

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691

DOI: 10.52957/27821919\_2022\_4\_48

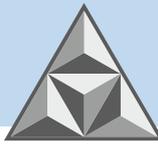
# Оценка неоднородности зернового состава золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4

**А.А. Лунёв**

Александр Александрович Лунёв

Центр компетенций в сфере использования вторичных материальных ресурсов в строительной отрасли, Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск, Российская Федерация

*lunev.al.al@gmail.com*



*Во многих регионах Российской Федерации существует дефицит природных грунтов требуемого качества. Обостряется и другая проблема, характерная для мегаполисов: сотни гектаров в пригородных зонах заняты отвалами отходов промышленности, большую часть из которых составляют золошлаковые смеси угольных теплоэлектростанций.*

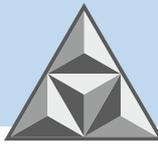
*Фракционирование золошлаковой смеси при намыве в отвалах приводит к неоднородности зернового состава, учет которой необходим при разработке техногенного грунта. Для изучения неоднородности в секции № 2 золоотвала ТЭЦ-4 г. города Омска проведено бурение 14 вертикальных скважин с отбором проб нарушенной структуры с глубин 0.5, 4.5, 8.5 м и 12.5 м. Пробы золошлаковых материалов исследованы в лабораторных условиях для оценки их состава ситовым и ареометрическим методами. Установлено, что изменение крупности частиц этого техногенного грунта в значительной мере обычно носит случайный характер. Выявлена статистически значимая закономерность, позволяющая прогнозировать гранулометрический состав золошлаковых смесей в золоотвале.*

**Ключевые слова:** тепловые электростанции, золошлаковые отходы и смеси, техногенные грунты, зерновой состав

**Для цитирования:**

**Лунёв А.А.** Оценка неоднородности зернового состава золошлаковой смеси на золоотвале Омской ТЭЦ-4 // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 4. С. 48-61. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4\\_2022](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022).

**DOI:** 10.52957/27821919\_2022\_4\_48



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/27821919\_2022\_4\_48

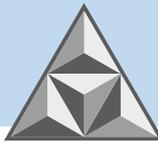
# Assessment of the Grain Composition Heterogeneity of the Ash Dump Pond of Omsk TPP-4

**A.A. Lunev**

Alexander A. Lunev

Competence Center for the Use of Secondary Material Resources in the Construction Industry, Siberian  
State Automobile and Road University, Omsk, Russia

*lunev.al.al@gmail.com*



*Nowadays, there is a shortage of natural soils of the required quality in many regions of the Russian Federation. Another issue is typical one for the megacities: hundreds of hectares in suburban areas covered by industrial waste dumps, most of which are ash and slag mixtures of coal thermal power plants.*

*The fractionation of the ash and slag mixture during washing in dumps leads to heterogeneity of the grain composition, accounting for which is necessary during the development of man-made soil. To study the heterogeneity in the Section No. 2 of the ash dump TPP-4 in Omsk, we drilled 14 vertical wells and took the samples with disturbed structure from depths of 0.5, 4.5, 8.5 m and 12.5 m. Then, we made the laboratory study of ash and slag materials samples to assess their composition by sieve and areometric methods. According to the study, we define random changing of the man-made soil particle size. Also, the study allows us to identify a statistically significant pattern that can predict the distribution of ash grain size and slag mixtures in the ash dump.*

**Key words:** thermal power plants, ash and slag waste and mixtures, man-made soils, grain composition

**For citation:**

**Lunev, A.A. (2022)** Assessment of the Grain Composition Heterogeneity of the Ash Dump Pond of Omsk TPP-4, *Smart Composite in Construction*, 3(4), pp. 48-61 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4\\_2022](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022) (in Russian).

**DOI:** 10.52957/27821919\_2022\_4\_48



## ВВЕДЕНИЕ

Свыше 65% тепловой и электрической энергии в России построенные тепловые электростанции вырабатывают за счёт сжигания углей [1]. На ближайшие десятки лет альтернативы этому виду топлива нет, особенно в связи с введением в странах Евросоюза углеродного сбора и антироссийских санкций, в результате чего существенно снизится экспорт угля. Сжигание углей является одним из наиболее дешевых путей получения энергии, однако при этом образуются золошлаковые отходы (несгораемая часть, представляющая собой минеральную часть породы). Золошлаковые отходы (ЗШО) (зола-унос и топливный шлак) после смешения с водой транспортируются на золоотвалы в виде пульпы золошлаковой смеси, где осаждаются и хранятся во влажном состоянии.

Каждый отвал является потенциальным источником опасности. На золоотвалах нередки аварии, в результате которых прорыв дамбы становился причиной разрушения прилегающих зданий и сооружений. Подобное имело место в Теннесси [2, 3] (декабрь 2008 г.) и Северной Каролине [4] (февраль 2014 г.).

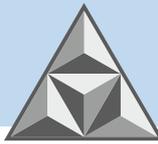
В Российской Федерации накоплено порядка 1.6 млрд. т этих материалов; при этом только на территории г. Омска складировано около 76 млн. т. Опасения вызывает динамика накопления ЗШО (по оценкам экспертов Интер РАО ЕЭС, к 2030 году количество ЗШО в Омске достигнет 91 млн. т). Следует также учитывать, что дамба высотой 20 м, ограждающая золоотвал ТЭЦ-4 в г. Омске, расположена в 50 м от р. Иртыш.

