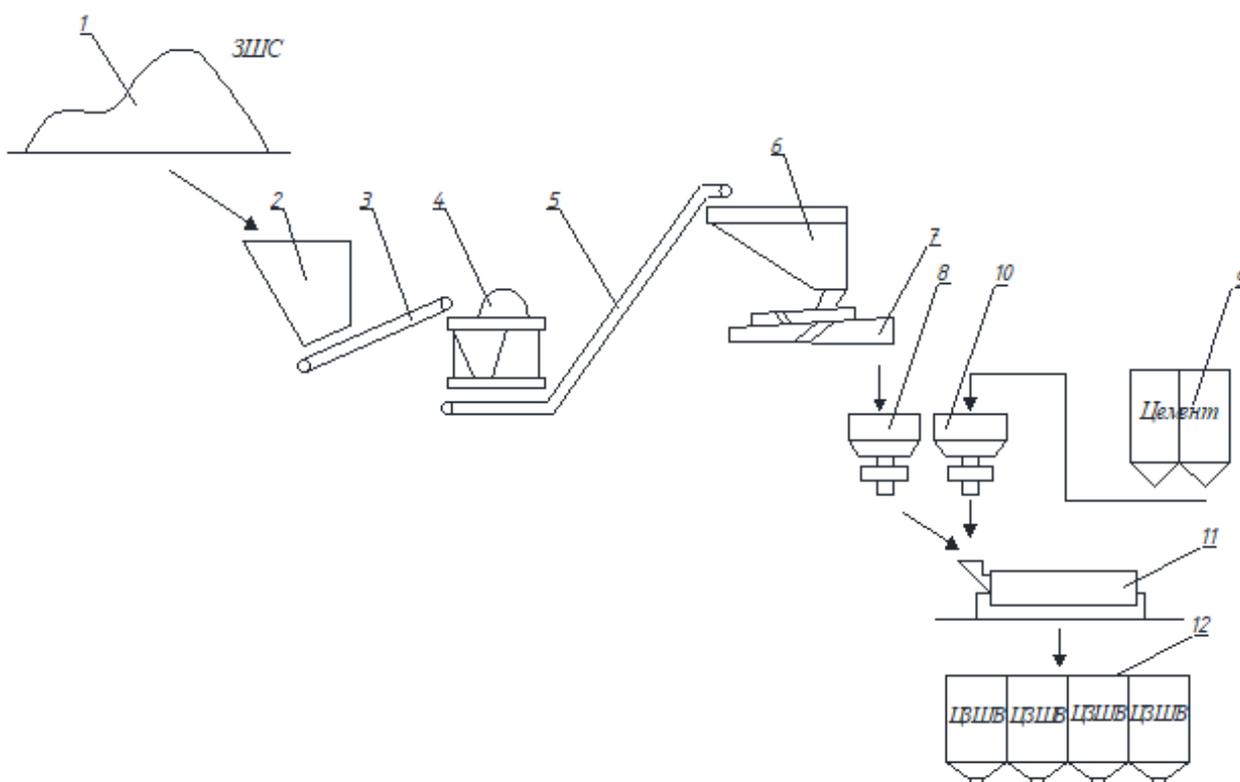


Рисунок 7.1 - Технологическая схема изготовления композиционных вяжущих веществ ЦЗШВ

Условными обозначениями на рисунке 7.1 являются:

1-ЗШС;

- 2,6 - бункер приемный;
- 3,5 - транспортер ленточный;
- 4 - дробилка щековая;
- 7 - грохот;
- 8, 10 - бункер с питателем для цемента и ЗШС;
- 9 - силосы для цемента;
- 11 - мельница шаровая;
- 12 - силосы для ЦЗШВ.

Технология производства композиционных вяжущих веществ на основе золошлаковой смеси была апробирована в условиях предприятия ЗАО «Кум-Шагыл» и получены следующие результаты:

- показана возможность использования ЗШС в качестве наполнителя в цемент при производстве композиционного цементнозолошлакового вяжущего;

- показатели физико-механических свойств ЦЗШВ_и зависят от количества наполнителя - ЗШС и времени активации;

- апробирована технология производства композиционного цементнозолошлакового вяжущего в условиях ЗАО «Кум-Шагыл».

- рассчитаны технико-экономические характеристики производства цементнозолошлакового композиционного вяжущего вещества.

7.2 Технологическая схема производства стеновых блоков на основе цементнозолошлакового вяжущего

Производство стеновых блоков из ЗШО может быть организовано непосредственно на территории золоотвалов или встроено в действующий комплекс предприятий по выпуску бетонных изделий и состоит из нескольких этапов:

- 1 - Этап изготовления композиционного вяжущего вещества;

- 2 - Этап изготовления бетонной смеси;
- 3 – Этап формования стеновых блоков.

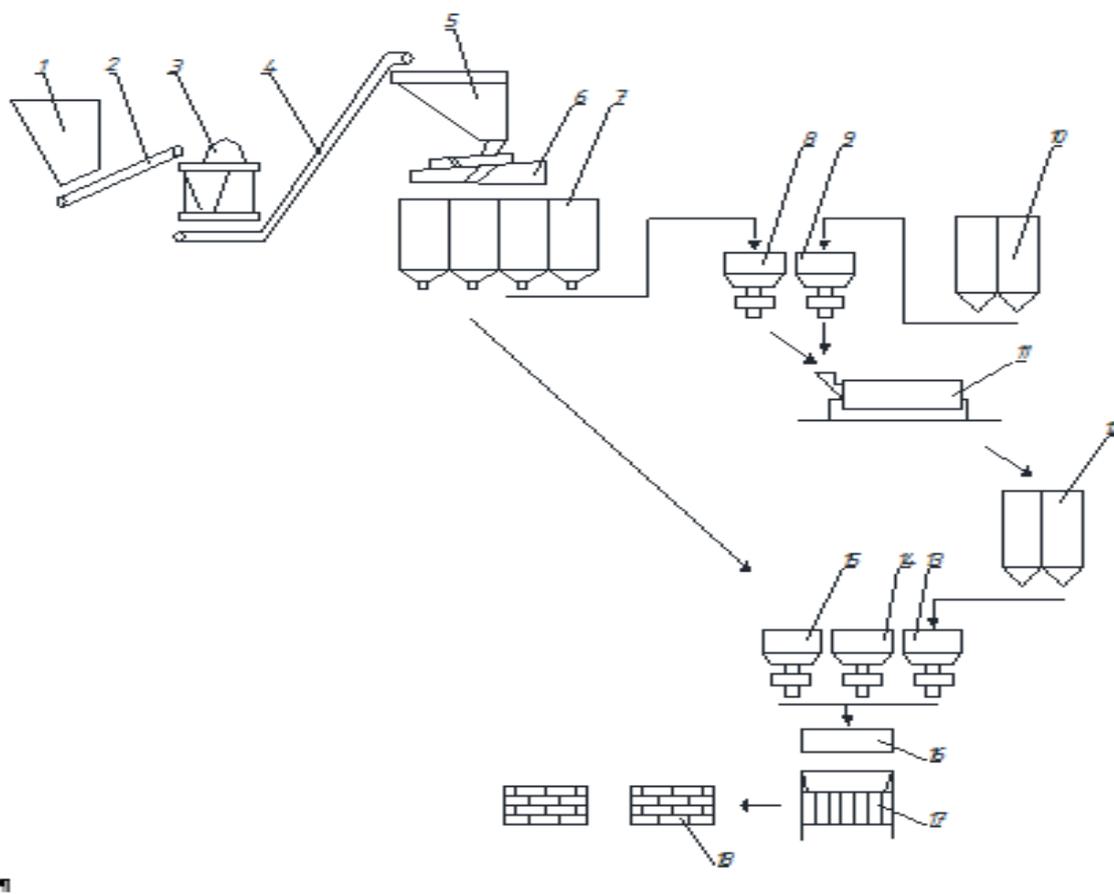


Рисунок 7.2 - Технологическая схема производства композиционных вяжущих веществ и стеновых блоков

На рисунке 7.2. приняты условные обозначений технологических стадий:

1- приемный бункер; 2-4-ленточный транспортер; 3-щековая дробилка; 5- приемный бункер; 6-грохот; 7-силосы для разных фракций шлака; 8-бункер шлака с питателем; 9-бункер цемента с питателем; 10-силос для хранения цемента; 11-шаровая мельница; 12-силос для композиционных вяжущих; 13- бункер для вяжущего с питателем; 14- бак для воды с дозатором; 15-бункер для заполнителя (шлака); 16-смеситель; 17-формовочная установка для формования стеновых блоков; 18-склад готовой продукции

Производство стеновых блоков на композиционном вяжущем наполненного ЗШСи топливным заполнителем организовано по технологической схеме, представленной на рисунок 5.2. Золошлаковая смесь с промежуточного склада завода поставляется с приемного бункера (1) ленточным транспортером (2) для дробления в щековую дробилку (3), затем измельченный шлак через бункер (5) подается на грохот (6), где разделяется на фракции 0-5 и 5-10 мм, который хранятся в силосах (7). Далее золошлаковая смесь мелких фракций поставляется в бункер с питателем (8), дозируется и подается в определенном количестве шаровую мельницу (11). Сюда же в мельницу через бункер с питателем (9) подается портландцемент, где осуществляется совместный его помол с ЗШС. Полученное цементнозолошлаковое вяжущее насосами поставляется в силоса (12) для дальнейшего хранения и использования.

Дальнейшее приготовление мелкозернистой бетонной смеси осуществляется в следующей технологической последовательности: приготовленное ЦЗШВ_и из силоса (12) с помощью пневмотранспорта поставляется в бункер с питателем, затем дозируется и подается в смеситель (16); шлаковый заполнитель определенной фракции в определенном количестве из бункера (15) также подается в смеситель (16); вода в определенном количестве из бака с дозатором (14) поставляется в смеситель (16). Из смесителя приготовленная таким образом бетонная смесь попадает на ленточный транспортер и поставляется этап формования (17), снабженной пультом управления. Процессы загрузки смеси в формы, уплотнение вибрированием и выдвигание стеновых блоков и укладка на стеллажи осуществляются автоматически. На складе готовой продукции (18) стеновые блоки хранятся и поставляются далее потребителю.

Стеновые блоки размером 390x190x188 мм (0,01м³) в количестве 100 штук изготовлены из композиционного вяжущего (наполнитель - 20% ЗШС) и мелкого заполнителя из шлака фракций (0-5 и 5-10 мм) при соотношении 1:2 и 1:3.

Определение физико-механических характеристик стеновых блоков производилось в лаборатории кафедры ПЭСМИиК на контрольных образцах размером $15 \times 15 \times 15$ мм (таблица 7.3.).

Таблица 7.3 – Физико-механические свойства МЗБ состава 1:3 на основе 20% ЗШС ЦЗШВ для изготовления проектируемых стеновых изделий

Номер	Соотношение компонентов	Подвижность смеси, см	В/Ц	Плотн. ρ , кг/м ³	Прочность после ТВО, МПа	Прочность после 28 сут., МПа	Мрз, цикл	λ , Вт/(м ⁰ С)
1	ЦЗШВ _и : Ш (0-5 и 5-10 мм) 1:3	3 см	0,78	1770	10,92	12,6	75	0,67

Изделия, изготовленные на основе композиционных цементозолошлаковых вяжущих веществ и заполнителей из шлака, отвечают требованиям ГОСТ 6133-99 «Камни бетонные стеновые».

Технология производства вяжущих и стеновых блоков с использованием топливного шлака в виде мелкого заполнителя была апробирована в условиях предприятия ЗАО «Кум-Шагыл» и получены следующие результаты:

- возможность использования композиционного цементозолошлакового вяжущего и мелкого заполнителя из топливного шлака при производстве стеновых блоков для малоэтажного строительства;
- зависимости основных физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов от процентного содержания в композиционном вяжущем наполнителя из золошлаковой смеси и соотношения его с мелким заполнителем из топливного шлака разных фракций;

- разработана технологическая карта на производство стеновых блоков, изготовленных из композиционного цементнозолошлакового вяжущего и мелкого заполнителя из шлака в условиях ЗАО «Кум-Шагыл»;

- рассчитаны технико-экономические характеристики производства стеновых блоков из мелкозернистого бетона на цементнозолошлаковом вяжущем и мелком заполнителе из топливного шлака.

7.3. Техничко-экономические показатели производства цементнозолошлакового вяжущего

Экономический эффект производства цементозолошлаковых вяжущих веществ рассчитан опираясь действующие нормативные документы КР.

1. С учетом добавки ЗШО 20 % рассчитываем расход сырьевых материалов на 1 т ЦЗШВ, который составил:

Портландцемент – 800 кг;

Золошлаковый отход – 200 кг;

2. На производство 1 тонны ЦЗШВ делаем расчет стоимости сырьевых материалов:

Портландцемент – $5000 \times 0,80 = 4000,0$ сом;

Золошлаковый отход – $150 \times 0,20 = 30,0$ сом;

Всего стоимость сырья составила - 4030 сом.

