
**ОХРАНА
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**ПЕРЕРАБОТКА ЗОЛОШЛАКОВЫХ ОТХОДОВ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ
ТОПЛИВ НА ТЭЦ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ С ПОЛУЧЕНИЕМ
ПОРИСТЫХ ГЕОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ¹**

© 2022 г. **Е. А. Яценко^а, ***, **Б. М. Гольцман^а, ****, **С. В. Трофимов^а**, **Г. И. Лазоренко^б**

^а*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
ул. Просвещения, д. 132, Новочеркасск, Ростовская обл., 346428 Россия*

^б*Ростовский государственный университет путей сообщения,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, Ростов-на-Дону, 344038 Россия*

*e-mail: e_yatsenko@mail.ru

**e-mail: boriuspост@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2021 г.

После доработки 19.01.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2022 г.

В современных условиях наиболее остро стоит вопрос улучшения экологической обстановки во всем мире. Одним из путей его решения в России может стать утилизация золошлаковых отходов, так как для их складирования на золоотвалах требуются колоссальные территории, которые таким образом выпадают из хозяйственного оборота страны. Одно из перспективных направлений утилизации золошлаковых отходов – дорожное строительство, поскольку освоение и благополучие регионов в большой степени зависит от наличия и качества развитой транспортной инфраструктуры. Основные трудности, возникающие при строительстве и эксплуатации дорог в Арктической зоне в условиях повышенной влажности и многолетней мерзлоты, связаны с неравномерным увеличением объема грунта из-за замерзания содержащейся в нем влаги. Для решения этой проблемы применяют теплоизоляционные материалы, а именно пористые геополимеры, полученные путем щелочной активации алюмосиликатного сырья, например золошлаковых отходов. В данной работе использовались золошлаковые отходы Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1. Для их исследования применялись методы рентгеноспектрального флуоресцентного (XRF) и порошкового рентгенофазового анализа (XRD). По результатам XRF-анализа было выявлено, что исследуемые золошлаковые отходы относятся к ряду кислых. Согласно XRD-анализу, золошлаковые отходы имеют низкое содержание кристаллических фаз, представленных диоксидом кремния (SiO_2) и гематитом (Fe_2O_3). Также присутствует аморфная структура в виде щелочной и щелочно-земельной ферроалюмосиликатной стеклофазы. Для исследования свойств геополимеров были разработаны составы с применением двух порообразующих добавок: алюминиевой пудры и 30%-ного раствора пероксида водорода. После синтеза геополимеров их средние плотности составляли: у золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ 430 и 381 $\text{кг}/\text{м}^3$ соответственно, у отходов Северодвинской ТЭЦ-1 – 454 и 402 $\text{кг}/\text{м}^3$ соответственно. Для всех образцов геополимеров характерно интенсивное порообразование с неравномерным распределением пор. Рентгенограммы полученных геополимеров показали малую интенсивность порообразования и низкое содержанием кристаллических фаз во всех исследованных составах.

Ключевые слова: золошлаковые отходы, геополимеры, пористая структура, Арктическая зона России, строительство дорог, рентгеноспектральный флуоресцентный анализ, порошковый рентгенофазовый анализ

DOI: 10.56304/S0040363622070104

Ежегодно на объектах угольной энергетики России – твердотопливных ТЭЦ – образуется более 20 млн т золошлаковых отходов – минерального несгораемого остатка угольного топлива, со-

стоящего в основном из различных алюмосиликатных компонентов (55–90%), несгоревшего угля (5–25%) и магнитных минералов (5–20%) [1, 2]. Общий объем накопленных золошлаковых отходов, занимающих территорию более 220 км^2 , составляет около 1.8–2.0 млрд т [3]. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, золошлаковые отходы относятся к V классу опасности, т.е. обладают низкой степенью вредного воздействия на окружающую среду. Однако

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00203 “Эффективные температуроотверждаемые экогеополимеры для дорожного строительства в условиях Арктической зоны Российской Федерации на основе отходов сжигания твердых топлив на местных ТЭЦ”).

размывание золошлаковых отвалов тальми водами и дождевыми потоками может привести к накоплению в поверхностных и подземных водах продуктов эрозии, к загрязнению и отчуждению почв. Возможно также пыление золы с поверхности золошлаковых отвалов, которое ведет к негативному изменению приземного слоя атмосферы [4]. В настоящее время в России из-за малого объема переработки золошлаковых отходов (не более 15%) [5] целесообразен поиск новых ресурсосберегающих технологий, позволяющих применять золошлаковые отходы в различных отраслях экономики, например в автодорожном строительстве и производстве строительных материалов [6–8].

Кроме того, в связи с тем что золошлаковые отходы обладают высокой дисперсностью и содержат в своем составе значительные доли стекловидных алюмосиликатных фаз, представляет интерес их переработка в перспективные геополимерные материалы [9]. Производство геополимерных вяжущих материалов заключается в щелочной обработке техногенного (золошлаки, зола-унос) или природного (магматические горные породы) сырья [10]. Данный процесс не требует высокотемпературного обжига и не сопровождается значительным выделением углекислого газа [11], что является огромным преимуществом по сравнению с технологией производства поргланццемента, получаемого при температурах 1500–1600°C. Результаты проведенных исследований геополимеров свидетельствуют об их долговечности, экологичности и высокой морозостойкости [12, 13]. Например, установлено, что геополимерный бетон на основе золошлаковых отходов обладает морозостойкостью 150 циклов [14].

