

ВЛИЯНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ЦЕМЕНТОВ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

А.А. Акрамов

Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

В работе исследовано влияние состава и granulometрии минеральных добавок на прочностные характеристики четырёхкомпонентных цементных систем с 50 % замещения клинкера. Проанализированы свойства золы-уноса Душанбинской ТЭЦ-2, доменного шлака и известняков месторождений Пусиён и Харангон - в том числе их фазовый состав, плотность, удельная поверхность и распределение частиц по размерам. Изучено взаимодействие компонентов в многокомпонентных вяжущих: показано, что зола-унос замедляет ранний набор прочности, а тонкомолотый известняк выступает катализатором твердения на начальных этапах, при этом совместное применение добавок позволяет реализовать синергетический эффект. Определены закономерности изменения водопотребности цементных смесей: установлено, что рост доли золы-уноса снижает суммарную удельную поверхность системы, но повышает водопотребность из-за угловатой формы частиц и открытой пористости. Выявлено, что динамика прочности при сжатии существенно зависит от сроков твердения и соотношения компонентов: на ранних этапах (1–2 суток) преимущество имеют составы с повышенным содержанием известняка, а в поздние сроки (28–56 суток) ключевую роль играет зольный компонент, особенно в смесях с 20 % шлака. Сформированы оптимизированные granulометрические составы вяжущих за счёт селективного помола компонентов: доменный шлак доводили до сверхтонкого помола (8000 см²/г), известняк ограничивали 20 минутами помола для сохранения грубой фракции, золу-унос использовали без дополнительной обработки. Представлены результаты механических испытаний: в оптимизированных составах к 28 суткам прочность при сжатии достигала 45–52 МПа (для 20 % шлака) и порядка 54 МПа (для 30 % шлака), что свидетельствует о приросте прочности на 10–18 % по сравнению с исходными образцами. Установлено, что предложенный подход позволяет сохранить нормальную плотность цементного теста на исходном уровне (27,5–29,5 %) при значительном повышении прочностных показателей. Обоснована роль поровой структуры в эксплуатационных свойствах бетона: по данным ртутной порометрии, во всех оптимизированных составах наблюдается низкая капиллярная пористость с пиком распределения в районе 0,5 мкм, а при высокой доле золы максимум смещается в область более мелких пор. Результаты демонстрируют потенциал регулирования фракционного состава минеральных добавок для повышения эффективности многокомпонентных цементов, хотя промышленная реализация сверхтонкого помола шлака на текущем этапе остаётся экономически нецелесообразной.

Ключевые слова: композиционные цементы, клинкер, шлак, зола-унос, известняк, прочность, удельная поверхность.

ТАЪСИРИ СЕМЕНТҲОИ ЧОРҶУЗЪА (ЧОРКОМПОНЕНТА) БА ХОСИЯТҲОИ ФИЗИКИЮ МЕХАНИКИ БЕТОН

А.А. Акрамов

Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

Корҳо оид ба оптимизатсияи афзоиши устувории маводҳои пайвастандаи омехта, ки аз чор ҷузъ: клинкери портландсементӣ (50 %), шлаки домнагӣ, хокистар-кул (зола-унос) ва орди оҳаксанг иборатанд, гузаронида шуданд. Таваассути танзими таркиби донагии маводҳои ибтидоӣ ба беҳтар намудани нишондиҳандаҳои устуворӣ даст ёфта шуд. Натиҷаҳои беҳтарин дар таркибҳои дорои 30 фоиз шлак ба қайд гирифта шудаанд, ки дар онҳо афзоиши устуворӣ дар шабонарӯзи 28-ум то 18 %-ро ташкил дод ва ин аз нишондиҳандаҳои намунаҳои дорои 20 % шлак болотар аст. Бо вучуди ин, усули пешниҳодшудаи оптимизатсия ҳоло хусусияти назариявӣ (гипотетикӣ) дорад, зеро ба даст овардани шлаки ниҳоят майда (баланддисперсӣ) бо усулҳои муосири суфтакунӣ ва сепаратсия аз ҷиҳати иқтисодӣ номувофиқ дониста шуд.

Калидвожаҳо: сементҳои композитсионӣ, клинкер, шлак, хокистар-кул, оҳаксанг, устуворӣ, сатҳи хос.

EFFECTS OF QUATERNARY CEMENTS ON THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

А.А. Akramov

Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

This paper examines the influence of the composition and granulometry of mineral additives on the strength properties of four-component cement systems with 50% clinker substitution. The properties of fly ash from Dushanbe CHPP-2, blast furnace slag, and limestone from the Pusiyeon and Kharangon deposits were analyzed, including their phase composition, density, specific surface area, and particle size distribution. The interactions between components in multicomponent binders were studied: it was shown that fly ash slows early strength gain, while finely ground limestone acts as a catalyst for hardening in the initial stages. The combined use of additives enables a synergistic effect. Patterns in changes in the water demand of cement mixtures were determined: it was found that an increase in the proportion of fly ash reduces the total specific surface area of the system but increases water demand due to the angular shape of the particles and open porosity. It was found that the dynamics of compressive

