Оригинальная статья

УДК 628.477.7 © Б.П. Куликов✉, Р.А. Назиров, А.И. Безруких, А.М. Жжоных, Н.С. Новиков, П.Ю. Веде, И.В. Тарасов, И.Л. Константинов, Д.С. Ворошилов, 2025

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия
✉ e-mail: kulikov-boris@yandex.ru

Original Paper

UDC 628.477.7 © B.P. Kulikov✉, R.A. Nazirov, A.I. Bezrukikh, A.M. Zhzhonykh, N.S. Novikov, P.Yu. Vede, I.V. Tarasov, I.L. Konstantinov, D.S. Voroshilov, 2025

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
✉ e-mail: kulikov-boris@yandex.ru

Исследование возможности использования золы уноса Березовской ГРЭС в строительстве*

Study of the possibility of using fly ash from the Berezovskaya SDPS in construction

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-11-57-63

Приведены результаты исследования свойств золы уноса Березовской ГРЭС для оценки возможности ее использования в качестве активной минеральной добавки в цемент. Показана целесообразность применения золы уноса в качестве расширяющегося или напрягающего вяжущего и в составе беззвучных химических средств для разрушения различных конструкций. Экспериментально установлено, что добавка золы уноса совместно с горелой породой и пластификатором общим количеством не более 20% обеспечивает прочность цемента не ниже, чем у стандартного состава из цемента и песка.

Ключевые слова: *зола уноса, горелая порода, цемент, активная минеральная добавка, пластификатор, оксид кальция, клинкер, рентгенофазный анализ.*

Для цитирования: Исследование возможности использования золы уноса Березовской ГРЭС в строительстве / Б.П. Куликов, Р.А. Назиров, А.И. Безруких и др. // Уголь. 2025;(11):57-63. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-57-63.

Abstract

The article presents the results of a study of the properties of fly ash from the Berezovskaya SDPS to assess the possibility of using it as an active mineral additive to cement. It demonstrates the feasibility of using fly ash as an expanding or stressing binder and as part of silent chemical agents for the destruction of various structures. it has been experimentally found that the addition of fly ash together with burnt rock and a plasticizer in a total amount of no more than 20% ensures cement strength no lower than that of a standard composition of cement and sand.

Key words

Fly ash, burnt rock, cement, active mineral additive, plasticizer, calcium oxide, clinker, X-ray phase analysis.

Acknowledgements

The work was performed within the framework of the state research assignment of the Siberian Federal University, Project No. FSRZ-2023-0009.

КУЛИКОВ Б.П.
Доктор хим. наук, ведущий научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: kulikov-boris@yandex.ru

НАЗИРОВ Р.А.
Доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой Проектирования зданий и экспертизы недвижимости, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: rnazirov@sfu-kras.ru

БЕЗРУКИХ А.И.
Канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Физикохимии металлургических процессов и материалов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: ai@bezru.ru

ЖЖОНЫХ А.М.
Заведующий лабораторией Строительной экологии и энергоэффективности, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: AZhzhonykh@sfu-kras.ru

** Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2023-0009.*

НОВИКОВ Н.С.
Старший преподаватель кафедры Строительных материалов и технологии строительства, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: novikov.nick.s@gmail.com

ВЕДЕ П.Ю.
Старший преподаватель кафедры Проектирования зданий и экспертизы недвижимости, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: pvede@sfu-kras.ru

ТАРАСОВ И.В.
Канд. техн. наук, доцент, директор Инженерно-строительного института, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: ivtarasov@sfu-kras.ru

КОНСТАНТИНОВ И.Л.
Канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории Низкоуглеродной металлургии и энергетики Инженерно-строительного института, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: ilcon@mail.ru

ВОРОШИЛОВ Д.С.
Канд. техн. наук, заведующий лабораторией Физикохимии металлургических процессов и материалов, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», 660041, г. Красноярск, Россия, e-mail: d.s.voroshilov@gmail.com

For citation
Kulikov B.P., Nazirov R.A., Bezrukikh A.I., Zhzhonykh A.M., Novikov N.S., Vede P.Yu., Tarasov I.V., Konstantinov I.L., Voroshilov D.S. Study of the possibility of using fly ash from the Berezovskaya SDPS in construction. *Ugol'*. 2025;(11):57-63. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-11-57-63.

