

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ ЗОЛОСОДЕРЖАЩИХ БЕТОНОВ И ОЦЕНКА ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.М. Абдуганиев, А.А.Акрамов, М.Р. Джуракулов

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

В представленной статье рассматривается применение золы-уноса как инструмента для внесения изменений в строительную отрасль за счёт внедрения инновационного метода повышения прочности бетона. Внедрение золы-уноса в качестве вторичного вяжущего компонента в технологию производства бетона доказывает свою эффективность сразу в нескольких аспектах. Использование данного техногенного сырья позволяет достичь следующих результатов: существенное улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств бетонных конструкций; заметное сокращение себестоимости производства за счет экономии первичных связующих веществ; минимизация нагрузки на окружающую среду путем эффективной утилизации промышленных отходов угольной отрасли. Системный подход к изучению свойств золы-уноса и накопленный практический опыт её использования открывают новые возможности для создания устойчивых и долговечных строительных материалов.

Ключевые слова: зола-уноса, бетон, цемент, прочность, устойчивость, минеральная добавка, золошлаковые материалы.

АСОСҲОИ ИЛМИЮ АМАЛИИ ИДОРАКУНИИ ХОСИЯТҲОИ МУСТАҲКАМИИ БЕТОНҲОИ ҲОКИСТАРДОР ВА АРЗЁБИИ САМАРАНОКИИ ТЕХНИКИЮ ИҚТИСОДИИ ОНҲО

А.М. Абдуганиев, А.А.Акрамов, М.Р. Чуракулов

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

Дар мақолаи мазкур истифодаи ҳокистар-гулхан (зола-унос) ҳамчун воситаи дигаргунсозии соҳаи сохтмон тавассути ҷорисозии усули инноватсионии баланд бардоштани мустаҳкамии бетон мавриди баррасӣ қарор гирифтааст. Истифодаи ин партовҳои саноатӣ ҳамчун ҷузъи дуомилавасткунанда дар технологияи истеҳсоли бетон самаранокии ҳудро дар якҷанд самт собит менамояд. Ба қор бурдани ин ашёи хоми техногенӣ имкон медиҳад, ки натиҷаҳои зерин ба даст оварда шаванд: беҳтаршавии назарраси хосиятҳои физикию механикӣ ва истифодабарии иншооти бетонӣ; коҳиши қобили мулоҳизаи арзиши аслии маҳсулот ба воситаи сарфаи маводҳои аввалияи пайваस्तкунанда; кам кардани таъсири манфӣ ба муҳити зист тавассути қоркарди самарабахши партовҳои соҳаи ангишт. Муносибати мунтазам ба омӯзиши хусусиятҳои ҳокистар-гулхан ва таҷрибаи амалии андӯхташуда ҷиҳати истифодаи он, уфуқҳои навро барои сохтани масолеҳи сохтмони устувор ва дарозмуддат боз менамояд.

Калидвожаҳо: ҳокистари ангиштсанг, бетон, семент, мустаҳкамӣ, устуворӣ, иловаҳои минералӣ, масолеҳҳои ҳокистаришлак.

SCIENTIFIC AND PRACTICAL FOUNDATIONS OF CONTROLLING THE STRENGTH PROPERTIES OF FLY ASH CONCRETE AND THE EVALUATION OF ITS TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY

A.M. Abduganiev, A.A. Akramov, M.R. Jurakulov

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

This article explores the transformative potential of fly ash within the construction sector, focusing on its role in an innovative methodology for enhancing concrete durability. Integrating fly ash as a supplementary cementitious material (SCM) offers multi-faceted advantages in concrete production technology. The utilization of this industrial byproduct yields the following outcomes: a significant upgrade in the physico-mechanical and operational characteristics of concrete structures; a marked reduction in manufacturing expenses by decreasing the reliance on primary binders; mitigation of environmental impact through the effective recycling of coal industry waste. A systematic analysis of fly ash properties, combined with extensive practical application, paves the way for the development of resilient and sustainable construction materials.

Key words: fly ash, concrete, cement, strength, stability, mineral additive, ash and slag materials. Key words: fly ash, concrete, cement, strength, stability, mineral additive, ash and slag materials.

Введение

Бетон как строительный материал известен с эпохи древнего Египта и на протяжении веков применяется в качестве заполнителя и связующего элемента в конструкциях.

Угольная зола, некогда считавшаяся отходом энергетической отрасли, сегодня активно используется в строительстве, что способствует развитию замкнутого цикла производства и снижению объёмов отходов. История бетона уходит корнями в глубокую древность, его устойчивость и несущая способность со временем значительно повышались.

Практика утилизации угольной золы как побочного продукта энергетического сектора уходит корнями в глубокую древность, когда были зафиксированы первые случаи её использования в строительных целях. Анализ этого многовекового наследия дает возможность по достоинству оценить роль и важность включения зольных отходов в высокотехнологичные процессы современного производства бетона.

Современная индустрия бетона нуждается в инновационных подходах для преодоления актуальных технологических барьеров. Ключевыми задачами здесь выступает не только улучшение прочностных характеристик, но и оптимизация производственных затрат наряду с минимизацией экологического следа. Классические рецептуры бетона базируются на цементе, изготовление которого остается ресурсозатратным и экологически небезопасным процессом. В то же время интенсивное накопление продуктов сжигания угля представляет собой существенную экологическую опасность, обусловленную их токсичным воздействием и огромными площадями отвалов. Детальное изучение данных аспектов подтверждает необходимость внедрения принципов «зеленой» экономики и дает возможность проанализировать перспективы рециклинга зольных отходов в индустрии строительных материалов.