- Цена сырьевых материалов и топливных отходов получена по данным существующих строительных организаций.

- В пунктах (4), (6), (7), (8) были взяты готовые данные действующих промышленных предприятий.

- Выплаты в социальный фонд – ставка налога составляет 17,25 % от фонда ЗП.

- Местные налоги составляют 2 % от суммы расходных статей и составил 84,144 сом.

- Налог на добавленную стоимость (НДС) равен 12 % от затрат на сырье (504,868 сом).

- Прибыль по стройиндустрии составляет равной 8 % от общей стоимости.

$$\Pi = 4796,208 \times 0,08 = 383,697 \text{ сом.}$$

Все расходы для производства ЦЗШВ представлены в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Себестоимость при производстве 1 тонны ЦЗШВ

№ пп	Наименование статей расхода	Ед. изм.	Расход на 1 тонну	
			Кол-во	В сомах
1	Сырьевые материалы			
	Портландцемент		5000	4000
	Золошлаковый отход		150	30
	Итого			4030
	Вспомогательные материалы			
2	Энергия на технологические нужды	кВт/ч	25	30.1
3	Заработная плата исполнителей	сом	—	10.6
4	Заработная плата добавочная	сом	—	1.5
5	Отчисления в социальный фонд	%	—	2.1
6	Затраты на содержание оборудования	сом	—	50.2
7	Цеховые расходы	сом	—	40.1
8	Общезаводские расходы	сом	—	42.6
9	Себестоимость готовой продукции	сом	—	4207.2
10	Налог на добавленную стоимость (НДС)	%	12	504.864
11	Местные налоги	%	2	84.144
12	Заводская себестоимость	сом	—	4796,208

Экономический эффект за 1 год от выпуска композиционного цементнозолошлакового вяжущего (ЦЗШВ) в объеме 10 000 т составит 3 836 970 сом.

7.4. Техничко-экономические характеристики производства стеновых блоков на цементнозолошлаковых вяжущих

Проектируемые стеновые блоки были изготовлены в соотношении ЦЗШВ:Ш=1:3.

1. Определяем расход сырьевых материалов на 1 м³ (100 штук) мелкозернистого бетона плотностью 1840 кг/м³ при соотношении 1:3 - вяжущее : шлаковый заполнитель (0-5 и 5-10 мм) составляет:

2. ЦЗШВ – 0,25 (460кг)

Шлак – 0,75 (1380 кг)

3. ЦЗШВ – 4616×0,46=2123 сом

Шлак - 150×1,380=207 сом

Всего стоимость сырьевых материалов - 2330 сом.

Расчет себестоимости 1 м³ мелкозернистого бетона (100 штук блоков) плотностью 1840 кг/м³ представлены в таблице 7.5

Таблица 7.5 – Калькуляция себестоимости 1 м³ мелкозернистого бетона (на 100 штук стеновых блоков)

№ пп	Сырье и материалы	Стоимость за ед.	Расход материалов на т/1 м ³ В-15 (М200)					
			Заводской вариант		Предлагаемый Вариант 1		Предлагаемый Вариант 2	
			Заполнитель – (песок)				Заполнитель – (шлак) фр. 0 -5;5-10мм	
			за 1 м ³	сом	за 1 м ³	сом	за 1 м ³	сом
1	Цемент	5000	0.43	2150	-	-		
2	Композиционное вяжущее ЦЗШВ	4616	-	-	0.46	2123	0.46	2123
3	Песок (природный)	300	1.645	234	1.645	234	-	-
	Шлак фракции (0-5, 5-10 мм)	150	-	-			1,38	207

5	Вода	10 сом/ м ³	0.215	2.15	0.215	2.15	0,2	2,15
6	Добавка	40	0,006	240	0,006	240	-	-
7	Технологическ ие затраты	2,5 сом/квт	10	25	10	25	10	25
Итого				2651		2624		2355

Таким образом, при изготовлении 1 м³ (100 штук) стеновых блоков из мелкозернистого бетона плотностью 1840 кг/м³ экономия за счет использования золошлаковых отходов в качестве наполнителя и мелкого заполнителя составит 296 сом. При использовании только к цементно-золошлакового вяжущего экономия составит 26,24 сом.

На 100 штук условного стенового блока из ЦЗШВ и мелкого заполнителя из шлака при соотношении 1:3 составит экономическая эффективность составит 29600 сом.

7.5. Технология производства цементозольных вяжущих веществ

Самым распространенным и востребованным материалом в современном строительстве остаются бетоны, состав которых в последние десятилетия дополнился наличием различных модифицирующих добавок, регулирующих и повышающих его структурно-механические характеристики.

При организации производства бетонов на композиционных вяжущих предпочтительнее использовать «отлежавшуюся» золу гидроудаления по нескольким причинам. В результате вылеживания в золоотвале она содержит меньшее количество соединений серы и щелочных оксидов, которые естественным образом вымываются из частиц золы [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Зольные отходы, длительное время находящиеся на открытом воздухе теряют свою реакционную способность вследствие окисления, вымывания гуминовых кислот, что влечет к снижению водопотребности золы в бетонной смеси [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. «Отлежавшиеся» золы

гидроудаления являются более экологичными по содержанию тяжелых металлов по сравнению с золами текущего выхода [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Восстановление и повышение активности инертных золошлаковых отходов осуществляется их переработкой, применяя такие технологические приемы, как сушка до 1 %, измельчение до необходимой дисперсности и при необходимости добавление химических добавок.

Как считают многие исследователи, длительное нахождение золы в отвалах приводит к усреднению и улучшению ее характеристик.

Кроме того, обезвоживание золы, влажность которой в золоотвалах может достигать 45 %, позволяет существенно снизить энергозатраты при сушке материала в сушильном агрегате.

На Бишкекской ТЭЦ системой гидроудаления полидисперсная золошлаковая смесь направляется в золоотвалы жилого массива Бакай-Ата. Здесь поблизости места выброса пульпы расположена шлаковая зона отвала, где оседают частицы крупностью более 0,25 мм и далее в отдалении располагается зольная зона с частичками менее 0,25 мм.

Для организации производства на заводе должен быть предусмотрен промежуточный склад с запасом золы для годовой работы завода. Отсюда с помощью экскаватора и автосамосвала зола гидроудаления подается в отделение для приготовления композиционного вяжущего.

Технологическая схема производства цементнозольного композиционного вяжущего (ЦЗВ) состоит из следующих последовательных операций (рис. 5.5).

Отбор золы гидроудаления (отлежавшейся) из золоотвала может осуществляться автосамосвалами на промежуточный склад сырья предприятия (1). Обезвоживание зольных отходов естественной влажности проводится механическим буртованием на открытой площадке золоотвала.

Со склада зола отбирается ковшовым автопогрузчиком в приемный бункер с колосниковой решеткой.

Посредством ленточного питателя из бункера материал подается в сушильный барабан (2), где осуществляется сушка золы теплоносителем (смесь дымовых газов с воздухом) до влажности 0,5 %.

В летний период при влажности золы 0,5 % сырье может подаваться напрямую в шаровую мельницу для помола с цементом. Барабанные сушилки должны быть оснащены высокопроизводительными рукавными фильтрами, где оседает тонкодисперсная фракция золы. Данный продукт из фильтров системой пневмотранспорта подается в отдельный силос либо подается вместе с основным продуктом в шаровую мельницу.

Высушенная зола из шнекового транспортера через бункеры-дозаторы подается в шаровую мельницу (6), где в зависимости от времени измельчается совместно с цементом до требуемой удельной поверхности не менее 350 м²/кг. Туда же из силосного склада (3) подается цемент в заданном количестве.

Одним из основных моментов изменения технологии является дозирование цементных вяжущих и подготовленного наполнителя из золы гидроудаления, которое осуществляется весовыми дозаторами с точностью ± 1%, расположенных под бункером-питателем (4,5).

Дозировка составляющих вяжущего производится в зависимости от требуемой марки цемента и в первую очередь зависит от доли золы ГУ в цементе.

Следующим технологическим переделом является транспортировка ЦЗВ_и, которая осуществляется при помощи насосов в силосы (3), где вяжущее хранится или подается для упаковки в тары в виде мешков.

Транспортировка композиционных цементнозольных вяжущих производится с помощью насосов, различных модификаций и мощностей и складывается в силосы (3).

Заключительным этапом является их упаковка в тары, разового предназначения или бумажные мешки. Для охраны окружающей среды от

воздействия пыли, выделяемой при упаковке, используются современные циклоны улавливания мелкодисперсной пыли.

Таблица 7.6 – Свойства ЦЗВи, измельченного в течение одного часа

№ состава	Соотношение компонентов Ц : Зола, (%)	Нормальная плотность, %	Тонкость помола, %	Время схватывания мин.		Прочность после ТВО, МПа		Прочность после 28суток, МПа	
				начало	конец	R _{изг.} , МПа	R _{сж.} , МПа	R _{изг.} , МПа	R _{сж.} , МПа
1	100:0	24	87	1,6	4,55	4,2	19,12	6,75	33,46
2	90 : 10	28	89	1,5	4,0	5,6	21,4	5,5	32,9
3	70:30	29	90,3	1,7	5,6	5,3	20,2	3,3	30,9

В условиях предприятия ЗАО «Кум-Шагыл» испытана опытная партия композиционных цементнозольных вяжущих веществ, наполненных золой гидроудаления. Результаты испытания цементнозольных композиционных вяжущих представлены в таблице 7.6.

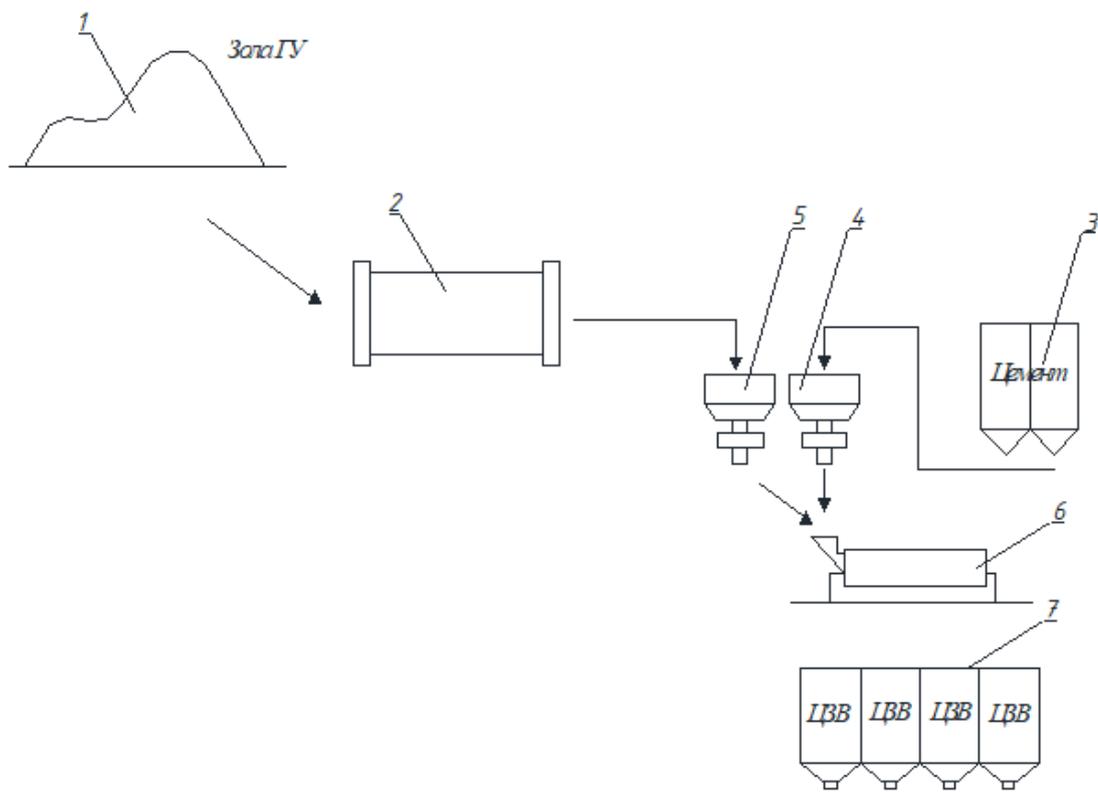


Рисунок 7.3 - Технологическая схема производства цементнозольных композиционных вяжущих

На рисунке 7.3 показана технология производства ЦЗВ_н на производстве с условными обозначениями технологических этапов:

- 1 - зола ГУ;
- 2 - барабанная сушилка;
- 3 - силосы для цемента
- 4 - бункер с питателем для цемента;
- 5 - бункер с питателем для золы ГУ;
- 6 - шаровая мельница;
- 7 - силосы для композиционных вяжущих веществ (ЦЗВ)

Технология производства вяжущих с использованием композиционных вяжущих веществ на золе гидроудаления была апробирована в условиях предприятия ЗАО «Кум-Шагыл» и получены следующие результаты:

- возможность использования золы гидроудаления в качестве наполнителя в цемент при производстве композиционного цементнозольного вяжущего;
- показатели физико-механических свойств цементозольного вяжущего в зависимости от количества наполнителя – золы гидроудаления и времени активации;
- разработана технология производства композиционного цементнозольного вяжущего в условиях ЗАО «Кум-Шагыл»;
- рассчитаны технико-экономические характеристики производства цементнозольного композиционного вяжущего вещества.