ВВЕДЕНИЕ

Отходы от сжигания угля при работе тепловых электростанций – зола уноса (ЗУ) накапливаются в количествах, превышающих миллионы кубометров, а по площади могут занимать десятки гектаров, нанося вред экологии окружающей местности [1, 2, 3]. Согласно работам [4, 5] ЗУ можно использовать в составе безобжиговых вяжущих и активных минеральных добавок (АМД) в строительных материалах благодаря содержанию в них кислых и основных оксидов, например, в качестве компонентов сырьевого шлама для обжига клинкера. Полезные качества ЗУ привлекают ученых разных стран, поэтому исследованию свойств ЗУ посвящено много работ. В источниках [3, 6, 7] показано, что благодаря своим эксплуатационным характеристикам и экологичности строительные материалы на основе ЗУ имеют большой потенциал как альтернатива обычному портландцементу, и рекомендуется проведение прикладных исследований в этом направлении. Авторами работы [8] описаны результаты изучения использования ЗУ в качестве компонента цемента в бетоне сверх общепринятого уровня, равного 30%. В источнике [9] приведен обзор механических свойств и долговечности бетона с отходами строительства и ЗУ при производстве новых марок бетона. В работе [10, 11] даны результаты, подтверждающие долговечность бетонного покрытия, уплотненного катком, с большим объемом ЗУ и содержащего резиновую крошку и наночастицы кремнезема.

Топливом для энергетических котлов Березовской ГРЭС служит бурый уголь Канско-Ачинского бассейна (Красноярский край). Годовой объем наращивания золошлаковых отходов на Березовской ГРЭС составляет около 180 тыс. т. Площадь золошлакоотвала составляет 50 га, а его проектный объем – 1,8 млн куб. м. Поэтому целью работы является исследование свойств золы уноса для оценки возможности ее использования в качестве активной минеральной добавки в строительные материалы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Доставку угля до промышленной площадки электростанции производят двумя внешними конвейерами производительностью по 4400 т/ч с открытого разреза Березовский-1. Для уменьшения ошлакования стен топки в котле принято горение топлива с температурой ядра факела 1250-1300°С. Удаление шлака, выпадающего в холодную воронку из топочной камеры, производят цепным скребковым конвейером. Каждый энергоблок ГРЭС оснащен тремя электрофильтрами типа ЭГД-2-128-9-6-4-200-5 с эффективностью работы 98,5%. Уловленную золу из бункеров электрофильтров и форкамер подают системой струйных насосов в золоосадительные станции, откуда пневмовинтовыми насосами транспортируют в осадительные станции и далее в багерную насосную. Затем отходы транспортируют до золошлакоотвала гидравлическим способом. По данным рентгенофазового анализа (РФА) средний минералогический и химический состав ЗУ Березовской ГРЭС, полученной с четырех полей электрофильтра, представлен в *табл. 1, 2*.

Таблица 1

Средний минералогический состав ЗУ Березовской ГРЭС, % (масс.)

Average mineralogical composition of fly ash from the Berezovskaya regional power station, % (by weight)

Минералы, % (масс.)								
SiO_2	CaO	MgO	$CaSO_4$	$3CaO\ Al_2O_3$	$Ca_2Fe_{1.28}Al_{0.72}O_5$	$Ca_4Al_6O_{12}SO_4$	$Ca(OH)_2$	$CaCO_3$
15,9±3,9	44,0±4,0	7,85±0,4	11,5±2,2	10,1±1,2	5,6±1,32	3,40±0,03	0,9±0,1	0,6

Таблица 2

Средний химический состав ЗУ Березовской ГРЭС, % (масс.)

Average chemical composition of fly ash from the Berezovskaya regional power station, % (by weight)

Элементы, % (масс.)								
0	C	S	Si	Al	Mg	Ca	Fe	H
37,0±0,5	0,1	2,5±0,2	8,3±0,5	2,7±0,2	5,1±0,1	41,9±0,5	2,3±0,1	0,04

Результаты РФА показали высокое содержание в ЗУ Березовской ГРЭС свободного оксида кальция с концентрацией от 40 до 50% (*см. табл. 1*), а общее содержание кальция в усредненной пробе составило около 42% (*см. табл. 2*). В составе ЗУ также есть соединения с вяжущими свойствами: сульфат кальция $CaSO_4$, трехкальциевый алюминат $3CaO\ Al_2O_3$, алюмоферрит кальция $Ca_2Fe_{1.28}Al_{0.72}O_5$ и сульфоалюминат кальция $Ca_4Al_6O_{12}SO_4$. Таким образом, ЗУ, кроме основного вяжущего соединения, содержит около 30% соединений, обладающих такими же свойствами.