В данной статье сопоставляется экологическая нагрузка от производства стандартного бетона и составов, содержащих зольный остаток. Авторы представили расчеты по снижению углеродного следа (CO_2), которое становится возможным благодаря частичной замене портландцемента продуктами углепереработки. Полученные данные доказывают, что внедрение золосодержащих композитов является эффективным механизмом снижения антропогенного воздействия на воздушную среду при капитальном строительстве.

Исследовательская часть работы охватывает анализ прочностных параметров, реологических свойств смесей, долговечности и экологической безопасности модифицированных бетонов.

Использование отходов угольной промышленности в производстве бетонов обусловлено их способностью выступать в роли активных минеральных компонентов. Это дает возможность существенно сократить затраты на портландцемент без потери качества. Опыт показывает, что лучшие эксплуатационные свойства проявляются у модифицированных бетонов проектного класса В20 и выше.

Приоритетными областями применения такого сырья являются гидротехническое строительство, устройство массивных оснований и дорожное дело. При расчете состава смеси обычно придерживаются нормы ввода золы в количестве 30 – 90 кг/м³. Соблюдение нормативной базы (ГОСТ 25818 – 2017 для зол и ГОСТ 25592 – 91 для шлаков) выступает гарантом надежности конструкций. Помимо традиционных бетонов, мелкодисперсная зола эффективна при создании огнеупорных материалов и специальных связующих составов, а также применяется для упрочнения оснований дорог при работе с грунтами.

При разработке рецептур бетонов различной плотности включение золы-уноса способствует более эффективному распределению расхода портландцемента и минеральных заполнителей. Это одновременно улучшает показатели текучести смесей и увеличивает ресурс эксплуатации готовых элементов. В технологии пористых бетонов неавтоклавного типа кислые зольные фракции выступают качественной заменой кремнеземистого сырья. В то же время составы с высоким содержанием кальция ($\text{CaO} \geq 30\%$) могут использоваться либо как активные добавки, либо как базовый вяжущий элемент. В газобетонном производстве данный вторичный ресурс позволяет частично исключить из состава известь и цемент.

Методы и результаты исследований

Основным материалом является бетон, состоящий из вяжущего – цемент марки М400 цементного завода ООО «Хуаксин Гаюр Цемент», вольского песка, воды и золы угля Фан-Ягнобского месторождения в % от массы цемента. Изготавливали образцы балочки размером 4х4х16 в количестве 20 штук. При приготовлении образцов вводили в состав бетонной смеси 1:3:0,4 (вяжущие: вольский песок:вода) от 0 до 20% золы угля Фан-Ягнобского месторождения. Испытывали образцы на изгиб и сжатие через 1, 3, 7 и 28 сут твердения. Испытание было проведено и для образца состава 1:1,57:2,57:0,4 с введением золы угля Фан-Ягнобского месторождения от 0 до 20% от массы

цемента [4]. Испытания образцов проводили на малогабаритном гидравлическом прессе ПГМ-500МГ4А., НИИ «Строительство и архитектуры». На рисунке 1 показана кинетическая зависимость прочности вяжущего от содержания золы по времени.