7.6. Техничко-экономические показатели производства цементнозольного вяжущего

1. Рассчитываем расход сырьевых материалов на производство 1 т ЦЗВ, которая составляет в процентном содержании, 70:30:

Портландцемент – 700 кг;

Зольные отходы – 300 кг;

2. Производим расчет стоимости сырьевых компонентов на 1 т ЦЗВ:

Цемент – $5000 \times 0,70 = 3500,0$ сом;

ЗШО – $150 \times 0,30 = 45,0$ сом;

Всего стоимость сырьевых материалов - 3545 сом

- Цена сырьевых материалов и топливных отходов получена по данным существующих строительных организаций.

- В пунктах 4, 6, 7, 8 были взяты данные действующих предприятий.

- Выплаты в социальный фонд – ставка налога составляет 17,25 % от фонда заработной платы.

- Местные налоги составляют 2 % от суммы расходных статей (74,4 сом).

- Налог на добавленную стоимость (НДС) равен 12 % от затрат на сырье (425,4 сом).

- Прибыль по строительной отрасли равна 8 % от общей стоимости.

$$\Pi = 4277,88 \times 0,08 = 342,23 \text{ (сом)}$$

Основные прямые расходы при производстве ЦЗВ представлены в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Себестоимость одной тонны ЦЗВ

№ пп	Наименование расхода	Ед.изм.	Расход на 1 тонну	
			Количество	В сомах
1	Сырьевые материалы			
	Цемент 700		5000	3500
	ЗШС 300		150	45
	Итого			3545
	Вспомогательные материалы			
2	Энергия на технологические нужды	кВт/ч	25	30.1
3	Заработная плата исполнителей	сом	—	10.6
4	Заработная плата -добавочная	сом	—	1.5
5	Отчисления в социальный фонд	%	—	2.1
6	Затраты на содержание оборудования	сом	—	50.2
7	Цеховые расходы	сом	—	40.1
8	Общезаводские расходы	сом	—	42.6
9	Себестоимость готовой продукции	сом	—	3722.2
10	Налог на добавленную стоимость	%	12	425,4
11	Местные налоги	%	2	74.44
	Заводская себестоимость	сом	—	4277,88

Экономический эффект за 1 год от выпуска композиционного цементнозольного вяжущего (ЦЗВ) 10 000т составит 3 422 300 сом.

7.7. Техничко-экономические характеристики производства 1 м³ бетона класса В 15 (М200) на цементнозольном вяжущем

Калькуляция затрат на производство 1 м³ бетона и расчет экономического эффекта от использования композиционного вяжущего вещества проводился на примере бетона класса В15 (М200) заводского состава представлен в таблице 7.7.

В таблице 7.7 показано, что предлагаемый тяжелый В-15 (М200) бетон на цементнозольном вяжущем ЦЗВ_и экономичнее заводского на 249 сом. Стоимость бетона марки В-7,5 (М100) на 170 сом ниже заводского.

Таблица 7.7 - Калькуляция затрат на производство 1 м³ тяжелого бетона В 15 (М200) и В 7,5 (М100)

№ п/п	Сырье и материалы	Стоимость за ед.	Расход материалов на т/1 м ³							
			Заводской				Предлагаемый			
			В-15 (М200)	В-7,5 (М100)	В-15 (М200)	В-7,5 (М100)	В-15 (М200)	В-7,5 (М100)	В-15 (М200)	В-7,5 (М100)
			за 1 м ³		сом		за 1 м ³		сом	
1	Цемент	5000	0,345	0,235	1725	1175	-	-	-	-
2	ЦЗВ _и	4278	-	-	-	-	0,345	0,235	1476	1005
3	Песок	300	0,780	0,92	234	276	0,780	0,92	234	276
4	Щебень	150	0,15	0,07	159	161	0,15	1,07	159	161
5	Вода (за 1 м ³)	10	0,195	0,18	1,9	1,8	0,210	0,18	2,3	1,8
6	Добавка	40	0,003	0,001	120	40	0,003	0,001	120	40
7	Технологические затраты (1 кВт)	2,5	10	10	25	25	10	10	25	25
Итого					2263	1678			2014	1507

Наиболее ощутимая разница в стоимости бетонов обусловлена в экономии цемента. Чем выше содержание цемента в бетоне, тем экономичнее выпуск тяжелого бетона. При выпуске 10 000 тонн тяжелого бетонов В-15

(M200) экономия составит **2 490 000 сом** и В-7,5 (M100) экономический эффект составит **1 700 000 сом**.

На основе проведенных исследований составлена технологическая схема изготовления цементношлаковых смешанных вяжущих (рис. 7.3)

Цементношлаковые композиционные вяжущие вещества производятся на одной технологической линии. При производстве вяжущего выполняются технологические операции в следующей последовательности: дробление техногенного сырья (шлака) → грохочение → дозирование компонентов → помол → транспортировка композиционного вяжущего → упаковка вяжущего → складирование вяжущего.

Важным технологическим переделом является дозирование материалов. Для дозирования материалов используются весовые дозаторы, которые взвешивают цементные вяжущие и наполнители с точностью $\pm 1\%$. Дозировка составляющих вяжущего производится по рецепту, разработанному каф. ПЭСМИК.

Дробление техногенного сырья, доставленного в виде кусков размером до 25-40 мм, производится в щековой дробилке.(5)

Дозирование компонентов в точно установленных соотношениях производится по массе дозаторами.(2,3)

Помол цементношлаковых композиционных вяжущих веществ производится в шаровой мельнице. (6) Далее композиционные вяжущие с помощью насосов транспортируются и складываются в силосы (7) и упаковываются в биг – беги (мешки). Очистка пыли производится через систему циклонов.

Складирование упакованных в мешки вяжущих производится в складе готовой продукции.

На основе разработанной технологической схемы в условиях предприятия ОсОО «Таш сервис» выпущена опытная партия композиционных цементношлаковых вяжущих веществ.

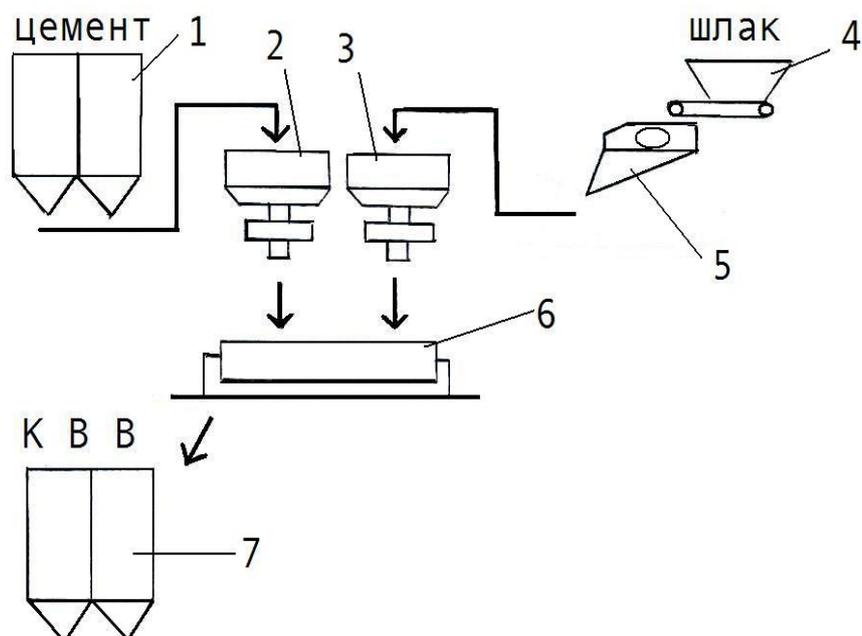


Рис.7.4. Технологическая схема производства шлакоцементных композиционных вяжущих

1-цементные силосы; 2-бункер с питателем для цемента; 3-бункер с питателем для золошлаковых смесей; 4-приемный бункер для шлака; 5-щековая дробилка; 6-шаровая мельница; 7-силосы для композиционного вяжущего вещества.

Результаты испытания полученных вяжущих приведены в табл.7.8.

Таблица 7.8.

Физико-механические свойства композиционных цементошлаковых вяжущих веществ.

№ состава	Соотношение компонентов, в % Ц:Ш	Норм. густота, %	Тонкость помола, %	Сроки схватывания час, мин.		Предел прочности, МПа			
						после пропарки ТВО		в 28 сут. твердения	
				нач.	конец	R _{изг}	R _{сж}	R _{изг}	R _{сж}
1	100:0	24	87	1ч.36	7ч.27	4,12	19,32	6,88	33,46

				мин	мин				
2	90:10	25	87,5	3ч. 12мин	5ч.14 мин	3,98	16,18	3,8	33,7
3	70:30	25	88,5	3ч. 23мин	5ч.25 мин	3,35	12,58	3,5	32,5
4	50:50	29	89,3	2ч. 50мин	5ч. 30ми н	4,8	18,4	5,9	28,16

Закключение: При добавке 10-30% тонкомолотой шлаковой смеси в цемент получены композиционные вяжущие вещества (ЦШВ) по физико-механическим характеристикам соответствующие М300. А состав, содержащий 50% добавок, соответствуют М200. Разработанные вяжущие могут быть рекомендованы для изготовления мелкоштучных стеновых изделий, в составе растворов различного назначения. Расширение выпуска указанных вяжущих способствует экономии дорогостоящего портландцемента при выполнении различных строительных работ.

7.8. Технологическая карта получения мелкозернистого бетона с использованием золы рисовой шелухи и золы гидроудаления

Цель: Производство мелкозернистого бетона с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами за счет использования золы рисовой шелухи (ЗРШ) в качестве наполнителя в цемент и золы гидроудаления (ЗГУ) в качестве мелкой фракции песка.

Область применения: Изготовление мелкозернистого бетона.

2. Исходные материалы

1. *Цемент*: Портландцемент марки М400 или М500.

2. *Зола рисовой шелухи (ЗРШ)*:

- Содержание SiO₂: не менее 85%.

- Удельная поверхность: 2000–3000 м²/кг.
- Пуццолановая активность: не менее 80%.

3. Зола гидроудаления (ЗГУ):

- Гранулометрический состав: 0–0,63 мм.
- Содержание SiO₂: 50–60%.
- Водопотребность: не более 120%.

4. Песок: Мелкозернистый кварцевый песок (при необходимости).

5. Вода: Соответствует требованиям ГОСТ 23732-2011.

6. Химические добавки: Суперпластификаторы (например, на основе поликарбоксилатов) для улучшения удобоукладываемости.

3. Оборудование

- Бетоносмеситель принудительного действия.
- Дозаторы для цемента, золы, песка и воды.
- Виброплощадка для уплотнения бетонной смеси.
- Формы для изготовления образцов.
- Сушильный шкаф для подготовки золы рисовой шелухи (при необходимости).

4. Технологический процесс

4.1. Подготовка материалов

1. Зола рисовой шелухи (ЗРШ):

- Просеивание через сито 0,315 мм для удаления крупных частиц.
- Прокаливание при температуре 600–800 °С для повышения реакционной способности.

2. Зола гидроудаления (ЗГУ):

- Просеивание через сито 0,63 мм для удаления крупных включений.
- Сушка до постоянной массы (при необходимости).

3. Песок:

- Просеивание и удаление примесей.

4. Цемент:

- Проверка качества и срока годности.

4.2. Дозирование компонентов**

Состав бетонной смеси (ориентировочный):

- Цемент: 100 кг.
- Зола рисовой шелухи (ЗРШ): 10–15% от массы цемента (10–15 кг).
- Зола гидроудаления (ЗГУ): 20–30% от массы песка (50–70 кг).
- Песок: 200–250 кг.
- Вода: $V/C = 0,4–0,5$ (40–50 л).
- Суперпластификатор: 0,5–1,0% от массы цемента (0,5–1,0 кг).

4.3. Приготовление бетонной смеси**

1. Загрузка в бетоносмеситель:

- Цемент.
- Зола рисовой шелухи (ЗРШ).
- Зола гидроудаления (ЗГУ).
- Песок.

2. Перемешивание сухих компонентов в течение 1–2 минут.

3. Добавление воды и суперпластификатора.

4. Перемешивание в течение 3–5 минут до получения однородной смеси.

4.4. Формование и уплотнение**

1. Укладка бетонной смеси в формы.

2. Уплотнение на виброплощадке в течение 1–2 минут.

3. Выравнивание поверхности.