Величина удельной поверхности, характеризующая реакционную способность вяжущих материалов и минеральных добавок, определенная для ЗУ по методу Брунауэра–Эммета–Теллера [12, 13], составила 4600 $см^2/г$, что выше, чем у цементов (2800-4500 $см^2/г$) и значительно превышает данный параметр для качественного портландцемента.

Определение объема и размера пор в частицах ЗУ по методу Баррета–Джойнера–Халенда (BJH) [13], показало, что ЗУ почти не содержит микропор, и их совокупный объем не превышает $6{,}9\times10^{-3}$ $см^3/г$ при средней ширине 7-9 нм. Это связано с условиями образования ЗУ в котлоагрегатах, где поверхность частиц золы оплавляется под воздействием высоких температур сжигания угля. Сферическая поверхность частиц ЗУ, практическое отсутствие пор и дефектов на поверхности частиц, низкая реакционная способность, гидратационное расширение при взаимодействии с водой – все это является важными факторами, определяющими поведение ЗУ в составе вяжущих гидравлического твердения.

Исследования частиц ЗУ, проведенные по ГОСТ Р ИСО 22309-2015 с использованием сканирующих электронных микроскопов Tescan Vega III SBH Hitachi SU3500/Model3500 SEM, представленные на *рис. 1*, показали, что проба почти полностью состоит из сферических частиц различного размера и состава, и в ней в меньшем количестве встречаются частицы угловатой и неправильной формы.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа частиц ЗУ с номерами мест съемки спектров указаны на *рис. 1. б* и в *табл.* 3.

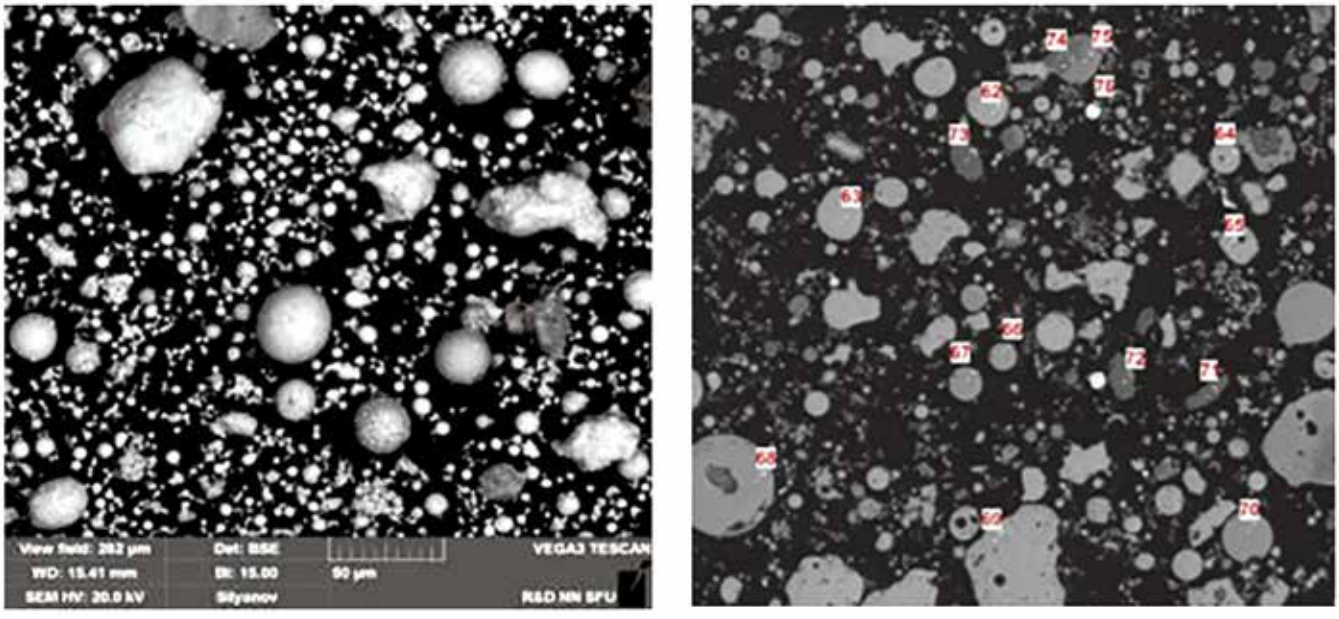

Рис. 1. Общий вид частиц золы уноса Березовской ГРЭС, полученный методом сканирующей электронной микроскопии

Fig. 1. A general view of the fly ash particles from the Berezovskaya regional power station obtained by scanning electron microscopy

Таблица 3

Химический состав частиц ЗУ, %, (масс.)