Хотя ЗШО начинают активно применяться при строительстве автомобильных дорог [5, 6], в производстве бетонных изделий [7] и изготовлении металлургической продукции [8], существующий принцип их захоронения влияет на свойства, которые в значительной мере определяют качество золошлаковых смесей (ЗШС), получаемых при разработке отвала [6]. ЗШС являются разновидностью техногенных грунтов [9, 10]; хотя форма частиц отличает их от природных грунтов [11], они, как правило, являются разновидностью мелких или пылеватых песков.

Исследования, проведенные Han-Lin Wang [12] при изучении прямого среза песчаных грунтов по поверхности ребристой пластины, указывают на существенное снижение их прочности при увеличении коэффициента однородности (является функцией зернового состава). В работе группы R. Wen и др. [13] аналогичный эффект снижения прочности зафиксирован при снижении крупности крупнообломочного грунта, что подтверждается данными E. Getahun с соавторами [14]. Влияние крупности частиц песчаного грунта и их однородности на физические свойства также отмечено в работах S.P. Kumara и др. [15] и Q. Zhai и др. [16]. Работы [16-18] доказали прямое влияние зернового состава на давление всасывания воды в грунт при разной влажности (SWCCs).

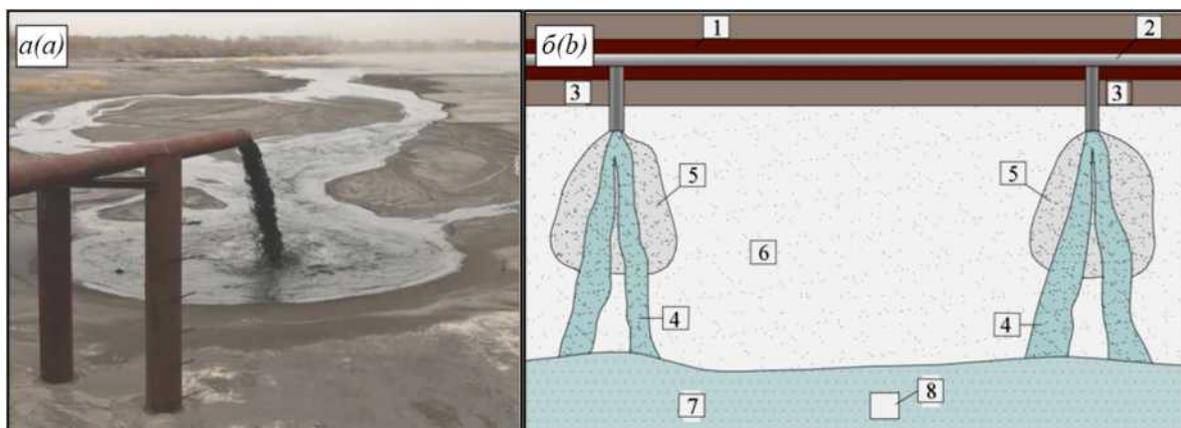
В работе S. Wang и др. [19] также приведены данные, что механические характеристики дисперсных грунтов существенно зависят от зернового состава, причем влияние глинистых частиц имеет ключевое значение. Однако в [19] указано, что существенную роль играет ненарушенная структура грунта, поэтому делать выводы о свойствах грунтов нарушенной в ходе разработки структуры по результатам испытаний монолитов нецелесообразно.

Влияние неоднородности зернового состава на свойства применительно к ЗШС рассмотрено в исследованиях Tiwary [20], Kumar [21], Kim [21], Muhunthan [22], Gimhan [23] для инертных ЗШС в США (четыре ТЭС в штатах Вашингтон и Индиана), Индии (три – в штатах Уттар-Прадеш, Раджастан) и Шри-Ланке (одна ТЭС). Схожий подход использован в работе Е.В. Иванова [6], в которой изучалось изменение механических характеристик



мелкозернистой ЗШС из отвалов ТЭЦ-5 г. Омска и ГРЭС-2 г. Томска, а также среднезернистой ЗШС из отвала Беловской ГРЭС. Влияние плотности и влажности на характеристики прочности и деформируемости золошлаковых материалов рассмотрено в работах В. Indraratna и др. [24], Singh and Panda [25], N.S. Pandian [26], S.K. Pal и А. Ghosh [27], Jakka и др. [28], Mohanty [29], Gruchot [30].

Гранулометрический состав ЗШС зависит от множества факторов: конструкции котлоагрегатов, режимов их эксплуатации, системы пылеприготовления и подачи топлива, дальности транспортировки пульпы, типа золоотвала и системы гидронамыва. При перемещении ЗШС в отвал средствами гидрозолошлакоудаления в виде гомогенной смеси более крупные и тяжёлые частицы оседают ближе к выпускам пульпы, а мелкие и легкие дальше от выпусков, что и обуславливает основную неоднородность свойств золошлаков в отвале (рис. 1).



