

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ В ГЕОПОЛИМЕРЫ

**П. Г. Козлов, Р. С. Федюк, А. В. Таскин,
Д. Р. Федотов, И. А. Выходцев, Г. Р. Федюк**

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Россия; филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя
России» Дальневосточный научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и технологический
институт по строительству», Владивосток, Россия*

Ключевые слова: бетон; геополимеры; золошлаковые отходы; испытания; строительные материалы; экология.

Аннотация: Рассмотрены способы получения химических веществ из золошлаковых отходов (ЗШО): ванадия, диоксида титана, золота, и применение ЗШО в строительной индустрии: при производстве шлакоблоков, кирпича и строительных смесей; плавательных средств, сигнальных буйев, спасательных жилетов; глинозольного кирпича; пенозола. Выдвинута и проверена гипотеза о создании геополимерного вяжущего, в основе которого лежит процесс активации алюмосиликатов, полученных из ЗШО растворами щелочей.

Введение

Существующие технологии переработки золошлаковых отходов (ЗШО) играют важную роль в устранении проблемы загрязнения окружающей среды и повышении эффективности использования ресурсов. Благодаря инновационным методам обработки и утилизации ЗШО удается не только снизить их вредное воздействие на окружающую среду, но и получить ценные материалы для дальнейшего использования в различ-

Козлов Павел Геннадьевич – аспирант, преподаватель Военного учебного центра, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия; Федюк Роман Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор Военного учебного центра, e-mail: roman44@ua.ru, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»; главный научный сотрудник филиала ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству», Владивосток, Россия; Таскин Андрей Васильевич – кандидат химических наук, заведующий лабораторией использования вторичных ресурсов, директор ООО «Лаборатория прикладных исследований»; Федотов Демьян Романович – аспирант департамента природно-охранных систем и техносферной безопасности, научный сотрудник лаборатории технологий использования вторичных ресурсов; Выходцев Иван Алексеевич – студент; Федюк Герман Романович – студент, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

ных отраслях промышленности. Такие технологии позволяют решить проблему складирования и накопления ЗШО, а также сократить расходы на обращение с ними. Разработка технологий переработки искусственных ЗШО играет ключевую роль в обеспечении инженерной защиты окружающей среды, борьбе с загрязнением и создании материалов для строительства, хозяйственной деятельности и жилищно-коммунального хозяйства.

Производство композиционных геополлимерных строительных материалов на основе сырья, использующего промышленные отходы тепловых электростанций, позволяет определить перспективные направления решения экологических проблем крупных городов [1].

Впервые термин «геополлимер» применил Davidovits J. в 1978 году, чтобы описать семейство минеральных связующих, которые обладают химическим составом, подобным цеолитам, при этом проявляют аморфную микроструктуру [2, с. 24]. Геополлимеры представляют собой неорганический алюмосиликатный полимерный материал, который схватывается и твердеет при температурах, близких к температуре окружающей среды [3].

Производство геополлимеров сопровождается значительно более низким уровнем выбросов двуокиси углерода по сравнению с обычным порландцементом, поскольку их производство не требует кальцинирования известняка и сжигания топлива в печи. Геополлимеры проявляют чрезмерную усадку, хотя и меньше, чем материалы из порландцемента, данный фактор необходимо учитывать [4]. В отличие от гидратации порландцемента, при производстве геополлимерной смеси используется лишь небольшое количество воды, однако требуется часть свободной воды, чтобы сделать смесь удобоукладываемой и однородной [5].

Благодаря постоянному развитию и совершенствованию процессов переработки золошлаков открываются новые возможности для эффективного и экологически чистого производства.

Какие существуют технологии переработки ЗШО?

Первое направление – получение химических веществ.

Ванадий. В работе [6] автор отмечает: «...Ванадий используется как легирующая добавка при получении износостойчивых, жаропрочных и коррозионностойких сплавов, для получения магнитов... Для выделения ванадия из золошлаковых отходов тепловых электрических станций используют гидрометаллургические и комбинированные методы их переработки, состоящие из химических процессов выщелачивания шламов и выделения ванадийсодержащих соединений из полученных растворов».

