

УДК 691.335  
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4557  
Шифр специальности ВАК: 1.3.14, 2.4.6

## Подходы к способу гранулирования золы уноса теплоэлектростанций

Н.И. Горячева, А.В. Полтавец, А.Р. Богомолов<sup>✉</sup>, Е.Ю. Темникова

*Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, г. Кемерово*

<sup>✉</sup>barom@kuzstu.ru

**Аннотация. Актуальность.** Исследование направлено на снижение влияния недостатков (пыление) в процессе вовлечения в обращение летучей золы уноса, препятствующих более широкому использованию ценного вторичного сырья в производстве востребованных продуктов. Направление работы соответствует Комплексному плану утилизации отходов угольных электростанций и котельных, утверждённому распоряжением Правительства РФ от 15.06.2022 г. № 1557-р. **Цель.** Разработка оптимальной технологии получения гранул из золы уноса Кемеровской ГРЭС с использованием в качестве связующего двух видов веществ аналогичной природы в зависимости от концентрации связующего в водном растворе, времени задержки набора прочности и показателя истираемости. **Объект.** Гранулят, или окатыш, из летучей золы уноса на основе связующего: экспериментального алюмосиликатного клея и жидкого натриевого стекла «Диола-53». **Методы.** Испытания по определению прочности проводились на гидравлическом прессе по ГОСТ 8929-2020, по определению показателя истираемости крупного заполнителя в полочном барабане – по ГОСТ 9758-2012. Использовали два способа гранулирования золы уноса: 1) одностадийный – гранулирование с использованием рыночного жидкого стекла; 2) двухстадийный – приготовление (варка) алюмосиликатного клея из золы уноса и гранулирование. Получение жидкого алюмосиликатного клея осуществлялось экспериментальным способом в емкости с использованием колбонагревателя и перемешивающего устройства. **Результаты и выводы.** Установлены различия по времени задержки набора прочности и показателя истираемости гранул, полученных двумя способами на основе золы уноса Кемеровской ГРЭС при использовании в качестве связующего вещества алюмосиликатного клея и жидкого натриевого стекла «Диола-53». Найдены зависимости времени задержки набора прочности и показателя истираемости гранул от концентрации (доли) водного раствора связующего вещества. Определены удельные затраты на производство гранул для каждого связующего вещества и его доли в водном растворе. Гранулят из золы уноса на основе связующего: экспериментального алюмосиликатного клея и жидкого натриевого стекла «Диола-53», может без пыления транспортироваться любым видом транспорта и служить потенциальным сырьем для производства цемента компонентом в производстве бетонов.

**Ключевые слова:** зола уноса, гранулирование, жидкое стекло, алюмосиликатный клей, прочность, истирание

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № 075-03-2024-082/2 от 15.02.2024 г. (FZES-2024-0001).

**Для цитирования:** Подходы к способу гранулирования золы уноса теплоэлектростанций / Н.И. Горячева, А.В. Полтавец, А.Р. Богомолов, Е.Ю. Темникова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 210–218. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4557

---

UDK 691.335  
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4557

## Approaches to the method of granulation of fly ash of power plants

N.I. Goryacheva, A.V. Poltavets, A.R. Bogomolov<sup>✉</sup>, E.Yu. Temnikova

*T.F. Gorbachev Kusbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation*

<sup>✉</sup>barom@kuzstu.ru

**Abstract. Relevance.** The research is aimed at reducing the impact of deficiencies (dusting) when involving in circulation fly ash, which prevents the wider use of valuable secondary raw materials in the production of demanded products. The direction of work corresponds to the Comprehensive Waste Disposal Plan for coal-fired power plants and boiler houses, approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 06/15/2022 No. 1557-R. **Aim.** Development of an optimal technology for the production of granules from fly ash of Kemerovo Urban District Power Plant using two types of substances of a similar nature as a binder, depending on the concentration of the binder in an aqueous solution and the delay time of strength gain and abrasion index. **Object.** A granulate or pellet made of fly ash based on a binder of experimental aluminosilicate glue and liquid sodium glass "Diola-53". **Methods.** Strength tests were carried out on a hydraulic press according to SS 8929-2020 and the abrasion index of a large filler in a shelf drum was determined out according to SS 9758-2012. Two methods of granulation of fly ash were used: 1) two-stage – preparation (cooking) of aluminosilicate glue from fly ash and granulation; 2) one-stage – granulation using market liquid glass. Liquid aluminosilicate glue was produced experimentally in a container using a flask heater and a mixing device. **Results and conclusions.** The authors have established the differences in the delay time of strength gain and the abrasion index of granules obtained by two methods based on fly ash from Kemerovo Urban District Power Plant using aluminosilicate glue and liquid sodium glass "Diola-53" as a binder. They found the dependences of the delay time of strength gain and the abrasion index of granules on the concentration (fraction) of an aqueous solution of the binder. The specific costs for the production of granules for each binder and its proportion in an aqueous solution are determined. Granulate from fly ash based on a binder: experimental aluminosilicate glue and liquid sodium glass "Diola-53", can be transported without dusting by any type of transport and serve as a potential raw material for cement production and a component in concrete production.