strength depend significantly on the curing time and component ratio: in the early stages (1–2 days), compositions with a higher limestone content are preferable, while in the later stages (28–56 days), the ash component plays a key role, especially in mixtures with 20% slag. Optimized binder particle size distributions were developed through selective grinding of the components: blast furnace slag was ground to an ultrafine grinding ($8000 \text{ cm}^2/\text{g}$), limestone was ground for a limited time of 20 minutes to preserve the coarse fraction, and fly ash was used without additional processing. The results of mechanical tests are presented: in the optimized compositions, by 28 days, the compressive strength reached 45–52 MPa (for 20% slag) and approximately 54 MPa (for 30% slag), indicating a strength increase of 10–18% compared to the original samples. It was found that the proposed approach allows for maintaining the normal consistency of the cement paste at the initial level (27.5–29.5%) while significantly increasing strength properties. The role of pore structure in the performance properties of concrete is substantiated: according to mercury porosimetry, all optimized compositions exhibit low capillary porosity with a distribution peak near $0.5 \text{ }\mu\text{m}$, and at a high ash proportion, the maximum shifts to the region of smaller pores. The results demonstrate the potential for regulating the fractional composition of mineral additives to improve the efficiency of multicomponent cements, although the industrial implementation of ultrafine slag grinding currently remains economically impractical.

Keywords: composite cements, clinker, slag, fly ash, limestone, strength, specific surface area.

Введение

Основным источником золы-уноса и золошлаковых отходов в Республике Таджикистан являются крупные теплоэлектроцентрали, работающие на угле. В силу модернизации энергетики за последние 10–15 лет объемы доступной золы существенно выросли.

Душанбинская ТЭЦ-2 – это самый мощный и современный объект (400 МВт), работающий на твердом топливе (уголь Шурабского и Фон-Ягнобского месторождений). ТЭЦ генерирует сотни тысяч тонн золошлаковых отходов в год. На станции установлены современные тканевые и электрофильтры, что позволяет улавливать высокодисперсную золу-уноса сухого отбора. Эта зола активно тестируется и частично уже используется местными цементными заводами (например, ООО «Хуаксин Гаюр Цемент») в качестве активной минеральной добавки.

Поскольку ТЭЦ Таджикистана используют преимущественно таджикский каменный и бурый уголь, получаемая зола часто относится к антрацитовым или каменноугольным (класс F) либо буроугольным (класс C). Она обладает выраженными пуццолановыми свойствами, что позволяет заменять ею до 15 – 30 % клинкера в цементе или использовать как наполнитель для бетона, повышающий его плотность и сульфатостойкость.

Процесс изготовления одной тонны цементного клинкера сопровождается выделением приблизительно 0,53 т углекислого газа, что обусловлено химическим распадом известняка [1]. Дополнительный объем эмиссии CO_2 генерируется в результате сжигания технологического топлива. Этот прогресс стал возможен благодаря двум основным факторам: переход на альтернативные виды топлива и активное внедрение цементно-замещающих материалов (ЦЗМ). В качестве наиболее распространенных добавок, заменяющих клинкер, выступают: молотый гранулированный доменный шлак (ГДШ), зола-унос и тонкомолотый известняк. Высокая степень замещения клинкера лишь одним типом ЦЗМ нередко приводит к нежелательным последствиям – замедлению темпов набора прочности бетона или снижению его эксплуатационной стойкости (долговечности). В составе современных многокомпонентных цементов каждый отдельный вид добавки оказывает специфическое воздействие на итоговые технические характеристики материала, что требует дифференцированного подхода к их дозированию.

Взаимодействие летучей золы и известняка наглядно демонстрирует специфику формирования прочностных характеристик бетона. На разных этапах твердения эти добавки проявляют себя следующим образом: зола-уноса как правило, провоцирует замедление набора прочности многокомпонентных составов на начальных этапах [3], однако при достижении проектного возраста итоговые показатели остаются стабильно высокими а тонкомолотый известняк напротив, выступает катализатором твердения в ранние сроки [4], но его избыточное содержание может негативно сказаться на прочности материала в долгосрочной перспективе. Интеграция нескольких видов цементно-замещающих материалов (ЦЗМ) позволяет достичь баланса технических характеристик. Сочетание различных добавок дает возможность, во-первых, нивелировать недостатки отдельных компонентов за счет достоинств других, во-вторых, использовать синергетический эффект, возникающий при их взаимодействии. В системах, объединяющих золу-унос и молотый известняк, наблюдается образование карбоалюминатов [5].

Это химическое взаимодействие способствует оптимизации микроструктуры цементного камня и улучшению его эксплуатационных свойств.

В исследовании использовали известняк месторождения Пусиён (Яванский район), который обеспечивает мощный завод «Хуасин Гаюр Цемент» (один из крупнейших производителей в стране, в настоящее время). Известняки характеризуются стабильным химическим составом.

Раньше использовался известняк Харангонского месторождения (Варзобский район), расположенного в непосредственной близости к Душанбе. Оно являлось основной сырьевой базой для Душанбинского цементного завода («Таджикцемент»). Известняки здесь высокого качества, с высоким содержанием CaCO_3 , пригодные для производства портландцемента высших марок.

Настоящее исследование направлено на поиск путей оптимизации набора прочности четырехкомпонентными цементными системами. В составе данных вяжущих доля замещения клинкера достигает 50 % за счет использования измельченного известняка, золы-уноса и доменного шлака. Работа проводится в рамках комплексного изучения факторов, определяющих показатели долговечности подобных составов.