Диоксид титана. В лаборатории полезных ископаемых Политехнического института Северо-Восточного государственного университета (Магадан) построена технологическая цепочка обогащения ЗШО – винтовыми и магнитными сепараторами, шлюзами глубокого наполнения и др. В качестве основного ценного компонента извлечения на данном этапе рассматривается диоксид титана. Области его применения – химическая, фармацевтическая, строительная, радиоэлектронная и другие отрасли производства [7].

Золото. Институт горного дела ДВО РАН проводит опытно-промышленные исследования эффективности центробежного обогащения ЗШО

Приморской ГРЭС в целях определения возможности извлечения золота методами гравитации, а именно центробежной концентрации на сепараторе ЦВК-200 (г. Наро-Фоминск) [8].

Второе направление – применение в строительной индустрии.

В России существует ряд предприятий, деятельность которых направлена на производство строительных материалов из ЗШО. К их числу относятся: «Сибирская генерирующая компания» (СГК) в Кемеровской области, Рефтинская ГРЭС «Энел Россия» в Свердловской области, «Основа Холдинг» в Омской области [9].

1. Золошлаковые отходы могут использоваться для производства строительных материалов и изделий, таких как шлакоблоки, кирпичи и строительные смеси; они реализуются в дорожном строительстве (при сооружении земляного полотна, для устройства укрепленных оснований, для возведения насыпей, для устройства дорожных одежд) [10, 11].

2. KazCenosphere's – инновационный проект инвест холдинга Kusto Group, который производит материалы с применением алюмосиликатной микросферы (АСМП) из отходов Аксуской электростанции АО «ЕЭК». Продукт используют при производстве плавательных средств, сигнальных буюв, спасательных жилетов и др. [12].

3. Авторы работы [13] предлагают пути полной утилизации ЗШО в целях получения полезной промышленной продукции и прекращения образования золошлакоотвалов. Разработана технологическая схема, позволяющая в значительной мере извлечь несгоревший уголь и железосодержащие частицы и получить алюмосиликатный продукт для производства ряда стройматериалов: глинозольного кирпича; сверхлегкого пористого стеклокристаллического материала – пенозола; других строительных материалов, и изделий. Кроме того, ЗШО могут быть использованы в качестве сырья для глубокой переработки на глинозем и белитовый шлам, при производстве керамических изделий.

4. В работе [14] предложена новая технология переработки золошлаковых отходов в строительные материалы, которая проходит в четыре этапа: 1 – обезвоживание ЗШО с получением твердого осадка (кека) на фильтрующей поверхности и возвратом осветленной воды на ТЭЦ; 2 – грануляция кека с добавками – связками и углем; 3 – дожигание гранулята в котлах кипящего слоя с возвратом тепла на ТЭЦ; 4 – производство строительных материалов из качественного минерального сырья.

Изготовление геополимера основано на использовании силиката натрия или силиката калия, растворенного в воде, и может быть выполнено при температуре окружающей среды. Процесс геополимеризации должен обеспечивать стабильный долговечный продукт. Использование сильного щелочного раствора неприемлемо для геополимерного бетона, так как может быть вредным для строителя и требует специальной подготовки для использования на месте и для массового применения. Также следует дифференцировать между щелочно-активированными материалами и геополимерами [15]. Геополимеры не являются щелочно-активированными материалами, и геополимеризация отличается от щелочной активации. В отличие от большинства керамических материалов, в качестве арматуры в геополимере может использоваться широкий спектр волокон, включая

органические вещества, поскольку температура синтеза геополимеров близка к температуре окружающей среды.

Цель исследования – изучение научно обоснованного технологического способа производства геополимерных строительных материалов для решения геоэкологической задачи утилизации золошлаковых отходов.

Для достижения поставленной цели решались следующие *задачи*:

- 1) определить перспективные способы извлечения компонентов строительных материалов из ЗШО объектов теплоэнергетики;
- 2) предложить технологические режимы производства геополимерных строительных материалов из ЗШО;
- 3) оценить возможность применения геополимерных бетонов в строительстве.

Материалы и методы

Золошлаковые отходы, очищенные от недожога и металлических вкраплений, прокаливались в печи при высокой температуре. Затем ЗШО подвергались обработке щелочными растворами и автоклавированию. Состав смесей для получения геополимерного бетона послужил основой для формирования образцов-призм размером $160 \times 40 \times 40$ мм. После высушивания образцы-призмы испытывались на растяжение при изгибе на оборудовании РГМ-1000-А. Затем части призмы помещали в лабораторный пресс МС-1000 и подвергали испытанию на сжатие пока не произойдет его слом.