Геополимеры применяют и в традиционном строительстве. Так, в Австралии из геополимерного бетона изготавливают плиты перекрытий, а в Венеции используют для реставрации архитектурных сооружений [15]. На основе геополимеров можно получать высокоэффективные пористые теплоизоляционные материалы для укладки дорожных слоев, а также асфальтового покрытия [16, 17]. Это особенно актуально для экстремальных климатических условий Арктической зоны, где при строительстве дорог нередко возникает проблема “морозного пучения”, т.е. деформации дорожного полотна, вызванного замерзанием и увеличением объема капиллярной влаги, неравномерно распределенной в верхнем слое грунта. Применение пористых геополимеров при дорожном строительстве в Арктической зоне в условиях многолетней мерзлоты позволит обеспечить дренаж влаги в глубь грунта и повысить его стабильность (когда верхний слой грунта минимально подвержен изменениям объема вследствие замерзания/оттаивания влаги).

Таким образом, разработка составов и изучение особенностей формирования пористых гео-

полимеров на основе золошлаковых отходов ТЭЦ Арктической зоны России для их дальнейшего применения в дорожном строительстве является актуальной и перспективной задачей.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основного сырья для синтеза пористых геополимерных материалов были использованы золошлаковые отходы Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1. Определение оксидного и элементного состава золошлаковых отходов проводилось методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа на последовательном вакуумном спектрометре модели PW2400 производства Philips Analytical (Нидерланды). Анализ микроструктуры пористых геополимерных материалов осуществлялся с помощью электронного микроскопа BresserDuolux.

Фазовый состав исходных золошлаковых отходов и синтезированных образцов определяли с помощью порошкового рентгенофазового анализа. Образцы измельчали и исследовали с помощью рентгеновского порошкового дифрактометра ARL (Thermo Fisher Scientific), входящего в состав ЦКП “Нанотехнологии” Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова. Полученные в ходе исследования данные обрабатывали с использованием программного комплекса Crystallographica Search-Match Version 3 базы данных ICDD PDF 2 (Международный центр дифракционных данных).

Синтез геополимеров проводили по следующей технологии: золошлаковые отходы сушили при температуре 100°C до постоянной массы и измельчали до размера частиц менее 250 мкм [18, 19]. Для щелочной активации алюмосиликатных компонентов в качестве активирующего вещества использовали смесь жидкого стекла и раствора NaOH. К заданному количеству порошка NaOH марки ХЧ (химически чистый) добавляли воду для получения 12 М (моль/л) раствора. Далее его смешивали с навеской жидкого стекла [гидросиликат натрия, силикатный модуль 2, содержание воды 55% (по массе)], после чего полученную суспензию вливали в навеску золошлакового отхода. Перемешивание геополимерной суспензии вели в течение 10 мин в барабанной мельнице (соотношение “геополимерная смесь : мелющие тела” составляло 1.0 : 1.5) [19, 20]. После приготовления смеси в нее добавляли порообразователь (порошок алюминия или 30%-ный раствор пероксида водорода), после чего перемешивали еще 10 мин при тех же условиях [21].

Полученные составы (сырьевую смесь) разливали в цилиндрические формы диаметром 37 мм и высотой 40 мм и высушивали. Сушка проводилась в

помещении без прямого попадания солнечных лучей при комнатной температуре $25 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 14 сут [22, 23] при относительной влажности воздуха $58 \pm 5\%$. Линейные размеры образцов после сушки определяли штангенциркулем, после чего по их значениям рассчитывали объем (см^3):

$$V = \pi h \frac{D^2}{4}, \quad (1)$$

где h , D – высота и диаметр образца, см.

Массу образцов m измеряли с точностью до 0.01 г, а их среднюю плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$, определяли по формуле

$$\rho = \frac{m}{V} \times 1000. \quad (2)$$

Каждое записанное тестовое значение плотности представляло собой среднее из трех значений плотности синтезированных образцов геополимеров каждого состава.

Размер и распределение пор в образцах определяли по программе NanoMeasurer 1.2, позволяющей по результатам микрофотографирования в автоматическом режиме собирать и анализировать данные о количестве и размере пор.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При исследовании золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1 были определены их оксидный и элементный составы, представленные в табл. 1, 2.

Согласно анализу данных, приведенных в табл. 1, основные компоненты золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1 – оксиды кремния и алюминия. Исследованные золошлаковые отходы по содержанию компонентов относятся к низкокальциевым, так как содержание соединений $\text{CaO} + \text{MgO}$ не превышает 12%,

что соответствует кислым отходам. Кислые золошлаковые отходы не обладают вяжущими свойствами, но могут приобрести их при добавлении интенсификаторов твердения. Также при повышенном содержании SiO_2 отходы в меньшей степени подвержены кристаллизации и образуют аморфную структуру. Кроме того, оба исследованных вида золошлаковых отходов содержат 2–6% соединений из категории “потери при прокаливании” (убыль массы вещества, нагреваемого до определенной температуры), представленных в основном несгоревшим углеродом (так называемый недожог). Это может оказать негативное влияние на качество геополимеров при их длительной эксплуатации в условиях Арктической зоны России.

Для определения фазового состава золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1 был проведен порошковый рентгенофазовый анализ (рис. 1), результаты которого позволяют сделать вывод, что оба исследованных материала характеризуются низкой интенсивностью пиков ввиду невысокого содержания кристаллических фаз, представленных диоксидом кремния (SiO_2) в форме высокотемпературного α -кварца (номер карточки из базы данных ICDD: 010-89-8936). На рентгенограммах отходов также присутствует гало в углах съемки 2θ от 14° до 30° , что свидетельствует о наличии аморфной структуры в виде щелочной и щелочно-земельной ферроалюмосиликатной стеклофазы.

На основе золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1 и Апатитской ТЭЦ были синтезированы пористые геополимеры двух составов с добавлением различных порообразующих добавок: в составе 1 использовалась алюминиевая пудра, а в составе 2 – 30%-ный раствор пероксида водорода (H_2O_2). В табл. 3 приведены шихтовый состав сырьевых смесей и такие характеристики

Таблица 1. Химический оксидный состав золошлаковых отходов

Золошлаковые отходы	Содержание оксидов, % (по массе)													
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	P_2O_5	SO_3	ппп*	Прочие	Всего
Апатитской ТЭЦ	52.39	22.15	7.73	2.63	0.78	1.94	3.59	1.05	0.07	0.36	0.37	6.46	0.48	100.00
Северодвинской ТЭЦ-1	60.78	17.69	5.93	2.71	3.56	2.29	2.08	0.82	0.07	0.21	0.32	2.29	1.25	100.00

* ппп – потери при прокаливании.