4.5. Твердение

1. Нормальные условия:

- Хранение образцов в помещении с температурой 20 ± 2 °С и относительной влажностью 95%.

- Увлажнение в течение первых 7 суток.

2. Тепловлажностная обработка (ТВО):

- Нагрев до 80–90 °С в течение 6–8 часов.

- Выдержка при температуре 12–16 часов.

- Охлаждение до комнатной температуры.

5. Контроль качества

1. Подвижность смеси: Оценка по осадке конуса (СНиП 82-02-95).
2. Прочность:
 - Определение прочности на сжатие и изгиб через 7, 28 и 90 суток (ГОСТ 10180-2012).
3. Водонепроницаемость: Испытание по методу "мокрого пятна" (ГОСТ 12730.5-84).
4. Морозостойкость: Проведение циклов замораживания-оттаивания (ГОСТ 10060-2012).
5. Микроструктурный анализ: Оценка структуры бетона с помощью SEM и XRD.

6. Рекомендации

- Для улучшения удобоукладываемости при высоком содержании золы рисовой шелухи (более 10%) рекомендуется использовать суперпластификаторы.
- При использовании золы гидроудаления в качестве мелкой фракции песка необходимо контролировать её водопотребность и гранулометрический состав.
- Для повышения долговечности бетона рекомендуется использовать золу рисовой шелухи в количестве 10–15% от массы цемента.

7. Ожидаемые свойства бетона

- Прочность на сжатие: 30 МПа.
- Водонепроницаемость: W6–W8.
- Морозостойкость: F100–F200.
- Улучшенная устойчивость к химической агрессии.

8. Преимущества технологии

- Снижение затрат на сырье за счет использования отходов.
- Улучшение экологических показателей производства.

7.9 Технико-экономические показатели эффективности получения мелкозернистого бетона с использованием золы рисовой шелухи и золы гидроудаления.

Технико-экономический эффект, полученный в результате внедрения результатов исследований, формируется за счет нескольких факторов:

- повышение прочности мелкозернистого бетона.
 - снижение расхода песка и цемента за счет введения в состав мелкозернистого бетона отходов золы гидроудаления и золы рисовой шелухи.
- При этом сохраняются необходимые прочностные показатели и водонепроницаемость материала. Это играет ключевую роль в снижении общей стоимости строительства, особенно в случаях, когда объемы бетонных работ значительны.

В ходе расчетов использовались цены на основные материалы и затраты, выраженные в национальной валюте - сомах.

Приведены расчёты стоимости 1 т мелкозернистого бетона завода ЗАО Кум-Шагыл (табл. 7.8).

Таблица 7.8. Заводской состав МЗБ по маркам (классам) - 1 т

№	Наименование материалов	Норма расхода, т	Стоимость за единицу	Общая стоимость, сом
М 100 (В7,5)				
1	Песок	1.810	650	1176,5
2	Цемент	0.290	6800	1972
3	Вода	0.200	18,5	3.7
Итого:				3152.2
150 (В10)				
1	Песок	1.750	650	1137,5
2	Цемент	0.350	6800	2380
3	Вода	0.205	18,5	3,79
Итого:				3521,29
М 200 (В15)				
1	Песок	1.680	650	1092
2	Цемент	0.410	6800	2788
3	Вода	0.210	18,5	3,89

Итого:				3883,89
M250 (B20)				
1	Песок	1.610	650	1046,5
2	Цемент	0.475	6800	3230
3	Вода	0.215	18,5	3.98
Итого:				4280.48
M300 (B22,5)				
1	Песок	1.550	650	1007,5
2	Цемент	0.530	6800	3604
3	Вода	0.220	18,5	4.07
Итого:				4615.57

Себестоимость экспериментальных составов МЗБ на 1 тонну с использованием золы гидроудаления и золы из рисовой шелухи представлена в таблице.

Таблица 7.9. Экспериментальный МЗБ с использованием золы из рисовой шелухи и золы гидроудаления Бишкек ТЭС– 1 т

№	Наименование материалов	Норма расхода, т	Стоимость за единицу	Общая стоимость, сом
M 100 (B7,5)				
1	Песок	1,380	650	897
2	Цемент	0,397	6800	2699,6
3	Зола гидроудаления	0,244	20	4,88
4	Зола рисовой шелухи	0,016	200	3,2
5	Вода	0,308	18,5	5,698
Итого:				3609,77
150 (B10)				
1	Песок	1.624	650	1055.6
2	Цемент	0.381	6800	2590.8
3	Зола рисовой шелухи	0.033	200	6,6
4	Добавка	0.00331	65	0,217
5	Вода	0.197	18,5	3,645
Итого:				3656,86
M 200 (B15)				
1	Песок	1,380	650	897
2	Цемент	0,397	6800	2699,6
3	Зола гидроудаления	0,244	20	4,88
4	Зола рисовой шелухи	0,016	200	3,2
5	Добавка	0,00165	65	0,107
6	Вода	0.286	18,5	5,291

Итого:				3610,04
M250 (B20)				
1	Песок	1,624	650	1055,6
2	Цемент	0,397	6800	2699,6
3	Зола рисовой шелухи	0,016	200	3,2
4	Добавка	0,00165	65	0,107
5	Вода	0,244	18,5	4,514
Итого:				3763,02
M300 (B22,5)				
1	Песок	1,380	650	897
2	Цемент	0,414	6800	2815,2
3	Зола гидроудаления	0,244	20	4,88
4	Добавка	0,00165	65	0,107
5	Вода	0,251	18,5	4,644
Итого:				3721,83

Расчёт себестоимости 1 т мелкозернистого бетона, изготавливаемого на заводе Кум-Шагыл по расходу материалов показал, что при изготовлении M100 (B7,5) – 3152,2 сом, при M150 (B10) - 3521,29 сом, при M200 (B15) - 3883,89 сом, при M250 (B20) - 4280,48 сом, при M300 (B22,5) - 4615,57 сом без учёта затрат предприятия на производство и реализацию продукции.

Расчет себестоимости экспериментальной мелкозернистой смеси с добавкой золы гидроудаления и золы из рисовой шелухи показал, что при изготовлении M100 (B7,5) - 3609,77 сом, при M150 (B10) - 3656,86 сом, при M200 (B15) - 3610,04 сом, при M250 (B20) - 3763,02 сом, M300 (B22,5) - 3721,83 сом без учёта затрат предприятия на производство и реализацию продукции.

МЗБ из экспериментальных бетонных смесей имеют себестоимость на 1 тонну ниже чем заводские бетоны. Следует отметить, положительный экономический эффект (табл.7.10.):

Таблица 7.10 – стоимость бетона классов B15 – B22,5.

№	Заводской состав		Экспериментальный состав	
	Класс бетона/ марка	Стоимость, сом	Класс бетона/ марка	Стоимость, сом
1	(B15) M200	3883, 89	(B15) M200	3610, 04
2	(B20) M250	4280, 48	(B20) M250	3763, 02

3	(B22,5) M300	4615, 57	(B22,5) M300	3721,83
---	--------------	----------	--------------	---------

Экономическая целесообразность использования ЗГУ и ЗРШ для производства мелкозернистого бетона, заключается в следующем:

- использование в качестве добавки золы гидроудаления и золы из рисовой шелухи, которые являются невостребованными техногенными отходами, позволит существенно расширить сырьевую базу для производства строительных материалов, а так же решить экологическую проблему охраны окружающей среды;

- организация промышленного изготовления мелкозернистого бетона с использованием отходов ЗГУ и ЗРШ в условиях действующих предприятий с использованием стандартного оборудования позволит снизить себестоимость выпускаемой продукции.

Разработанные составы МЗБ из экспериментально подобранной смеси были использованы при изготовлении лотков арочных из бетонных смесей марки 200 (B15) и сравнен заводским лотком марки 200 (B15).

При производительности завода по производству товарного бетона 30 тыс. м³/ год экономическая эффективность от использования добавки золы рисовой шелухи (ЗРШ) в цемент и золы гидроудаления (ЗГУ) вместо части мелкого заполнителя составит при изготовлении экспериментальных мелкозернистых бетонов классов B15 - 8215500 сом, B20 15523800 сом, B22,5 26812200 сом.

Применение мелкозернистого бетона с использованием золы гидроудаления позволит получить экономический эффект в сфере промышленного производства изделий и социальный эффект за счет использования отходов ТЭЦ. Опытно-промышленное апробирование и технико-экономические расчеты показали, что использование золы гидроудаления и золы из рисовой шелухи позволяет существенно расширить сырьевую базу для производства строительных материалов и в какой-то мере решает экологическую проблему охраны окружающей среды.

Удельный расход энергии на производство 1 т портландцемента

Так как основные технологические стадии производства цемента связаны с тонким измельчением сырьевых материалов и цемента, то главными потребителями электроэнергии при производстве цемента являются помольные агрегаты – сырьевые и цементные мельницы, а также вентиляторы и дымососы, потребляющие в сумме до 80 % всей энергии на 1 т производимого цемента. Удельный расход электроэнергии на производство цемента составляет 90–150 кВтч/т цемента. Удельный расход электроэнергии при мокром способе производства цемента несколько выше, чем при сухом или комбинированном способах производства.

Для промышленных предприятий КР по производству цементной продукции тариф на электроэнергию составляет — 3,49 сом/кВтч (без учета налогов). На получение 1 тонны цемента расходуется $150 \times 3,49 = 208,5$ сом

Например, для завода ЖБИ при производительности товарного бетона 200 тыс м³ экономия цемента составит

$$\text{Эц} = (0,414 - 0,397) 200\ 000 = 3400 \text{ т.}$$

Экономический эффект с учетом, что удельный расход электроэнергии на производство цемента по мокрому способу составляет 150 кВт·ч/т можно рассчитать экономический эффект от экономии электроэнергии при тарифах на электроэнергию — 3,49 сом/кВтч (без учета налогов).

$$\text{Ээ} = 3400 \text{ т.} \times 150 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \times 3,9 \text{ сом/кВтч} = 1\ 779\ 800 \text{ сом/год}$$

Экономии цемента в целом по Республике при рациональное потреблении будет составлять еще более значительные суммы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Основные теоретические положения и практический опыт по использованию минеральных добавок показали, что золошлаковые отходы могут успешно использоваться в виде наполнителей в цемент и заполнителей в бетоны различного назначения.

- Использование топливных отходов в вяжущих и бетонах экологически и экономически целесообразно: во-первых, значительный рост цен на цемент, природные заполнители, энергоносители и, во-вторых, ухудшение экологической ситуации в результате образования и накопления промышленных отходов.

- Анализ химического состава пробы золошлаковой смеси и золы гидроудаления по содержанию кремнезема (SiO_2), глинозема (Al_2O_3) и оксидов железа ($FeO+Fe_2O_3$) практически идентичны.
- содержание $SiO_2+Al_2O_3 + Fe_2O_3$ по массе составляет 73,53 - 76,57% и по нормированному показателю, содержащие > 45% SiO_2 ЗШО относятся к кислому типу зол с не стабильным химическим составом, малым количеством свободного CaO и большим содержанием SiO_2 . Такие золы не обладают самостоятельными вяжущими свойствами, но при добавлении интенсификаторов твердения они могут обладать вяжущими свойствами;
- При помоле в шаровой мельнице 0,5 часа удельная поверхность золы достигает дисперсности цемента ($310 \text{ м}^2/\text{кг}$) далее в течении одного часа, дисперсность $360 \text{ м}^2/\text{кг}$, 1,5 часа $380 \text{ м}^2/\text{кг}$ и при измелении в течении трех часов, дисперсность остается в пределах $390 \text{ м}^2/\text{кг}$, что характеризует легкую размалываемость золы;
- Отмечается, что использование золы гидроудаления при твердении в условиях ТВО эффективно: при замене 10 % цемента золой с дисперсностью $3000\text{--}5000 \text{ см}^2/\text{г}$ прочность бетона нормального твердения практически не снижается, а после ТВО наблюдается её увеличение на 14 %. Также установлено, что при увеличении доли наполнителя требуется более длительный помол: наивысший технический эффект (прочность R28 сут сж – 37 МПа) достигается при совместном помоле 2 часа и содержании золы 10 %, тогда как при 30 % золы прочность R28 сут сж составляет 33 МПа. Таким образом, активизация золы гидроудаления существенно повышает эффективность твердения композиционного вяжущего в условиях ТВО.
- в ЦЗШВ увеличение концентрации ЗШС с 10 до 50% прочность его снижается от 21 до 17 МПа. В условиях активации до 1-2 часов помола цемента с ЗШС прочность после ТВО возрастает до 25 МПа (10% ЗШС) и до 20 МПа (50% ЗШС) соответственно.