**Keywords:** fly ash, granulation, liquid glass, aluminosilicate glue, strength, abrasion

**Acknowledgements:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of Project no. 075-03-2024-082/2 dated February 15, 2024 (FZES-2024-0001).

**For citation:** Goryacheva N.I., Poltavets A.V., Bogomolov A.R., Temnikova E.Yu. Approaches to the method of granulation of fly ash from thermal power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 210–218. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4557

## Введение

Летучую золу уноса и ее гранулы применяют в различных сферах человеческой деятельности: а) в сельском хозяйстве используют в качестве мелиоранта для нейтрализации кислых почв и повышения их плодородия [1–3]; б) в автодорожном строительстве применяют в качестве минерального порошка, золы песка или щебня в составе асфальтобетонной смеси [4, 5] и для стабилизации глинистого слоя дорожного полотна [6]; в) при изготовлении бетонных смесей и строительных растворов для замещения части цемента и природного щебня [7–12], а также для полной или частичной замены крупного и мелкого заполнителя [13–16]. Несмотря на широкий спектр ее применения, переработке подвергается не более 8–10 % с предельным накоплением в золошлакоотвалах.

В рамках реализации Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г. распоряжением Правительства РФ от 15.06.2022 г. № 1557-р утвержден Комплексный план утилизации отходов угольных электростанций и котельных, где установлен целевой показатель доли утилизируемых золошлаков тепловых электростанций и котельных от годового объема образования 15 % к 2024 г. и 50 % к 2035 г. Проблемы повышения доли перерабатываемой золы уноса связаны также с ее высокой дисперсностью. К примеру, для пяти энергетических станций Кузбасса улавливаемая сухим и мокрым способом зола уноса имеет грану-

лометрический состав 0–100 мкм около 90 мас. %, из которого модальный размер 25 мкм составляет 52–75 %, а максимальный размер – 250 мкм [17]. Она образуется в результате сжигания твердого пылевидного угольного топлива в камерных топках на ТЭС Кузбасса, где при содержании в минеральной части исходного топлива кальция, магния, кремния, железа и алюминия под воздействием высоких температур при горении угля образуются оксиды кремния (38–52 мас. %), алюминия (26–30 мас. %), железа (6–10 мас. %), кальция (5–7 мас. %) и магния (1,5–3,5 мас. %) – минералы, способные к гидратации. В таких золах при затворении водой оксиды кальция и магния способны к самостоятельному твердению. Можно отметить, что содержание оксида кремния в минеральной части углей Д, используемых в качестве топлива на ТЭС, значительно по сравнению с зольным остатком в бурых углях. Этот факт потенциально говорит о целесообразности использования золы уноса для получения как жидкого связующего клея, так и гранулята.

Количественные характеристики по химическому составу свидетельствуют о возможности внедрения практик вовлечения золы уноса в хозяйственный оборот в качестве пуццолана (гидравлическая активность) для производства цемента, сухих строительных смесей, в строительстве дорожных одежд.

Сезонные тренды оказывают существенное влияние на объем грузоперевозок в сегменте строи-

тельства. В начале строительного сезона образуется дефицит хопперов-цементовозов и автоцементовозов, способных транспортировать золу в исходном состоянии. Данный фактор накладывает существенные ограничения на объем использования золы уноса в строительной сфере. То есть основным недостатком золы уноса является ее пыление при погрузке в транспортные средства, при транспортировке и закачивании в силосы на предприятиях, использующих в качестве добавки искусственную сырьевую базу.

В связи с этим исследования направлены на снижение влияния недостатков в процессе вовлечения летучей золы уноса в хозяйственный оборот, препятствующих более широкому использованию ценного вторичного сырья, переводя ее в вид прочного гранулята для производства востребованных продуктов. Наиболее целесообразный способ по расширению сфер использования золы уноса – это ее гранулирование в прочный окатыш для исключения обильного пыления при погрузочно-разгрузочных и транспортных операциях, характерного для мелкодисперсных материалов.

Известно об успешных результатах гранулирования золы уноса бурого и каменного угля с добавлением в качестве связующего фосфогипса, состоящего в основном из гидрата сульфата кальция, портландцемента (гидравлического вяжущего вещества с преобладанием силиката кальция) и гидратированной извести (извести, которая схватывается при гидратации) [18–21]. Однако данный гранулят превращается в прочный или средней прочности гравий, камень, керамзит при пределе прочности на сжатие от 50 до 100 МПа, который можно использовать только в качестве заполнителя в производстве бетона.

Таким образом, необходимо определить тип и оптимальную концентрацию связующего и способы производства гранулята из золы уноса рациональной прочности на сжатие и истирание. Такой гранулят может использоваться в качестве добавки к природным компонентам (клинкеру) при производстве цемента сухим способом. При этом гранулят можно применять и в виде гранул, и в виде порошка, получаемого из гранулята разрушением или измельчением при воздействии цепных или других конструкций измельчителя.

Тогда задачей исследования является разработка оптимальной технологии производства гранулированной золы уноса с достаточной прочностью на сжатие и истирание на основе двух способов гранулирования: одностадийного (жидкое стекло + зола уноса) и двухстадийного (варка алюмосиликатного клея и процесс гранулирования – клей + зола уноса). Связующие при этом имели одинаковую природу происхождения по химическому со-

ставу с золой уноса для формирования гранул: 1) жидкое натриевое стекло «Диола-53» и 2) экспериментальный алюмосиликатный клей.