Chemical composition of fly ash particles, %, (by weight)

№ спектра	Минерал	Элементы, % (масс.)											
		O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	Ca	Ti	Fe	Sr	Ba
62	Шлак	39,8	–	2,0	4,2	10,0	–	–	40,8	–	3,2		–
63	Карбонат	33,8	–	5,5	5,1	0,5	–	–	51,5	–	2,1	1,4	–
64	Карбонат	35,5	–	3,1	7,5	0,4	–	–	48,8	0,7	2,3	1,7	–
65	Карбонат	34,2	–	4,1	5,1	0,9	–	–	52,9	–	1,5	1,3	–
66	Шлак	40,5	–	4,3	2,1	15,3	–	–	35,0	–	2,9	–	–
67	Шлак	41,4	0,4	3,4	1,4	21,1	–	–	29,8	–	2,5	–	–
68	Шлак	41,8	0,5	2,8	2,4	19,7	–	–	30,8	–	2,1	–	–
69	Шлак	37, 3	–	0,9	3,8	11,7	–	–	42,7	–	3,6	–	–
70	Шлак	43,6	–	3,0	2,2	20,9	–	–	27,5	0,6	2,2	–	–
71	Кварц	53,0	–	–	–	47,0	–	–	–	–	–	–	–
72	Кварц	52,5	–	–	–	47,5	–	–	–	–	–	–	–
73	Кварц	52,3	–	–	–	47,7	–	–	–	–	–	–	–
74	Кварц	53,2	–	–	–	46,8	–	–	–	–	–	–	–
75	Шлак	44,8	1,8	1,9	2,1	29,2	–		18,4	–	1,2	–	–
76	Барит	22,3	–	–	–	–	2,4	4,31	1,4	–	–	4,0	65,6

Таблица 4

Содержание естественных радионуклидов в ЗУ Березовской ГРЭС, Бк/кг

Content of natural radionuclides in fly ash from the Berezovskaya regional power station, Bq/kg

Наименование определяемых показателей	Результат испытаний
Удельная эффективная активность $A^*_{эфф}$	61
Удельная активность Cs–137, менее	3
Удельная активность Радий Ra-226	23
Удельная активность Торий Th-232	23
Удельная активность Калий K-40	77

** Примечание. Удельная эффективная активность $A_{эфф}$ вычислялась по формуле:*

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1{,}31\ A_{Th} + 0{,}085\ A_K,$$

где A_{Ra}, A_{Th}, A_K – удельные активности радия, тория и калия соответственно, Бк/кг.

Важным показателем, показывающим возможность использования ЗУ в строительстве, служит концентрация в ней естественных радионуклидов, определяемая по значению удельной эффективной активности ($A_{эфф}$) природных радионуклидов. В *табл. 4* приведены результаты испытаний ЗУ Березовской ГРЭС на соответствие требованиям МИ № 126/210-(01.00250-2008)-2011.

Расчетная удельная эффективная активность ЗУ Березовской ГРЭС составила 61 Бк/кг, поэтому, согласно ГОСТ 30108-94, эти отходы являются радиационно-безопасным материалом и без ограничений могут использоваться в строительной отрасли.

Особое внимание для оценки возможности использования ЗУ в качестве добавки в цементные и бетонные смеси уделено свободному оксиду кальция. Температура сжигания углей Березовского месторождения – около 1250°С и превышает температуру диссоциации известняка (850-900°С). При более высоких температурах, по данным [14], происходит рекристаллизация оксида кальция, сопровождающаяся образованием более плотных, крупных и правильных кристаллов. При этом получаемый CaO медленнее реагирует с водой, а водопотребность известкового теста снижается.