- после 28 суток твердения в нормальных условиях при помоле 1 час прочность $R^{28}_{сж}$ составляет 26 МПа, при 2 часа прочность растет до 32 МПа;
- установлено, что увеличение времени измельчения от 0 до 2 часов снижает время начала схватывания от 3,0-3,3 часа до 2,2 часа. Конец схватывания несколько снижается при малых концентрациях ЗШС 10-30% в вяжущем от 5,4 до 4,6 часа. При 50% ЗШС в ЦШВ времена помола значительного влияния не оказывает и составляет 5,4 часа;
- Композиционные цементно-шлаковые вяжущие (ЦШВ) с использованием топливных шлаков в 1 случае когда дробленный и просеянный топливный шлак смешивали с цементом не способны твердеть в нормальных условиях и после 28 суток практически были разрушены, т.к. частицы шлака не участвовали в процессе гидратации.
- твердение образцов ЦШВ_м в условиях ТВО при 10% топливного шлака обеспечивает рост прочности от 19,32 до 24,18 МПа. Дальнейшее увеличение его до 50% снижает прочность образцов в два раза.
- для вяжущего (ЦШВ-И) при содержании шлака 0; 10; 30% $R_{сж}^{28}$ составляет 33,46; 33,7; 32,5 МПа соответственно. Это указывает на эффективность введения тонкоизмельченного шлака.
- для образцов отставание прочности вяжущего после ТВО 19,32 до 12,58 МПа объясняется пониженной температурой (80⁰С);
- для ЦШВ-Пи, полученного совместным помолом цемента и тонкоизмельченного шлака в течении 1 часа $R_{сж}^{28}$ практически неизменна и при 0-10-30% и составляет 33,46; 34,28 и 32,98 МПа;
- время начала схватывания ЦШВПи удлиняется почти в 2 раза, а конец схватывания сокращается от 447 до 293 мин. по мере увеличения содержания шлака до 50%;
- установлено, что в качестве наполнителя наиболее эффективно использовать активированные измельчением шлаки, что позволяет увеличить

гидравлическую активность шлака и стабилизировать его физико-химических характеристики.

- В составе МЗБ №1, где КВВ :Ш (5-10мм) :П - 1:2:1 лучшие результаты показывает вяжущее с использованием золы ГУ и ЗШС. МЗБ на вяжущем с ЗШС 10-50 % набирает прочность после ТВО в пределах 15-10 МПа. На вяжущем с золой ГУ в пределах 18-12 МПа. Та же тенденция сохраняется и после твердения МЗБ 28 суток, здесь $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}$ находится в пределах 22 -14 МПа;

- для МЗБ состава № 6 КВВ : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:2 установлено, что наибольшие $R^{\text{тво}}_{\text{сж}}$ и $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}}$ обеспечиваются для МЗБ на вяжущем ЦЗВи (с золой ГУ) и ШЦВи (с шлаком), но при нижних уровнях 10%. При 40% наполнителя обеспечивается $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} \geq 20,0$ МПа и плотности 1800-1820 кг/м³;

- для МЗБ состава № 7 КВВ : Ш (смесь фр.0-5 и 5-10 мм) - 1:3 содержание мелкого шлакового заполнителя увеличено, что привело к снижению плотности МЗБ до 1720-1820 кг/м³ и прочности до 10- 18 МПа. И прочность МЗБ $R^{28\text{сут}}_{\text{сж}} = 20,0$ МПа обеспечиваются при 10% содержании наполнителя в вяжущих ЦЗВи (с золой ГУ) и ШЦВи (со шлаком);

- по результатам исследований выявлена единая закономерность: образцы твердеющие 28 суток в нормальных условиях, характеризуются более высокими показателями прочности, чем после ТВО, что обусловлено преобладающей ролью цементных минералов в процессе гидратации, нежели активированными частицами золы гидроудаления;

- анализ результатов прочности МЗБ на вяжущих с золой гидроудаления, золошлаковой смесью и шлака показал, что чем ниже марка бетона, тем большее количество цемента можно заменить топливными отходами;

- основе шлакового заполнителя и шлакоцементных вяжущих состава 1:2 получен облегченный МЗБ – М 200,300; $\rho=1800-1880$ кг/м³; $M_{pr} 100$; $\lambda=0,72$ Вт/мК, а из состава 1:3 – МЗБ плотностью 1700-1870 кг/м³; $M_{150-200}$; $M_{pr} 75$; $\lambda=0,67$ Вт/мК;

– на основе шлакового заполнителя с использованием песка фр 0-5 и фр 5-10 и шлакоцементных вяжущих получен МЗБ - $\rho=1300-1380\text{кг/м}^3$; М 50; Мрз 20; $\lambda=0,35\text{ Вт/мК}$;

- оптимальная структура МЗБ достигается при обеспечении наиболее плотной упаковки зёрен заполнителя, пористость зернисто дисперсной системы сводиться к минимуму, что даёт возможность сократить расход цемента.

- мелкозернистые бетоны с улучшенными характеристиками: малой усадки, низкой деформативности, повышенной трещиностойкости невозможно получить без использования пластификаторов. Пластификаторы на поликарбоксилатной основе MasterGlenium, значительно снижающий водопотребность бетона и способствует набору прочности в условии ТВО.

- результаты испытаний мелких заполнителей месторождений ЧУ и Аламедин которые используются заводами ЖБИ г.Бишкек показали, что модуль крупности песка Аламедин $M_K=3,26$ и песка ЧУ $M_K=2,55$. По классификации данные пески относятся к крупнозернистым и рекомендуются подбор оптимального зернового состава мелких заполнителей заполнителей.

- установлено, что МЗБ на песке месторождения Аламедин показали, что прочность после ТВО максимально для состава № 8 имея прочность $R_{сж}^{ТВО}=27,4\text{ МПа}$ и ОК 5,8 см, плотность 2270 кг/м^3 . Оптимизация гранулометрического состава песка и использование добавки MasterGlenium 116 (1%) позволило снизить содержание цемента на 30%. По сравнению с эталонным составом прочность возросла на 6 МПа. Установленно, что со снижением добавки до 0,8% прочность снижается (состав № 4) прочность снижается до 23 МПа, осадка конуса снижается до 12,5 см, но в любом случае превышает эталонный состав № 7.

- установлена оптимальная дозировка химической добавки MasterGlenium 917 - 0,8% для МЗБ на ЦЗШВи (30%) $R_{сж}^{ТВО} = 21,4\text{ МПа}$ и ОК 6,1, и $\rho 2255\text{ кг/м}^3$.

- исследование основных характеристик МЗБ показало возможность использования ЗШО для экономии цемента, но при обязательной оптимизации гранулометрического состава мелких заполнителей

- представляется возможным получение МЗБ на низкомарочных цементах при обязательной их активации с использованием ЗШС в течении 1-2 часов.
- анализ ЭСМ показал, что получение МЗБ марок 100-150 обеспечивается на вяжущих с ЗШС 10-30% и их количестве 300-400 кг, но при регулировании химической добавки.
- изделия, изготовленные на основе композиционных шлакоцементных вяжущих веществ и заполнителей из шлака или природного песка, отвечают требованиям ГОСТ 6133-99 «Камни бетонные стеновые».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдыкалыков, А. А. Оптимизация зернового состава наполнителя для бетонов / Сб. научных трудов КыргызНИИП строительства (1994-1995гг.) – Бишкек: Илим, 1995-с. 150-157. 1
2. Абдыкалыков, А. А. Вознесенский В.А., Мавлянов А.С., Лященко Т.В. Моделирование и оптимизация свойств композиционных строительных материалов. - Фрунзе: ФПИ, 1988. – 109 с.2
3. Адеева, Л. Н. Зола ТЭЦ – перспективное сырье для промышленности/ В. Ф. Борбат, Вест. Омск.ун-та.-2009.-№2(52).-С.137-147.3

4. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. / Маркова Е.В., Грановский Ю.В. – М.: Наука, 1976. – с .279
5. Азаров, М. В. Золошлаковые и бесклинкерные цементы / А.А. Петухов, Г. С. Зубарь Студенческая научная весна-2004:матер.53 науч.-тех.конф.студ. и аспирантов ЮРГТУ (НПИ).-Новочеркасск:Темп.,2004.-С.188.5
6. Алтынова, М. В. Некоторые экологические аспекты использования золы-уноса тепловых электрических станций / Современные энергетические системы и комплексы и управление ими:матер.3международ.науч.-практ.конф., Новочеркасск, 30мая-10июня 2003г.ЧЗ-С.21-22.6
7. Ананьев, В. М. Использование золы-уноса в качестве добавки при производстве тяжелого бетона / В. Н. Левченко, А.А.Вишневский Строительные материалы. 2006. — № 11. — С. 32—33.7
8. Ананьев, Г. Д. Перспективы использования золы и шлака тепловых электростанций в народном хозяйстве / Мало- и безотходные технологии в энергетике как средства защиты окружающей среды и повышения эффективности топливоиспользования: матер.всесоюз.совещ., Москва, окт.1984г.-С.11-20.8
9. Ахвердов, И. Н. Высокопрочный бетон. М., Госстройиздат.1961.9
10. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов / В.И. Бабушкин , Г.М. Матвеев, О.П. Мчедлов-Петросян.4-е изд.,перераб и доп. М.: Стройиздат,1986.с.408
11. Баженов, Ю. М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций. М., Госстройиздат. 1941.11
12. Баженов, Ю. М. Основные подходы к компьютерному материаловедению строительных материалов // Строительные материалы. 2006.-№7.- С.2-4.12
13. Баженов Ю.М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов [Электронный ресурс]: монография/ Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В.— Электрон. текстовые данные.— М.:

Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.—
204 с.

14. Баев, В. С. Опыт и перспективы комплексного использования золошлаковых отходов / Н. А. Машкин Технология бетонов.-2008.С.42-44.14
15. Баев, В. С. Физико-химические основы создания композиционных строительных материалов: монография / А.Б. Виноградов, М.С. Чемерис – Новосибирск.гос.аграр.ун-т «Золотой колос», 2016.с.244
16. Балюра, М. В. Некоторые результаты исследований строительных свойств золошаков // А. П. Полищук, В. В. Фурсов Расширенное использование природных ресурсов и охрана геологической среды. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1990. — С. 85—91.16
17. Бариев, Э. Р. Использование золошлаковых отходов Казанской ТЭЦ-2 в строительной промышленности / А. И. Агаева, Э.А. Королев Безопасн.жизнедеятельности.2005.-№7.-С.44-45.17
18. Бикбау, М. Я. Экология и строительство // ГиТеК. 2000. — № 4. — С. 9-11.18
19. Бирюков, В. В. Проблемы и перспективы использования золошлаковых отходов / В. В. Сиротюк, В. Р. Шевцов Вест.СибАДИ.-2008.- Вып.7.-С.7-13.19
20. Бирюков, В. В. Эффективные направления крупномасштабного использования золошлаковых отходов. Сибирский торгово-экономический журнал. С.Е. Метелев, В.В. Сиротюк, В.Р.Шевцов 2008. № 7. С. 66-70.20
21. Белякова, Ж. С. Экологические, материаловедческие и технологические аспекты применения зол ТЭС в бетоне // Е. Г. Величко, А Г. Комар Строительные материалы. 2001. — № 3. — С. 46—48.21
22. Боженков, П. И. Комплексное использование минерального сырья для производства строительных материалов. Л., Госстройиздат, 1963.22
23. Борисенко, Л. Ф. Перспективы использования золы угольных тепловых электростанции / Л.М.Делицын, А.С. Власов ЗАО «Геоинформмарк». – М., 2004. – 68 с.23

24. Брунарски, Л. Естественная радиоактивность строительных материалов // М.Кравчик Строительные материалы и конструкции. 1990. - № 5. - С. 44-46.24
25. Буравчук, Н. И. Ресурсосбережения в технологии строительных материалов/Ростов-на-Дону.2009.25
26. Буравчук, Н. И. Перспективные направления утилизации отходов добычи и сжигания углей// О. В. Гурьянова, Е. П. Огороков Материалы V Междунар.конф. «Сотрудничество для решения проблемы отходов».-Харьков, 2008. - С86-88.26
27. Бутт, Ю. М. Гидратация золы сланцев Кашпирского месторождения / Б.Г.Варшал, А.А.Майер – Строительные материалы, 1961, №2.27
28. Ватин, Н. И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве./ Д.В. Петросов Magazine of Civil Engineering. 2011. №4. С. 16-21.28
29. Вегерова, Н. В. Исследование морозостойкости, водостойкости и коррозионной стойкости арматуры в безцементном мелкозернистом золошлакобетоне / Новые строительные технологии: Сб.науч.тр. посвящ.40-летию строит.фак-та / Сиб.гос.индустр.ун-т.- Новокузнецк,2000. -С.138-140.29
30. Вегерова, Н. В. Физико-механические и деформативные свойства безцементного золошлакобетона во времени / Новые строительные технологии: сб.науч.тр.,посвящ.40-летию строит.фак-та / Сиб.гос.индустр.ун-т.- Новокузнецк, 2000.-С.145-148.30
31. Вейл, Дж. Продукты от сжигания угля в Европе – ценное сырье для строительной промышленности / Энергохозяйство за рубежом. – 2007.- №1(230).-С.248-254.31
32. Величко, Е. Г. Некоторые аспекты физикохимии и механики композитов многокомпонентных цементных систем // Ж. С. Белякова Строительные материалы. 1997. — № 2. — С. 21—25.32
33. Винокуров, С. Ф. Особенности комплексной переработки золошлаков ТЭЦ / И. В. Николаев Ресурсы.Технол.Экон..-2005.-№11.-С.2-3.33