Процесс образования геополимера заключается в следующем: активные SiO_2 и Al_2O_3 в сырье сначала растворяются в растворе щелочи с образованием аморфных мономеров Si и Al, а затем мономеры Si и Al подвергаются реакции полимеризации с образованием геополимерного геля, и геополимерный гель и инертные частицы сырья сшиваются с образованием геополимера.

Многие исследователи [16 – 18], изучая химическую структуру геополимера, рассматривают его как алюмосиликатный гель, состоящий из связанных алюминатных и силикатных частиц, к которому предъявляются определенные требования по прочности и пористости. Создание технологий геополимеров связано с возможностью производить вяжущие на основе ЗШО тепловых электростанций и других промышленных отходов [19, с. 5].

В статье [20] авторы подтверждают, что ЗШО на 70 % состоит из Al_2O_3 и SiO_2 – основы геополимера, и возможность изготовления геополимерного бетона на основе компонентов, извлеченных из ЗШО.

Получение геополимерного бетона на основе ЗШО происходит в определенной последовательности:

- приготовление раствора активатора, смешивание в сухом виде заполнителей и отожженной золы, введение в сухую смесь активатора, перемешивание;
- приготовление раствора активатора, введение золы, перемешивание, введение добавки шлака, перемешивание, введение мелкого заполнителя, перемешивание, введение крупного заполнителя, перемешивание;
- приготовление раствора активатора, введение золы, перемешивание, введение заполнителей, перемешивание [2].

Исходный материал должен быть богатым кремнием Si или алюминием Al или обоими из них. Это могут быть природные минералы, такие как каолинит, глина и другие, или техногенные отходы – зола-уноса, зола рисовой шелухи, ЗШО и т.д. Для синтеза геополимера могут быть использованы щелочная среда (Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^+ и т.д.) или средние кислоты, такие как фосфорная кислота или гуминовая. В щелочной среде процесс геополимеризации происходит, когда оксиды кремния и алюминиевых минералов или алюмосиликатов реагируют со щелочным раствором с образованием полимерных связей Si–O–Al.

Реакционные процессы в геополимерах (реакции геополимеризации) в основном связаны с тремя процессами:

- растворения, в котором щелочной раствор растворяет алюмосиликатное сырье для высвобождения в смеси частиц алюминия и кремния;
- конденсации, в котором алюминатные и силикатные мономеры примыкают друг к другу путем совместного разделения атомов кислорода с образованием олигомеров и образованием более крупных сетей;
- перенасыщения смеси алюмосиликатным гелем (который изначально обогащен связями алюминия).

В лаборатории технологий использования вторичных ресурсов ДВФУ золошлаковая смесь тепловой электростанции, очищенная от недожога и металлических вкраплений, прокаливалась в печи при температуре 800 °С в течение 1 суток. После остывания ЗШО подвергалась обработке щелочными растворами и автоклавированию при температуре 220 °С и давлении 1,5 МПа. По окончании автоклавирования в реакторе сформировался густой осадок (ТСВ) и жидкая часть (АСВ).

Состав смесей (табл. 1) для получения геополимерного бетона послужил основой для формирования экспериментальных образцов-призм путем укладки в формы размером 160 × 40 × 40 мм. Далее они подвергались вибрационному уплотнению, а после высушивались в сушильном шкафу при температуре 70 °С в течение 70 ч.

В таблице представлены смеси: маркировка М – наполнитель зола и песок, связующее вещество – АСВ; маркировка Ф – наполнитель зола, связующее вещество – АСВ, ТСВ и кремнезем.

Испытание проводилось на оборудовании филиала ФГБУ «ЦНИИ Минстроя России ДальНИИС». Образцы-призмы прямоугольного сечения размером 160 × 40 × 40 мм закрепляются на оборудовании машины испытательной универсальной РГМ-1000-А для проведения испытания на растяжение при изгибе (рис. 1).