### Материалы и методы

В процессе получения окатышей использовались два связующих, близких по значению силикатного модуля, т. е. по химическому составу. Различие заключалось в том, что алюмосиликатный клей содержал кроме оксида кремния и натрия оксиды кальция, натрия, калия и др. При гранулировании применяли водные растворы из связующих с различным соотношением связующее (клей):вода в количестве не менее шести.

В одностадийном способе гранулирования использовали рыночное жидкое натриевое стекло «Диола-53» – это водный щелочной раствор силикатов натрия  $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$ , силикатный модуль 2,6–3,0, плотность 1,36–1,5 г/см<sup>3</sup>. Это связующее выбрано из многих других в связи с достаточной информацией о продукции. Характеристикой химического состава жидкого стекла является силикатный модуль.

Другие производители натриевого жидкого стекла на рынке, например, натриевое жидкое стекло «Эксперт», жидкое стекло Ижорского завода, жидкое стекло ФОНОЛ 2 (Казахстан), жидкое стекло натриевое COVER COLER и др. не предоставляют в открытом доступе информацию о силикатном модуле и плотности.

В двухстадийном способе предварительно производили алюмосиликатный клей из золы уноса для его последующего применения в качестве клеящего или связующего вещества для получения гранулята, однородного по химическому составу с золой уноса.

Данные технологии будут способствовать получению окатышей для перевозки без пыления в транспортных вагонных средствах открытого типа и использованию в качестве добавки при производстве цемента. Причем это добавки в качестве присадки могут вводиться во вращающуюся печь и измельчаться до состояния тонкодисперсного размера цемента.

Для приготовления экспериментального алюмосиликатного клея (связующего для получения гранулята из золы уноса) в качестве сырья была использована немагнитная фракция золы уноса с размерами частиц 0–50 мкм, вода, 43 % раствор гидроксида натрия (NaOH). Нагрев смеси осуществлялся до 80–90 °С с ее перемешиванием в течение 50–60 мин и поддержанием температуры не выше 90 °С. На 1000 г смеси состав сырья следующий:

- 40 %, или 400 г, золы;
- 24 %, или 240 г, 43 % раствора гидроксида натрия;
- 36 %, или 360 г, воды.

С учётом испарения в процессе варки выход готового продукта составляет 890 г. Данная авторская технология и оптимальное соотношение компонентов представлены в [22, 23]. При этом силикатный модуль произведенного алюмосиликатного клея по предлагаемой авторами технологии составлял 2,6–3,6.

Технология производства гранулята из золы уноса в лабораторных условиях заключалась в нанесении методом распыления через форсунку капель связующего на поверхность сыпучей золы, находящейся в тарном круглом контейнере, совершающем планетарное эксцентричное вращение. При взаимодействии капель связующего и золы уноса в движении образовывались окатыши. В зависимости от размера капель создавались гранулы соответствующего размера. Размер гранулята в лабораторных условиях составлял от 6 до 20 мм. Гранулы образуются по форме, близкой к сферической. Фотография гранулята из золы уноса Кемеровской ГРЭС представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Гранулы из сухой золы уноса Кемеровской ГРЭС  
**Fig. 1.** Granules from dry fly ash of the Kemerovo Urban District Power Plant

Одна из задач исследования при формировании гранул состояла в оценке влияния концентрации связующего в водном растворе на прочность окатышей и время набора прочности. Были проведены исследования составов связующего в соотношении клей/вода: 95/5, 90/10, 85/15, 80/20, 70/30, 50/50. Набор прочности контролировался по графику – суткам. Были приняты интервалы в сутках: 1, 2, 3, 5, 7, 14, 20, 30. Процесс задержки набора прочности проводился в помещении при температуре 22 °С. Из полученного гранулята ежедневно проводился отбор образцов для определения прочности на разрушение.

Образцы подвергались испытанию на прочность на гидравлическом прессе в соответствии с ГОСТ 8929-2020. Исследование образцов гранулята на истирание проводилось во вращающемся барабане

с продольными перегородками в соответствии с ГОСТ 9758-2012. Отбор проб для испытаний на прочность на сжатие и показатель на истирание произведенных гранул размером от 6 до 20 мм, близкой к сферической форме, производили методом выборки. Окатыши (гранулы) укладывали насыпью при небольшом встряхивании для дополнительного уплотнения в пресс форму диаметром 75 мм. Высота слоя составляла не менее трех калибров, а по диаметру – не менее 10 калибров. Гидравлическим прессом производили медленное повышение давления по манометру. При резком сбрасывании максимального давления электронным датчиком фиксировался момент сброса. Таким образом определяли прочность при сжатии. Процедуру повторяли три раза. Среднее значение принимали как усредненное для отображения на графиках. Доверительный интервал при трехкратном измерении каждого события (время набора прочности и состава связующего) по прочности на сжатие и показателя истираемости не превышал  $\pm 5$ –8 %. Большая величина погрешности относилась к начальным временам набора прочности и показателя истираемости на уровне 3–5 дней.