Таблица 2. Элементный состав прочих оксидов, содержащихся в золошлаковых отходах и не вошедших в табл. 1

Золошлаковые отходы	Содержание элементов, $\times 10^{-4}\%$ (по массе)																
	Cr	V	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	U	Th	Y	Nb	Pb	As	Cl	Mo
Апатитской ТЭЦ	205	223	180	137	179	80	1216	298	2060	14	19	91	20	71	32	12	5
Северодвинской ТЭЦ-1	103	116	56	39	81	81	338	277	1103	5	11	37	16	33	11	10227	5

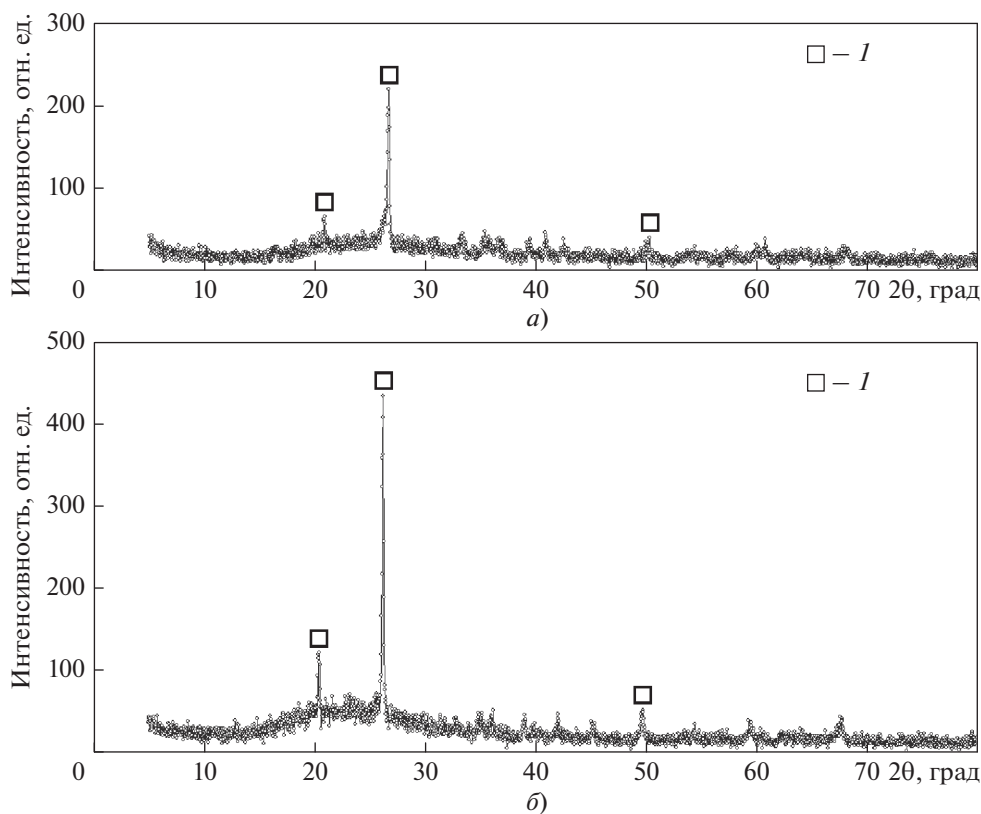


Рис. 1. Рентгенограмма золошлаковых отходов на Апатитской ТЭЦ (а) и Северодвинской ТЭЦ-1 (б). I – α-кварц

синтезированных геополимеров, как средняя плотность и прочность при сжатии. Составы на основе золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1 обозначены как 1с и 2с, Апатитской ТЭЦ – 1а и 2а. Для каждого состава было синтезировано по три образца.

Представленные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что наименьшей плотностью и, соответственно, большей пористостью обладают образцы на основе золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1. Лучший результат в качестве порообразующей добавки для тех и других золошлаков показал 30%-ный раствор перокси-

да водорода: разница плотностей образцов с порообразующими добавками составляла в среднем 50 кг/м³: 430–450 кг/м³ для алюминиевой пудры и 380–400 кг/м³ для пероксида водорода. При уменьшении плотности образцов, как и ожидалось, снижился предел прочности на сжатие с 2.8 до 2.3–2.5 МПа.

Микроструктуры синтезированных геополимеров на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1 с введением порообразующих добавок показаны на рис. 2, 3. Образцы на основе золошлаковых отходов обеих

Таблица 3. Шихтовый состав сырьевых смесей и характеристики синтезированных геополимеров

Состав	Содержание компонента, % (по массе)*						Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
	золошлак	NaOH (сухой)	вода	жидкое стекло	пероксид водорода, сверх 100	алюминиевая пудра, сверх 100%		
1с	75	2.5	4.5	18	—	2	430	2.76
2с	75	2.5	4.5	18	2	—	381	2.26
1а	75	2.5	4.5	18	—	2	454	2.81
2а	75	2.5	4.5	18	2	—	402	2.52

* Вначале готовилась сырьевая смесь, принятая за 100%, а уже независимо от нее вводилось содержание порообразователя, которое не входит в изначальный состав сырьевой смеси, т.е. дополнительно к 100% сырьевой смеси вводилось 2% порообразователя от общей массы приготовленной сырьевой смеси.