Материалы и методы исследования

В работе были использованы портландцемент марки ПЦ 500 ДО / ЦЕМ I 42,5 заводы компании ООО «Хуасин Гаюр Цемент», зола-унос Душанбинского ТЭЦ-2 и известняк месторождения Пусиён (Яванский район, Хатлонская область), а также известняк Харангонского месторождения (Варзобский район). Исследование бетонных образцов кубиков $10 \times 10 \times 10$ см проводилось в лаборатории ГУП НИИ «Строительство и архитектура».

Для получения гранулометрической кривой использовали прибор - лазерную дифракцию Analysette 22 (Fritsch) в лаборатории ГУП НИИ «Строительство и архитектура».

Методика получения гранулометрического кривого ОПЦ, ГДШ, известняка и золы-уноса заключается в следующем:

1. Проба суспензируется в жидкой среде (мокрый способ, обычно в спирте для цемента, чтобы избежать гидратации) или диспергируется потоком сжатого воздуха (сухой способ).

2. Лазерный луч проходит сквозь поток частиц. Частицы рассеивают свет под разными углами: крупные – под малыми углами с высокой интенсивностью, мелкие – под большими углами.

3. Оптические детекторы фиксируют угловое распределение интенсивности рассеянного света.

4. Программное обеспечение на основе теории Ми или приближения Фраунгофера рассчитывает эквивалентные диаметры частиц и автоматически строит интегральные и дифференциальные гранулометрические кривые.

Начальная стадия исследования включала анализ одиннадцати комбинаций четырехкомпонентного цемента (см. табл. 1). Роль клинкерной составляющей выполнял портландцемент марки ПЦ 500 ДО / ЦЕМ I 42,5, в составе которого уже присутствовали присадка-ускоритель и малая доля известняка. С целью стандартизации уровня SO_3 на отметке 3 % масс. в смесь добавляли ангидрит. Чтобы исключить влияние физических факторов на результаты, гранулометрия шлака, золы-уноса и известняковой составляющей подбиралась максимально идентичной – это позволило связать динамику прочности и гидратации исключительно с химическим составом вяжущего.

Характеристики компонентов приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 1.

Таблица 1 – Составы четырехкомпонентных цементов, содержащих 50 масс. % ОПЦ

Table 1 – Compositions of quaternary cements containing 50 wt. % OPC

Компонент	Содержание, масс. %									
ГДШ	20	20	20	20	20	20	30	30	30	30
Зола-унос	0	10	15	20	25	30	0	5	10	15
Известняк	30	20	15	10	5	0	20	15	10	5

Таблица 2 – Фазовый состав основных компонентов

Table 2 – Phase composition of the major components

Фаза (ОПЦ)	ОПЦ, %	Фаза (Добавки)	ГДШ, %	Зола-унос, %	Известняк, %
C ₃ S	68,2	Кальцит	1,7	0,9	95,6
C ₂ S	7,1	Кварц	0,2	14,3	0,9
C ₃ A	5,1	Майенит	0,2		
C ₄ AF	11,4	Мервинит	0,7		
Бассанит	1	Муллит		11,4	
Гипс	3,1	Маггемит		0,8	
CaO _{св}	0,6	Гематит		0,6	
Периклаз	0,6	Аморфная фаза	94,1	72	3,5
Портландит	0,8	C ₃ S	2		
Арканит	0,8	C ₄ AF	0,3		
Кальцит	1,3	Гипс	0,8		
Итого	100	Итого	100	100	100

Таблица 3 – Физические свойства основных компонентов

Table 3 – Physical properties of the major components

Материал	Удельная поверхность по Блейну, см ² /г	Плотность, г/см ³	d ₅₀ , мкм
ОПЦ	5210	3,142	8,73
ГДШ	4130	2,896	13,55
Зола-унос	4170	2,491	11,38
Известняк	5190	2,722	9,03

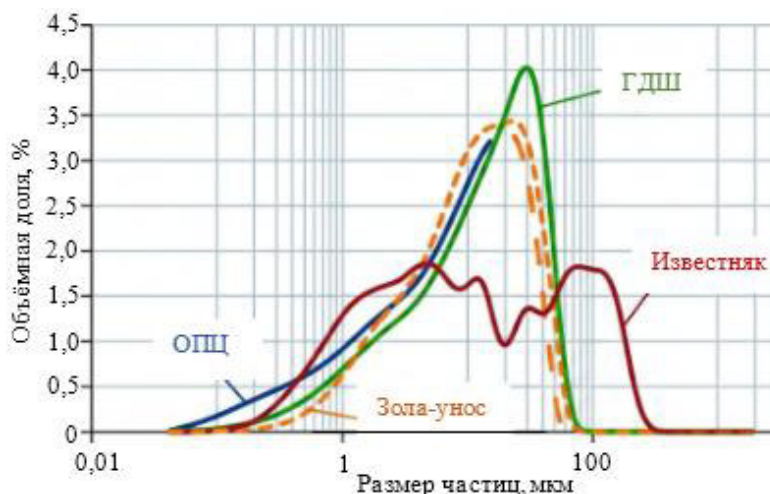


Рисунок 1 – Гранулометрические кривые для основных компонентов

Figure 1 – Particle size distribution curves of the major components

В исследуемом шлаке было зафиксировано присутствие небольшого количества клинкерных минералов, что объясняется условиями его подготовки (сушкой) на территории цементного предприятия. При подготовке смесей зола-унос применялась в молотом состоянии. Согласно заданным условиям эксперимента, зерновые составы ОПЦ, золы и шлака оказались сопоставимыми.