В работе применяли условную градацию по прочности на сжатие, используя данные ГОСТ 9478-84 и 9479-2011. Полученный в данной работе гранулят имеет пористую, хотя незначительно, структуру, и для сравнения можно использовать вулканические туфы, также с пористыми структурами, у которых предельная прочность на сжатие составляет не менее 5 МПа. Этот материал используют для приготовления туфобетона, обладающего еще и хорошими теплоизоляционными свойствами. Тогда, если прочность на сжатие полученного гранулята более 50 кгс/см<sup>2</sup> (5 МПа), его можно использовать для производства бетона в качестве заполнителя, в другом случае, т. е. менее 50 кгс/см<sup>2</sup>, предлагаем гранулят вносить в присадку при производстве цемента непосредственно во вращающуюся печь, где он будет измельчен цепными устройствами.

### Результаты исследования и обсуждение

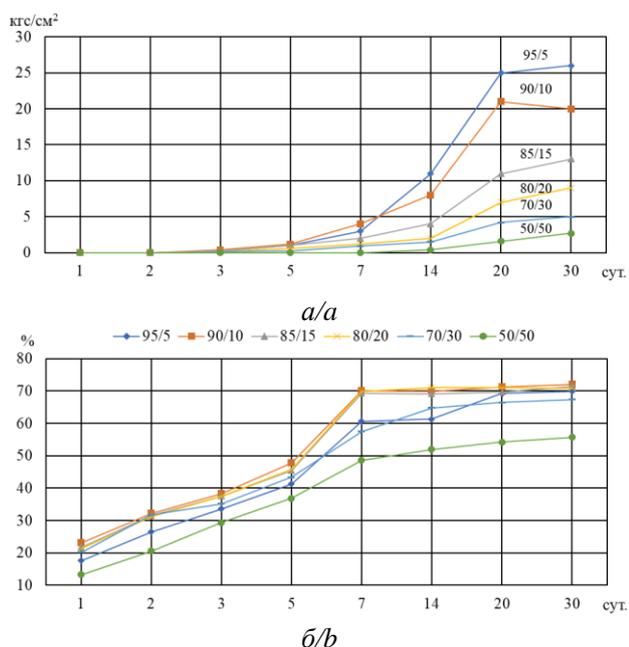
Испытания на прочность и истирание проводятся с целью определения возможности транспортировки гранулята (без его пыления) и дальнейшего надежного измельчения гранул, вносимых во вращающую печь с внутренними измельчающими цепными устройствами при производстве цемента в качестве присадки.

На рис. 2 представлены результаты проведения экспериментального исследования на прочность (рис. 2, а) и на истирание (рис. 2, б) в зависимости от продолжительности выдержки по дням для различных составов: алюмосиликатный клей/вода.

Для всех образцов полученного гранулята на основе связующего алюмосиликатного клея характерен максимальный набор прочности к 20 суткам, значение которого при концентрации клея 95 % в смеси с водой составило  $25 \text{ кгс/см}^2$  (~2,5 МПа). Далее набор прочности протекает более низкими темпами.

Для соотношения клей/вода, равного 95/5, на 14 сутки прочность гранулята составляла  $11 \text{ кгс/см}^2$  (~1,1 МПа). Дальнейшие 6 суток (с 14 до 20 сут.) набор прочности был интенсивнее, чем в последующие 10 суток (с 20 до 30 сут.) выдержки для всех соотношений клей/вода.

Стойкость к истиранию образцов также зависит от доли алюмосиликатного клея в водном растворе в составе гранул и от времени выдержки при хранении в лабораторных условиях. Образцы при содержании клей/вода 90/10, 85/15, 80/20 по прошествии 7 суток способны сопротивляться истиранию на 70 %, и в дальнейшем стойкость не изменяется, поэтому осуществлять выдержку гранул более 7 суток для перечисленных выше соотношений клей/вода нецелесообразно. Образец гранул из алюмосиликатного клея/воды 70/30 набирает устойчивость к истиранию на 14 день при значении 65 %, а образцу с соотношением 50/50 потребуется более 30 дней для устойчивости к истиранию примерно на уровне 55 %.



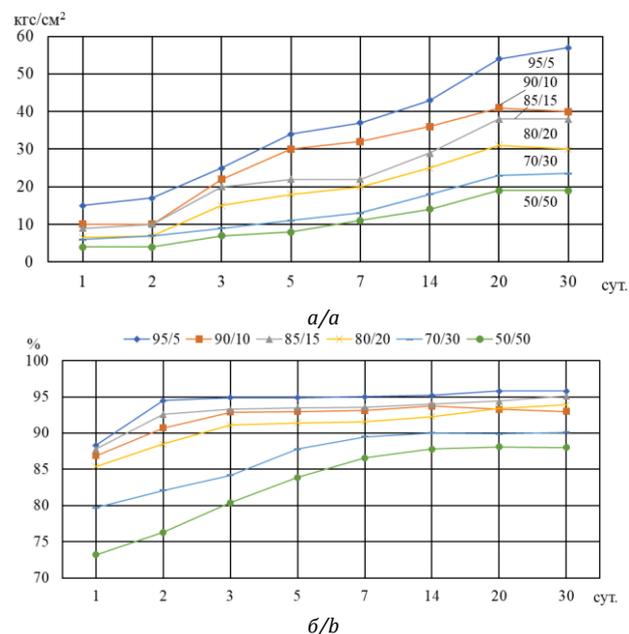
**Рис. 2.** Зависимость показателей прочности (а) и истирания (b) гранул от доли алюмосиликатного клея в смеси и количества дней выдержки