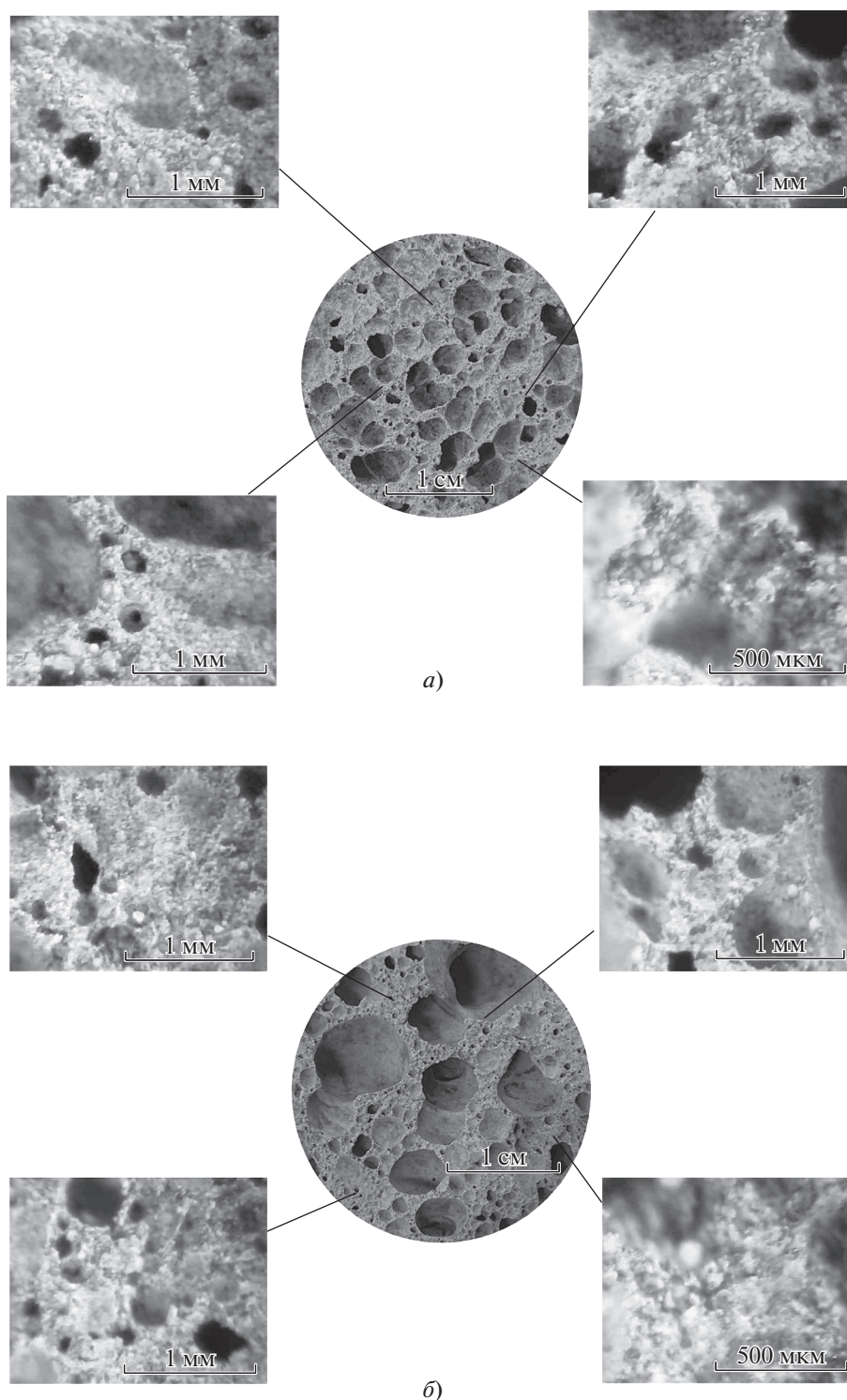


Рис. 2. Микроструктура синтезированных геополимеров на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ с применением в качестве порообразующей добавки алюминиевой пудры (а) и 30%-ного раствора пероксида водорода (б)

ТЭЦ с добавлением алюминиевой пудры характеризуются интенсивным порообразованием. Для отходов Апатитской ТЭЦ наблюдается неравномерное распределение макропор (см. рис. 2, а), размеры которых составляют от 0.8 до 6.0 мм, а для отходов Северодвинской ТЭЦ-1 это распределе-

ние практически равномерное (см. рис. 3, а). Образцы (см. рис. 2, б) на основе золошлаковых отходов обеих ТЭЦ с добавлением 30%-ного раствора пероксида водорода также характеризуются интенсивным порообразованием и неравномерным распределением макропор, максимальные размеры