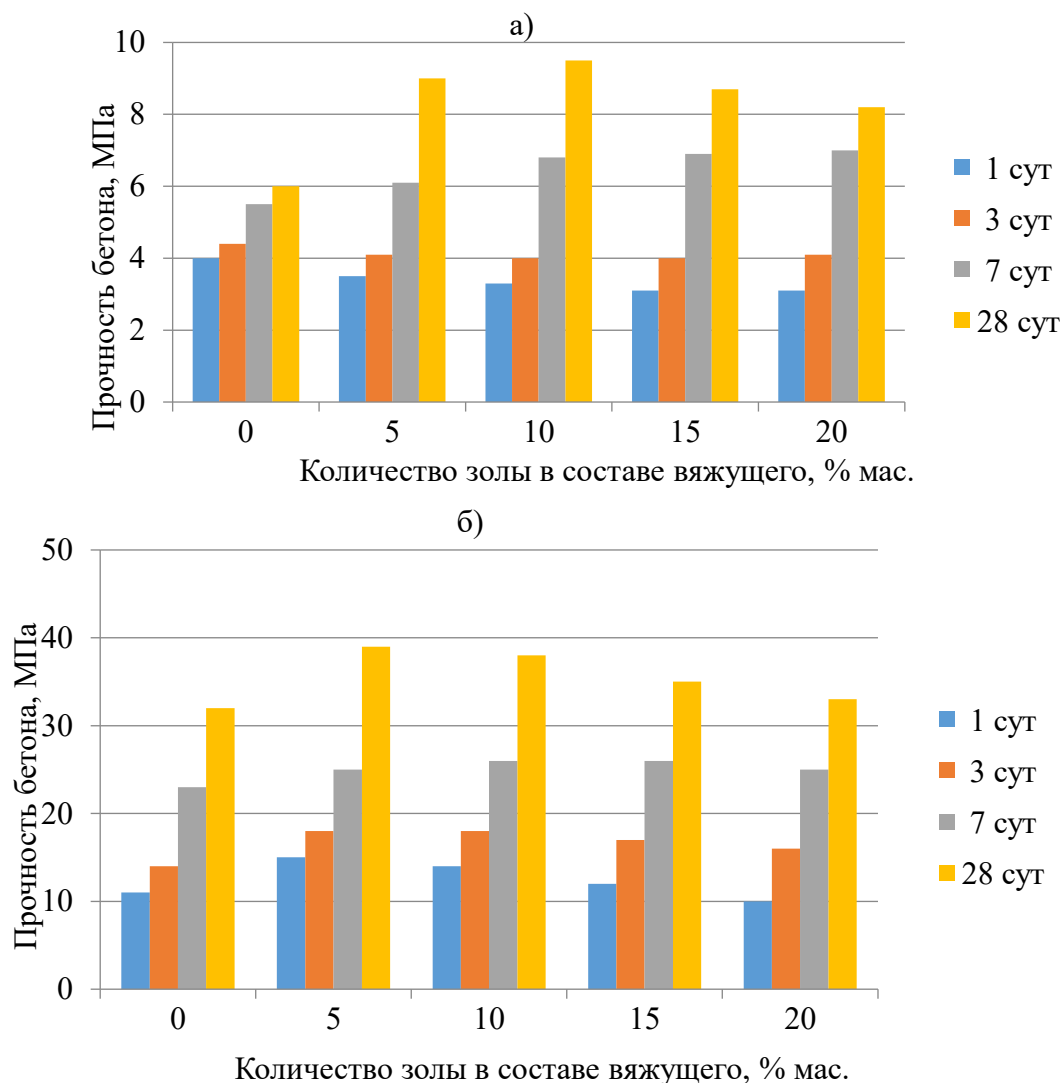


Рисунок 1 – Кинетическая зависимость прочности вяжущего по времени при
а) – изгибе, б) – сжатии

Figure 1 – Kinetic Dependence of Binder Strength on Time:
(a) – Flexural Strength, (b) – Compressive Strength

Оптимальное процентное содержание золы для каждого типа бетона определяется экспериментальным путем. Такой подход, учитывающий специфику применяемого сырья, гарантирует достижение проектных эксплуатационных свойств и обеспечивает надежную защиту стального армирования от коррозии. В железобетонных конструкциях с предварительным напряжением, эксплуатируемых в неагрессивных условиях, концентрация кислой золы не должна превосходить по массе объем используемого портландцемента. Требования к качеству зольного сырья, пригодного для интеграции в бетонные смеси, регламентированы характеристиками, указанными в таблице 1.

Теоретическая часть

Золу-уноса можно классифицировать по трем ключевым признакам: химическому характеру (кислотности), происхождению (виду сжигаемого угля) и качественному виду (категории дисперсности и чистоты от I до IV, см. таблицу 1).

Таблица 1 – Показатели золы-уноса
Table 1 – Fly Ash Parameters

№	Наименование показателя	Вид угля	Значение показателя для вида золы			
			I	II	III	IV
1	Содержание оксида кальция, мас. %:					
	– кислая зола, не более	Для всех	10	10	10	10
	– основная зола, более	Бурий	10	10	10	10
	в том числе свободного CaO, не более:					
	– кислая зола	Для всех	-	-	-	-
	– основная зола	Бурий	5	5	-	2
2	Содержание оксида магния, мас. %, не более	Для всех	5	5	-	5
3	Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO ₃ , мас.%, не более:					
	– кислая зола	Для всех	3	5	3	3
	– основная зола	Бурий	5	5	6	3
4	Содержание щелочных оксидов в пересчете на Na ₂ O, мас. %, не более:					
	– кислая зола	Для всех	3	3	3	3
	– основная зола	Бурий	1,5	1,5	3,5	1,5
5	Потери массы при прокаливании, мас. %, не более:					
	– кислая зола	Антрацит	20	25	10	10
		Каменный	10	15	7	5
		Бурий	3	5	5	2
	– основная зола	Бурий	3	5	3	3
6	Удельная поверхность, м ² /кг, не менее:					
	– кислая зола	Для всех	250	150	250	300
	– основная зола	Бурий	250	200	150	300
7	Остаток на сите № 008, мас. %, не более:					
	– кислая зола	Для всех	20	30	20	15
	– основная зола	Бурий	20	20	30	15

1). Классификация по химическому составу (кислотности)

Главным критерием деления является содержание оксида кальция (CaO}, которое определяет характер проявления вяжущих свойств:

– кислая зола содержит не более 10% CaO. Она образуется преимущественно при сжигании антрацитов и каменных углей. Обладает выраженными пуццолановыми свойствами (способностью связывать известь в присутствии воды);

– основная зола содержит более 10% CaO. Она происходит от сжигания бурых углей. Обладает не только пуццолановыми свойствами, но и собственной гидравлической активностью (способна самостоятельно схватываться и твердеть при затворении водой).

2). Классификация по технологическим видам (I, II, III, IV)

Показатели удельной поверхности и остатка на сите № 008 разделяют золу на 4 вида, отражающих степень измельчения и чистоту:

Вид IV и I – Высокодисперсные (тонкодисперсные): Имеют удельную поверхность не менее 300 м²/кг (для вида IV) и 250 м²/кг (для вида I). Остаток на сите № 008 минимален (15 – 20%). Это наиболее качественные добавки для тяжелых бетонов (класс А);

Вид II и Вид III — Грубодисперсные, удельная поверхность снижается до 150 – 200 м²/кг, а остаток на сите возрастает до 30%. Такие золы чаще находят применение в легких бетонах (класс Б), где требования к дисперсности ниже.