**Fig. 2.** Dependence of the strength (a) and abrasion (b) indicators of granules on the proportion of aluminosilicate glue in the mixture and the number of days of exposure

На рис. 3 представлены опытные данные показателей прочности (рис. 3, а) и истирания (рис. 3, b) полученного гранулята из золы уноса на основе жидкого натриевого стекла «Диола-53».

Необходимо отметить, что при использовании связующее/вода в соотношении 95/5 набор прочности  $25 \text{ кгс/см}^2$  с применением рыночного жидкого стекла наступает на третий день, а при введении алюмосиликатного клея аналогичного состава набор такой прочности достигается только на 20 день. Этот результат свидетельствует о том, что жидкое стекло «Диола-53» эффективнее по набору прочности до  $25 \text{ кгс/см}^2$  почти в 7 раз, если рассматривать по времени набора прочности.

Кроме того, на 20 день при использовании «Диола-53» прочность гранулята  $22 \text{ кгс/см}^2$  достигается при использовании связующее/вода в соотношении 70/30. Это говорит о количественной экономичности применения связующего жидкого натриевого стекла по сравнению с алюмосиликатным клеем. При максимальной концентрации жидкого стекла 95/5 на 20 день достигается прочность  $54 \text{ кгс/см}^2$ .



**Рис. 3.** Зависимость показателей прочности (а) и истирания (b) гранул от доли жидкого натриевого стекла «Диола-53» в смеси и количества дней выдержки

**Fig. 3.** Dependence of the strength (a) and abrasion (b) indicators of granules on the proportion of liquid sodium glass "Diola-53" in the mixture and the number of days of exposure

Наибольшая стойкость к истиранию полученных образцов состава 95/5 и 90/10 гранулята на основе жидкого стекла достигается после двух суток,

а для состава 85/15 и 80/20 на третьи сутки с показателем 92–95 %. Образцы состава 70/30 и 50/50 достигают стойкости к истиранию с показателем 87–90 % к седьмым суткам.

Важными характеристиками для потребителя гранулята из золы уноса являются: достаточная прочность, не обязательно высокая, но приемлемая для использования в технологическом процессе при его измельчении, и показатель на истирание, в большей степени имеющий отражение при транспортировке и пересыпах. Для производства бетона и железобетонных конструкций непременно требуется высокая прочность гранул и показатель на истирание, соответственно, для производства бетона можно применять гранулы, полученные на основе жидкого стекла, так как прочность на сжатие таких гранул составляет более 5 МПа. А вот при производстве цемента добавка в виде гранулята не требует высокой прочности, так как окатыши во вращающейся барабанной печи подвергаются измельчению, что соответствует набору прочности гранул на алюмосиликатном клее со значением не более 2,5 МПа.

Важной характеристикой с экономической точки зрения является количество золы уноса, которое может быть воспринято одним граммом связующего. На рис. 4 представлены зависимости удельного массового расхода золы уноса, или ее относительная доля, поглощенная 1 г жидкого стекла или алюмосиликатного клея, для различных соотношений водного раствора.

Видно, что расход золы уноса на 1 г связующего вещества (удельное поглощение) при использовании жидкого стекла практически не изменяется (3,03–2,88) при уменьшении его концентрации в водном растворе от 95 до 50 %. При этом прочность гранул при трехдневном наборе прочности снижается в зависимости от указанной концентрации связующего с 25 до 8 кгс/см<sup>2</sup>, а стойкость на истирание снижается с 95 до 80 %.

Результаты экспериментальных данных по удельному поглощению (расходу) золы уноса в условиях применения алюмосиликатного клея значительно отличаются от удельного поглощения при использовании жидкого стекла. Наблюдается антибатная зависимость, с уменьшением концентрации связующего его поглощающая способность заметно увеличивается с 0,33 до 2,77. При

концентрации 50 % связующего в водном растворе данные для двух способов практически совпадают.

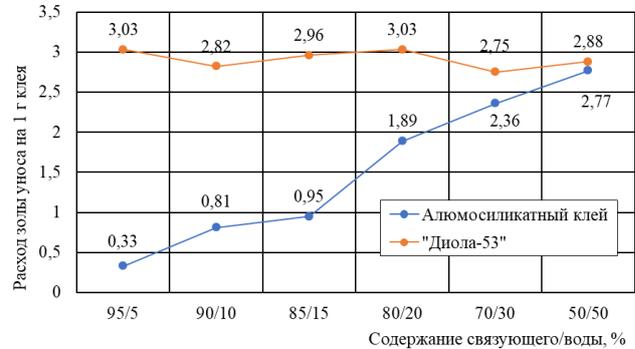


Рис. 4. Зависимость относительной доли золы уноса, поглощенной 1 граммом связующего вещества в гранулах, от доли связующего

Fig. 4. Dependence of the relative share of fly ash absorbed by 1 gram of binder in granules on the binder proportion

Необходимо отметить, что с увеличением поглощающей способности алюмосиликатного клея при уменьшении его концентрации в связующем происходит увеличение времени набора прочности и стойкости к истиранию.