**Рис. 1.** Поступление пульпы в золоотвал (а) и схема намыва золошлака в отвале (б): 1 – дамба; 2 – пульпопровод; 3 – выпуски пульпы; 4 – русловые потоки; 5 – золошлаковая зона; 6 – зольная зона надводного намыва; 7 – осветительный пруд и зольная зона подводного намыва; 8 – водосборный колодец

**Fig. 1.** Pulp entering into the ash dump (a) and the scheme of ash slag alluvium in the dump (b): 1 – damp; 2 – pulp pipeline; 3 – pulp releases; 4 – channel flows; 5 – ash zone; 6 – ash zone of surface alluvium; 7 – lighting pond and ash zone of underwater alluvium; 8 – drainage well

Действующие выпуски пульпы регулярно изменяются, пульпопроводы перемещают в процессе заполнения отвала ЗШО, а залегание частиц по глубине определяется качеством топлива, поступающего на станцию в течение жизненного цикла золоотвала, зависит от способов измельчения и сжигания угля. Это приводит к образованию массива с малопрогнозируемым зерновым составом и требует проведения его оценки по площади и глубине золоотвалов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Отбор проб

Буровые работы выполняли в секции № 2 отвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11» полевыми бригадами с помощью буровых установок УРБ-2ДЗ на базе ЗИЛ-131. Способ бурения скважин выбран исходя из СП 11-105-97 (часть I, приложение Г) – шнековое, с применением спецтехники; диаметр 151 мм.

Осуществляли по схеме (рис. 2) отбор в герметичные мешки проб золошлаковой смеси (56 образцов) нарушенной структуры с сохранением природной влажности из 14 скважин вертикального бурения.



Рис. 2. Схема отбора проб на секции № 2 отвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11»

Fig. 1. Sampling scheme for the section No. 2 of the ash dump SHPP-4 JSC "TGC-11"

Отбор производили с глубин 0,5, 4,5, 8,5 и 12,5 м в каждой скважине из секции № 2 золоотвала СП «ТЭЦ-4». Для обеспечения надежной транспортировки и идентификации проб использовали уникальные пломбы для опечатывания.

#### *Проведение исследований зернового состава*

Выделение частиц крупностью от 0,5 до 10,0 мм осуществляли ситовым методом без промывки водой. Содержание частиц размером менее 0,5 мм определяли ареометрическим методом путем измерения плотности суспензии ареометром по ГОСТ 12536-2014.

Среднюю пробу для анализа отбирали методом квартования по ГОСТ 8735-88. Массу средней пробы принимали равной 50-100 г. Пробу высушивали до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре 105 °С. Границы текучести и раскатывания, необходимые для классификации грунтов, определяли по ГОСТ 5180-2015.

#### *Анализ результатов определения зернового состава*

На основании результатов определения зернового состава рассчитывали коэффициент кривизны (Coefficient of curvature)  $C_c$ , степень фракционированности (Uniformity coefficient)  $C_u$  и модуля крупности  $M_k$ . Также проведен анализ зернового состава на предмет наличия закономерностей в массиве ЗШС по плану и глубине с использованием комплексов MATLAB и MSExcel. ЗШС классифицировали по зерновому составу согласно ГОСТ 25100-2020 и ASTM D 2487.

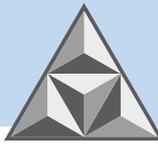
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам исследования проб ЗШС, зерновой состав проб в виде кумулятивных кривых (рис. 3) варьируется в широких пределах и имеет максимальную неоднородность по количеству частиц размером 0,05-0,10 мм.

Результаты определения коэффициента кривизны ( $C_c$ ), степени фракционированности ( $C_u$ ) и модуля крупности ( $M_k$ ) с дифференциацией по точкам отбора (номер – согласно схеме на рис. 2) и глубине ( $h$ ) приведены в табл. 1.

Согласно ГОСТ 25100-2020 53, пробы ЗШС отнесены к пылеватым пескам и лишь одна из них – к мелким пескам. По Unified Soil Classification System, большинство образцов (38) представляют собой пылеватый грунт (lean silt (ML)), 17 – отнесено к пылеватым пескам (silty sand (SM)) и один образец – к пескам с примесью пыли неоптимального состава (poorly graded sand with silt (SP-SM)).

Наибольшее влияние на свойства ЗШС оказывают частицы крупнее 0,1 мм [31, 32].



Поэтому анализ, в первую очередь, затрагивает особенности формирования массива ЗШС с учетом содержания в нем шлаковых частиц крупнее 0,1 мм.

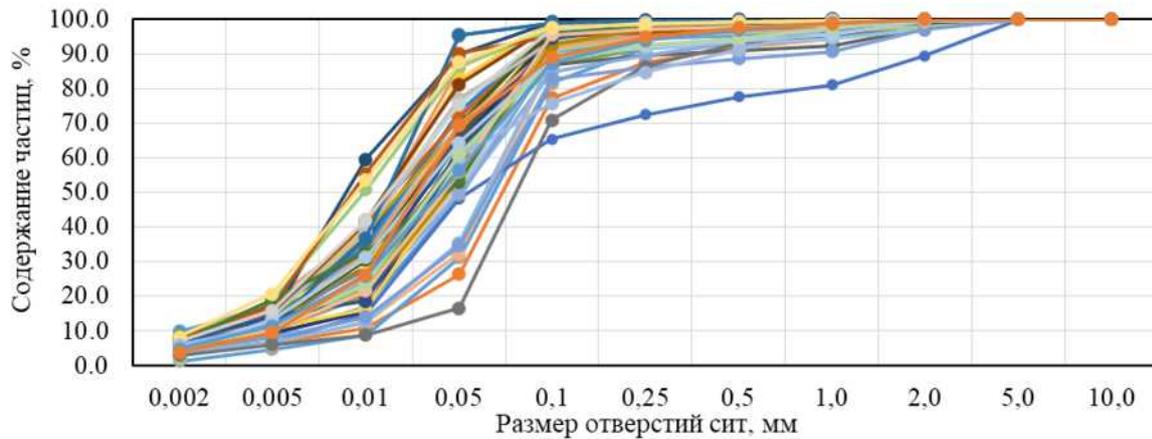


Рис. 3. Кумулятивные кривые зернового состава ЗШС

Fig. 3. Cumulative curves of the grain composition of ash and slag mixtures

**Таблица 1.** Результаты определения коэффициента кривизны ( $C_c$ ), степени фракционированности ( $C_u$ ) и модуля крупности ( $M_k$ ) проб золошлаковых смесей