34. Вишневский, А. А. Производство ячеистого бетона на основе золы-уноса // В. Н. Левченко Ячеистые бетоны в современном строительстве: сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. 13—15 сент. 2005. — СПб., 2005.34
35. Вишня, Б. Л. Перспективные технологии удаления, складирования и использования золошлаков ТЭС. В. М. Уфимцев, Ф. Л. Капустин.- Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2006.-С.156.35
36. Власова, В. В. Перспективы переработки техногенного сырья (на примере золошлаковых отходов ТЭС Иркутской области) / Зап.Горн.ин-та.- 2005.-С.43-45.36
37. Внуков, А. Н. Эффективные золошлакобетоны с добавками водорастворимых полимеров: автореф. дис. канд. тех. наук / Воронеж. воен. авиац. инж. инт.-Воронеж, 2005.-С.18. 37
38. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. —М.: Финансы и статистика, 1981. —с.263
39. Вознесенский, В. А. Принятие решений по статистическим моделям. А.Ф. Ковальчук—М.: Статистика, 1978. — с.192
40. Вознесенский, В. А. Современные методы оптимизации композиционных материалов/, Выровой В.Н., Керш В.Я. и др. —Киев: Буд вельник, 1983. — с. 144
41. Волженский, А. В. Применение зол и топливных шлаков в производстве строительных материалов/ А. В. Волженский, И. А. Иванов, Ю. Н. Виноградов. М.: Стройиздат, 1984. 198 с.41
42. Волженский, А. В. Технология и свойства золопесчаных бетонов. / Л.Б. Гольденберг – Обзор / ВНИИЭСМ. М., 1979. 42
43. Волженский, А. В. Мелкозернистый бетон с добавкой золы. И.Ю. Данилович, Л.Б.Гольденберг –Сб. трудов /НИИЖБ, 1978, вып.35.43
44. Волженский, А. В. Исследование процессов твердения вяжущих на основе гранулированных топливных шлаков. – Б.Н.Виноградов, К.В.Гладких Строительные материалы, 1960, №6.44

45. Волженский, А. В. Бетоны и изделия из шлаковых и зольных материалов. Ю.С.Буров, Б.Н.Виноградов, К.В. Гладких М., Стройиздат, 1969.45
46. Волженский, А. В. Безобжиговые искусственные заполнители для легких бетонов. К.В. Гольденберг, А.М.Юдина, – Строительные материалы, 1979, №7.46
47. Володько, В. П. Применение зол и шлаков тепловых электростанций в дорожном строительстве. – Киев,1974.47
48. Выровой, В. Н. Физико-химическая механика и оптимизация композиционных материалов./Т.В. Ляшенко-К.: Об-во «Знание»,1987,с.19
49. Гайворонский, С. Я. Исследование золы Фрунзенской ТЭС для изготовления зольного керамзита / И.В.Савелов, С.Г.Караханиди, Н.М.Иванова: (Тр. Фрунзенского политехнического института). – Фрунзе, 1974. –Вып.70. –с. 18-23.49
50. Ганичева, О. А. Изготовление бетонов с использованием золошлаковых отходов угольных ТЭЦ / Новые энерго- и ресурсосберегающие наукоемкие технологии в процессе строительных материалов: междунар.науч.-техн.конф., 21-22дек.2005.-С.16-18.50
51. Гиббс Дж. Термодинамика:Статистическая механика- М.:Наука,1980,с.584
52. Гольденберг, Л. Б. Производство изделий из песчаного бетона с добавками зол.Реф.инф. / М.А. Горюнов ВНИИЭСМ. М., 1980, вып. 5. Использование отходов и попутных продуктов для изготовления стройматериалов, изделий и конструкций.52
53. Гольдштейн, Л. Я. Использование топливных зол и шлаков при производстве цемента / Л. Я. Гольдштейн, Н. П. Штейерт. – Л.: СТРОЙИЗДАТ, 1977. – 152 с.: ил. – Библиогр.: С. 147-150.53
54. Гольдштейн, Л. Я. Использование золы в качестве активной минеральной добавки/ В.П. Манцурова./ (Тр. ГИПРОЦЕМЕНТА). –М: Стройиздат, 1971. –Вып. 39, -с. 26-27.54

55. Гольдштейн, Л. Я. Методы определения активности минеральных добавок к цементам / Г.Ф. Ермакова Цемент. –1998. – № 12.55
56. Гончарова, Л. В. Техногенные отходы ТЭС, их многообразие и возможности использования / Многообразие грунтов: морфология, причины, следствия: тр.международ.науч.конф.,Москва, 27-28мая 2003.-МГУ,2003.-С-113-114.56
57. Гончарова, М. А. Применение принципов нанотехнологии при получении композиционных шлаковых строительных материалов / Науч.вест.Воронеж.ГАСУ.-2008.-№3(11).-С.61-66.57
58. ГОСТ 1. 310.1-76. Цементы. Методы испытаний. Общие положения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 6 с.58
59. ГОСТ 24640-91 Добавки для цементов. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 25 с.59
60. ГОСТ 7.1-2003 Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования.60
61. ГОСТ 7.59-2003 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила.61
62. ГОСТ Р 57789-2017. Зола, шлаки и золошлаковые смеси ТЭС для производства искусственных пористых заполнителей. Технические условия – Введ. 2017-10-12. - Москва: Стандартинформ, 2017. - III, 7 с
63. Горбунов, С. П. Оптимизация составов тяжелых бетонов применением тонкодисперсных добавок. Вестник ЮУрГУ. 2012. №17. С. 30-35.63
64. Горчаков, Г. И. Использование золы гидроудаления в бетоне. Э. Г. Мурадов, Н.А.Сканави –Бетон и железобетон, 1976,№9.64
65. Гужелев, Э. П. Рациональное применение золы ТЭЦ: Результаты научно-практических исследований. / Ю. Т.Усманский / — Омск: Омский гос. ун-т, 1998. — 238 с.65
66. Данилович, И. Ю. Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов / М.:Высш.шк.,1988.72с.66

67. Данилович, И. Ю. Использование зол и золошлаковой смесей в тяжелых и облегченных бетонах / Сб.матер.акад.чтения «Развитие теории и технологий в области силикатных и гипсовых материалов» и 3 Традиц.науч.-практ.кнф.мол.ученых, асп. И докторантов «Строительство – ормирование среды жизнедеятельности» М.:МНСУ, 2000.-С.87-89.67
68. Дарманская, Т. А. Утилизация зольных отходов / Экол.пром-сть России.-2010.-Янв.-С-39-41.68
69. Дворкин, Л. И. Снижение расхода цемента и топлива в производстве сборного железобетона. -К.:Вища шк., 1985.- 99 с.69
70. Дворкин, Л. И. Эффективность цементов с минеральными добавками в бетонах. // О.Л. Дворкин Цемент и его применение. - С.-Петербург: №2, 2002. - С. 41-43.70
71. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из промышленных отходов: Учеб. пособие для вузов. / И. А. Пашков–Киев: Выш. школа. Головное изд-во,1980. -144с.71
72. Дворкин, Л. И. Золосодержащие вяжущие низкой водопотребности и бетоны на их основе. Технологии бетонов. / Ю.В.Гарницкий, В.В. Марчук 2012. № 5-6. С. 24-27.72
73. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности: учебное справочное пособие [Текст] / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. Ростов н/Д.: Феникс, 2007. 363 с.73
74. Дворкин, Л. И. Физико-механические свойства активированных цементно-зольных вяжущих [Текст] / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин // Технологии бетонов. 2010. № 11-12. С. 35-37.74
75. Джусупова, М. А. Особенности получения композиционного цементнозольного вяжущего// Кульшикова С.Т. В сборнике: The Europe and the Turkic World: Science, Engineering and Technology Materials of the II international scientific-practific conference.2017.С.175-181.75
76. Джусупова, М. А. Композиционные вяжущие с использованием топливных шлаков // Кульшикова С.Т. Международная научно-практическая

- конференция Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Научные исследования в деталях».2017.С.10-17.76
77. Джусупова, М. А. Композиционные вяжущие на основе отходов // Кульшикова С.Т. Актуальная наука.2017.№5 (5).С.10-15.77
78. Джусупова, М. А. Получение мелкозернистого бетона с использованием золы гидроудаления // Кульшикова С.Т. Вестник КГУСТА.2018.№4(63).78
79. Делицын, Л. М. Комплексное использование углей ТЭС // А. С. Власов Экология и промышленность России. 2002. — № 8. — С. 37—39.79
80. Деницын, Л. М. Необходимость новых подходов к использованию золы угольных ТЭС / А. С. Власов.-2010.-№4.-С.49-55.80
81. Делицын, Л. М. Возможные технологии утилизации золы / Ю. В.Рябов, А. С.Власов Энергосбережение. М., 2014. № 2. С. 60-66.81
82. Диамант, М. И. Свойства высокопрочного мелкозернистого бетона на гранулированном доменном шлаке / Н.И.Федынин. Известия вузов. Серия «Строительства и архитектура», № 7, 1972.82
83. Еременко, Е. В. Опыт Каширской ГРЭС по решению проблемы утилизации золошлаков / Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование:материалы 3международ.науч.-практ.семинара, М.:2010.-С.43-44.83
84. Ефременко, А. С. применение золошлаковых отходов ТЭС при производстве высокопрочных легких бетонов// Е.П.Халтаева Вестник ИрГТУ. 2014. №8 (91). С.86-89.84
85. Жабо, В. В. Использование золошлаков тепловых электростанций в строительной индустрии / Экол.пр-ва.-2007.-№3.прилож.Энергетики.-С.10-12.85
86. Зайченко, Н. М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны с модифицированными минеральными добавками из золошлаковых отходов Углегорской ТЭС // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА / Ежегодный научно-технический сборник. Донецк ПромстройНИИпроект, 2007. – С. 145-151.86

87. Золосиликатный кирпич: Информационный листок: № 112(442а). – Фрунзе: КиргизНИИНТИ, 1989. –205с.87
88. Зольников, Г. С. Использование отходов промышленности в производстве строительных материалов за рубежом. Обзор. информ. –М.: 1987.
89. Зоткин, А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне // Бетон и железобетон. 1994. №3. С. 7-9.89
90. Зоткин, А. Г. Назначения составов бетона с золой // Р.Ф.Балтаков Бетон и железобетон, -1988-№1,- С 31-33.90
91. Иванов, И. А. Легкие бетоны на основе зол электростанций.М.1972.91
92. Использование промышленных отходов КМА в производстве строительных материалов / В.С. Лесовик: ВНИИЭСМ, 1987.92
93. Использование зол ТЭС в производстве строительных материалов. Обзор.информ. М.: 1983.93
94. Ильичев, В. А. О развитии производства строительных материалов на основе вторичных продуктов промышленности [Текст] / В. А. Ильичев, Н.И.Карпенко, В. Н. Ярмаковский // Строительные материалы. 2011. №4. С. 36-42.94
95. Ковалёва, А. М. Порядок проведения контроля в строительстве // А. С. Семёнов, Ю. А. Ряховский. ИТпортал, 2016. №1 (9). URL: <http://itportal.ru/science/economy/poryadok-provedeniya-kontrolya-v-st/>
96. Казанский, В. М. Использование зол ТЭЦ с повышенным содержанием несгоревшего топлива / З.С. Красильников и др. см 1989, -№3. – С.14-15.96
97. Калашников, В. И. Терминология науки о бетоне нового поколения. Строительные материалы. 2011. № 3. С. 103–106.
98. Калашников, В. И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения. Бетон и железобетон. 2012. № 1. С. 82. 4. Калашников, В. И. Основные принципы создания высокопрочных и особовысокопрочных бетонов. Популярное бетоноведение.