Представленные в таблице переменные затраты на производство гранул с применением алюмосиликатного клея и жидкого натриевого стекла «Диола 53», приведенные к 1 кг золы уноса, сопоставимы при процентном соотношении 50/50 связующего вещества и воды и составляют 16 р./кг.

При увеличении доли связующего переменные затраты для алюмосиликатного клея растут до 138 р./кг за счет роста массы золы уноса и требуемого гидроксида натрия (NaOH) для приготовления алюмосиликатного клея.

### Заключение

Установлены различия по времени задержки набора прочности и показателя истираемости гранул, полученных на основе золы уноса Кемеровской ГРЭС, при использовании в качестве связующего вещества алюмосиликатного клея и жидкого натриевого стекла «Диола-53».

Таблица. Переменные затраты на 1 кг золы уноса при производстве гранул

Table. Variable costs per 1 kg of fly ash in the production of pellets

Связующий материал Binding material	Стоимость связующего, р./кг Binder cost, rub/kg	Доля связующего/Binder proportion, %					
		95/5	90/10	85/15	80/20	70/30	50/50
Алюмосиликатный клей/Aluminosilicate glue	110	138	56	48	24	22	16
Диола 53/Diоla 53	47	15	17	16	15	17	16

Были найдены зависимости времени задержки набора прочности и показателя истираемости гранул от концентрации (доли) водного раствора связующего вещества.

Определены удельные затраты на производство гранул для каждого связующего вещества и его доли в водном растворе.

Гранулированная зола уноса с использованием в качестве связующего экспериментального алюмо-

силикатного клея и жидкого натриевого стекла «Диола-53», получаемая в результате её окомкования при внесении связующего, может без пыления транспортироваться любым видом транспорта и служить потенциальным сырьем для производства цемента (при использовании алюмосиликатного клея) и компонентом в производстве бетонов (при применении жидкого натриевого стекла).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишелова Т.И., Самусева М.Н. Применение золы-уноса ТЭЦ ОАО «Иркутскэнерго» для химической мелиорации кислых почв // *Успехи современного естествознания*. – 2004. – № 12. – С. 85–86.
2. Талашов Д.Н. Оценка возможности использования золы уноса в качестве химического мелиоранта на кислых дерново-подзолистых почвах Северо-Западного региона // *Инновации в науке и образовании-2010: Труды VIII Международн. научн. конф., посвященной 80-летию образования университета*. – Калининград, 19–21 октября 2010. – Калининград: Калинингра. гос. технич. ун-т, 2010. – Ч. 1. – С. 171–172.
3. Айтчанова К.М., Сарсенова А.А. Эффективность применения мелиоративных препаратов, золы уноса и технического углерода на обыкновенном черноземе лесостепной зоны Западной Сибири // *Омский научный вестник*. – 2015. – № 1 (138). – С. 134–135.
4. Хохлов А.И., Факова Е.Ф., Чудинов С.А. Технология утилизации золы уноса ГРЭС в дорожном строительстве // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых учёных: Сборник материалов III Международн. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных*. – Омск, 7–8 февраля 2019. – Омск: Сибирск. гос. автомобильно-дорожный ун-т, 2019. – С. 241–244.
5. Маданбеков Н.Ж., Осмонова Б.Ж. Повышение эффективности использования дорожного асфальтобетона путем применения золы-уноса в качестве минерального порошка // *Инновационная наука*. – 2015. – № 12-2. – С. 121–126.
6. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilization: a review / Z. Zimar, D. Robert, A. Zhou, F. Giustozzi, S. Setunge, J. Kodikara // *Journal of Environmental management*. – 2022. – Vol. 312. – P. 114926.
7. Sathiparana N., Jaasimb.H.M., Banujan B. Sustainable production of cement masonry blocks with the combined use of fly ash and quarry waste // *Materialia*. – 2022. – Vol. 26. – P. 101621.
8. Utilization of fly ash in concrete: a state-of-the-art review / S. Varadharajan, S.V. Kirthanashri, N. Maurya, P. Bishetti, B.K. Shukla, G. Bharti // *Proceedings of Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference (IGGEC)*. – Jalandhar, India, 2021. – Vol. 2. – P. 189–194.
9. Recycling of used foundry sand and fly ash in concrete as a partial replacement for conventional ingredients / R. Sabale, U. Karande, A. Kolhe, A. Kulkarni, A. Tapase // *Proceedings of Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference (IGGEC)*. – Jalandhar, India, 2021. – Vol. 2. – P. 169–181.
10. Gopalakrishna B., Dinakar P. Mix design development of fly ash-GGBS based recycled aggregate geopolymer concrete // *Journal of Building Engineering*. – 2023. – Vol. 63. – P. 105551.
11. Biswal U.S., Dinakar P. A mix design procedure for fly ash and ground granulated blast furnace slag based treated recycled aggregate concrete // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2021. – Vol. 5. – P. 100314.
12. Rathinam K., Kanagarajan V. Behaviour of fly ash and GGBS based monoblock prestressed geopolymer concrete composite sleepers // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 65. – P. 3321–3327.
13. Фомина И.В., Капустин Ф.Л. Эффективный заполнитель для конструкционных бетонов на основе золы-уноса // *Научный журнал «Апробация»*. – 2013. – № 3 (6). – С. 56–60.
14. Безобжиговый зольный гравий как крупный заполнитель бетонов / К.Ю. Усанова, Ю.Г. Барабанщиков, С.А. Костыря, Ю.П. Федоренко // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2018. – № 9 (72). – С. 31–45.
15. Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // *Вестник МГСУ*. – 2017. – Т. 12. – № 12 (111). – С. 1385–1391.
16. Damodhara Reddy B., Mohan Babu M., Aruna Jyothy S. Strength and durability of concrete by partial replacement of cement by fly ash and fine aggregates by granite dust // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – Vol. 79. – P. 1–6.
17. Borowski G., Ozga M. Comparison of the processing conditions and the properties of granules made from fly ash of lignite and coal // *Waste Management*. – 2020. – Vol. 104. – P. 192–197.
18. Перспективы использования золы уноса тепловых электростанций Кузбасса / Е.Ю. Темникова, А.Р. Богомолов, Н.В. Тиунова, А.А. Лапин // *Вестник КузГТУ*. – 2017. – № 1 (118). – С. 90–97.
19. Капустин Ф.Л., Фомина И.В. Получение легкого заполнителя на основе золы-уноса Рефтинской ГРЭС для конструкционных бетонов // *Экология и промышленность России*. – 2014. – № 8. – С. 32–34.
20. Золотухина А.А., Лазарева Т.Л. Пористый заполнитель для легких бетонов с использованием золы-уноса ТЭС // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. – 2011. – Т. 2. – С. 229–233.
21. Жугинисов М.Т., Сабыралы Д.С. Легкий заполнитель с применением техногенного сырья // *Наука и инновационные технологии*. – 2016. – № 1 (1). – С. 119–123.
22. Temnikova E.Yu., Lapin A.A., Bogomolov A.R. The optimal composition of reagents for producing aluminosilicate glue based on fly ash of thermal power plants // *EPJ Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 196. – Actual Problems of Thermal Physics and Physical Hydrodynamics: XV All-Russian School-Conference of Young Scientists with International Participation. – Novosibirsk, Russia, November 20–23, 2018. – P. 00014.1–00014.5.