В то же время измельчение известняка в шаровой мельнице обусловило бимодальный характер распределения его частиц. Для полученных четырехкомпонентных составов были установлены базовые характеристики: динамика набора прочности, величина удельной поверхности и нормальная густота (водопотребность).

Доменный шлак подвергался измельчению в шаровой мельнице в течение 6 часов, и была достигнута целевая тонкость помола – $8000 \text{ см}^2/\text{г}$, что превышает минимально необходимый порог в $6000 \text{ см}^2/\text{г}$. Это показатель сверхтонкого (коллоидного) помола. За счет колоссальной площади поверхности 8000 см^2 на каждый грамм шлак вступает в химическую реакцию гидратации в первые же сутки, обеспечивая высокую раннюю прочность бетона (компенсируя главный недостаток обычных шлакобетонов – их медленное твердение).

Частицы такой крупности работают как ультрадисперсный наполнитель. Они распределяются в микропорах между зернами цемента и песка, заклинивая их. Это делает структуру цементного камня практически беспористой, что автоматически повышает водонепроницаемость, морозостойкость и конечную прочность бетона.

Результаты и обсуждения

На рис. 2 приведены значения удельной поверхности и водопотребности четырехкомпонентных цементов.

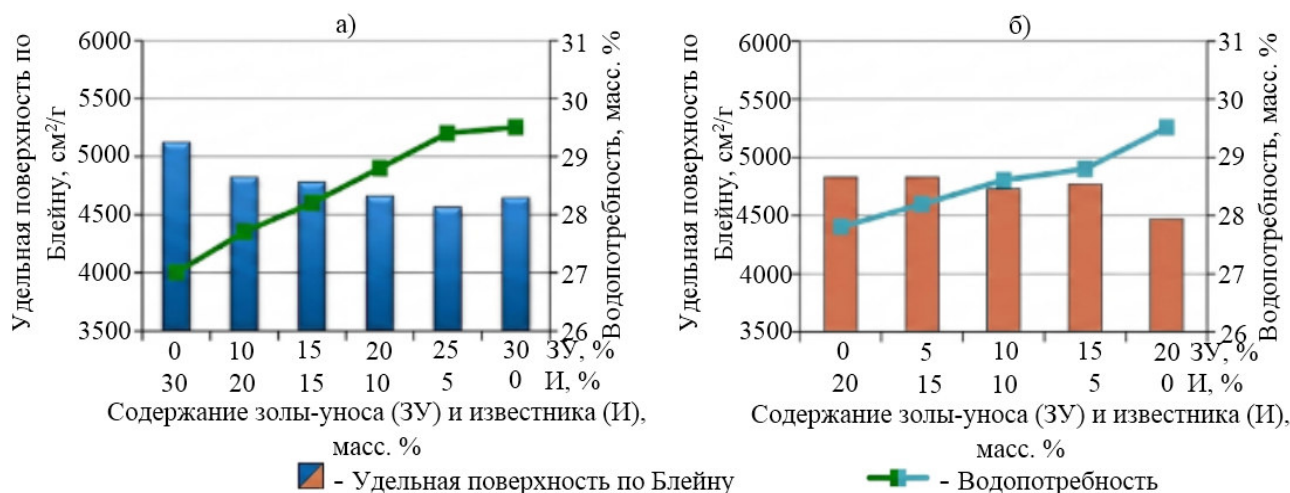


Рисунок 2 – Удельная поверхность по Блейну и водопотребность цементов с 20 (а) и 30 масс. % ГДШ (б)
Figure 2 – Blaine specific surface area and water demand of cements containing 20 wt. % (a) and 30 wt. % (b) of GBFS

Рост концентрации золы-уноса ведет к снижению удельной поверхности цементных систем, что обусловлено более низкой дисперсностью данного компонента ($4170 \text{ см}^2/\text{г}$ по Блейну) в сравнении с известняковым наполнителем ($5190 \text{ см}^2/\text{г}$). Вопреки снижению суммарной поверхности, наблюдается существенное повышение водопотребности. Данный эффект может быть вызван высокой концентрацией частиц угловатой формы, сформировавшихся при помоле золы (рис. 3, а), а также ростом открытой пористости вследствие разрушения полых микросфер (рис. 3, б). Дополнительным фактором выступает плотность упаковки: составы с преобладанием известняка характеризуются более плотной структурой за счет бимодального распределения его частиц по размерам.

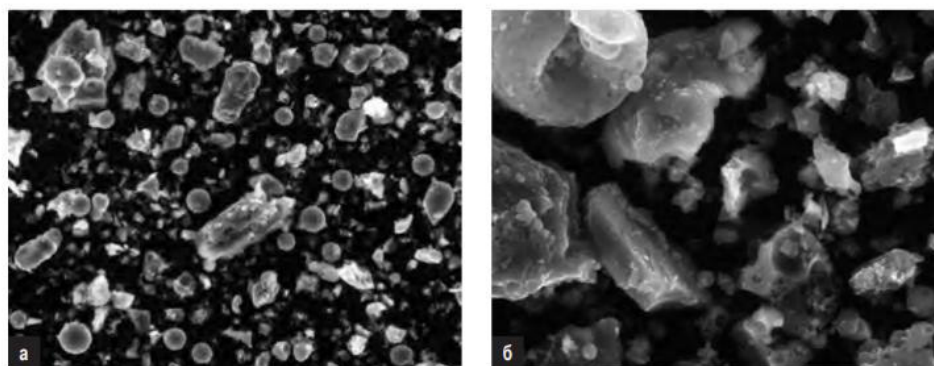


Рисунок 3 – Сферические и угловатые частицы (а) и грубые частицы с открытой пористостью (б) в измельченной золе-уносе
Figure 3 – Spherical and Angular Particles (a) and Coarse Particles with Open Porosity (b) in Ground Fly Ash

Графическая интерпретация процесса набора прочности при сжатии для составов, содержащих 20 % и 30 % шлака по массе, приведена на рис. 4. Данные показатели были получены в ходе испытаний стандартных растворов с водоцементным отношением, равным 0,50, согласно методике, описанной в источнике.