2008. № 3. С. 102. 5. Калашников В. И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения. Строительные материалы. 2012. № 10. С. 70–71.
99. Калашников, В. И. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей. / О. В.Тараканов , Ю. С.Кузнецов , В. М.Володин , Е. А.Белякова Инженерно-строительный журнал. 2012. № 8 (34). С. 47–53.
100. Капленко, О. А. Современная универсальная добавка ЖККА // Т Технические науки – от теории к практике: сборник статей по материалам XXIX международной научн.-практ. конф. – Новосибирск: Изд-во: «СибАК», 2013. –№ 12 (25). – С. 119–126.100
101. Караханиди, С. Г. Использование природных сырьевых материалов и попутных продуктов промышленности в производстве строительных материалов. – Фрунзе: Киргиз НИИНТИ,1990. -56с.101
102. Качаев, Г. В. Экологическая оценка искусственных смесей, созданных на основе золошлаков Березовской ГРЭС-1 и рекомендуемых для восстановления природных экосистем. Вестник Красноярского государственного аграрного университета. Г.А.Демиденко, Н.В.Фомина 2011. № 9. С. 161-16.102
103. Козлова, В. К. Использование зол тепловых электростанций в производстве строительных материалов. – Барнаул,1975.103
104. Кокубу, М. Зола и зольные цементы. – В кн.: Труды У Международного конгресса по химии цемента. М.,1972. С. 405-416.104
105. Кокубу, М. Цемент с добавкой золы –уноса. / Д. Ямада–В кн.: УI Международного конгресса по химии цемента. Т.Ш. М.,1976.105
106. Кучеров, Г. С. Композиционные вяжущие с минеральными добавками различного генезиса и бетоны на их основе: автореф.дисс. на соискание ученой степени канд.тех.наук:/Белгород,2011.106

107. Кульшикова, С. Т. Оценка влияния золошлаковой смеси на основные свойства композиционного вяжущего. Электронный периодический рецензируемый журнал «SCI-ARTICLE.RU».2018.№56апрель.С.25-29.107
108. Кульшикова, С. Т. Оптимизация рецептурно-технологических факторов вяжущего с использованием золы гидроудаления Бишкекской ТЭС республики Кыргызстан. Актуальные вопросы науки. 2018.№41.С.188-193.108
109. Кульшикова, С. Т. Композиционные вяжущие с использованием золошлаковых отходов. Актуальная наука.2018.№9(14).С.9-14.109
110. Кульшикова, С. Т. Особенности гидратации золоцементных веществ. Сборник материалов Совместной Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективности в строительстве».2018.С189-193.110
111. Кульшикова, С. Т. Эффективное использование топливных шлаков ТЭС в мелкозернистых бетонах Colloquium-journal 2019№2(26) С.33-35.111
112. Корнилов, А. В. Комплексная технология оценки минерально-строительного сырья // Т.З.Лыгина Строительные материалы. 2005.-№12.- С.78-79.112
113. Овчинников, Р. В. Модификация портландцемента золошлаковыми отходами. Новые технологии. / А.Г.Авакян 2014. №2. С. 1-7.113
114. Овчинников, Р. В. Модификация структуры цементных бетонов наполнителями из золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС: дис.на соискание ученой степени канд.тех.наук/Новочеркасск.2014.113
115. Ларионова, З. М. Формирование структуры цементного камня и бетона. М., Стройиздат. 1971.115
116. Любимова, Т. Ю. О свойствах контактной зоны на границе между вяжущим и заполнителем в бетоне / Э. Р. Пинус–В кн.: Коррозия железобетона и методы защиты. М., Госстройиздат, 1962.116
117. Макаренко, С. В. Влияние зол-уноса и золошлаковых смесей ТЭС ОАО «Иркутскэнерго» на свойства цемента. Известия Казанского

- государственного архитектурно-строительного университета. / Д.И. Баишев, О.В. Хохряков, В.Г. Хозин 2014. № 4. С. 278-283.117
118. Мелентьев, В. А. Гидрозолоудаления и золоотвалы./ Е.З.Нагли – Л.,1968.118
119. Мириев, И. И. Технология и свойства высокопрочных мелкозернистых бетонов. Баку, Азербайджанское гос. изд-во, 1961.119
120. Мороз, М. Н. Эффективные бетоны нового поколения с низким удельным расходом цемента на единицу прочности / В. И.Калашников, И. В. Ерофеева Молодой ученый. — 2015. — №6. — С. 189-191
121. Мчедлов-Петросян, О. П. О физико-химических основах бетона / О.П. Мчедлов-Петросян, А.Г. Бунакова, Ю.А. Воробьев. Сб.трудов ХИИТа.1962.вып.54 с.215
122. Нгуен Тиен Хоа Высококачественный бетон с использованием золы рисовой шелухи в условиях жаркого влажного климата Вьетнама. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский государственный строительный университет. Москва, 2005. – 171с.122
123. Нгуен, Т. Т. Научно-технические предпосылки разработки огнестойкого и водостойкого неавтоклавного газобетона для условий Вьетнама. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета / Д.В. Орешкин 2014. № 5 (46). С. 117-125.123
124. Пантелеев, В. Г. Состав и свойства золы и шлака ТЭС : справ. пособие / В. Г. Пантелеев, Э. А. Ларина, В. А. Мелентьев и др.; под ред. В. А. Мелентьева. - Ленинград: Энергоатомиздат, 1985. – с. 285
125. Партуга, Д. С. Рациональное использование золошлаковых отходов в строительных материалах / В.А. Тютюнов В сборнике: Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ». 2013. С. 79-82.125.

126. Петров, В. П. Пористые заполнители из шлаков тепловых электростанций для однослойных стеновых панелей // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2002.-№9.-С.14-15.126
127. Пат.2526072 Российская Федерация, МПК С04/В40/00(2006.01). Способ приготовления золобетонной смеси/Авакян А.Г., Маслов П.С., Овчинников Р. В., Шавлов В.П.; Новочеркасский политехнический институт. - 2013.бюл.№23.127
128. Пат.2553817 Российская Федерация, МПК С04В 28/26 (2006.01) Сырьевая смесь для приготовления золошлакового бетона/Русина В.В., Корда Е.В., Громова А.Н., Корнеев Д.Н.-2015.бюл.№17.128
129. Применение золошлаковых отходов в строительстве. Рабинович Р. И., Тахтович Е. В. Обзор. –М.: ВНИИТПИ, 1990.129
130. Прошин, А. П. Особо тяжелый высокопрочный бетон на основе вторичного сырья // В. С. Демьянова, Д. В. Калашников Экология и промышленность России. 2003. — № 8. — С. 8—9.130
131. Применение металлургических шлаков и зол электростанций в строительстве. Под ред. Н.И. Федынина. Кемеровское книжное изд-во, 1970.131
132. Пугин, К. Г. Строительство автомобильных дорог с использованием техногенных материалов. / В.С. Юшков Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2011. № 1. С. 35-43.132
133. Путилов, В. Я. Основные барьеры на пути эффективного решения проблемы обращения с золошлаками энергетики. / И.В.Путилова, Е.А.Маликова. Вестник МЭИ. 2013. № 1. С. 16-23.133
134. Радомский, С. М. Экологические проблемы золошлакоотвала Благовещенской ТЭЦ // А Ф. Миронюк, В. И. Радомская и др. Экология и промышленность России. 2004. — № 3. — С. 7—9.134
135. Райхель В. Бетон: в 2-х ч. Ч.1 Свойства. Проектирование. Испытание. [пер. с нем. О. П. Мчедлов-петросян. Под ред. В. Б. Ратионова] / В. Райхель, Д. Конрад. М.: Стройиздат, 1979. с.111

136. Ратинов, В. Б. Химическая стойкость цементного камня, цементно-песчаного раствора и бетона на шлакопортландцементях в кислых средах. / В.Д. Миронов Сб. трудов ВНИИСТРОМ, №16 (44). М., Стройиздат, 1969.136
137. Ращупкина, М. А. Применение золы гидроудаления Омских ТЭЦ в технологии бетона / А Ф.Косач, В. А. Попов // Строительные материалы.2005.- № 10. - С. 17-20.137
138. Ребиндер, П. А. – В кн.: Физико – химическая механика дисперсных структур. М., « Наука», 1966.138
139. Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций/ НИИЖБ. – М.: Стройиздат. 1986. -80с.139
140. Рояк, С. М. Специальные цементы. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Стройиздат, 1983. С. 236-252.140
141. Савелов, И. В. Использование зол гидроудаления в строительстве и производстве строительных материалов Киргизии: Обзорная информация. / С.Г. Караханиди, Н.М. Иванова – Фрунзе, КиргизНИИНТИ, 1976. – с. 1-44.141
142. Соломатов, В. И. Новый подход к проблеме утилизации отходов в стройиндустрии // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2000. - № 1. - С. 28-29.142
143. Соломатов, В. И. Особенности формирования свойств цементных композиций при различной дисперсности цементов и наполнителей // О. В. Кононова Строительство и архитектура. Сер. Изв. вузов. 1991. №8. С. 50-53.143
144. Соломатов, В. И. Интенсивная технология бетонов – /М.К.Тахиров, Шах Мд.Тахер - М.:Стройиздат,1989,с.254
145. Суздальцев, О. В. терминологии защитно-отделочных и архитектурно-декоративных бетонов нового поколения. / Р. А. Дрянин, В. И.Калашников Новый университет. Серия: Технические науки. 2014. № 5–6 (27–28). С. 43–46.
146. Сычев, М. М. Образование межзерновых контактов при твердении вяжущих систем/Химия и технология вяжущих веществ.Сб.тр.-Л.,1975, с.3-13

147. Термический анализ минералов и горных пород / М-во геологии СССР. Всесоюз. науч.-исслед. геол. ин-т "ВСЕГЕИ". - Ленинград: Недра, 1974. – с. 399
148. Толыпина, Н. М. К вопросу о взаимодействии цементной матрицы с заполнителями / Современные наукоемкие технологии. – 2016. – № 6-1. – С. 81-85.148
149. Чан Тхи Тху Ха, Цементный бетон на карбонатном заполнителе и кремнеземсодержащих наполнителях : для условий Вьетнама : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.23.05. — Москва, 2006. — 203 с.149
150. Черепанов, А. А. Комплексная переработка золошлаковых отходов ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) / А. А. Черепанов, В. Т. Кардаш / Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2009. № 2. С. 98-115.150
151. Чистяков, Б. З. Использование отходов промышленности в строительстве. Лениздат, 1977.151
152. Чулкова, И. Л. Эффективность использования золы при производстве железобетонных конструкций. С.М. Кузнецов Механизация строительства. 2009. № 7. С. 15-18.152
153. Федьнин, Н. И. Изготовление высокопрочного мелкозернистого шлакобетона / Г.И. Кинекстуль, М.И. Диамант, Ю.М.. Седельницкий Кемеровское книжное изд-во, 1971.153
154. Ферронская, А. Б. Производства и применение изделий из ГЦПВ в сельском строительстве Киргизской ССР: Обзорная информация. В.Ф. Коровяков, С.В. Лукьянов, Л.С. Креймер–Фрунзе, 1973. с.15-28.154
155. Фисенко, В. А. Определение и классификация / В.А. Фисенко. Химически е и минеральные добавки в бетон. Хартков. «Колорит», 2005.№5 С.52-56
156. Флоров, Ю. Г. Курс коллоидной химии: поверхностные явления и дисперсные системы – М.:Химия,1988.с.464

157. Урьев, Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы.- М.:Химия, 1980. с.320
158. Уфимцев, В. М. Получение попутной минеральной продукции на проблемы обращения с золошлаками энергетики / В.Я.Путилов, И.В. Путилова, Е.А. Маликова. Вестник МЭИ,2013 №1.с.7-9
159. Уфимцев, В. М. Шлаки в составе бетона: новые возможности. / Л.А. Коробейников Технологии бетонов. 2013. № 1 (78). С. 46-49.159
160. Шестоперов, С. В. Долговечность бетона. М., Авторанс–издат, 1954.160
161. Шоева, Т. Е. Мелкозернистые бетоны с использованием механоактивированных зол. Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук. Новосибирск .2012
162. Щигельски, Т. Влияние новых технологий сжигания угля на типы и свойства золошлаков / Хыцнар Я. Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование: материалы 3 междунар. науч.-практ. семинара, Москва, 22-23 апр. 2010. - М.: МЭИ, 2010. - С.33-37
163. Штефан, Ю. В. Повышение плотности асфальтобетонов на шлаковых заполнителях / Б.А. Бондарев Науч. вестн. Воронеж. ГАСУ. - 2004. - Вып.2. - С.150-153
164. Шульце, С. Е. Влияние химического состава золы-уноса на её реакционную способность / С.Е. Шульце, Й.Рикерт. Цемент и его применение , 2012.№1. с.170-175
165. Энхжаргал, Х. ТЭС на угле как энергопромагрокомплекс. Утилизация золошлаковых отходов / Батмунх С., Саломатов В.В. Энергетика и теплотехника: сб. науч. тр. Вып.15. - Новосибирск: НГТУ, 2010. - С.183-192
166. Экологические аспекты и проблемы утилизации и рециклинга золошлаковых отходов тепловых электростанций / Ефимов Н.Н., Яценко Е.А., Смолий В.А. и др. // Экология пром. пр-ва. - 2011. - N 2. - С.40-44
167. Элинзон, М. П. Шлаки. М., Госстройиздат, 1959.167