23. Получение алюмосиликатного жидкого стекла из золы уноса ТЭС / А.Р. Богомолов, Е.Ю. Темникова, В.Д. Петраков, А.В. Тыра // В сборнике: 21 век: фундаментальная наука и технологии: Материалы XXX международной научно-практической конференции. – Бангалор, Карнатака, Индия, 2022. – С. 92–96.

### Информация об авторах

**Наталья Игоревна Горячева**, студент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; goriachevaNI@yandex.ru

**Алексей Викторович Полтавец**, старший преподаватель кафедры теплоэнергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; aleksey.poltavets@gmail.com

**Александр Романович Богомолов**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплоэнергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; barom@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4746-0106>

**Темникова Елена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; teu.pmahp@kuzstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5890-6281>

Поступила в редакцию: 31.01.2024

Поступила после рецензирования: 27.03.2024

Принята к публикации: 28.10.2024

### REFERENCES

1. Shishelova T.I., Samuseva M.N. The use of fly ash from the Thermal power Plant of JSC Irkutskenergo for chemical reclamation of acidic soils. *Successes of modern natural science*, 2004, no 12, pp. 85–86. (In Russ.)
2. Talashov D.N. Evaluation of the possibility of using fly ash as a chemical meliorant on acidic sod-podzolic soils of the North-Western region. *Innovations in science and education – 2010. Proceedings of the VIII International Scientific Conference dedicated to the 80th anniversary of the University*. Kaliningrad, October 19–21, 2010. P. 1. Kaliningrad, Kaliningrad State Technical University Publ., 2010. pp. 171–172. (In Russ.)
3. Ajtchanova K.M., Sarsenova A.A. The effectiveness of the use of reclamation preparations, fly ash and carbon black on ordinary chernozem of the forest-steppe zone of Western Siberia. *Omsk Scientific Bulletin*, 2015, no. 1 (138), pp. 134–135. (In Russ.)
4. Khokhlov A.I., Fakova E.F., Chudinov S.A. Technology of utilization of fly ash of GRES in road construction. *Fundamental and applied research of young scientists. Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists*. Omsk, 7–8 February 2019. Omsk, Siberian State Automobile and Road Engineering University Publ., 2019. pp. 241–244. (In Russ.)
5. Madanbekov N.Zh., Osmonova B.Zh. Improving the efficiency of using road asphalt concrete by using fly ash as a mineral powder. *Innovative science*, 2015, no. 12-2, pp. 121–126. (In Russ.)
6. Zimar Z., Robert D., Zhou A., Giustozzi F., Setunge S., Kodikara J. Application of coal fly ash in pavement subgrade stabilization: a review. *Journal of Environmental management*, 2022, vol. 312, pp. 114926.
7. Sathiparana N., Jaasimb J.H.M., Banujan B. Sustainable production of cement masonry blocks with the combined use of fly ash and quarry waste. *Materialia*, 2022, vol. 26, pp. 101621.
8. Varadharajan S., Kirthanashri S.V., Maurya N., Bishetti P., Shukla B.K., Bharti G. Utilization of fly ash in concrete: a state-of-the-art review. *Proceedings of Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference (IGGEC)*. Jalandhar, India, 2021. Vol. 2, pp. 189–194.
9. Sabale R., Karande U., Kolhe A., Kulkarni A., Tapase A. Recycling of used foundry sand and fly ash in concrete as a partial replacement for conventional ingredients. *Proceedings of Indian Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Conference (IGGEC)*. Jalandhar, India, 2021. Vol. 2, pp. 169–181.
10. Gopalakrishna B., Dinakar P. Mix design development of fly ash-GGBS based recycled aggregate geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 63, pp. 105551.