Химическая активность золы-уноса оценивается по её способности участвовать в процессах гидратации цемента, вступать в пуццолановую реакцию и обеспечивать стабильность объема цементного камня.

Химическая активность золы:

Пуццолановая активность:

- Связывание Ca(OH)₂
- Требуется SiO₂ ≥ 40%

Самостоятельная гидравлическая:

- Свойственна основным золам
- Иницируется свободным CaO

– Зависит от дисперсности

– Ограничена из-за риска деструкции

Химическая активность золы находится в прямой зависимости от ее физического состояния: дисперсности и гранулометрического состава.

Дисперсность (Удельная поверхность) – это химическое взаимодействие между кремнеземом золы и известью цемента, то есть это гетерогенный процесс, протекающий на границе раздела фаз. Чем выше удельная поверхность (у видов I и IV она 250 – 300 м²/кг), тем больше площадь контакта, тем быстрее и полнее протекают пуццолановые реакции в ранние сроки твердения.

Гранулометрический состав в зависимости от назначения: Для тяжелых бетонов (Класс А) требуется высокая плотность, поэтому содержание мелких фракций золы и шлака (менее 0,315 мм) ограничено пределами 20–50 % (см. таблицу 2). Для легких бетонов (Класс Б), где важна пористость и низкая насыпная плотность (менее 1300 кг/м³), допускается вводить до 50–100% мелких фракций, которые работают и как микронаполнитель, и как активный компонент матрицы (см. таблицу 3).

Содержание влаги в зольном остатке лимитируется значением в 1%.

При изготовлении ячеистого бетона зола-унос выступает одновременно в роли вяжущего агента и активного микронаполнителя. В соответствии с требованиями ГОСТ 25485-89, применение золы как основного связующего возможно при условии, что она содержит не менее 40% СаО (из которых свободного оксида кальция – от 16%), до 6% SO₃ и не более 3,5% суммы щелочных оксидов (K₂O и Na₂O). Если же материал используется как кремнеземистый компонент, регламентируются иные нормативы: концентрация SiO₂ должна составлять минимум 45%, в то время как лимиты по кальцию, серному ангидриду и щелочам сужаются до 10%, 3% и 3% соответственно.

Нормативные требования к удельной поверхности золы-уноса устанавливают диапазон от 300 до 350 м²/кг. В составе кислой золы доля стекловидных и сплавленных фаз должна составлять как минимум половину от общего объема. Установлены также жесткие лимиты на потерю массы при прокаливании (ППП): до 3% для бурогоугольного сырья и до 5% для каменноугольного. При этом для бурых углей и антрацитов показатель удельной площади поверхности смещается в сторону более высоких значений – от 400 до 500 м²/кг. Обязательным этапом контроля является проверка материала на равномерность изменения объема. Согласно положениям ГОСТ 2244-85, топливные шлаки могут перерабатываться в пористый песок (фракция до 5 мм), очищенный щебень (5-10, 10-20, и 5-20 мм) или использоваться в виде несепарированной смеси с размером частиц до 20мм. Ключевые физико-химические критерии систематизированы в таблице 2.

Таблица 2 – Требования к гранулометрическому составу фракционированного гравия, шлакового песка и неочищенного шлака

Table 2 – Requirements for the Particle Size Distribution of Fractionated Gravel, Slag Sand, and Unprocessed Slag

Наименование показателя	Фракционированный щебень	Шлаковый песок	Рядовой несортированный шлак
Полные остатки на ситах с диаметром отверстий, соответствующего наименьшему номинальному размеру зерен фракций, мас. %	90–100	–	–
Полные остатки на ситах с диаметром отверстий, соответствующего наибольшему номинальному размеру зерен фракций, мас. %	до 10	до 10	до 10
Содержание зерен, проходящих через сито № 0315, мас. %, не более	5	20	10

Для тяжелых бетонных смесей установлены минимальные пороги объемно-насыпной массы: 1000 кг/м³ для плотного шлакового гравия и 1100 кг/м³ для песка аналогичного типа. Регламент по потерям при прокаливании не распространяется на плотные разновидности шлаков, однако для пористых заполнителей из антрацита и бурого угля действуют ограничения в 7% и 3% соответственно (для железобетонных конструкций нормы ужесточаются до 5% для каменного угля). Химический состав заполнителей лимитирован по содержанию сернистых соединений (до 3% в пересчете на SO₃) и оксида кальция в свободной форме (до 1%).

В вопросах обеспечения долговечности конструкций приоритет отдается показателям структурной устойчивости. Нормативные требования ограничивают допустимую деструкцию при проверке силикатного и железного распада значениями 8% и 5% от общей массы соответственно. Стойкость к отрицательным температурам считается подтвержденной, если после циклического

замораживания (15 циклов для пористых и 100 для плотных фракций) потеря веса не превышает 8%.

Стандарты качества для золошлаковых смесей, применяемых в монолитном и сборном железобетоне, зафиксированы в ГОСТ 25592 – 91 (подробные спецификации отражены в табл. 3).