**Table 1.** Results of the determination of the coefficient of curvature ( $C_c$ ), the uniformity coefficient ( $C_u$ ) and the size modulus ( $M_k$ ) of samples of ash and slag mixtures

№	$h$ , м	$M_k$	$C_u$	$C_c$	№	$h$ , м	$M_k$	$C_u$	$C_c$	№	$h$ , м	$M_k$	$C_u$	$C_c$
65222	0.5	6.5	3.8	1.5	65226	12.5	6.9	9.4	2.0	65231	8.5	6.9	9.4	2.0
65222	4.5	6.6	3.3	0.9	65227	0.5	6.7	12.5	3.8	65231	12.5	6.9	11.0	3.8
65222	8.5	6.8	6.5	1.9	65227	4.5	7.0	8.0	2.0	65232	0.5	6.5	6.0	1.5
65222	12.5	6.8	10.0	1.6	65227	8.5	7.0	2.4	0.7	65232	4.5	6.9	10.0	2.1
65223	0.5	5.9	4.5	0.7	65227	12.5	7.0	11.7	3.8	65232	8.5	7.0	10.0	1.8
65223	4.5	6.7	13.8	4.1	65228	0.5	6.7	2.6	0.7	65232	12.5	6.9	9.2	1.9
65223	8.5	7.0	27.1	1.2	65228	4.5	6.8	4.0	1.4	65233	0.5	6.5	2.8	1.5
65223	12.5	7.0	11.0	3.3	65228	8.5	6.9	13.0	3.8	65233	4.5	6.9	12.0	3.0
65224	0.5	6.6	11.3	2.8	65228	12.5	7.0	12.9	4.0	65233	8.5	6.9	14.3	7.0
65224	4.5	6.9	8.9	4.2	65229	0.5	6.7	14.0	3.5	65233	12.5	6.9	20.0	2.2
65224	8.5	6.9	9.0	3.4	65229	4.5	6.8	9.5	2.6	65234	0.5	6.7	11.3	3.5
65224	12.5	6.9	11.3	3.5	65229	8.5	7.0	5.6	2.7	65234	4.5	6.9	11.0	3.3
65225	0.5	6.9	0.9	0.3	65229	12.5	7.0	10.0	5.1	65234	8.5	7.0	10.0	1.8
65225	4.5	7.0	10.0	13.1	65230	0.5	6.9	15.0	3.0	65234	12.5	6.9	9.2	1.2
65225	8.5	6.9	10.0	2.8	65230	4.5	7.0	10.0	3.6	65235	0.5	6.5	2.5	0.9
65225	12.5	7.0	10.0	3.3	65230	8.5	6.9	9.0	4.7	65235	4.5	6.7	10.0	3.6
65226	0.5	6.9	10.0	3.6	65230	12.5	7.0	8.9	3.5	65235	8.5	6.8	12.0	3.0
65226	4.5	6.9	2.2	0.7	65231	0.5	6.8	4.0	1.3	65235	12.5	6.8	8.5	3.6
65226	8.5	6.9	10.0	3.2	65231	4.5	6.8	0.9	0.3	-	-	-	-	-

Примечание: данные о значениях границы текучести и раскатывания не приведены в связи с отсутствием у ЗШС пластичности, позволяющей раскатать грунт в жгут для определения соответствующих параметров.

В Рекомендациях по проектированию золошлакоотвалов, разработанных во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, для оценки зернового состава используется формула определения расстояния от бровки наружного откоса золоотвала до границы между золошлаковой и зольной зонами:

$$L_{\text{ЗШ}} = \left[ 0,1 \cdot \sum_{d=0,25 \text{ мм}}^{d_{\text{макс}}} \Phi_{di} \right] L, \quad (1)$$



где  $\sum_{d=0,25\text{ мм}}^d \Phi_{di}$  – сумма фракций крупнее 0.25 мм (может быть 0.315, 0.16, 0.10 мм) в составе исходного золошлакового материала, %;  $L$  – расстояние от бровки наружного откоса до водосборного колодца, м.

Эта формула позволяет прогнозировать размер зон намыва только с частицами крупнее 0.1 мм и не дает никаких данных о неоднородности по глубине и распределении частиц внутри зоны.

Позднее на основании исследований на золоотвалах ТЭС Иркутска, Омска, Кемерово, Белово, Томска, Новосибирска, Москвы и др. [6]. было установлено: независимо от типа шлаковых частиц и гранулометрического состава исходной ЗШС, общая пропорция шлака и золы-уноса подчиняется одному тренду.

Данные по результатам анализа проб, отобранных на поверхностях отвалов, показали, что распределения шлаковых частиц по длине намыва можно прогнозировать [33]:

$$\text{Ш} = \text{П}_{\text{Ш}} \cdot e^{-232 \frac{l}{L}}, \quad (2)$$

где Ш – содержание шлака в точке по длине намыва, в долях от единицы;  $\text{П}_{\text{Ш}}$  – содержание шлака в месте выпуска пульпы, в долях от единицы;  $e$  – число Эйлера;  $l$  – расстояние от выпуска пульпы до точки определения содержания шлака, м;  $L$  – расстояние от выпуска пульпы до водоприёмного колодца в отвале, м

Фракционирование ЗШС по площади (рис. 4) лишь частично подтверждает закономерность (2) отложения минеральных частиц при движении потока пульпы от точки сброса.