11. Biswal U.S., Dinakar P. A mix design procedure for fly ash and ground granulated blast furnace slag based treated recycled aggregate concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 2021, vol. 5, pp. 100314.
12. Rathinam K., Kanagarajan V. Behaviour of fly ash and GGBS based monoblock prestressed geopolymer concrete composite sleepers. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 65, pp. 3321–3327.
13. Fomina I.V., Kapustin F.L. Effective filler for structural concrete based on ash-entrainment. *Scientific journal "Approbation"*, 2013, no. 3 (6), pp. 56–60. (In Russ.)
14. Usanova K.Yu., Barabanshchikov Yu.G., Kostyrya S.A., Fedorenko Yu.P. Unfired ash gravel as a large aggregate of concrete. *Construction of unique buildings and structures*, 2018, no. 9 (72), pp. 31–45. (In Russ.)
15. Bazhenov Yu.M., Voronin V.V., Alimov L.A. High-quality self-compacting concretes with the use of coal burning waste. *Vestnik MGSU*, 2017, vol. 12, no. 12 (111), pp. 1385–1391. (In Russ.)
16. Damodhara Reddy B., Mohan Babu M., Aruna Jyothy S. Strength and durability of concrete by partial replacement of cement by fly ash and fine aggregates by granite dust. *Materials Today: Proceedings*, 2023, vol. 79, pp. 1–6.
17. Borowski G., Ozga M. Comparison of the processing conditions and the properties of granules made from fly ash of lignite and coal. *Waste Management*, 2020, vol. 104, pp. 192–197.

18. Temnikova E.Yu., Bogomolov A.R., Tiunova N.V., Lapin A.A. Prospects for the use of fly ash from Kuzbass thermal power plants. *Bulletin of KuzSTU*, 2017, no. 1 (118), pp. 90–97. (In Russ.)
19. Kapustin F.L., Fomina I.V. Derivation of lightweight aggregate on the base of fly ash from Reftinskaya GRES. *Ecology and Industry of Russia*, 2014, no. 8, pp. 32–34. (In Russ.)
20. Zolotuhina A.A., Lazareva T.L. Porous aggregate for light concrete using fly ash of thermal power plants. *Scientific, technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century*, 2011, vol. 2, pp. 229–233. (In Russ.)
21. Zhuginisov M.T., Sabyraly D.S. Light filler with the use of technogenic raw materials. *Science and innovative technologies*, 2016, no. 1 (1), pp. 119–123. (In Russ.)
22. Temnikova E.Yu., Lapin A.A., Bogomolov A.R. The optimal composition of reagents for producing aluminosilicate glue based on fly ash of thermal power plants. *EPJ Web of Conferences*, 2019, vol. 196. *XV All-Russian School-Conference of Young Scientists with International Participation. Actual Problems of Thermal Physics and Physical Hydrodynamics*, 2019, pp. 00014.1–00014.5.
23. Bogomolov A.R., Temnikova E.Yu., Petrakov V.D., Tyra A.V. Obtaining aluminosilicate liquid glass from fly ash of thermal power plants. *21st century: fundamental science and technology. Materials of the XXX international scientific and practical conference*. Bengaluru, Karnataka, India, 2022. pp. 92–96. (In Russ.)

#### **Information about the author**

**Natalya I. Goryacheva**, Student, T.F. Gorbachev Kusbass State Technical University, 28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; goriachevaNI@yandex.ru

**Alexey V. Poltavets**, Senior Lecturer, T.F. Gorbachev Kusbass State Technical University, 28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; aleksey.poltavets@gmail.com

**Alexander R. Bogomolov**, Dr. Sc., Head of Department, T.F. Gorbachev Kusbass State Technical University, 28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; barom@kuzstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4746-0106>

**Elena Yu. Temnikova**, Cand. Sc., Associate Professor, T.F. Gorbachev Kusbass State Technical University, 28, Vesennaya street, Kemerovo, 650000, Russian Federation; teu.pmahp@kuzstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5890-6281>

Received: 31.01.2024

Revised: 27.03.2024

Accepted: 28.10.2024