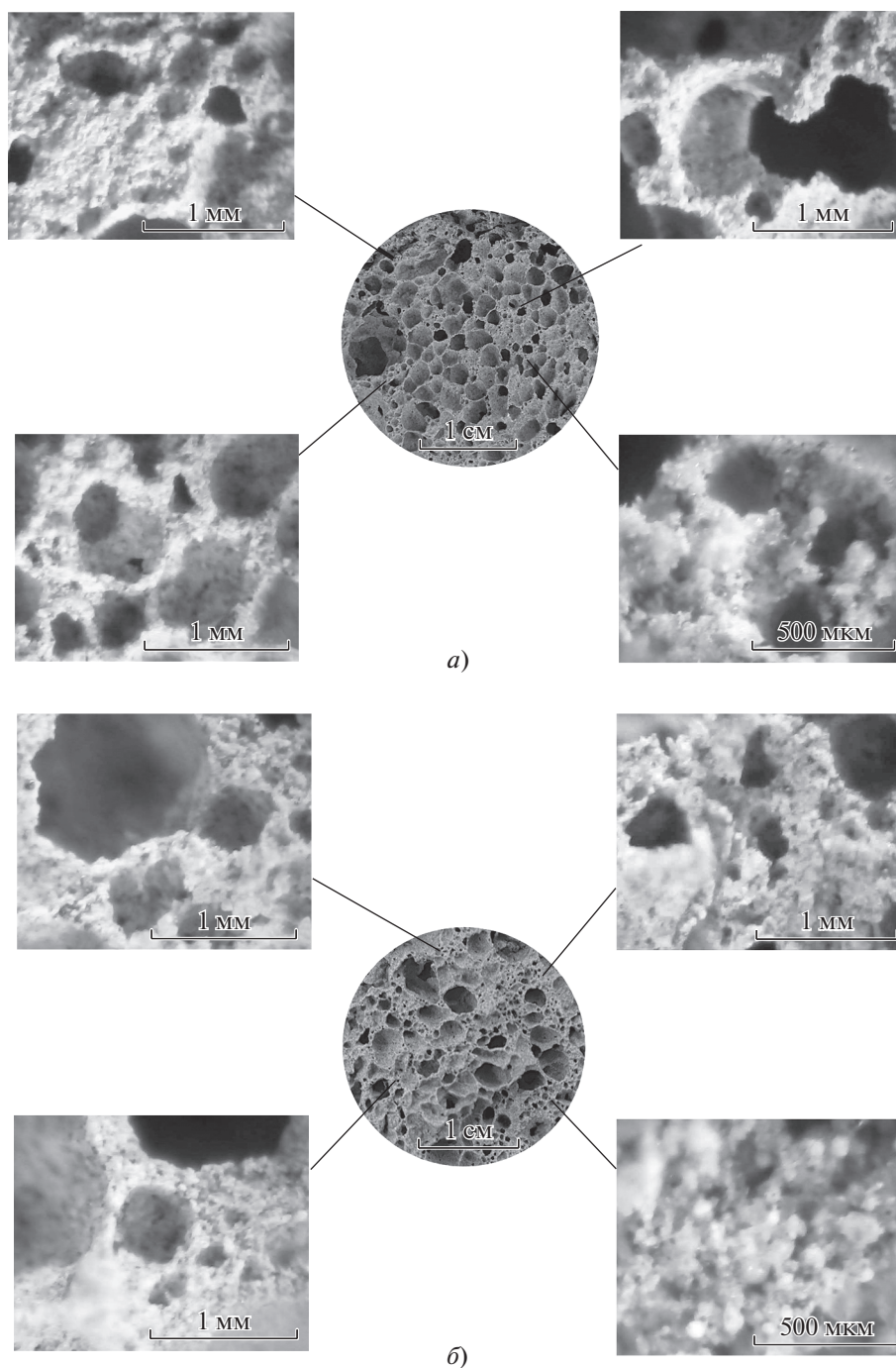


Рис. 3. Микроструктура синтезированных геополимеров на основе золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1 с применением в качестве порообразующей добавки алюминиевой пудры (а) и пероксида водорода (б)

которых для золошлаков Апатитской ТЭЦ составляют 12.0 мм, а Северодвинской ТЭЦ-1 – 7.2 мм. Распределение размеров пор в геополимерах на основе золошлаковых отходов обеих ТЭЦ представлено на рис. 4.

Проанализировав структуры образцов геополимеров на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1, можно сделать следующий вывод: при применении раз-

личных добавок порообразование происходит интенсивно, при этом наиболее распространенными оказываются закрытые макропоры размером до 1.6 мм. Полученные геополимеры составов 2с и 2а с введением в качестве порообразующей добавки пероксида водорода характеризуются наличием крупных пор, что может негативно сказаться на стабильности свойств получаемых образцов – прочности и теплопроводности.