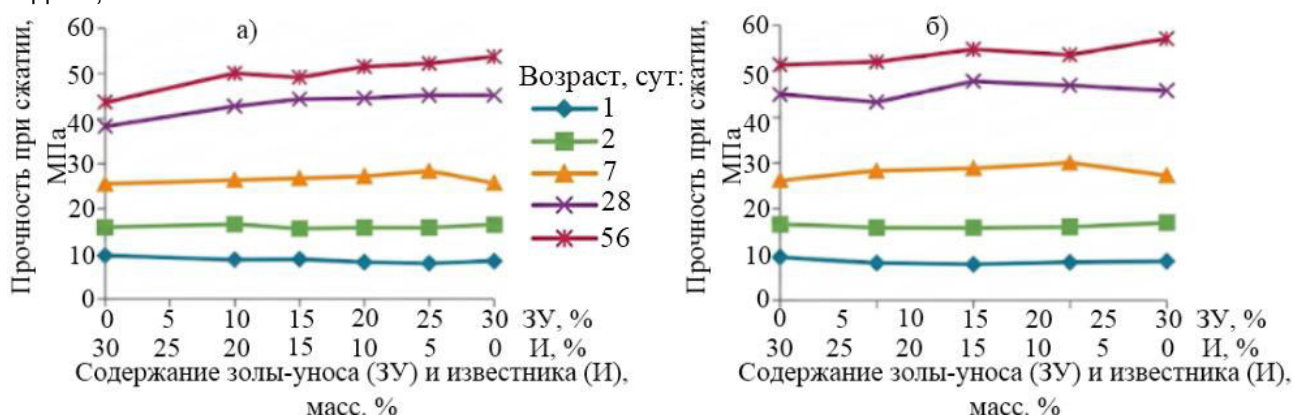


Рисунок 4 – Прочность при сжатии для композиций с 20 (а) и 30 (б) масс. % шлака
Figure 4 – Compressive Strength of Compositions Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Slag

На ранних сроках твердения (1 сутка) максимальные показатели прочности при сжатии зафиксированы у образцов с повышенной долей известнякового компонента. Это объясняется как каталитическим действием известняка, так и минимальным присутствием (или полным отсутствием) золы-уноса, замедляющей гидратацию на начальном этапе. К 2-м и 7-м суткам существенной зависимости прочности от рецептуры вяжущего не обнаружено. Однако в период 28–56 суток зольный компонент начинает играть ключевую роль в упрочнении, особенно в смесях с 20-процентным содержанием шлака.

Увеличение доли шлака до 30 % также способствует росту прочностных характеристик, проявляющемуся с 7-суточного возраста и усиливающемуся в более поздние сроки. Тем не менее общие показатели прочности остались сравнительно невысокими, составив 39 – 47 МПа к 28 суткам.

С целью совершенствования динамики набора прочности и эксплуатационной стойкости четырехкомпонентных вяжущих были определены две стратегии, также направленные на минимизацию негативного влияния отклонений от оптимальных режимов твердения. Первая стратегия базировалась на направленном регулировании гранулометрического состава каждого из компонентов для обеспечения быстрого твердения без существенного роста водопотребности. Вторая – на интенсификации процессов гидратации минеральных добавок (золы и шлака) посредством химического воздействия. В данном материале изложены итоги реализации исключительно первого метода, так как изыскания в рамках второго подхода на текущий момент продолжаются.

Ключевая задача регулирования зернового состава состояла в доведении вспомогательных цементирующих материалов (ВЦМ) до заданных показателей дисперсности, минуя измельчение клинкерной составляющей. Такой подход позволяет максимально эффективно задействовать реакционную способность добавок. По итогам предварительной серии экспериментов были установлены следующие условия:

1) Доменный шлак, учитывая его доминирующее влияние на динамику набора прочности, подвергался интенсивному измельчению. В шаровой мельнице в течение 6 часов была достигнута целевая тонкость помола – 8000 см²/г, что превышает минимально необходимый порог в 6000 см²/г.

2) Зола-унос, данный наполнитель применялся в исходном состоянии, без дополнительной обработки. Это необходимо для балансировки высокой дисперсности других фаз (шлака и клинкера). Кроме того, округлая морфология зольных частиц была использована для оптимизации реологических свойств и снижения водопотребности готовой смеси.

Для достижения баланса в гранулометрии четырехкомпонентного вяжущего и уменьшения его потребности в воде, наиболее химически пассивный ингредиент – известняк, который должен обладать максимально возможной крупностью зерен. С этой целью время его обработки в шаровой мельнице было ограничено 20 минутами. Одновременно с этим концентрация SO₃ в составе цемента была скорректирована в сторону уменьшения до 2,5 % по массе. Итоговые

гранулометрические показатели и физико-механические параметры модифицированных компонентов отображены в таблице 4 и на рисунке 5.