Таблица 1

Состав смеси для получения геополимера, %

Маркировка образцов	Зола прокаленная	Песок	АСВ	Вода	Кремнезем	ТСВ	NaOH
М7	17,10	55,26	17,11	10,53	–	–	–
М8	18,57	55,72	18,57	7,14			
М9	18,80	56,10	18,80	6,30			
Ф1	50,00	–	17,50	21,90	0,50	2,30	7,80
Ф3	49,50		18,00	20,50		4,20	7,30



Рис. 1. Машина испытательная универсальная РГМ-1000-А



Рис. 2. Лабораторный испытательный пресс МС-1000

В центр пролета закрепленного образца оказывается возрастающее усилие пока образец не сломается на две части. Максимальные показания фиксируются и заносятся в табл. 2.

Затем каждую из разделенных частей помещают в лабораторный испытательный пресс МС-1000 и подвергают испытанию на сжатие пока не произойдет его слом (рис. 2). Затем показания фиксируются и также заносятся в табл. 2, а по полученным результатам испытания делается вывод. Из представленных данных видно, что существует изменение уровня пределов прочности при модифицировании массовой доли щелочного активатора, за счет высвобождения катионов щелочи, уже находящихся в алюмосиликатном материале, при увеличении времени механоактивации.

Таблица 2

Испытание образцов геополимера

Номер образца	Масса, г	Предел прочности при сжатии, кН		Предел прочности при изгибе, кгс
		1 часть	2 часть	
1	2	3	4	5
М7				
1	437,97	17,7	17,6	217
2	441,78	16,4	14,1	157
3	440,81	13,4	13,4	184
4	440,12	18,4	12,8	184
5	456,29	12,0	13,2	200
6	435,01	15,2	16,5	185
М8				
1	445,50	19,2	10,8	267
2	416,71	26,8	25,2	284
3	418,20	20,4	27,6	272
4	460,52	31,6	29,8	352
5	459,17	34,1	26,0	322
6	453,80	19,4	20,8	292

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
М9				
1	443,82	11,4	14,0	121
2	445,71	11,8	14,0	185
3	416,13	19,3	14,2	50
4	435,75	14,8	20,8	189
5	432,81	16,4	17,7	273
6	437,69	22,5	16,5	234
Ф1				
1	337,56	27,6	25,8	38
2	335,10	26,8	21,6	20
3	339,37	20,4	26,0	20
4	330,09	22,4	22,8	19
5	332,08	22,6	23,0	19
6	338,55	19,6	23,6	15
Ф3				
1	334,45	33,7	36,0	112
2	342,68	36,2	35,9	150
3	339,55	30,1	45,2	194
4	347,94	32,9	42,8	100
5	335,48	34,8	37,6	162
6	340,23	35,3	48,4	196

Результаты и обсуждения

Лабораторией технологий использования вторичных ресурсов ДВФУ выдвинута и проверена гипотеза о создании геополимерного вяжущего, в основе которого лежит процесс активации алюмосиликатов, полученных из ЗШО растворами щелочей. В результате данного процесса получается твердая алюмосиликатная структура, похожая на камень (рис. 3), но отличающаяся от портландцемента отсутствием процесса твердения из-за гидратации ионов кальция.

В результате проведенных испытаний получены данные, свидетельствующие о следующем:

- основой геополимерного бетона являются промышленные отходы, такие как ЗШО, то есть в качестве основного материала для производства геополимерных вяжущих может быть использован любой материал, состоящий в основном из алюмосиликата;

- в качестве активаторов процесса отверждения могут быть использованы гидроксиды щелочных металлов – натрия и калия, и их силикаты;

- геополимеры на основе ЗШО характеризуются высокой эксплуатационной стойкостью к существующим видам разрушительного воздействия окружающей среды.



Рис. 3. Взвешивание образца-призмы геополимеров, подготовленного к испытанию на растяжение при изгибе

Использование геополимерных вяжущих различного состава позволяет создавать композиционные материалы с заданными физическими, механическими и эксплуатационными свойствами, но для получения заданной структуры необходимо научное обоснование состава, теоретической и экспериментальной подбор технологий производства геополимеров.

Заключение

Геополимерные строительные материалы на основе ЗШО ТЭС могут быть использованы на различных объектах строительства, а само производство геополимеров помогает сократить количество отходов, снизить производственные затраты и создать более экологичные и долговечные материалы. Таким образом, технология производства геополимеров из ЗШО является эффективным способом использования отходов производства и создания новых экологически чистых материалов. Следует отметить, что зола является отходом, а технология производства геополимеров из золы не предполагает использования высокотемпературного обжига.