Таблица 3 – Технические требования к угольным золошлаковым материалам в соответствии с ГОСТ 25592-91
Table 3 – Technical Requirements for Coal Ash and Slag Materials in Accordance with GOST 25592-91

Показатель	Класс А (тяжелые бетоны)	Класс Б (легкие бетоны)
Содержание шлака, мас. %	Не менее 50	До 20
Содержание зерен золы и шлака размером менее 0,315 мм, мас. %:		
- вид I	20–30	50–100
- вид II	20–50	50–100
Содержание зерен размером более 5 мм, мас. %	Не нормируется	Не более 15
Максимальный размер зерен шлака, мас. %	40	20
Удельная поверхность, м ² /кг	Не нормируется	150–400
Влажность, мас. %	Не более 15	Не более 35
Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м ³	Не менее 1300	Не более 1300
Содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO ₃ , мас. %	Не более 3	Не более 3
- в том числе в сульфидной форме	Не более 1	Не более 1
Количество SiO ₂ , мас. %	Не менее 40	Не менее 40

Обсуждение

Показатели ППП для разных видов угольных отходов (золы и шлака) подлежат строгому контролю. Не допускается отклонение данных характеристик от нормативных максимумов, зафиксированных в соответствующем диаграмме (см. рис. 2).

Максимальные потери массы при прокаливании (ППП) золы-уноса

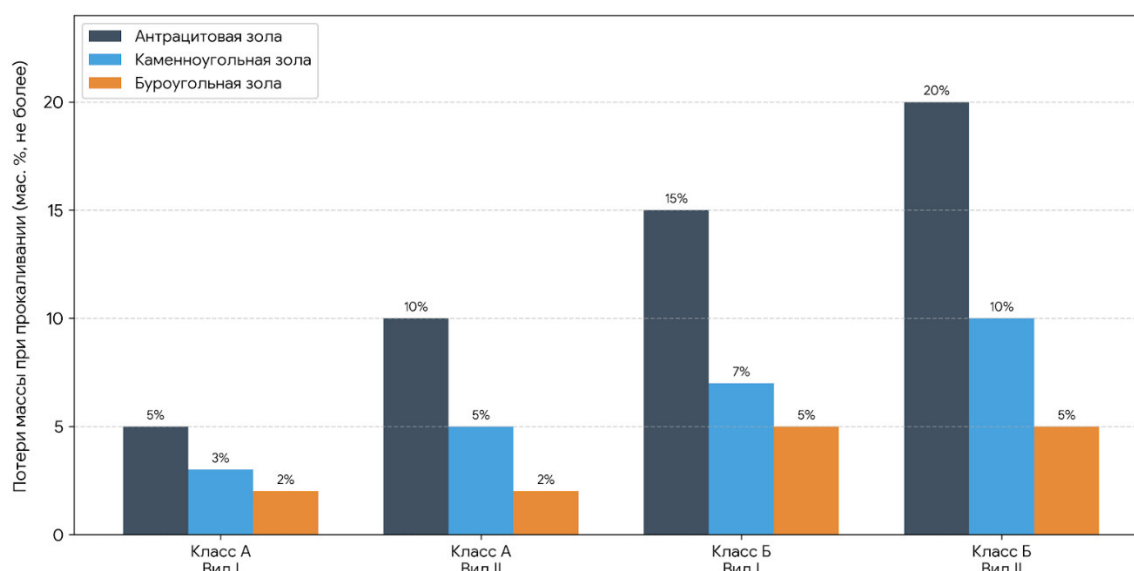


Рисунок 2 – Потеря массы при прокаливании
Figure 2 – Loss of Mass on Ignition

Для достижения необходимого гранулометрического состава продукты сжигания угля подвергаются механической активации в шаровых или вертикально-роликовых мельничных агрегатах. Процесс измельчения считается завершенным, когда остаточная доля на 45 – микронном сите составляет 10 – 30%. Средняя продолжительность помола, как правило, не превышает 1 – 2 часов, корректируясь в зависимости от свойств исходного материала.

В ходе поиска оптимальных пропорций модифицированного бетона проводились испытания с минимальным содержанием зольного остатка от 30% по массе. Анализ данных, полученных в результате 100 контрольных замесов, выявил прямую зависимость между химическим профилем золы (в частности, уровнем кальция) и её предельно допустимым объемом в смеси.

Установлено, что рост концентрации кальция позволяет пропорционально увеличивать количество вводимого вторичного сырья. Это открывает возможности для снижения себестоимости продукции и реализации принципов рационального природопользования. Численные значения этой зависимости приведены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Соотношение между содержанием кальция и допустимым процентом золы в Бетоне

Figure 3 – Relationship Between Calcium Content and the Allowable Percentage of Ash in Concrete

Зависимость между химическим составом золы (содержанием CaO) и допустимым уровнем её замещения в бетонном растворе представлена в таблице 5. В частности, если концентрация кальция достигает 30%, оптимальный объем введения добавки составляет от 35% до 40%. Подобная рецептура обеспечивает достижение заданных прочностных параметров и эксплуатационную надежность конструкций.

Фундаментальным условием для реализации заложенного потенциала материала является точное следование технологии перемешивания и соблюдение массовых долей всех ингредиентов. Оценка качества состава базируется на замерах предела прочности на сжатие в контрольные сроки 3 суток и 60 день.