Таблица 4 – Физические свойства основных компонентов цемента

Table 4 – Physical Properties of the Main Cement Components

Материал	Удельная поверхность по Блейну, $\text{см}^2/\text{г}$	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	d_{50} , мкм
ОПЦ	5180	3,128	9
ГДШ	7710	2,893	2,4
Зола-унос	3340	2,323	19,4
Известняк	3590	2,718	14,2

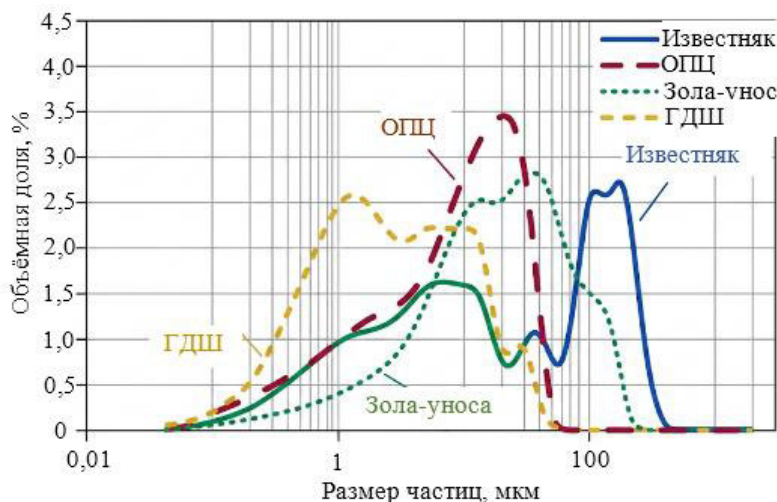


Рисунок 5 – Оптимизированное распределение частиц ингредиентов

Figure 5 – Optimized Particle Size Distribution of the Ingredients

Представленные на рис. 5 данные свидетельствуют о том, что четырехкомпонентное вяжущее характеризуется расширенным диапазоном размеров частиц.

Расчет удельной поверхности исследуемых смесей производился исходя из индивидуальных показателей дисперсности каждого базового компонента. Взаимосвязь между водопотребностью и удельной поверхностью данных цементных систем наглядно отражена на рис. 6.

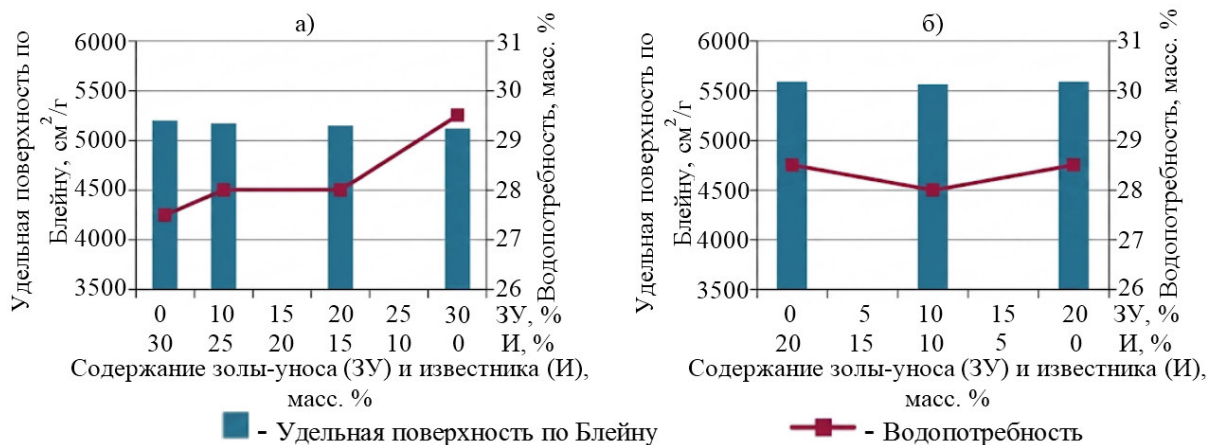


Рисунок 6 – Показатели дисперсности по Блейну и нормальной густоты четырехкомпонентных вяжущих, содержащих 20 % (а) и 30 % (б) ГДШ по массе

Figure 6 – Blaine Fineness and Standard Consistency of Four-Component Binders Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)

Так как удельная поверхность зольного компонента и известнякового наполнителя практически идентична, итоговая дисперсность всей системы варьируется преимущественно за счет изменения доли шлака. Зафиксированные показатели водопотребности в большинстве случаев варьируются в пределах 27,5 – 28,5 %. Лишь в единичном случае этот параметр вырос до 29,5 %. Это подтверждает, что, несмотря на рост удельной поверхности, оптимизированные составы сохраняют потребность в воде на уровне исходных (неоптимизированных) образцов.

На рис. 7 отражены результаты испытаний на сжатие для оптимизированных систем с содержанием шлака 20 % и 30 %, полученные при испытании стандартных растворов ($B/C = 0,50$) по методике . Для наглядного сопоставления эффективности на этом же графике представлены прочностные характеристики цемента до оптимизации.