Результаты исследования показывают:

1. Переработку ЗШО на предприятиях теплоэнергетики с целью получения полезных компонентов необходимо вести в направлениях получения химических веществ и создания геополимеров.

2. Для производства геополимерных строительных материалов из ЗШО необходимо использовать прокаленную золошлаковую смесь тепловой электростанции, очищенную от недожога и металлических вкраплений, густой осадок (ТСВ) и жидкую часть (АСВ), полученные после варки золошлаковых отходов в автоклаве.

3. Геополимерные бетоны в строительстве рекомендуется применять в качестве каменных материалов и материалов для декоративной отделки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН, тема № FWFN(0205)-2022-0002.

Список литературы

1. Ерошкина, Н. А. Исследование свойств бетона на основе композиционного геополимерного вяжущего, определяющих его долговечность / Н. А. Ерошкина, М. О. Коровкин, В. И. Логанина, П. А. Полубояринов // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 3. – С. 58 – 62.

2. Davidovits, J. *Geopolymer Chemistry and Applications* / J. Davidovits. – 4th ed. – Saint Quentin, GeopolymerInstitute, 2015. 644 p.

3. Mackenzie, K. J. D. *Geopolymer (aluminosilicate) composites: synthesis, properties and applications* / K. J. D. Mackenzie, M. Welter // *Advances in Ceramic Matrix Composites*. – 2014. – P. 445 – 470. doi: 10.1533/9780857098825.3.445

4. *Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking in Metakaolin-Based Geopolymers* / C. Kuenzel, L. J. Vandeperre, S. Donatello, A. R. Voccaccini,

C. Cheeseman // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2012. – Vol. 95, No. 10. – P. 3270 – 3277. doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05380.x

5. Influence of Curing Schedule on the Integrity of Geopolymers / D. Perera, O. Uchida, E. Vance, K. Finnie // *Journal of Materials Science*. – 2007. – Vol. 42(9). – P. 3099 – 3106. doi: 10.1007/s10853-006-0533-6

6. Гриб, Ю. А. Анализ способов утилизации золошлаковых отходов / Ю. А. Гриб ; под общ. ред. Э. Ю. Абдуллаянова // XXV Всерос. аспирантско-магистерский науч. семинар, посвященный Дню энергетика : материалы конф. В 3-х томах (Казань, 07–08 декабря 2021 г.). – Т. 1. – Казань, 2022. – С. 449 – 451.

7. Гайдай, Н. К. Технологическая схема переработки золошлаковых отходов для повышения экологичности генерации энергии на магаданской ТЭЦ / Н. К. Гайдай, М. А. Кузьменков, Л. В. Шипунов // *Стратегия современного научно-технологического развития: Проблемы и перспективы реализации* : сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 29 ноября 2021 г.). – Петрозаводск, 2021. – С. 27 – 33. doi: 10.46916/01122021-1-978-5-00174-388-0

8. Лаврик, Н. А. Опытные промышленные исследования технологии переработки золошлаковых отходов приморской ГРЭС / Н. А. Лаврик, Г. П. Пономарчук, Т. С. Банщикова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2009. – № S4. – С. 367 – 376.

9. Игумина, В. А. Анализ способов утилизации золошлаковых отходов / В. А. Игумина, А. Е. Карючина, А. С. Ровенских // *Исследования молодых ученых* : материалы VI Междунар. науч. конф. (Казань, 20–23 января 2020 г.). – Казань, 2020. – С. 21 – 24.

10. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н. И. Ватин, Д. В. Петросов [и др.] // *Инженерно-строительный журнал*. – 2011. – № 4. – С. 16 – 21.

11. Кожухан, А. К. Научно-технологический анализ вторичной переработки техногенных отходов энергетики и горно-химических предприятий / А. К. Кожухан // *Молодой ученый*. – 2009. – № 12. – С. 54 – 57.

12. Умбетова, Ш. М. Техногенные отходы предприятий энергетики и пути их вторичной переработки / Ш. М. Умбетова. – Текст : электрон. – URL : https://kap.kz/custom/wysiwyg/image/file/20191107/20191107151124_50634.pdf (дата обращения: 10.10.2024)

13. Делицын, Л. М. Возможные технологии утилизации золы / Л. М. Делицын, Ю. В. Рябов, А. С. Власов // *Энергосбережение*. – 2014. – № 2. – С. 60 – 66.