Гидратационное расширение ЗУ позволяет рекомендовать ее в качестве добавки в расширяющихся цементах, отличающихся способностью к росту объема при схватывании и твердении. Разновидностью этого цемента является напрягающий цемент (ГОСТ Р 56727-2015) – высокоэффективное вяжущее, обладающее гидроизоляционными свойствами, состоящее из тонкоизмельченного портландцементного клинкера, расширяющейся добавки и гипса. Свойства ЗУ указывают на потенциальную возможность использования ее в качестве составляющей расширяющегося или напрягающего вяжущего в результате конверсии CaO в портландит и кальцит. Поэтому была проведена оценка потенциала собственно ЗУ Березовской ГРЭС и в композициях с активными минеральными добавками техногенного происхождения для получения расширяющихся вяжущих.

В работах [15, 16] показано, что повысить качество расширяющихся композиций возможно вводом суперпластификаторов – многокомпонентных универсальных добавок для бетонных растворов, обладающих пластифицирующим и водоредуцирующим действием. Эти добавки не меняют основные компоненты (цемент, воду, песок), а лишь придают смеси дополнительные качества.

Изучение параметров расширения ЗУ без добавок и в композиции с другими техногенными отходами, цементом и пластификатором проводили на смесях, состав которых приведен в *табл. 5 и 6*. В состав смесей добавляли пластификатор СВВ-500, а также ЗУ Ново-Иркутской ТЭЦ, горелую породу г. Черемхова и п. Бородино. Равномерность изменения объема определяли по ГОСТ 30744-2001 в кольцах Ле-Шателье [17].

Из эксперимента установлено, что на поверхности всех испытуемых составов, кроме состава № 3 с цементом, появились трещины. Наибольшее количество трещин, преимущественно радиальных, наблюдалось у образцов № 1 и № 2, содержащих ЗУ, но без АМД. Трещинообразованию способствовала добавка пластификатора СВВ-500, снизившая водовяжущее отношение. Снижение количества ЗУ

Таблица 5

Составы исследуемых смесей % (масс.)

Composition of the mixtures studied, % (by weight)

Материалы	Составы смесей, % (масс.)					
	1	2	3	4	5	6
ЗУ Березовской ГРЭС	77	78	38	38	38	38
Вода	23	21	23	23	23	23
Пластификатор СВВ-500	–	1	–	–	–	–
Цемент	–	–	38	–	–	–
ЗУ Ново-Иркутской ТЭЦ	–	–	–	38	–	–
Горелая порода г. Черемхово	–	–	–	–	38	–
Горелая порода п. Бородино	–	–	–	–	–	38

Таблица 6

Параметры расширения исследуемых смесей (масс. %) при их гидратации

Expansion parameters of the mixtures studied (by weight %) during their hydration

Параметры	Составы смесей, % (масс.)					
	1	2	3	4	5	6
Расширение на воздухе, мм	66,7	52,1	17,4	44,4	53,0	50,2
Расширение в воде, мм	42,3	63,9	42,7	13,8	12,8	7,0
Расширение на воздухе и в воде, мм	109,0	116,0	60,1	58,2	65,8	57,2
Дополнительное расширение в воде, %	61,2	44,9	29,0	76,3	80,5	87,8

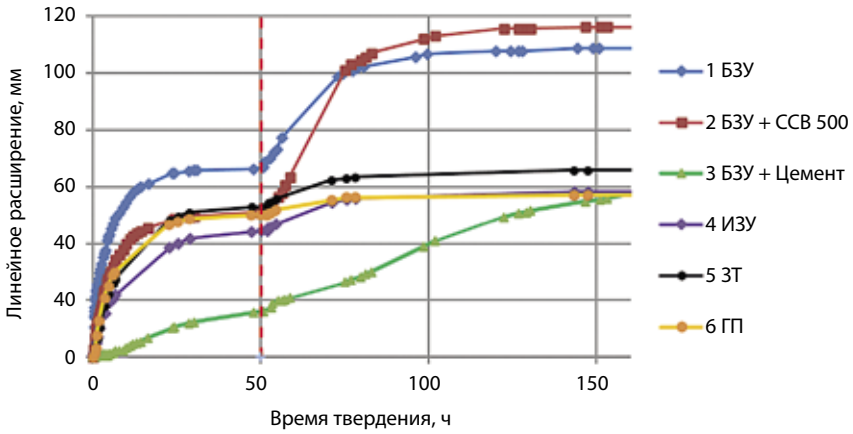

Рис. 2. Расширение колец Ле–Шателье от времени твердения составов смесей №№ 1-6 (см. табл. 5) до и после помещения в воду (граница сред показана вертикальной красной пунктирной линией)

Fig. 2. Expansion of the Le Chatelier molds depending on the curing time of mixtures No. 1-6 (Table 5) before and after immersion in water (the boundary between the media is shown by a vertical red dotted line)

в образцах №№ 4-6 из-за введения техногенных отходов снизило склонность к трещинообразованию.