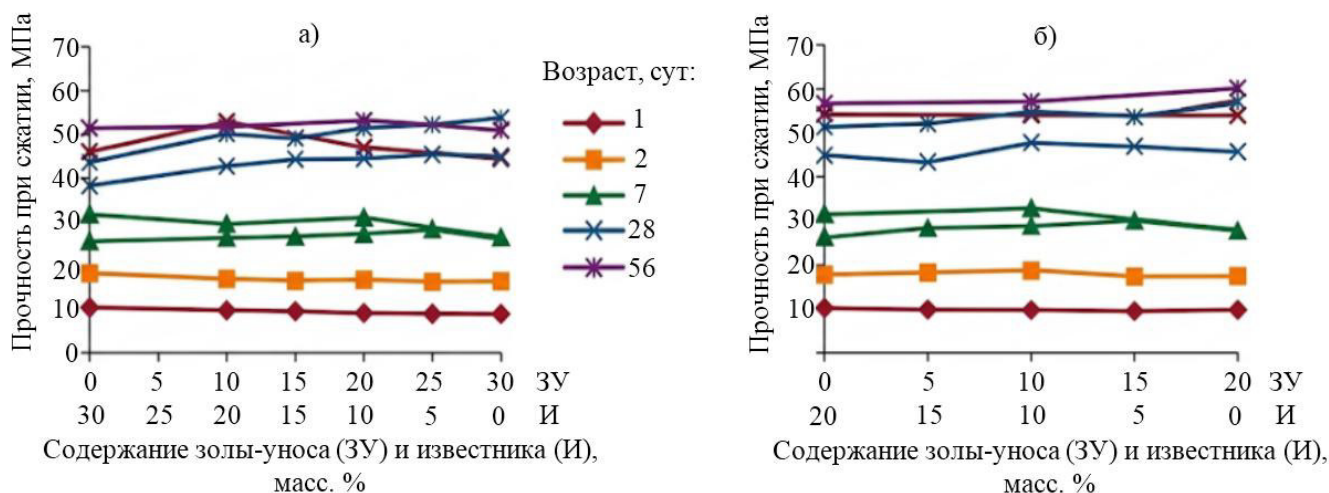


Рисунок 7 – Динамика сопротивления сжатию для составов с 20 % (а) и 30 % (б) шлака. Штриховыми линиями обозначены показатели прочности исходных (неоптимизированных) цементов

Figure 7 – Development of Compressive Strength for Compositions Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Slag. Dashed Lines Indicate the Strength Values of the Original (Non-Optimized) Cements

На начальных этапах твердения (1–2 суток) у модифицированных цементов с 20 – процентным содержанием шлака наблюдался лишь умеренный прирост прочностных характеристик. Однако к 7 и 28 суткам зафиксировано существенное повышение прочности, за исключением рецептуры с 30 % золы. К 28 – дневному возрасту предел прочности при сжатии достиг интервала 45 – 52 МПа (при этом показатель 52 МПа, скорее всего, является статистической погрешностью).

К 56 суткам темпы упрочнения замедлились, что свидетельствует о завершении основной фазы гидратации шлака в более ранние сроки. Отсутствие положительной динамики прочности при высокой концентрации золы-уноса (30 %), наблюдаемое на всех этапах исследования, может объясняться конкурентным взаимодействием между зольным и шлаковым компонентами.

Композиции с 30 масс. % шлака демонстрируют примерно те же тенденции, что и композиции с 20 масс. % шлака. Как и предполагалось, увеличение прочности в случае 30 масс. % шлака оказалось более выраженным. Уже в возрасте 1 и 2 сут прочность при сжатии заметно возросла. В возрасте 28 сут она достигла приблизительно 54 МПа.

Распределение пор по размерам в выборочных образцах определяли с помощью ртутной порометрии (рис. 8) с использованием образцов 28 – суточного возраста после определения прочности при сжатии.

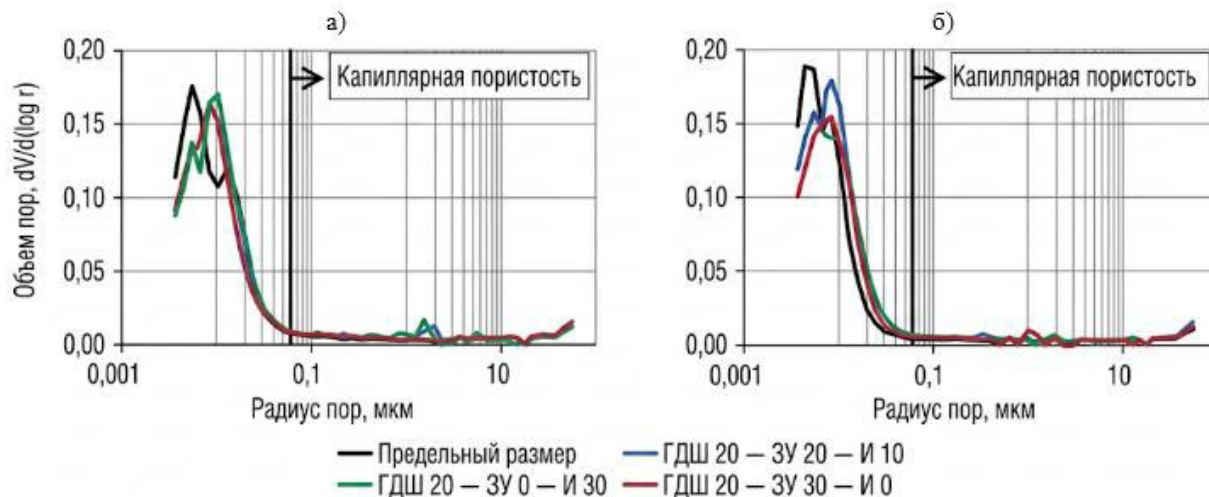


Рисунок 8 – Дифференциальные кривые распределения пор в логарифмических координатах для составов с содержанием шлака 20 % (а) и 30 % (б) по массе