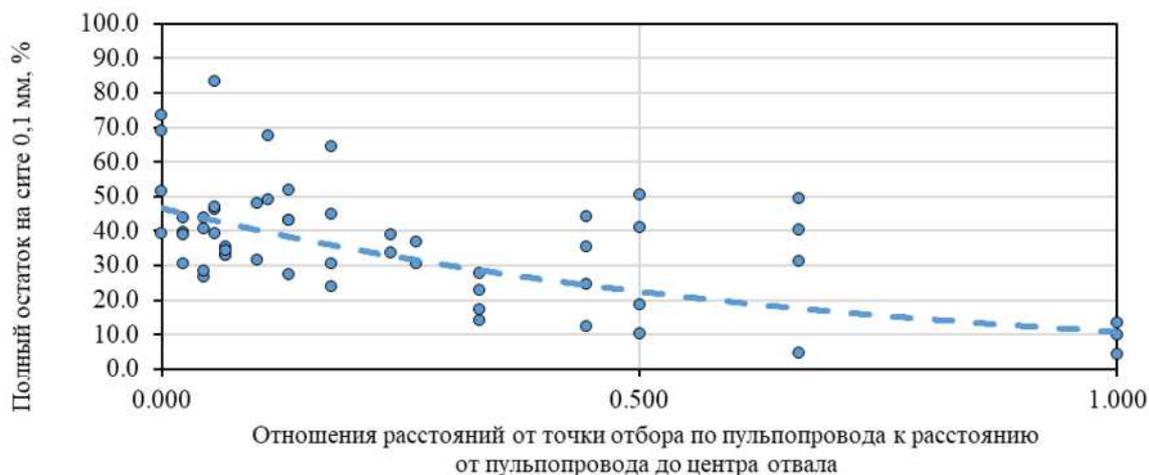


Рис. 4. Зависимость остатка на сите 0,1 мм от места отбора

Fig. 4. The dependence of the residue on the sieve 0.1 mm upon the sampling site

Это несоответствие обусловлено неровностями поверхности золоотвала и различиями в плотности частиц ЗШС, а также свидетельствует о неоднородности проб по глубине отвала.

Изменение дисперсности частиц ЗШС по глубине часто обусловлено наращиванием дамб обвалования, устройством специальных прослоек для предотвращения пыления и перемещением зон выпуска пульпы. Подобная слоистость, в частности, ранее наблюдалась в золоотвалах Берёзовской ГРЭС, Новосибирской ТЭЦ-3, Назаровской ГРЭС, сжигающих угли Канско-Ачинского угольного бассейна [6, 34]. Результаты анализа неоднородности зернового состава исследуемых нами проб (рис. 5) подтверждают, что имеется тренд, который говорит о снижении крупности частиц золошлака по глубине.

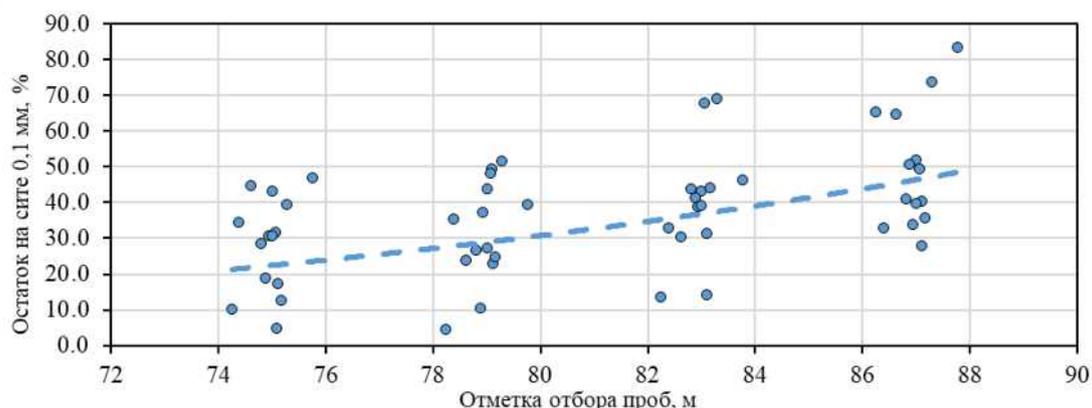


Рис. 5. Зависимость остатка на сите от глубины отбора

Fig. 5. Dependence of the residue on the sieve on the depth of sampling

Это можно объяснить постепенным переносом наиболее мелких зольных частиц с водой, фильтруемой вниз через золошлаковый массив, о чём, в частности, свидетельствует увеличение влажности ЗШС по глубине. Также очевидна бóльшая однородность зернового состава в рамках отдельных слоев, нежели в отвале в целом.

Регрессионно-корреляционный анализ показывает, что с некоторой долей достоверности ( $R^2 = 0.65$ ) можно предсказывать количество шлаковых частиц  $S$  (крупностью более 0.1 мм) в исследуемой секции отвала СП «ТЭЦ-4». Прогнозировать содержание частиц шлака в секции № 2 отвала СП ТЭЦ-4 АО «ТГК-11» с определенной достоверностью возможно с использованием полиномиальной функции:

$$S = -25,04 - 309,6 \cdot l + 0,8816 \cdot z + 35,84 \cdot l^2 + 3,131 \cdot l \cdot z, \quad (3)$$

где  $l$  – отношение расстояния от выпуска пульпопровода до точки отбора к расстоянию от пульпопровода до шахтного колодца;  $z$  – отметка отбора проб над уровнем моря в Балтийской системе координат, м.