Технологический регламент предусматривает интенсивный набор прочности (до 70% от номинала) в течение первых 72 часов, в то время как оставшийся ресурс прочности в 30% должен быть реализован к завершению второго месяца. Проектирование состава всегда опирается на актуальные требования СНиП, при этом расчетный показатель прочности на сжатие должен быть полностью достигнут именно к 60 – суточному возрасту бетона. Для определения рациональных пропорций портландцемента, инертных заполнителей, воды и золы-уноса следует использовать специализированное программное обеспечение или проверенные отраслевые методики. Рецептура подбирается индивидуально: она варьируется в зависимости от назначения конструкции и тех нагрузок, которые ей предстоит выдерживать в процессе эксплуатации. В рисунке 4 приведены соответствия марок бетона и целевых значений прочности на сжатие.

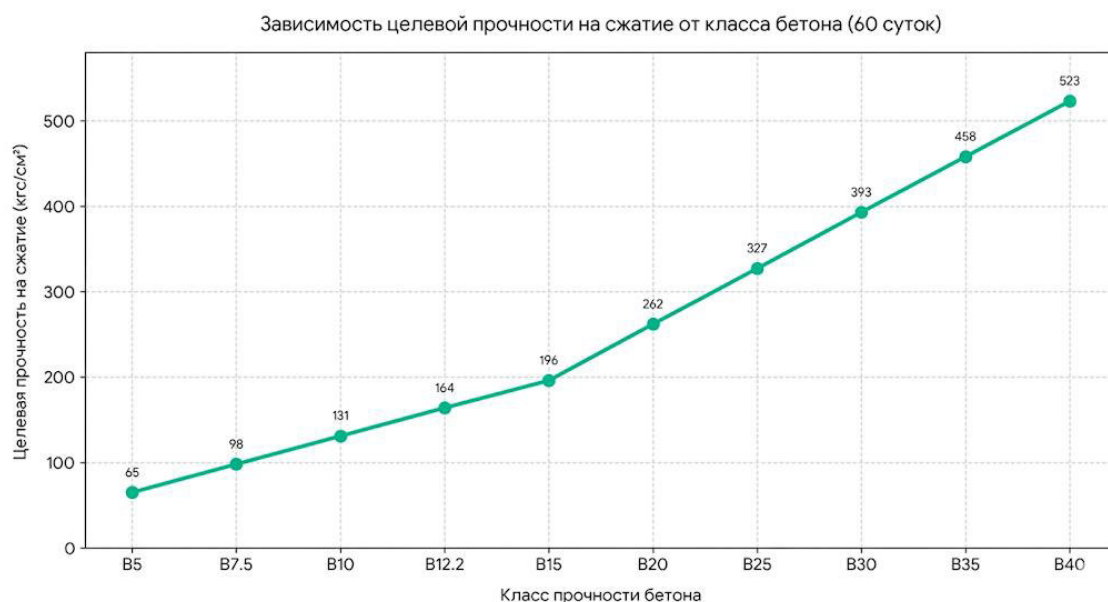


Рисунок 4 – Марки прочности бетона и целевые значения прочности при сжатии

Figure 4 – Concrete Strength Grades and Target Compressive Strength Values

Для оценки качества строительных смесей подготавливаются контрольные образцы в форме кубов, цилиндров или конусов. Испытание их прочности на сжатие осуществляется в лабораторных условиях с помощью гидравлического пресса. В случаях, когда требуется проверка уже готовых монолитных объектов, фрагменты бетона извлекаются путем вырезания или выпиливания. Наиболее распространенным методом отбора кернов является алмазное бурение колонковыми снарядами. Помимо разрушающих испытаний, широко внедряются бесконтактные и неразрушающие способы контроля: ультразвуковая дефектоскопия, метод ударного импульса и другие высокотехнологичные подходы с использованием специализированных приборов.

Частичное замещение портландцемента угольной золой в рецептурах бетона является эффективным инструментом декарбонизации строительства, так как именно производство цементного клинкера генерирует основную массу выбросов парниковых газов. Опираясь на исследовательскую базу, можно утверждать, что интеграция до 30% зольного остатка позволяет предотвратить эмиссию CO_2 в объеме от 0,7 до 1 тонны на каждый кубометр готовой смеси. Данная экологическая преференция достигается путем исключения из состава части углеродоемкого связующего и его замены техногенным сырьем. Математическое подтверждение сокращения углекислотного следа обосновывает целесообразность этой технологии в контексте глобальных климатических инициатив и стратегий устойчивого развития.

Интеграция угольной золы в производство бетона представляет собой перспективную стратегию, сочетающую в себе экономическую целесообразность и принципы экологической безопасности. Глобальные объемы генерации зольного остатка, являющегося следствием работы тепловых электростанций, ежегодно достигают колоссальных масштабов. Данный техногенный побочный продукт создает серьезные логистические и экологические трудности, связанные с его утилизацией и потенциальной опасностью для природы. Длительное складирование значительных масс золы на полигонах в черте жилых зон формирует долгосрочные риски для локальных экосистем и благополучия населения.