Figure 8 – Differential Pore Size Distribution Curves in Logarithmic Coordinates for Compositions Containing 20 wt.% (a) and 30 wt.% (b) Slag

Для всех растворов на базе цементов с 20 – процентным содержанием шлака характерна идентичная и при этом низкая капиллярная пористость. Пик распределения пор сосредоточен в районе 0,5 мкм и почти не коррелирует с вариациями в рецептуре. Однако при предельной дозировке золы-уноса (состав ГДШ – 20, ЗУ – 30, И – 0) наблюдается сдвиг этого максимума в область более мелких пор.

Аналогичные закономерности с небольшими уточнениями прослеживаются и для смесей с 30 % шлака. В сравнении с 20 – процентными составами здесь отмечается незначительное уменьшение объема капиллярных пор. При этом рост концентрации золы-уноса провоцирует еще более выраженное смещение пика распределения в сторону меньших диаметров.

Выводы

Настоящая работа посвящена поиску путей ускорения набора прочности четырехкомпонентных цементных систем (содержание клинкера – 50 %) посредством регулирования фракционного состава их ингредиентов: золы-уноса, доменного шлака и известняка.

Методология исследования опиралась на селективный подбор дисперсности минеральных добавок, что позволило максимально раскрыть их реакционную способность, не допуская при этом критического роста водопотребности. Требуемое распределение частиц в оптимизированных составах достигалось за счет сочетания тонкомолотого шлака с грубодисперсным известняком и золой-уносом в состоянии поставки (без обработки). Такая комбинация позволила сохранить нормальную плотность цементного теста на исходном уровне при существенном увеличении прочности на сжатие в интервале от 7 до 56 суток. Наиболее выраженная динамика упрочнения зафиксирована у образцов с 30 % шлака (прирост около 18 % к 28 суткам), в то время как при 20-процентном содержании шлака этот показатель составил порядка 10 %.

Однако стоит отметить, что предложенная концепция пока носит преимущественно теоретический характер. Это связано с тем, что получение высокодисперсного шлака с применением современных промышленных методов помола и классификации на данный момент экономически нецелесообразно.

Рецензент: Хасанзода Н.М. — д.т.н., и.о. профессора кафедры «Основания, фундаменты и подземные сооружения» ЛПТУ им. акад. М. Осими.

Литература

1. Damtoft, J.S. Sustainable Development and Climate Change Initiatives / J.S. Damtoft et al. // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – No. 2. – P. 115–127.

2. VDZ. Verminderung der CO₂-Emissionen. Beitrag der deutschen Zementindustrie. Verein deutscher Zementwerke e.V., 2013.

3. Абдуганиев, А. М. Применение углеотходов при сухом способе производства цемента / А. М. Абдуганиев, А. А. Акрамов, М. З. Сиддигов // Наука-основа инновационного развития: Материалы X Международной научно-практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 138-141. – EDN MYSQVP.

4. Сатторов, З. М. Влияние углеродсодержащих примесей на процесс разложения каолинита / З. М. Сатторов, А. А. Акрамов // Наука-основа инновационного развития: Материалы X Международной научно-практической конференции, Душанбе, 17–18 апреля 2025 года. – Душанбе: Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 2025. – С. 146-148. – EDN EGOUFQ.

5. Саидзода, Д. Х. Сульфатирование высокоосновного ферритного клинкера на основе ферритного отхода / Д. Х. Саидзода, А. А. Акрамов, М. Р. Джуракулов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 1(69). – С. 128-133. – EDN KIPTPO.

References

1. Damtoft, J.S. Sustainable Development and Climate Change Initiatives / J.S. Damtoft et al. // Cement and Concrete Research. – 2008. – Vol. 38. – No. 2. – P. 115–127.

2. VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V.). Verminderung der CO₂-Emissionen: Beitrag der deutschen Zementindustrie. Düsseldorf, Germany: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2013.

3. Abduganiev, A.M., Akramov, A.A., Siddikov, M.Z. Application of Coal Waste in the Dry Process of Cement Production. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Science as the Basis of Innovative Development", Dushanbe, Tajikistan, April 17–18, 2025. Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 2025, pp. 138–141.

4. Sattorov, Z.M., Akramov, A.A. Influence of Carbon-Containing Impurities on the Kaolinite Decomposition Process. In: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference "Science as the Basis of Innovative Development", Dushanbe, Tajikistan, April 17–18, 2025. Dushanbe: Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 2025, pp. 146–148.

5. Saidzoda, D.Kh., Akramov, A.A., Dzhurakulov, M.R. Sulfation of High-Basic Ferrite Clinker Based on Ferrite Waste. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2025, 1(69), 128–133.

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФ-СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ-INFORMATION ABOUT AUTHOR

TJ	RU	EN
Акрамов Авазҷон Абдуллоевич	Акрамов Авазжон Абдуллоевич	Akramov Avazjon Abdulloevich
Номзади илмҳои техникӣ, дотсент	Кандидат технических наук, доцент	Candidate of technical sciences, assistant professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: akramov.avaz@mail.ru		
0000-0002-7084-9128		