Однако создание более общих зависимостей, позволяющих прогнозировать зерновой состав в золоотвале, а также установление влияния зернового состава на свойства ЗШС требует тщательного изучения физико-химических свойств и других ЗШС. Для них нужно определять распределение частиц экспериментально либо создавать новые математические модели на основе зависимости (2).

## ВЫВОДЫ

1) Золошлаковые смеси Омской ТЭЦ-4 относятся к пылеватым пескам и обладают высоким содержанием пылеватых частиц. Крупность частиц таких смесей с глубиной массива уменьшается, что объясняется переносом мелких фракций с фильтрующей через массив водой.

2) Отмечается изменение крупности частиц по длине намыва в золоотвале, однако данная закономерность характерна в большей степени для поверхности зоны намыва. Это связывается с неравномерными отметками поверхности золоотвала и постоянным перемещением выпусков из пульпопроводов.

3) Прогнозирование зернового состава в массиве с использованием математических методов, основанных на эмпирических данных, не позволяет с высокой точностью оценить крупность золошлаковых смесей. Требуется проведение аналогичных исследований на других объектах для установления влияния зернового состава техногенного грунта на его физико-механические свойства и свойства смесей.

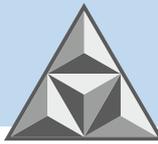


## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены совместно с акционерным обществом «Территориальная генерирующая компания № 11» (АО «ТГК-11») в рамках изучения свойств накопленных объемов золошлаковых материалов в отвалах СП «ТЭЦ-4» и СП «ТЭЦ-5» г. Омска.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ показателей балансов электрической энергии и мощности ЭЭС России за IV квартал 2018 года. URL: [http://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups\\_balance\\_analysis\\_2018q4\\_1.pdf](http://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups_balance_analysis_2018q4_1.pdf) (accessed: 12.07.2020).
2. **Bartov G. et al.** Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash Spill. 1. Source apportionment using mercury stable isotopes // *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47, № 4. P. 2092–2099. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303111p>.
3. **Deonarine A. et al.** Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash spill. 2. Effect of coal ash on methylmercury in historically contaminated river sediments // *Environ. Sci. Technol.* 2013. Vol. 47, № 4. P. 2100–2108. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303639d>.
4. **Demir I., Hughes R.E., DeMaris P.J.** Formation and use of coal combustion residues from three types of power plants burning Illinois coals // *Fuel.* 2001. Vol. 80, № 11. P. 1659–1673. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00028-X).
5. **Martin J.P. et al.** Properties and Use of Fly Ashes for Embankments // *J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers.* 1990. Vol. 116, № 2. P. 71–86.
6. **Иванов Е.В.** Обоснование применения золошлаковых смесей для строительства земляного полотна с учетом особенностей водно-теплого режима. Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2014. 165 с.
7. **Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G.** Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction // *Procedia Eng.* 2016. Vol. 150. P. 1558–1562. DOI: [10.1016/j.proeng.2016.07.111](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111).
8. **Valeev D. et al.** Magnetite and carbon extraction from coal fly ash using magnetic separation and flotation methods // *Minerals.* 2019. Vol. 9, № 5. P. 320. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9050320>.
9. **Prashanth V., Madhavi L.G.** Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology // *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.* 2015. Vol. 1. P. 6. DOI: [10.1007/s40891-014-0008-9](https://doi.org/10.1007/s40891-014-0008-9).
10. **Liu X., Qu S., Huang J.** Relationship between physical properties and particle-size distribution of geomaterials // *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 222. P. 312–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.127>.
11. **Zhang X., Baudet B.A., Yao T.** The influence of particle shape and mineralogy on the particle strength, breakage and compressibility // *Int. J. Geo-Engineering.* 2020. Vol. 11, № 1. DOI: [10.1186/s40703-020-0108-4](https://doi.org/10.1186/s40703-020-0108-4).
12. **Wang H.-L. et al.** Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface // *J. Mater. Civ. Eng.* 2019. Vol. 31, № 10. P. 04019238. DOI: [10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002880](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002880).
13. **Wen R. et al.** Grain Size Effect on the Mechanical Behavior of Cohesionless Coarse-Grained Soils with the Discrete Element Method // *Adv. Civ. Eng.* 2018. Vol. 2018. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4608930>.
14. **Getahun E. et al.** Characteristics of grain size distribution and the shear strength analysis of Chenjiaba long runout coseismic landslide // *J. Mt. Sci.* 2019. Vol. 16, № 9. P. 2110–2125.
15. **Gallage C.P.K., Uchimura T.** Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils // *Soils Found.* 2010. Vol. 50, № 1. P. 161–172.
16. **Zhai Q. et al.** Estimation of the soil-water characteristic curve from the grain size distribution of coarse-grained soils // *Eng. Geol.* 2020. Vol. 267, № 12. P. 105502. DOI: [10.1016/j.enggeo.2020.105502](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105502).
17. **Fredlund M.D., Fredlund D.G., Wilson G.W.** An equation to represent grain-size distribution // *Can.*