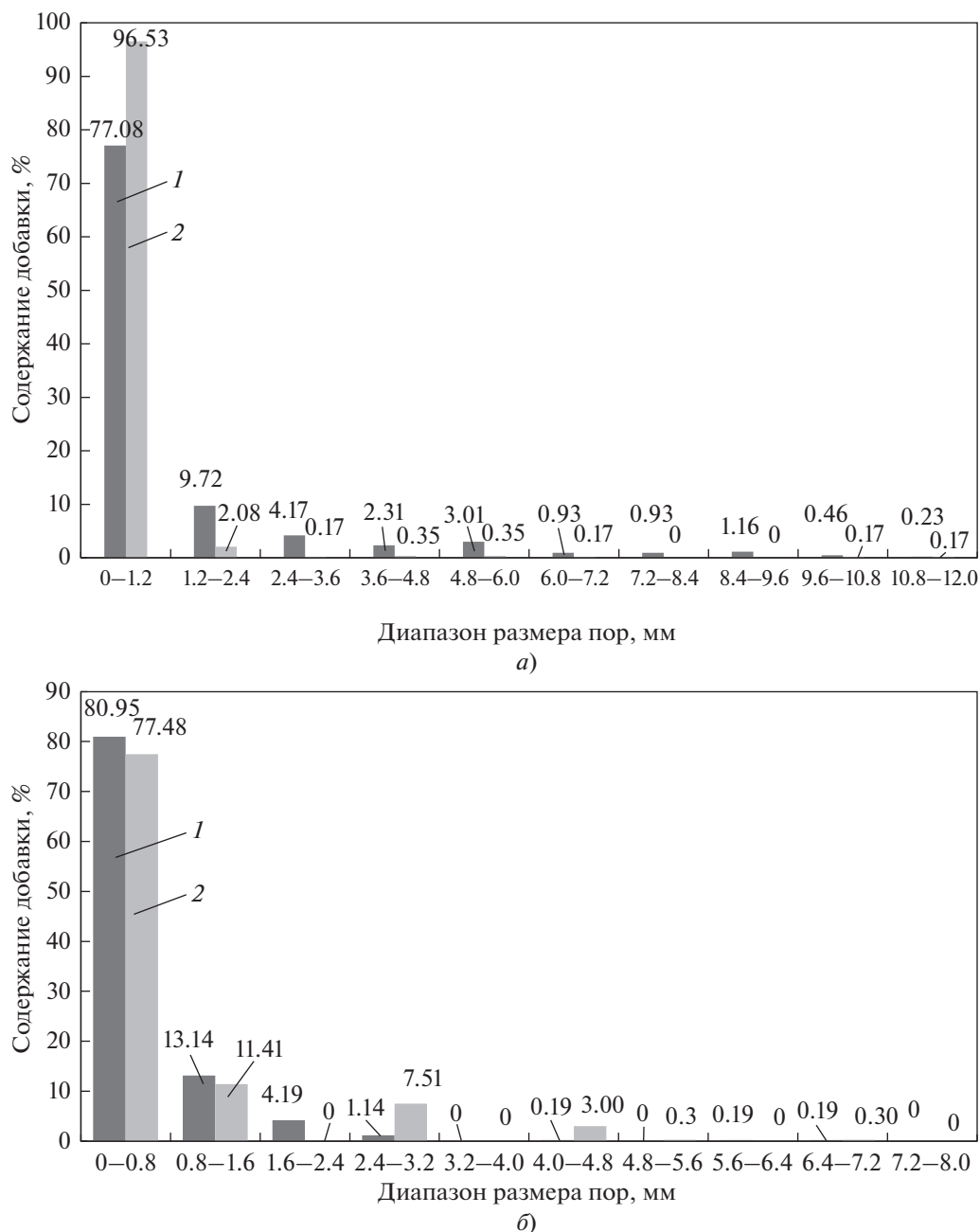


Рис. 4. Распределение размеров пор в геополимерах на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ (а) и Северодвинской ТЭЦ-1 (б).

Порообразующая добавка: 1 – алюминиевая пудра; 2 – 30%-ный раствор пероксида водорода

Для определения фазового состава синтезированных на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ (рис. 5) и Северодвинской ТЭЦ-1 (рис. 6) геополимеров был проведен порошковый рентгенофазовый анализ, результаты которого показывают, что во всех четырех представленных составах присутствует интенсивное гало в углах съемки 2θ от 14° до 34° , что свидетельствует о наличии рентгеноаморфной стеклофазы. Все исследованные материалы характеризуются низкой интенсив-

ностью пиков и, следовательно, невысоким содержанием кристаллических фаз, которые в синтезированных образцах с порообразующей добавкой алюминиевой пудры представлены диоксидом кремния SiO_2 в форме α -кварца и альбитом $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, а с порообразующей добавкой 30%-ного раствора пероксида водорода – только диоксидом кремния SiO_2 . Образование небольшого количества альбита в составах с алюминиевым порообразователем обусловлено, вероятно, действием

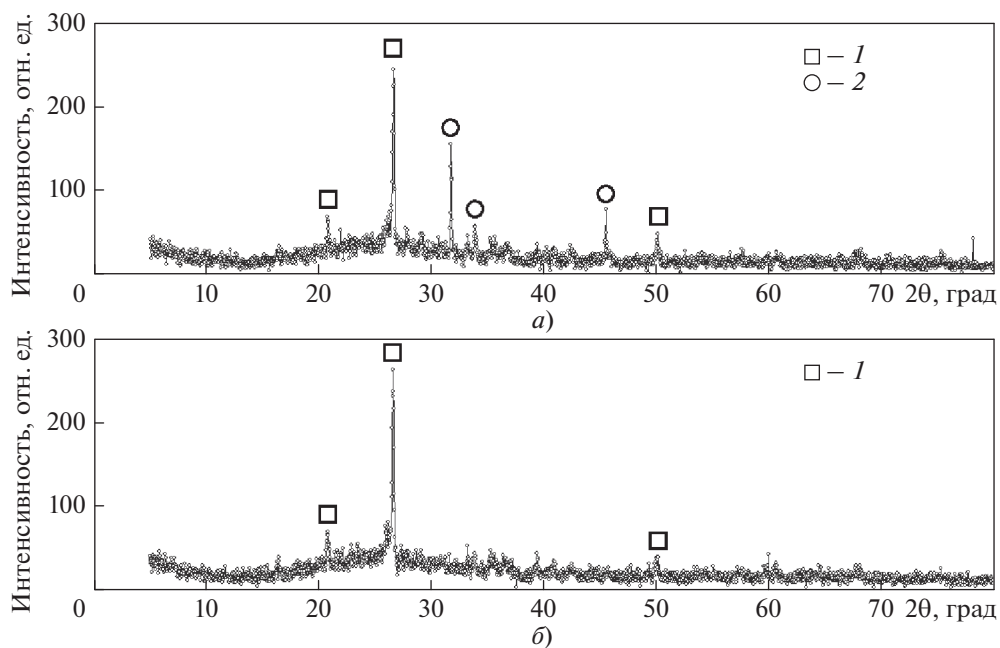


Рис. 5. Рентгенограмма синтезированных геополимеров на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ с применением в качестве порообразующей добавки алюминиевой пудры (а) и 30%-ного раствора пероксида водорода (б). 1 – α-кварц; 2 – альбит ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