В мировом масштабе территории, занятые отвалами продуктов сжигания угля, сопоставимы с площадью небольших государств. Общий объем накопленных отходов исчисляется миллиардами тонн, а энергетическая отрасль продолжает ежегодно пополнять эти запасы миллионами тонн свежих поступлений. Критическое заполнение существующих площадок и ужесточение экологических нормативов ставят ТЭС перед жестким выбором: инвестировать огромные средства в системы утилизации или консервировать мощности из-за дефицита мест для складирования.

Рациональным выходом из сложившейся ситуации служит вовлечение золы-уноса в цикл производства строительных материалов, в частности – бетонных растворов. Такой подход реализует двойную выгоду: освобождает земли от техногенных свалок и снижает потребность в добыче первичных недр. Данная модель является классическим примером циркулярной экономики, где отходы одного сектора становятся ценным ресурсом для другого. Более того, использование золы повышает качественные характеристики бетона и способствует развитию тренда «зеленого» строительства.

Экономическая целесообразность использования золы в бетоноведении подтверждается расчетами. Поскольку доля портландцемента в структуре себестоимости бетонной смеси составляет около 35%, замена даже четверти этого объема зольным остатком позволяет снизить итоговые затраты на 8 – 9%. При средней стоимости кубометра бетона в 400 сомони (где расходы на цемент составляют до 80% от этой суммы), внедрение золы-уноса снижает себестоимость на 8%. В результате чистая экономия достигает примерно 70 сомони на каждый кубический метр произведенного материала, что существенно повышает конкурентоспособность предприятия.

Ниже приведен расчет экономической эффективности введения золы уноса в состав бетонной смеси.

Исходные данные для расчета: средняя стоимость 1 м³ бетона – 400 сомони; доля портландцемента в себестоимости бетона – 35 %; доля расходов на цемент от общей стоимости: до 80 %; процент снижения себестоимости при внедрении золы-уноса – 8 %; объем замены цемента зольным остатком – 25 % (четверть объема).

1. Расчет базовых показателей (без применения золы): сначала определим затратную часть на закупку вяжущего (цемента) в структуре стоимости одного кубического метра готовой продукции:

$$\text{Расходы на цемент} = 400 \text{ сомони} \times 0,80 = 320 \text{ сомони/м}^3$$

2. Расчет экономического эффекта (с применением золы): поскольку замена четверти объема цемента золой-уноса позволяет снизить итоговую себестоимость производства на 8 %, то определим размер чистой экономии на кубический метр:

$$\text{Экономия на 1 м}^3 = 400 \text{ сомони} \times 0,08 = 32 \text{ сомони/м}^3$$

3. Итоговые показатели эффективности: прямое снижение себестоимости – 8 %: итоговая чистая экономия (с учетом сопутствующих факторов) – до 70 сомони на каждый кубический метр произведенного материала

Это указывает на то, что замена 25 % портландцемента золой-уноса является высокоэффективным решением для строительного сектора в Республике Таджикистан, существенно повышающим рентабельность производства и конкурентоспособность предприятия на рынке.

Переход на использование золы-уноса в производстве строительных растворов обеспечивает двойной эффект: существенную экономию средств и эффективную переработку промышленных побочных продуктов. Сегодня это один из наиболее действенных инструментов конкурентной борьбы. Высокая инвестиционная привлекательность метода обусловлена балансом между прибылью и принципами экологической безопасности.

Основные выводы исследования, включая данные по сокращению эмиссии CO₂ и повышению доходности производства, предоставлены в распоряжение ключевых партнеров. Полученные результаты наглядно обосновывают целесообразность модернизации технологических процессов. Внедрение подобных решений укрепляет парадигму устойчивого развития в строительной индустрии, способствуя защите природного капитала и созданию экологически чистой городской среды.

Заключение

Резюмируя вышеизложенное, следует констатировать, что предложенный способ модификации бетона с помощью золы-уноса полностью оправдал ожидания. Данная технология демонстрирует комплексный положительный эффект, выражающийся в сокращении производственных затрат, качественном улучшении структурных характеристик смеси и снижении антропогенного давления на экосистему. Применение отходов промышленности в качестве

частичного заменителя вяжущего позволило оптимизировать сметную стоимость строительства, что делает готовое жилье и инфраструктуру более доступными для населения.