- Geotech. J.* 2000. Vol. 37, № 4. P. 817–827. DOI: <https://doi.org/10.1139/t00-015>.
18. **Fredlund M.D., Wilson G.W., Fredlund D.G.** Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve // *Can. Geotech. J.* 2002. Vol. 39, № 5. P. 1103–1117. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-049>.
  19. **Wang S.Y., Lu X.B., Shi Z.M.** Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands // *Yantu Lixue/Rock Soil Mech.* 2005. Vol. 26, № 7. P. 1029–1032. DOI: 10.2174/1874835X01003010082.
  20. **Tiwari S.K., Ghiya A.** Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations // *Electron. J. Geotech. Eng.* 2013. Vol. 18. P. 3085–3106.
  21. **Kim B., Prezzi M., Salgado R.** Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments // *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.* 2005. Vol. 131, № 7. P. 914–924. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)).
  22. **Muhunthan B., Taha R., Said J.** Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2004. Vol. 54, № 8. P. 985–991. DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470959>.
  23. **Gimhan P.G.S., Disanayaka J.P.B., Nasvi M.C.M.** Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material // *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka.* 2018. Vol. 51, № 1. P. 49. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>.
  24. **Indraratna B. et al.** Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill // *Can. Geotech. J.* 2011. Vol. 28, № 4. P. 542–555. DOI:10.1139/T91-070.
  25. **Singh R.S., Panda A.P.** Utilization of fly ash in geotechnical construction // *Proc. Indian Geotechnical Conf.* 1996. Vol. 1. P. 547–550.
  26. **Pandian N.S.P.** Fly ash characterization with reference to geotechnical applications // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2005. P. 189–216.
  27. **Pal S., Ghosh A.** Shear strength behaviour of indian fly ashes // *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*. 2009. P. 763–778.
  28. **Jakka R.S., Ramana G. V., Datta M.** Shear behaviour of loose and compacted pond ash // *Geotech. Geol. Eng.* 2010. Vol. 28, № 6. P. 763–778. DOI: 10.1007/s10706-010-9337-1.
  29. **Mohanty S., Patra N.R.** Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India // *Int. J. Geo-Engineering.* 2015. Vol. 6, № 1. P. 1–18. DOI: 10.1186/s40703-015-0013-4.
  30. **Gruchot A., Zydroń T.** Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash // *J. Ecol. Eng.* 2016. Vol. 17, № 4. P. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/63955>.
  31. **Trivedi A., Sud V.K.** Grain characteristics and engineering properties of coal ash // *Granul. Matter.* 2002. Vol. 4, № 3. P. 93–101.
  32. **Kumar D., Kumar N., Gupta A.** Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions // *Int. J. Sci. Res.* 2014. Vol. 3, № 9. P. 1487–1494.
  33. **Lunev A.A., Sirotyuk V.V.** Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash // *Soil Mech. Found. Eng.* 2021. Vol. 58, № 4. P. 314–319.
  34. **Огородникова Е.Н., Николаева С.К.** Литогенетические особенности техногенных отложений золошлакоотвалов // *Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода.* 2005. № 66. С. 65–74.

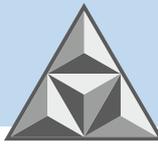
Поступила в редакцию 12.10.2022

Одобрена после рецензирования 02.11.2022

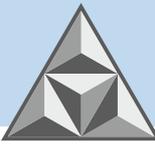
Принята к опубликованию 17.11.2022

## REFERENCES

1. Analysis of indicators of electric energy and power balances of the UES of Russia for the IV quarter of 2018. [online]. Available at: [http://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups\\_balance\\_analysis\\_2018q4\\_1.pdf](http://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2018/ups_balance_analysis_2018q4_1.pdf) (accessed: 12.07.2020) (in Russian).
2. **Bartov, G. et al.** (2013) Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash