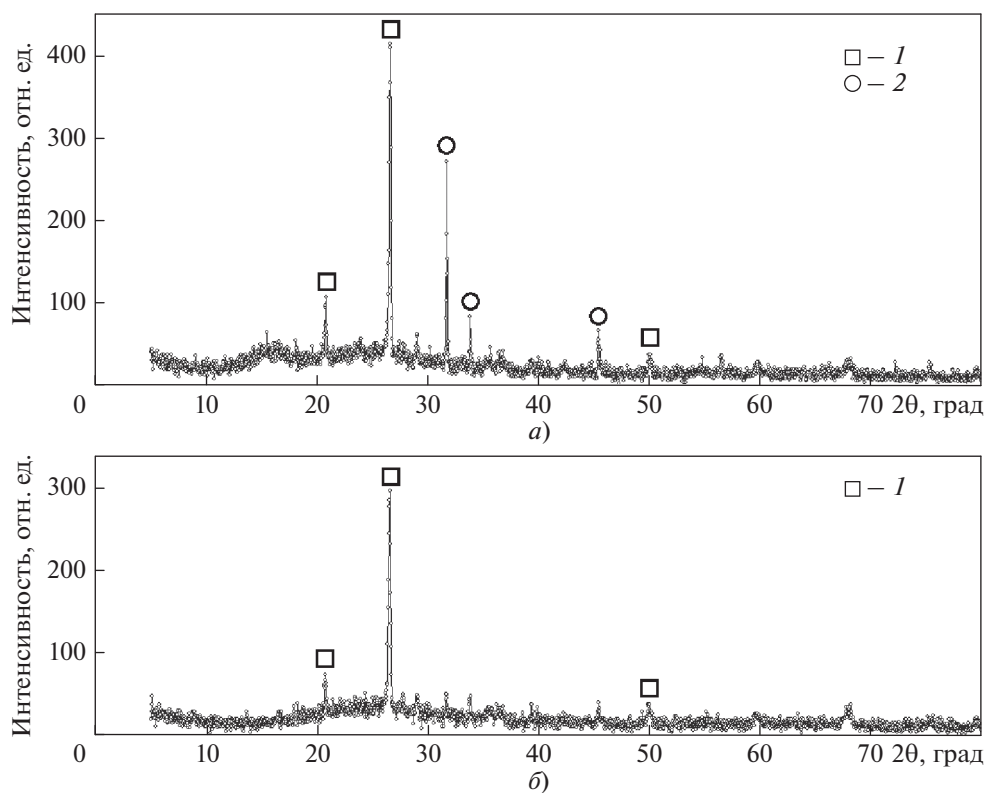


Рис. 6. Рентгенограмма синтезированных геополимеров на основе золошлаковых отходов Северодвинской ТЭЦ-1 с применением в качестве порообразующей добавки алюминиевой пудры (а) и 30%-ного раствора пероксида водорода (б). Обозначения см. рис. 5

атомов алюминия, которые в процессе окисления ведут к формированию кристаллов альбита [10].

Низкая интенсивность пиков кристаллических фаз и наличие стеклофазы в геополлимерных материалах приводит к избыточной внутренней энергии и, как следствие, высокой реакционной способности получаемых материалов. Это можно объяснить тем, что глинистые компоненты, присутствующие в углях, длительное время находятся в зоне высоких температур, вследствие чего спекаются и образуют остеклованные частицы.

Таким образом, в процессе экспериментов была доказана возможность использования золошлаковых отходов ТЭЦ Арктической зоны России в качестве основного сырья для синтеза пористых геополлимерных материалов. Такие материалы могут найти широкое применение в различных отраслях экономики, в частности в дорожном строительстве.

ВЫВОДЫ

1. Золошлаковые отходы, образующиеся на Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1, пригодны для использования в качестве сырья при производстве пористых геополлимеров. Наилучшей порообразующей добавкой является 30%-ный раствор пероксида водорода: разница в плотности ее и другой порообразующей добавки — алюминиевой пудры составляет в среднем 12%. Более равномерным распределением и меньшими размерами пор отличаются образцы с алюминиевой пудрой, в образцах с 30%-ным раствором пероксида водорода присутствуют макропоры размером более 2.5 мм в большем количестве, исключение составляют образцы на основе золошлаковых отходов Апатитской ТЭЦ. Значительное количество макропор может отрицательно сказаться на прочности и теплопроводности получаемых материалов.

2. На рентгенограммах синтезированных геополлимеров наблюдаются низкая интенсивность пиков кристаллических фаз и наличие стеклофазы, что обуславливает избыточную внутреннюю энергию и, как следствие, высокую реакционную способность производимых материалов.

3. Золошлаковые отходы Апатитской ТЭЦ и Северодвинской ТЭЦ-1, находящихся в Арктической зоне, можно рекомендовать в качестве основного сырья для синтеза геополлимерных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Законодательное** регулирование использования золошлаковых отходов угольных ТЭЦ: “Круглый стол” / М-во энергетики РФ, 2019. <https://minenergo.gov.ru/node/14014>
2. **Методы** обогащения золошлаковых отходов угольных ТЭЦ и пути их вовлечения в хозяйственный оборот (обзор) / Ю.В. Рябов, Л.М. Делицын, Н.Н. Ежо-

ва, С.В. Сударева // Теплоэнергетика. 2019. № 3. С. 3–24.

<https://doi.org/10.1134/S0040363619030056>

3. **Исследование** возможностей комплексной переработки отходов предприятий энергетики Приморского края / Е.И. Шамрай, А.В. Таскин, С.И. Иванов, А.А. Юдаков // Современные наукоемкие технологии. 2017. № 3. С. 68–75. <https://doi.org/10.17513/snt.36618>
4. **Черенцова А.А., Олесик С.М.** Оценка золошлаковых отходов как источник загрязнения окружающей среды и как источник вторичного сырья // Горный информ.-аналит. бюл. 2013. № 3. С. 230–243.
5. **Goltsman B.M., Yatsenko L.A., Goltsman N.S.** Production of foam glass materials from silicate raw materials by hydrate mechanism // *Solid State Phenomena*. 2020. V. 299. P. 293–298. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.299.293>
6. **Применение** зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев, П. Лахтинен // *Magazine Civil Eng.* 2011. Т. 22. № 4. С. 16–21. <https://doi.org/10.5862/MCE.22.2>
7. **Waste** slag from heating plants as a partial replacement for cement in mortar and concrete production. Part I. Physical–chemical and physical–mechanical characterization of slag / A. Nedeljković, M. Stojmenović, J. Gulicovski, N. Ristić, S. Milićević, J. Krstić, M. Kravogović // *Minerals*. 2020. V. 10. Is. 11. P. 992. <https://doi.org/10.3390/min10110992>
8. **Yatsenko E.A., Goltsman B.M.** Study of synthesis processes of heat-insulating silicate materials for external protection of steel oil pipelines // *CIS Iron Steel Rev.* 2020. V. 20. P. 33–36. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2020.02.08>
9. **Ahmed M.F., Nuruddin M.F., Shafiq N.** Compressive strength and workability characteristics of low-calcium fly ash-based self-compacting geopolymer concrete // *Int. J. Civil Environ. Eng.* 2011. V. 5. Is. 2. P. 72–78. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1330481>
10. **Davidovits J.** *Geopolymer chemistry and applications*. 5rd ed. France, Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2020.
11. **Dombrowski K., Buchwald A., Weil M.** The influence of calcium content on the structure and thermal performance of fly ash based geopolymers // *J. Mater. Sci.* 2007. V. 42. Is. 9. P. 3033–3043. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0532-7>
12. **Steinerova M.** Mechanical properties of geopolymer mortars in relation to their porous structure // *Ceram. – Silik.* 2011. V. 55. Is. 4. 362–372.
13. **Provis J.L., van Deventer J.S.J.** *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing, 2009.
14. **Škvára F., Jílek T., Kopecský L.** Geopolymer materials based on fly ash // *Ceram. – Silik.* 2005. V. 49. Is. 3. P. 195–204.
15. **Дудников А.Г., Дудникова М.С., Реджани А.** Геополлимерный бетон и его применение // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2018. № 1–2. С. 38–45.
16. **Development** of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity / J. Feng, R. Zhang, L. Gong, Y. Li, W. Cao, X. Cheng // *Mater. Des.* 2015. V. 65.