168. Элинзон, М. П. Топливо содержащие отходы промышленности в производстве строительных материалов / С.Г. Васильков–М.,1962.168
169. Эмдин, С. В. Опыт утилизации золошлаковых материалов ОАО "Иркутскэнерго" / Жабо В.В., Целыковский Ю.К. Энергетик. - 2006. - N 9. - С.11-13
170. Энтин, Э. Б. Зола ТЭС - сырье для цемента и бетона [Текст] / Э. Б. Энтин, Л. С. Нефедова, Н. В. Стржалковская // Цемент и его применение. 2012. №2. С. 40-46.170
171. Энтин, Э. Б. Еще раз о золах - уносе ТЭС для производства цемента / Стржалковская Н. Цемент и его применение. - 2009. - N 2. - С.106-111
172. Эффективное использование твердого топлива и переработка золошлаковых отходов ТЭС с применением нанотехнологий / Ефимов Н.Н., Косарев А.С., Яценко Е.А. и др. // Альтернатив. энерг. и экол. - 2010. - N 3. - С.93-102
173. Янковский, Л. В. Рентгено- и дифференциально-термический анализ цементобетонных конструкций после тепловлажной обработки / Л.В. Янковский / Интернет-журнал «Науковедение».2012.№4.С.1-9
174. Ярмолинская, Н. И. Обоснование целесообразности модификации молекулярно-поверхностных свойств минеральных порошков из отходов дальневосточных ТЭС / Парфенов А.А., Лазарева Т.Л. Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: междунар. сб. науч. тр. - Хабаровск: ТОГУ, 2009. - N 9. - С.373-377
175. <http://dx.doi.org/10.5402/2011/310742>.
176. http://www.ruffnews.ru/novocherkassk/Shlakovye-othody-Novocherkasskoy-GRES-nekuda-budet-devat-uzhe-cherez-2-goda_25757.
177. <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35983> (дата обращения: 20.12.2018).
178. <http://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/rocktrons-profit-buildinglow-co2-concrete>

179. Aitcin, P. C. High-Performance Concrete [Text] I P.-C. Ai'tcin. - An Imprint of Routledge London and New York. : E & FN SPON. 1998. 591 p.
180. Bellmann, F. Activation of blast furnace slag by a new method [Text] I F. Bellmann, J. Stark II Cement and Concrete Research. 2009. Vol. 39. Iss. 8 - pp. 644-655.
181. Badogiannis, E. Metakaolin as supplementary cementitious material – Optimization of kaolin to metakaolin conversion / E. Badogiannis, G. Kakali, S. Tsvivilis // J. Therm. Anal. Calorim. – 2005. – № 81. – P. 457–462.
182. Canadian J. of Civil Engineering. -1987. –Va:14. №5.667- 682.
183. Cement Concrete persearch -1989 –Vol. 18, №16,p. 852-862.
184. Chao, Li A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+Al) cements [Text] I Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li [Text] II Cement and Concrete Research. 2010. Vol. 40 - pp. 1341-1349.
185. Chaunsali, P. Novel Cementitious Binder Incorporating Cement Kiln Dust: Strength and Durability [Text] I P. Chaunsali, S. Peethamparan II ACI Journal Search. 2013. Vol. 110. Iss. 3 -pp. 297-304.
186. Concrete Flant and Production. -1985. –Va. 3 №8. –p. 311-312.
187. Ilich, B.R. Termal Treatment of Kaolin Clay to Obtain Metakaolin / B.R. Ilich, A.A. Mitrovich, L.R. Milichch // Chem. ind. – 2010. – № 64 (4). – P. 351–356.
188. Haha, M. B. Quantification of the degree of reaction of fly ash I M. Ben Haha, K. De Weerdt, B. Lothenbach II Cement and Concrete Research. 2009. Vol. 40. Iss. 11 -pp. 1620-1629.
189. Gutteridge W.A. Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement: Part 1. A fine non-hydraulic / W.A. Gutteridge, J.A. Dilziel.1990.pp.778-782
190. Kostuch, J.A. High performance concrete incorporating metakaolin – a review / J.A. Kostuch, G.V. Walters, T.R. Jones // Concrete 2000. – 1993. – № 2. – P. 1799–811.

191. Properties of blended cements with thermally activated kaolin / M. Arikan, K. Sobolev, T. Ertun, A. Yeginobali, P. Turker // *Constr. Build. Mater.* – 2009. – № 23. – P. 62–70.
192. Rahier, H. Influence of the degree of dehydroxylation of kaolinite on the properties of aluminosilicate glasses / H. Rahier, B. Wullaert, B. Van Mele // *J. Therm. Anal. Calorim.* – 2000. – № 62. – P. 417–427.
193. Sement – Kalk – Cips, -1985. –S.374-378.
194. Shehata M.H. Long-term durability of blended cement against sulfate attack / M.H. Shehata, G. Adhikari, Sh. Radomski. *ACI Materials Journal*.2008.pp.594-602
195. S. P. Guleria and R. K. Dutta, “Effect of addition of tirechips on the unconfined compressive strength of fly ash-limegypsum mixture,” *Journal of Materials in Civil Engineering*. In press.
196. S. P. Guleria and R. K. Dutta, “Tensile strength of fly ash- lime-gypsum composite mixed with treated tyre chips,” *International Journal of Geotechnics and Environment*, vol. 2, no. 2, pp. 71–87, 2010.
197. Stanton T.E. Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate . *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*.-1940. №66.pp.1781-1811
198. Thomas M.D. 50years and still going strong: flyash puts paid to ASR / D.A. Thomas, R.D. Hooton, C. Rogers, B. Fournier / *Concrete International*. 2012.pp.35-40,
199. Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity / G. Kakali, T. Perraki, S. Tsivilis, E. Badogiannis // *Appl. Clay Sci.* – 2001. – № 20. – P. 73–80.
200. The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite / A. Shvarzman, K. Kovler, G.S. Grader, G.E. Shter // *Cem. Concr. Res.* – 2003. – № 33. – P. 405–416.
201. Сигитова И.С. Оценка эффективности и классификация минеральных добавок к цементам и бетонам // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 11-6. – С. 1109-1113.

202. Баженов Ю.М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов [Электронный ресурс]: монография/ Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В.— Электрон. текстовые данные.— М.: Московский государственный строительный университет, ЭБС АСВ, 2013.— 204 с.
203. Каушанский В.Е., Боженова О.Ю., Трубицин А.С. Влияние термообработки шлаковой составляющей портландцемента на его активность // Цемент и его применение. 2001. № 3. С. 25–26.
204. Низина Т.А., Селяев В.П., Балыков А.С., Володин В.В., Коровкин Д.И. Оптимизация составов многокомпонентных мелкозернистых фибробетонов, модифицированных на различных масштабных уровнях // Нанотехнологии в строительстве: науч. интернет-журн. 2017. Т. 9, № 2. С. 43–65.
205. Пунагин В.В. Свойства и технология бетона для высотного монолитного строительства // Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури. 2009. № 1(78). С. 122–127.
206. Durdziński P.T., Ben Naha M., Zajac M., Scrivener K.L. Phase assemblage of composite cements. Cement and Concrete Research, 2017.
207. Fediuk R.S. Mechanical Activation of Construction Binder Materials by Various Mills. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016(125):1. P. 012019.
208. Волженский А.В., Гольдберг Л.Б. Технология и свойства золопесчаных бетонов. - М.: ВНИИЭСМ, 1979. - С. 36.
209. Ахвердов И.Н. Теоретические основы бетоноведения: Уч. пособие. - М.: Стройиздат, 1991. — С. 268.
210. Ильина Л. В. Повышение эксплуатационных характеристик строительных материалов на основе цемента длительного хранения: Автореферат на соиск. ученой степени докт. техн. наук/ Л. В. Ильина - Новосибирский госуд. архитектурно-строительный универ. (Сибстрин), 2011.

211. Баженов, Ю.М. Технология бетонов XXI века / Ю.М. Баженов // Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2005. С.9-19.
212. Bulsari, A. Нелинейные модели удобоукладываемости и прочности на сжатие помогают снизить затраты / A. Bulsari, H. Kylvametsa, K. Juvas // CPI – Международное бетонное производство. 2009. №6. С.26-32.
213. Джусупова М.А., Талантбек кызы А. Оптимизация зерновых составов бетонов с использованием компьютерного моделирования. Вестник КГУСТА им. Н. Исанова Вып.2(60).2018г.
214. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Тахер Шах Мд. Интенсивная технология бетонов. –М.: Стройиздат, 1989. -254с.
215. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов // Учебник. М. Изд-во АСВ. 2011. 528 с.
216. Современные методы оптимизации композиционных материалов/ Вознесенский В.А., Выровой В.Н., Керш В.Я. и др. –Киев: Буд вельник, 1983. - 144 с.
217. Global aspects on Coal Combustion Products // Coaltrans Conferences URL: <https://www.coaltrans.com/insights/article/global-aspectson-coal-combustion-products>.
218. A. Abdykalykov, N. Antoniuk and A. Talantbek Kyzy Ensuring Strength of Fine Grained Concrete with Mixed Cement Binders. Actual Problems of Engineering Mechanics: Materials Science and Technologies Selected peerreviewed papers from the 7th International Conference "Actual Problems of Engineering Mechanics"(АРЕМ-2020) 13 May, Odesa, Ukraine.
219. Бекболот кызы Б. Физико-химические основы переработки рисовой шелухи. Автореф. дисс. ...канд. хим. наук: 02.00.01/ Бекболот кызы Бактыгул; Национальная академия наук КР, - Бишкек, 2018. – с 13: ил. – Библиогр.: с. 13.

220. Исследование применения золы рисовой шелухи взамен кремнезема при разработке высокопрочного бетона и раствора// Окончательный доклад научных исследований. Ханой. - 4-2003. - 54 с.
221. Пичугин Е. А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов тепловых электростанций // Проблемы региональной экологии, 2019. №. 4.
222. Зоткин А.Г. Бетоны с эффективными добавками.- М.: Инфра – Инженерия, 2014. – 160 с.
223. Ляшенко Т.В. Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017.
224. **Environmental Benefits // Ash Development Association of Australia.** – URL: <http://www.adaa.asn.au/resource-utilisation/environmental-benefits> (дата обращения: 13.02.2020).
225. Белов, В.В. Формирование оптимальной структуры композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Вестник центрального регионального отделения РААСН. Воронеж. ВГАСУ. 2010. С.65-72.
226. Белов, В.В. Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси / В.В. Белов, М.А. Смирнов // Строительные материалы. 2009. № 9. С.88-90.
227. Нелинейные модели помогают сократить расход цемента путем улучшения уплотнения заполнителей // СРІ – Международное бетонное производство, 2008. №4. С.28-35.
228. Bulsari, A. Нелинейные модели удобоукладываемости и прочности на сжатие помогают снизить затраты / A. Bulsari, H. Kylmametsa, K. Juvas // СРІ – Международное бетонное производство. 2009. №6. С.26-32.
229. Белов, В.В. Пат. 201610796. Российская Федерация. Программа для моделирования хаотичной упаковки 2х-фракционной смеси гранул / В.В. Белов, И.В. Образцов, А.Г. Реунов // зарегистрировано 25.01.10 г.

230. Волошин, В.П. Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых упаковок сферических частиц / В.П. Волошин, Н.Н. Медведев, В.Б. Фенелонов, В.Н. Парман // Журнал структурной химии. 1999. Т.40. № 4. С.46-60.
231. Волошин, В.П. Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых упаковок сферических частиц/ В.П. Волошин, Н.Н. Медведев, В.Б. Фенелонов, В.Н. Парман // Журнал структурной химии. 1999. Т. 40. № 4. С.46-60.
232. Гусев, Б.В. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния / Б.В. Гусев и др. // Научный Интернет-журнал «На-нотехнологии в строительстве». 2009. № 3. С.8-14.
233. Свидерский, В.А. Влияние гранулометрических параметров наполнителя на структуру композиционного материала / В.А. Свидерский, А.В. Миронюк. Сухие строительные смеси. 2008. № 4. С.46-48.
234. Беленцов, Ю.А. Формирование оптимального гранулометрического состава заполнителя растворов / Ю.А. Беленцов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 9. С.36-37.
235. Белов, В.В. Патент 2010617267 Российская Федерация. Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя строительного композита / В.В. Белов, И.В. Образцов // зарегистрировано 29.10.10 г.
236. Земнухова Л.А. Исследование условий получения, состава примесей и свойств аморфного диоксида кремния из отходов производства риса [Текст] / Л.А. Земнухова, Г.А. Федорищева, А.Г. Егоров, В.И. Сергиенко // Журнал прикладной химии. 2005. Т. 78. - Вып. 2. С. 324–328.
237. А.А. Черепанов, В.Т. Кардаш, КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ ТЭЦ (результаты лабораторных и полупромышленных испытаний) ISSN 19997566. Геология и полезные ископаемые Мирового океана, 2009, №2. – С. 98-115.

238. GCCA, 2021: GNR – GCCA in Numbers.
<https://gccassociation.org/sustainabilityinnovation/gnrgcca-in-numbers/> Accessed
August 27, 2021.