- Spill. 1. Source apportionment using mercury stable isotopes, *Environ. Sci. Technol.*, 47(4), pp. 2092–2099. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303111p>.
3. **Deonarine, A. et al.** (2013) Environmental impacts of the Tennessee Valley Authority Kingston coal ash spill. 2. Effect of coal ash on methylmercury in historically contaminated river sediments, *Environ. Sci. Technol.*, 47(4), pp. 2100–2108. DOI: <https://doi.org/10.1021/es303639d>.
  4. **Demir, I., Hughes, R.E. & DeMaris, P.J.** (2001) Formation and use of coal combustion residues from three types of power plants burning Illinois coals, *Fuel*, 80(11), pp. 1659–1673. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00028-X).
  5. **Martin, J.P. et al.** (1990) Properties and Use of Fly Ashes for Embankments, *J. Energy Eng. American Society of Civil Engineers*, 116(2), pp. 71–86.
  6. **Ivanov, E.V.** (2014) The rationale for the use of pond ash for the construction of the subgrade, taking into account the peculiarities of the water-thermal regime. Omsk: The Siberian State Automobile and Highway University (in Russian).
  7. **Hadbaatar, A., Mashkin, N.A. & Stenina, N.G.** (2016) Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction, *Procedia Eng.*, 150, pp. 1558–1562. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.111.
  8. **Valeev, D. et al.** (2019) Magnetite and carbon extraction from coal fly ash using magnetic separation and flotation methods, *Minerals*, 9(5), pp. 320. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9050320>.
  9. **Prashanth, V. & Madhavi, L.G.** (2015) Influence of Particle Size on the Friction and Interfacial Shear Strength of Sands of Similar Morphology, *Int. J. Geosynth. Gr. Eng.*, 1, p. 6. DOI: 10.1007/s40891-014-0008-9.
  10. **Liu, X., Qu, S. & Huang, J.** (2019) Relationship between physical properties and particle-size distribution of geomaterials, *Constr. Build. Mater.*, 222, pp. 312–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.127>.
  11. **Zhang, X., Baudet, B.A. & Yao, T.** (2020) The influence of particle shape and mineralogy on the particle strength, breakage and compressibility, *Int. J. Geo-Engineering*, 11(1). DOI: 10.1186/s40703-020-0108-4.
  12. **Wang, H.-L. et al.** (2019) Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface, *J. Mater. Civ. Eng.*, 31(10), pp. 04019238. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002880.
  13. **Wen, R. et al.** (2018) Grain Size Effect on the Mechanical Behavior of Cohesionless Coarse-Grained Soils with the Discrete Element Method, *Adv. Civ. Eng.*, 2018, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4608930>.
  14. **Getahun, E. et al.** (2019) Characteristics of grain size distribution and the shear strength analysis of Chenjiaba long runout coseismic landslide, *J. Mt. Sci.*, 16(9), pp. 2110–2125.
  15. **Gallage, C.P.K. & Uchimura, T.** (2010) Effects of dry density and grain size distribution on soil-water characteristic curves of sandy soils, *Soils Found.*, 50(1), pp. 161–172.
  16. **Zhai, Q. et al.** (2020) Estimation of the soil-water characteristic curve from the grain size distribution of coarse-grained soils, *Eng. Geol.*, 267(12), pp. 105502. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105502.
  17. **Fredlund, M.D., Fredlund, D.G. & Wilson, G.W.** (2000) An equation to represent grain-size distribution, *Can. Geotech. J.*, 37(4), pp. 817–827. DOI: <https://doi.org/10.1139/t00-015>.
  18. **Fredlund, M.D., Wilson, G.W. & Fredlund, D.G.** (2002) Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve, *Can. Geotech. J.* 39(5), pp. 1103–1117. DOI: <https://doi.org/10.1139/t02-049>.
  19. **Wang, S.Y., Lu, X.B. & Shi, Z.M.** (2005) Effects of grain size distribution and structure on mechanical behavior of silty sands, *Yantu Lixue/Rock Soil Mech.*, 26(7), pp. 1029–1032. DOI: 10.2174/1874835X01003010082.
  20. **Tiwari, S.K. & Ghiya, A.** (2013) Strength Behavior of Compacted Fly Ash, Bottom Ash and their Combinations, *Electron. J. Geotech. Eng.*, 18, pp. 3085-3106.
  21. **Kim, B., Prezzi, M. & Salgado, R.** (2005) Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, 131(7), pp. 914–924. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)).
  22. **Muhunthan, B., Taha, R. & Said, J.** (2004) Geotechnical engineering properties of incinerator ash mixes, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 54(8), pp. 985–991. DOI:



<https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470959>.

23. **Gimhan, P.G.S., Disanayaka, J.P.B. & Nasvi, M.C.M.** (2018) Geotechnical Engineering Properties of Fly Ash and Bottom Ash: Use as Civil Engineering Construction Material, *Eng. J. Inst. Eng. Sri Lanka*, 51(1), p. 49. DOI: <http://doi.org/10.4038/engineer.v51i1.7287>.
24. **Indraratna, B. et al.** (2011) Engineering behaviour of a low carbon, pozzolanic fly ash and its potential as a construction fill, *Can. Geotech. J.*, 28(4), pp. 542–555. DOI:10.1139/T91-070.
25. **Singh, R.S. & Panda, A.P.** (1996) Utilization of fly ash in geotechnical construction, *Proc. Indian Geotechnical Conf.*, 1, pp. 547–550.
26. **Pandian, N.S.P.** (2005) Fly ash characterization with reference to geotechnical applications, *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, pp. 189–216.
27. **Pal, S. & Ghosh, A.** (2009) Shear strength behaviour of indian fly ashes, *Indian Geotechnical Conference Geotechnics in Infrastructure Development (GEOTIDE)*, pp. 763–778.
28. **Jakka, R.S., Ramana, G. V. & Datta, M.** (2010) Shear behaviour of loose and compacted pond ash, *Geotech. Geol. Eng.*, 28(6), pp. 763–778. DOI: 10.1007/s10706-010-9337-1.
29. **Mohanty, S. & Patra, N.R.** (2015) Geotechnical characterization of Panki and Panipat pond ash in India, *Int. J. Geo-Engineering*, 6(1), pp. 1–18. DOI: 10.1186/s40703-015-0013-4.
30. **Gruchot, A. & Zydroń, T.** (2016) Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash, *J. Ecol. Eng.*, 17(4), pp. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/63955>.
31. **Trivedi, A. & Sud, V.K.** (2002) Grain characteristics and engineering properties of coal ash, *Granul. Matter.*, 4(3), pp. 93–101.
32. **Kumar, D., Kumar, N. & Gupta, A.** (2014) Geotechnical Properties of Fly Ash and Bottom Ash Mixtures in Different Proportions, *Int. J. Sci. Res.*, 3(9), pp. 1487–1494.
33. **Lunev, A.A. & Sirotyuk, V.V.** (2021) Influence of Granulometric Composition on the Mechanical Properties of Pond Ash, *Soil Mech. Found. Eng.*, 58(4), pp. 314–319.
34. **Ogorodnikova, E.N. & Nikolaeva, S.K.** (2005) Lithogenetic features of technogenic deposits of ash and slag dumps, *Byulleten' Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 66, pp. 65-74 (in Russian).

Received 12.10.2022

Approved after reviewing 02.11.2022

Accepted 17.11.2022