- P. 529–533.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.024>
17. **Utilisation** of waste-based geopolymer in asphalt pavement modification and construction – A review / A. Milad, A.S.B. Ali, A.M. Babalghaith, Z.A. Memon, N.S. Mashaan, S. Arafa, N.I.Md. Yusoff // *Sustainability*. 2021. V. 13. Is. 6.
<https://doi.org/10.3390/su13063330>
 18. **Wu J.** Preparation and characterization of ultra-light-weight foamed geopolymer (UFG) based on fly ash-metakaolin blends // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 168. P. 771–779.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.097>
 19. **Waste-based** geopolymeric mortars with very high moisture buffering capacity / A. De Rossi, J. Carvalheiras, R.M. Novais, M.J. Ribeiro, J.A. Labrincha, D. Hotza, R.F.P.M. Moreira // *Constr. Build. Mater.* 2018. V. 191. P. 39–46.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.201>
 20. **Development** of eco-friendly geopolymers with ground mixed recycled aggregates and slag / J. Tan, J. Cai, X. Li, J. Pan, J. Li. // *J. Cleaner Prod.* 2020. V. 256. P. 120369.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120369>
 21. **Peculiarities** of foam glass synthesis from natural silica-containing raw materials / E.A. Yatsenko, B.M. Goltsman, L.V. Klimova, L.A. Yatsenko // *J. Therm. Anal. Calorim.* 2020. V. 142. P. 119–127.
<https://doi.org/10.1007/s10973-020-10015-3>
 22. **Natural** fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry / G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, J. Nakamatsu // *Sustainable Mater. Technol.* 2020. V. 23. P. e00132.
<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>
 23. **Optimization** and mechanical-physical characterization of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates for construction products / M. Panizza, M. Natalia, E. Garbin, V. Ducman, S. Tamburini // *Constr. Build. Mater.* 2020. V. 264. P. 120158.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120158>

Processing of Ash and Slag Waste from Coal Fuel Combustion at the CHPP of the Arctic Zone of Russia with Obtaining Porous Geopolymer Materials

E. A. Yatsenko^{a, *}, B. M. Goltsman^{a, **}, S. V. Trofimov^a, and G. I. Lazorenko^b

^a South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Rostov oblast, 346428 Russia

^b Rostov State University of Communications, Rostov-on-Don, 344038 Russia

*e-mail: e_yatsenko@mail.ru

**e-mail: boriustpost@gmail.com

Abstract—In modern conditions, the most acute issue is improving the environmental situation around the world. One of the ways to solve it in Russia can be the disposal of ash and slag waste, since their storage in ash dumps requires huge territories, which thus fall out of the country’s economic turnover. One of the promising areas for the disposal of ash and slag waste is road construction, since the development and well-being of the regions to a large extent depends on the availability and quality of a developed transport infrastructure. The main difficulties that arise in the construction and operation of roads in the Arctic zone in conditions of high humidity and permafrost are associated with an uneven increase in the volume of soil due to the freezing of the moisture contained in it. To solve this problem, heat-insulating materials are used, namely, porous geopolymers obtained by alkaline activation of aluminosilicate raw materials, such as ash and slag waste. In this work, ash and slag wastes from the Apatitskaya CHPP and Severodvinsk CHPP-1 were used. For their study, the methods of X-ray spectral fluorescence (XRF) and powder X-ray phase analysis (XRD) were used. According to the results of XRF analysis, the studied ash and slag wastes belong to the acidic category. According to XRD analysis, ash and slag wastes have a low content of crystalline phases represented by silicon dioxide (SiO₂) and hematite (Fe₂O₃). There is also an amorphous structure in the form of an alkaline and alkaline earth ferroaluminosilicate glass phase. To study the properties of geopolymers, compositions were developed using two pore-forming additives: aluminum powder and a 30% hydrogen peroxide solution. After the synthesis of geopolymers, their average densities were: 430 and 381 kg/m³ for ash and slag waste, respectively, from the Apatity CHPP and 454 and 402 kg/m³, respectively, for the waste of Severodvinskaya CHPP-1. All samples of geopolymers are characterized by intense pore formation with an uneven distribution of pores. X-ray diffraction patterns of the obtained geopolymers showed a low intensity of pore formation and a low content of crystalline phases in all studied compositions.

Keywords: ash and slag wastes, geopolymers, porous structure, Arctic zone of Russia, road construction, X-ray fluorescence analysis, powder X-ray phase analysis