На *рис. 2* представлена кинетика расширения всех составов при твердении в течение 50 ч на воздухе с последующим помещением колец с образцами в воду. Перевод образцов из воздуха в воду отмечен вертикальной красной пунктирной линией (*см. рис. 2*).

Результаты экспериментов также показали, что расширение исследуемых составов было пропорционально количеству ЗУ, содержащей максимальное количество расширяющегося компонента CaO. В пробах №№ 3-5 и 6 содержание CaO почти в два раза меньше, чем в № 1 и № 2, поэтому расширение этих составов снизилось на 45-50%.

Расширяющиеся цементы – это отдельная категория неорганических вяжущих, проявляющих способность к увеличению объема в процессе схватывания и твердения. Одним из его видов является напрягающий цемент, который благодаря своим характеристикам широко используется при изготовлении железобетонных конструкций. Полученные в ходе исследований свойств ЗУ Березовской ГРЭС экспериментальные данные указывают на потенциальную возможность их использования в качестве составляющей расширяющегося или напрягающего вяжущего и в составе беззвучных химических средств для разрушения различных конструкций. Этот вывод основан на гидратационном расширении высококальциевой ЗУ в результате конверсии CaO в портландит и кальцит.

При вовлечении ЗУ Березовской ГРЭС в строительство необходимо учитывать аномально высокую (40-50%) концентрацию в ней малоактивного оксида кальция, что проявляется в замедленной гидратации и негативном влиянии на формирование искусственного камня. Исследования показали, что основными дестабилизирующими процессами при гидратации ЗУ являются образование гидроксида и карбоната кальция, а также эттрингита – минерала, называемого также «цементной бациллой». Он имеет кристаллическую структуру, в которой отдельные кристаллы сильно растут при наборе прочности и разрушают сам цемент. Синтез этих соединений на поздних сроках твердения цементного теста приводит к изменению размеров и трещинообразованию в структуре формирующегося искусственного камня.

Таблица 7

Составы смесей для экспериментов по частичной замене цемента на смесь техногенных отходов

Composition of the mixtures for testing partial replacement of cement with a mixture of man-made waste

Компоненты смеси		
Цемент	Песок	Состав активной минеральной добавки, г
Весовые части		
1	3	Контрольный
0,8	3	1. 33 г ЗУ + 77 г ГП + 8,25 г СВВ-500
0,8	3	2. 33 г ЗУ + 77 г ГП + 2,75 г СВВ-500
0,8	3	3. 55 г ЗУ + 55 г ГП + 8,25 г СВВ-500
0,8	3	4. 55 г ЗУ + 55 г ГП + 2,75 г СВВ-500
0,8	3	5. 66 г ЗУ + 44 г ГП + 8,25 г СВВ-500
0,8	3	6. 66 г ЗУ + 44 г ГП + 2,75 г СВВ-500

Для снижения негативных факторов на деструктивные последствия гидратации ЗУ можно ограничить добавку ЗУ в вяжущее (не более 10-15%) или проводить предварительную гидратацию свободного оксида кальция и других активных соединений ЗУ. В последнем случае ЗУ утратит значительную часть своей активности, но при этом может без ограничений использоваться в качестве известь содержащего соединения.

Далее были проведены эксперименты по частичной замене портландцемента на смесь из техногенных отходов, играющих роль АМД. Для контрольного образца использовали смесь портландцемента класса прочности 32,5 с пофракционным песком максимальной крупностью 1,25 мм в соотношении 1 к 3. В остальных опытах 20% цемента заменяли смесью из отходов с добавкой пластификатора СВВ-500 на основе эфира карбоксилата и лимонной кислоты. В состав контрольного образца входило 500 г цемента и 1500 г песка. В состав смеси с добавкой АМД входило 400 г цемента, 100 г АМД и 1500 г песка. В качестве АМД использовали ЗУ Березовской ГРЭС, горелую породу угольных месторождений Черемховского района Иркутской области (далее ГП) и пластификатор СВВ-500. Составы экспериментальных смесей приведены в *табл. 7*.