14. Новая технология переработки кислых золошлаковых отходов ТЭЦ в строительные материалы / Г. И. Овчаренко, Д. И. Гильмияров, А. В. Викторов, Н. А. Фок // *Известия вузов. Строительство*. – 2012. – № 10(646). – С. 14 – 19.

15. Evolution of Geopolymer Binders: a Review / M. F. Nuruddin, A. B. Malkawi, A. Fauzi, B. S. Mohammed, H. M. Almatrarneh // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2016. – Vol. 133. – P. 012052.

16. Environmental Progress & Sustainable Energy / M. Kanuchova, L. Kozakova, M. Drabova, M. Sisol, A. Estokova, J. Kanuch & J. Skvarla. – 2015. – Vol. 34(3). – P. 841 – 849.

17. Jaarsveld, J. G. S. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers / J. G. S. Jaarsveld, J. S. J. Deventer, G. C. Lukey // *Chemical Engineering Journal*. – 2002. – Vol. 89, Iss. 1–3. – P. 63 – 73.

18. Анализ перспективности применения золы-уноса в технологии геополимеров / М. О. Коровкин, В. М. Володин, Н. А. Ерошкина, М. Ю. Чамурлиев, И. Ю. Лавров // *Молодежный научный вестник*. – 2017. – С. 70 – 78.

19. Ерошкина, Н. А. Ресурсосберегающие технологии геополимерных вяжущих и бетонов на основе отходов добычи и переработки магматических горных пород: монография / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза : ПГУАС, 2013. – 152 с.

20. Матвеев, Е. А. Получение геополлимерного (бесцементного) вяжущего на основе продуктов переработки ЗШО от угольных ТЭС / Е. А. Матвеев, Н. Д. Кулаков, А. В. Таскин // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2022. – № 1. – С. 211 – 213.

References

1. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Loganina V.I., Poluboyarinov P.A. [Study of the properties of concrete based on composite geopolymer binder that determine its durability], *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, no. 3, pp. 58-62. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Davidovits J. *Geopolymer Chemistry and Applications*, 4th ed. Saint Quentin, GeopolymerInstitute, 2015, 644 p.

3. Mackenzie K., Welter M. Geopolymer (aluminosilicate) composites: synthesis, properties and applications, *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 2014, pp. 445-470. doi: 10.1533/9780857098825.3.445

4. Kuenzel C., Vandeperre L.J., Donatello S., Boccaccini A.R., Cheeseman C. Ambient Temperature Drying Shrinkage and Cracking in Metakaolin-Based Geopolymers, *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, vol. 95, no. 10, pp. 3270-3277. doi: 10.1111/j.1551-2916.2012.05380.x

5. Perera D., Uchida O., Vance E., Finnie K. Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers, *Journal of Materials Science*, 2007, vol. 42(9), pp. 3099-3106. doi: 10.1007/s10853-006-0533-6

6. Grib Yu.A.; Abdullazyanov E.Yu. (Ed.). *XXV Vseros. aspirantsko-magisterskiy nauch. seminar, posvyashchenny Dnyu energetika: materialy konf.* [XXV All-Russian postgraduate and master's scientific seminar dedicated to the Day of Power Engineer: conference materials], In 3 vols. (Kazan, December 7-8, 2021), vol. 1, Kazan', 2022, pp. 449-451. (In Russ.)

7. Gayday N.K., Kuz'menkov M.A., Shipunov L.V. *Strategiya sovremennogo nauchno-tehnologicheskogo razvitiya: Problemy i perspektivy realizatsii: sb. st. III Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Strategy of modern scientific and technological development: Problems and prospects of implementation: collection of articles. III All-Russian. scientific-practical. conf.] (Petrozavodsk, November 29, 2021), Petrozavodsk, 2021, pp. 27-33. doi: 10.46916/01122021-1-978-5-00174-388-0 (In Russ.)

8. Lavrik N.A., Ponomarchuk G.P., Banshchikova T.S. [Pilot-industrial studies of the technology for processing ash and slag waste of the Primorskaya GRES], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2009, no. S4, pp. 367-376. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Igumina V.A., Karyuchina A.Ye., Rovenskikh A.S. *Issledovaniya molodykh uchenykh: materialy VI Mezhdunar. nauch. konf.* [Research of young scientists: Proc. VI Intern. scientific conf.], (Kazan, January 20-23, 2020), Kazan, 2020, pp. 21-24. (In Russ.)