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

Литература

1. Золошлаковые отходы. Часть 1: На пороге экологического коллапса // Медицентр ИХТЦ. – 2016. – URL: <https://ect-center.com/mediacenter/kuda-devat-zolu-zoloshlakovyey-otkhody-kak-ugroza-ekologii> (дата обращения: 18.05.2026).
2. Производителям бетонов и растворов // ООО «СЛК Цемент». – URL: http://слк.рф/?page_id=281 (дата обращения: 18.05.2026).
3. Мехта, П. К. Бетон: Микроструктура, свойства и материалы. / Мехта, П. К., и Монтейру, П. Дж. М. // Образование 2014. Макгроу-Хилл. С. 127–133
4. Миндесс С. Бетон. Прентис-холл. / Миндесс С., Янг Дж. Ф. и Дарвин Д. // Технологии бетонов 2003. С. 92–99.
5. Малхотра, В. М. Пуццолановые и цементирующие материалы. / Малхотра, В. М., и Мехта, П. К. // CRC-пресс. 2006. С. 121–125.
6. Томас, доктор медицинских наукР. / Использование побочных продуктов сжигания угля в экологически чистом бетоне. // Томас, доктор медицинских наук, и Гупта, Р. Издательство "Вудхед Пабблишинг". 2013. С. 162–173
7. Гартнер, Э. Интересные с промышленной точки зрения подходы к получению цементов с низким содержанием CO₂ / Гартнер, Э. // Исследование цемента и бетона. 2004. 34 (9), С. 1489-1498.
8. Лотенбах Б. Дополнительные цементирующие материалы. / Лотенбах Б., Скривнер К. и Хутон Р. Д. // Исследование цемента и бетона. 2011. 41 (12), 1244-1256.
9. Ши, К. Утилизация угольной золы для производства экологически чистого бетона / Ши, К., и Цянь, Дж. // Журнал экологически чистого производства. 2017. №149, С. 1142-1157.
10. Акрамов А.А. Возможные пути утилизации золы угля для производства строительных материалов / Шарифов А., Акрамов А.А., Субхонов Д.К., Шодиев Г.Г., Улукханов Ал.А., Ахмадов Ш.И. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Развитие архитектуры, строительства и производства строительных материалов», (25 апреля 2015 г.) г. Худжанд, 2015. – С. 185-188.
11. Акрамов А.А. Влияние количества добавки золы-уноса на механическую прочность цементного камня / Шарифов А., Акрамов А.А., Муминов А.К. Акрамова З.А. Акрамова Ф.А. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные задачи градостроительства и архитектуры» (27 ноябрь 2019) г. Душанбе, С. 253-257.
12. Акрамов А.А. Модифицирование цемента золой угля Фан-Ягнобского месторождения для повышения прочности бетона / Шарифов А., Акрамов А.А.Назирова Я.Г.Муминов А.К.Ахмедов М.Ф. // Политехнический вестник, Серия: Инженерные исследования 1(57)-2022. – С. 157–163.

References

1. Ash and Slag Waste. Part 1: On the Verge of an Environmental Collapse // Media Center of the Engineering Chemical Technology Center (ECT Center). – 2016. – URL: <https://ect-center.com/mediacenter/kuda-devat-zolu-zoloshlakovyey-otkhody-kak-ugroza-ekologii> (accessed: 18.05.2026).
2. For Concrete and Mortar Manufacturers // SLK Cement LLC. – URL: http://слк.рф/?page_id=281 (accessed: 18.05.2026).
3. Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education, 2014, pp. 127–133.
4. Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. Concrete. Prentice Hall, 2003, pp. 92–99.
5. Malhotra, V.M., Mehta, P.K. Pozzolanic and Cementitious Materials. CRC Press, 2006, pp. 121–125.
6. Thomas, M.D.A., Gupta, R. Use of Coal Combustion By-Products in Sustainable Concrete. Woodhead Publishing, 2013, pp. 162–173.

7. Gartner, E. Industrially Interesting Approaches to Low-CO₂ Cement Production. Cement and Concrete Research. 2004, Vol. 34, No. 9, pp. 1489–1498.
8. Lothenbach, B., Scrivener, K., Hooton, R.D. Supplementary Cementitious Materials. Cement and Concrete Research. 2011, Vol. 41, No. 12, pp. 1244–1256.
9. Shi, C., Qian, J. Coal Ash Utilization for Sustainable Concrete Production. Journal of Cleaner Production. 2017, No. 149, pp. 1142–1157.
10. Akramov, A.A., Sharifov, A., Subkhonov, D.K., Shodiev, G.G., Ulukhanov, A.A., Akhmadov, Sh.I. Possible Ways of Coal Ash Utilization for the Production of Construction Materials. In: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference “Development of Architecture, Construction and Production of Building Materials”, Khujand, April 25, 2015, pp. 185–188.
11. Akramov, A.A., Sharifov, A., Muminov, A.K., Akramova, Z.A., Akramova, F.A. Influence of Fly Ash Addition Amount on the Mechanical Strength of Cement Stone. In: Proceedings of the Republican Scientific and Practical Conference “Modern Problems of Urban Planning and Architecture”, Dushanbe, November 27, 2019, pp. 253–257.
12. Akramov, A.A., Sharifov, A., Nazirov, Ya.G., Muminov, A.K., Akhmedov, M.F. Modification of Cement with Coal Ash from the Fan-Yagnob Deposit to Increase Concrete Strength. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2022, No. 1(57)., pp. 157–163.

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

TJ	RU	EN
Абдуганиев Абдумачид Мамасодиқович	Абдуганиев Абдумаджид Мамасодиқович	Abduganiev Abdumadzhid Mamasodikovich
муаллими калон	Старший преподаватель	senior lecturer
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: shahboz04@mail.ru		
0009-0007-7879-6984		
TJ	RU	EN
Акрамов Авазҷон Абдуллоевӣ	Акрамов Авазжон Абдуллоевич	Akramov Avazjon Abdulloevich
Номзади илмҳои техники, 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 Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: akramov.avaz@mail.ru		
0000-0002-7084-9128		
TJ	RU	EN
Љуракулов Муродали Роҳатович	Джуракулов Муродали Роҳатович	Jurakulov Murodali Rohatovich
Номзади илмҳои техники, и.в. дотсент	Кандидат технических наук, и.о. доцента	Candidate of Technical Sciences, Acting Associate Professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими	Tajik Technical University named after Acadtmician M.S. Osimi
E-mail: murodali1969@gmail.ru		
0000-0003-3604-8682		