Составы АМД смешивали и измельчали в шаровой мельнице Retsch PM400 в течение 5 мин при скорости вращения 400 об./мин. Смеси (цемент + АМД + песок) смешивали вручную. Образцы-балочки 40×40×160 мм формовали сериями. Воду добавляли до получения необходимой консистенции цементного теста. Практически во всех случаях, где использовали смесь цемента с АМД, отношение воды к цементу с АМД составило 0,52. Цементное тесто уплотняли в формах на встряхивающем столике. В результате экспериментов у всех образцов не наблюдалось увеличение объема, и отсутствовали трещины. Испытания на предел прочности при сжатии и изгибе проводили на испытательной машине Instron 3369 на образцах-балочках размером 40×40×160 мм по ГОСТ 30744-2001 после 28 и 90 суток твердения. Перед испытаниями образцы подвергали сушке. Результаты испытаний представлены в *табл. 8*.

Из сравнения результатов испытаний контрольного образца (цемент + песок) с образцами, в которых 20% цемента замещали АМД, установлено следующее. Четыре образца из шести с АМД (ЗУ Березовской ГРЭС + ГП Черемхово + СВВ-500) имеют более высокие показатели по пределу прочности по сравнению с контрольным образцом в возрасте 28 и 90 сут. После 90 сут. контрольный образец имеет более высокое значение прочности на изгиб по сравнению с составами с АМД. В 28 суточном возрасте прочность образцов на изгиб с АМД (ЗУ Березовской ГРЭС + ГП Черемхово + пласт) соизмерима с прочностью на изгиб контрольного образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что зола уноса Березовской ГРЭС может быть использована в качестве активной минеральной добавки для расширяющегося или напрягающего вяжущего и в составе беззвучных химических средств. Кроме того, добавка золы уноса совместно с горелой породой и пластификатором в цемент обеспечивает прочность цемента не ниже, чем у стандартного состава цемента и песка.

Список литературы • References

1. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. 2024. № 2. С. 85-88. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88.
   Astafyeva O.E. Application of ash and slag waste in the building materials industry. *Ugol'.* 2024;(2):85-88. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88.
2. Dheeresh Kumar Nayak, Abhilash P.P., Rahul Singh, Rajesh Kumar, Veerendra Kumar. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials.* 2022;(6):100143. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143.

Таблица 8

Плотность и прочность образцов-балочек на основе цемента и с добавками АМД

Density and strength of the beam samples made of cement with active mineral additives

Состав смеси	Прочность на сжатие, МПа		Прочность на изгиб, МПа		Плотность, кг/м^3
	28 сут.	90 сут.	28 сут.	90 сут.	
Контрольный	32,2	38,8	5,1	8,3	2135
1. 33 г ЗУ + 77 г ГП + 8,25 г СВВ-500	26,9	44,0	5,1	6,5	2178
2. 33 г ЗУ + 77 г ГП + 2,75 г СВВ-500	35,3	36,7	5,2	7,8	2220
3. 55 г ЗУ + 55 г ГП + 8,25 г СВВ-500	35,0	43,0	5,1	5,8	2158
4. 55 г ЗУ + 55 г ГП + 2,75 г СВВ-500	35,2	41,7	6,0	5,2	2172
5. 66 г ЗУ + 44 г ГП + 8,25 г СВВ-500	33,9	40,7	5,9	6,6	2246
6. 66 г ЗУ + 44 г ГП + 2,75 г СВВ-500	24,9	30,4	4,2	7,0	2172