10. Vatin N.I., Petrosov D.V. [et al.], [Use of ash and ash and slag waste in construction], *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Engineering and construction journal], 2011, no. 4, pp. 16-21. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Kozhakhhan A.K. [Scientific and technological analysis of secondary processing of technogenic waste of energy and mining and chemical enterprises], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2009, no. 12, pp. 54-57. (In Russ., abstract in Eng.)

12. available at: https://kap.kz/custom/wysiwyg/image/file/20191107/20191107151124_50634.pdf (accessed 10 October 2024)

13. Delitsyn L.M., Ryabov Yu.V., Vlasov A.S. [Possible technologies for ash utilization], *Energoberezeniye* [Energy saving], 2014, no. 2, pp. 60-66. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Ovcharenko G.I., Gil'miyarov D.I., Viktorov A.V., Fok N.A. [New technology for processing acidic ash and slag waste of thermal power plants into building materials], *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Construction], 2012, no. 10(646), pp. 14-19. (In Russ., abstract in Eng.)
15. Nuruddin M.F., Malkawi A.B., Fauzi A., Mohammed B.S., Almattarneh H.M.. Evolution of geopolymer binders: a review, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 133, pp. 012052.
16. Kanuchova M., Kozakova L., Drabova M., Sisol M., Estokova A., Kanuch J., Skvarla J. Environmental progress & sustainable energy, 2015, vol. 34(3), pp. 841-849.
17. Jaarsveld J.G.S., Deventer J.S.J., Lukey G.C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers, *Chemical Engineering Journal*, 2002, vol. 89, Iss. 1-3, pp. 63-73.
18. Korovkin M.O., Volodin V.M., Yeroshkina N.A., Chamurliyev M.Yu., Lavrov I.Yu. [Analysis of the Prospects of Using Fly Ash in Geopolymer Technology], *Molodezhnyy nauchnyy vestnik* [Youth Scientific Bulletin], 2017, pp. 70-78. (In Russ., abstract in Eng.)
19. Yeroshkina N.A., Korovkin M.O. *Resursosberegayushchiye tekhnologii geopolimernykh vyazhu-shchikh i betonov na osnove otkhodov dobychi i pererabotki magmatischeskikh gornykh porod: monografiya* [Resource-saving technologies of geopolymer binders and concretes based on waste from the extraction and processing of igneous rocks: monograph], Penza: PGUAS, 2013, 152 p. (In Russ.)
20. Matveyev Ye.A., Kulakov N.D., Taskin A.V. [Obtaining a geopolymer (cement-free) binder based on the processing products of ash and slag from coal-fired thermal power plants], *Molodyye uchenyye – razvitiyu Natsional'noy tekhnologicheskoy initsiativy (POISK)* [Young scientists – for the development of the National Technological Initiative (POISK)], 2022, no. 1, pp. 211-213. (In Russ., abstract in Eng.)

Promising Technologies for Processing Ash and Slag Waste into Geopolymers

**P. G. Kozlov, R. S. Fediuk, A. V. Taskin,
D. R. Fedotov, I. A. Vykhodtsev, G. R. Fediuk**

*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia;
Branch of the Federal State Budgetary Institution "TsNIIP Ministry
of Construction of Russia" Far Eastern Research, Design
and Technological Institute for Construction, Vladivostok, Russia*

Keywords: concrete; geopolymers; ash and slag waste; testing; building materials; ecology.

Abstract: Thanks to the improvement of ash and slag processing processes, new opportunities for efficient and environmentally friendly production are opening up. The first direction is the production of chemicals: vanadium, titanium dioxide, and gold. The second direction is application in the construction industry: production of cinder blocks, bricks and building mixes; production of swimming equipment, signal buoys, life jackets; production of alumina bricks; foam. A hypothesis has been put forward and tested on the creation of a geopolymer binder based on the process of activating aluminosilicates obtained from ash and slag with alkali solutions.

© П. Г. Козлов, Р. С. Федюк, А. В. Таскин,
Д. Р. Федотов, И. А. Выходцев, Г. Р. Федюк, 2024