3. Bishnu Kant Shukla, Aakash Gupta, Sachin Gowda, Yuvraj Srivastav. Constructing a greener future: A comprehensive review on the sustainable use of fly ash in the construction industry and beyond. *Materials Today: Proceedings.* 2023;93(3):257-264, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.179.
4. Finkelman R.B., Wolfe A., Hendryx M.S. The future environmental and health impacts of coal. *Energy Geoscience.* 2021;2(2):99-112. https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.11.001.
5. Kelechi S.E., Adamu M., Uche O.A.U., Okokpujie I.P., Ibrahim Y.E., Obianyo, I.I. A comprehensive review on coal fly ash and its application in the construction industry. *Cogent Engineering.* 2022;9(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2114201.
6. Gang Xu, Xianming Shi, Characteristics and applications of fly ash as a sustainable construction material: A state-of-the-art review, Resources. *Conservation and Recycling.* 2018;(136):95-109. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.010.
7. Chen W., Shaikh F., Li Z., Ran W., Hao H. Dynamic compressive properties of high volume coal fly ash (HVCFA) concrete with nano silica. *Construction and Building Materials.* 2021;(301):124352. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124352.
8. McCarthy M.J., Dhir R.K. Development of high volume fly ash cements for use in concrete construction *Fuel.* 2005;84(11):1423-1432, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.08.029.
9. Da Silva S.R., Andrade J.J.d.O. A Review on the Effect of Mechanical Properties and Durability of Concrete with Construction and Demolition Waste (CDW) and Fly Ash in the Production of New Cement Concrete. *Sustainability*. 2022;(14):6740. https://doi.org/10.3390/su14116740.
10. Mohammad Shariful Islam, Tausif E Elahi, Azmayeen Rafat Shahriar, Nashid Mumtaz. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction. *Construction and Building Materials.* 2020;(255):119392. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119392.
11. Горелая порода черемховских терриконик – активная минеральная добавка / Е.А. Левченко, В.А. Воробчук, Е.А. Филоненко и др. // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2012. № 2. С. 99-105.
Levchenko E.A., Vorobchuk V.A., Filonenko E.A., Filonenko K.A. Brunt rock of Cheremkhovo pit tips as active mineral admixture. *Izvestiya vuzov. Investitsii, stroitel'stvo, nedvizhimost'.* 2012;(2):99-105. (In Russ.).
12. Niu H., Liu Y., Wu K., Wu J., Li S., Wang H. Study on Pore Structure Change Characteristics of Water-Immersed and Air-Dried Coal Based on SEM-BET. *Combustion Science and Technology*, 2022;195(16):3994–4016.
13. Raoof Bardestani, Gregory S. Patience, Serge Kaliaguine. Experimental methods in chemical engineering: specific surface area and pore size distribution measurements – BET, BJH, and DFT. *Canadian Society for Chemical Engineering*. 2019:2781-2791.
14. Gomado ,Foster Dodzi, Khalifeh,Mahmoud, Saasen Arild, Sanfelix, Susana G., Kjøniksen Anna-Lena, Jan Aage Aasen. Effect of Calcium Expansive Additives on the Performance of Granite-Based Geopolymers for Zonal Isolation in Oil and Gas Wells. *SPE J.* 2023;(28):2790-2801. DOI: https://doi.org/10.2118/217431-PA.
15. Shuai Xu, Pengyuan Hou, Runran Li, Fidelis T. Suorineni. An improved outer pipe method for expansive pressure measurement of static cracking agents. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2022;32(1):27-39. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.11.011.
16. Sung-Hoon Kang, Minkyeong Kwon, Yang-Hee Kwon, Juhyuk Moon. Effects of polycarboxylate ether (PCE)-based superplasticizer on the dissolution and subsequent hydration of calcium oxide (CaO). *Cement and Concrete Research.* 2021;(146)106467. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106467.
17. Titova L., Titov M. Analysis of Russian and foreign methods of testing mineral additives for tensing concrete. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020;24(1):148-154.

Authors Information
Kulikov B.P. – Doctor of Chemical Sciences, leading Researcher, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: kulikov-boris@yandex.ru

Nazirov R.A., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Building Design and Real Estate Expertise, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: rnazirov@sfu-kras.ru

Bezrukikh A.I. – PhD (Engineering), leading Researcher of the Laboratory of Physical Chemistry of Metallurgical Processes and Materials, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: ai@bezru.ru

Zhzhonykh A.M. – Head of the Laboratory of Construction Ecology and Energy Efficiency, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: AZhzhonykh@sfu-kras.ru

Novikov N.S. – Senior Lecturer of the Department of Building Materials and Construction Technology, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: novikov.nick.s@gmail.com

Vede P.Yu. – Senior Lecturer of the Department of Building Design and Real Estate Expertise, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: pvede@sfu-kras.ru

Tarasov I.V. – Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Director of the Civil Engineering Institute, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: ivtarasov@sfu-kras.ru

Konstantinov I.L. – PhD (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Low-Carbon Metallurgy and Energy, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: ilcon@mail.ru

Voroshilov D.S. – PhD (Engineering), Head of the Laboratory of Physical Chemistry of Metallurgical Processes and Materials, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation, e-mail: d.s.voroshilov@gmail.com.

Информация о статье
Поступила в редакцию: 21.03.2025
Поступила после рецензирования: 18.10.2025
Принята к публикации: 30.10.2025

Paper info
Received March 21, 2025
Reviewed October 18, 2025
Accepted October 30, 2025