

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И СВОЙСТВА ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ОСАДКОВ БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД

**С.А. Шахов**, *sashakhov@mail.ru*

*Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия*

**Аннотация.** Одним из потенциальных многотоннажных источников сырья для получения строительных материалов являются практически неиспользуемые золы от сжигания образующихся в результате функционирования очистных сооружений канализации осадков бытовых сточных вод (ОБСВ). С использованием физико-химических методов изучены вещественный состав и свойства золы от сжигания бытовых сточных вод. Зола состоит из частиц с шероховатой текстурой поверхности и пористой микроструктурой и проявляет высокие впитывающие свойства. Установлено, что зола от сжигания ОБСВ по ряду характеристик (коэффициент фильности, истинная плотность, гранулометрический состав, содержание ряда оксидов) существенно отличается от используемых для получения строительных материалов зол ТЭС и суглинка. Близость оксидного состава золы и суглинка делает технически рациональным ее использование в качестве легкоплавкого алюмосиликатного сырьевого компонента с расширенным интервалом спекания. Наличие у золы гидравлической активности позволяет рассматривать ее и в качестве активной минеральной добавки к цементному клинкеру. Стойкость золы к раздавливанию сравнима с керамзитом, что допускает в ряде случаев пригодность ее в качестве наполнителя или мелкого заполнителя. Дренажные характеристики допускают использование золы при строительстве оснований автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** зола, строительная керамика, цементный клинкер, гидравлическая активность

**Для цитирования.** Шахов С.А. Вещественный состав и свойства золы от сжигания осадков бытовых сточных вод // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 2. С. 31–39. DOI: 10.14529/build230204

Original article  
DOI: 10.14529/build230204

## THE MATERIAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF ASH FROM THE INCINERATION OF DOMESTIC SEWAGE SLUDGE

**S.A. Shakhov**, *sashakhov@mail.ru*

*Siberian State University of Railways, Novosibirsk, Russia*

**Abstract.** Ash generated by sewage treatment facilities – domestic sewage sludge (DWS) – is an untapped source of potential raw materials for the construction industry. We studied the material composition and properties of ash from the incineration of domestic wastewater. Ash consists of particles with a rough surface texture and porous microstructure and exhibits high absorbent properties. It has been established that the characteristics of ash produced by the incineration of DWS (the coefficient of philosity, true density, granulometric composition, the content of a number of oxides) differ significantly from ash produced by thermal power plants and loam which are used in the production of building materials. The proximity of the oxide composition of ash and loam makes it a rational choice as a fusible aluminosilicate raw material with an extended sintering interval. Hydraulic activity in the ash allows it to be considered as an active mineral additive for cement clinker. The crushing resistance of ash is comparable to that of expanded clay, which in some cases means it can be suitable as a filler or fine aggregate. The drainage characteristics of ash allow its use in the construction of road foundations.

**Keywords:** ash, building ceramics, cement clinker, hydraulic activity

**For citation.** Shakhov S.A. The material composition and properties of ash from the incineration of domestic sewage sludge. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2023;23(2):31–39. (in Russ.). DOI: 10.14529/build230204

### Введение

Разработка научных и технологических основ использования для получения строительных материалов техногенных отходов является одной из приоритетных задач строительного материаловедения.

Установлено, что использование промышленных отходов позволяет покрыть до 40 % потребности строительства в сырьевых ресурсах. Применение промышленных отходов позволяет на 10–30 % снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья, экономия капитальных вложений достигает 35–50 % [1, 2].

В Российской Федерации накоплен значительный опыт по использованию золошлаковых отходов электростанций в промышленности строительных материалов. Такие золы могут быть эффективным сырьем для изготовления силикатного кирпича, зольной керамики, минеральной ваты, стекла [3–6].

Наряду с золой ТЭС многотоннажным сырьевым резервом для получения строительных материалов являются практически неиспользуемые золы от сжигания образующихся в результате функционирования очистных сооружений канализации осадков бытовых сточных вод (ОБСВ). В настоящее время повсеместно используемый в РФ способ утилизации таких осадков – это захоронение на специальных площадках (картах депонирования), под которые заняты большие площади земли [7]. Использование осадка, хранящегося в таких картах, является сложной задачей, что связано с большим содержанием в этих отходах тяжелых металлов и патогенных видов микрофлоры. В этой связи среди возможных вариантов утилизации осадков бытовых сточных вод наиболее рациональный способ – это их сжигание с последующим использованием образующейся золы в качестве сырья при производстве строительных материалов [8–11].

Известно, что конкретные направления использования зол в производстве строительных материалов зависят от их фазово-химического состава [12]. В этой связи назрела необходимость в более детальном исследовании особенностей состава и технологических свойств малоизученных зол от сжигания ОБСВ.

**Цель работы:** установить вещественный состав и свойства золы от сжигания осадков бытовых сточных вод и сопоставить их с характеристиками используемого для получения строительных материалов сырья.

### Материалы и методы

Ввиду невозможности самостоятельного горения обезвоженного осадка по термодинамическим причинам (теплотворная способность – 1500 МДж/кг), золу для проведения лабораторных исследований получали путем обжига в камерной печи Nabertherm LV 9/11/P330 при  $t = 800$  °С осад-

ка бытовых сточных вод (отобран в МУП «Горводоканал» г. Новосибирска).

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на дифрактометре Bruker D8 Advance с использованием  $\text{Cu-K}_\alpha$  излучения. Микрофотографии и элементный анализ проводили на электронном микроскопе Hitachi TM-1000. Содержание водорастворимых солей в водной вытяжке из золы определялся методом капиллярного электрофореза на приборе «Капель-105». Гидравлическую активность золы оценивали по количеству поглощенного оксида кальция.

### Результаты их обсуждение

Образующаяся зола от сжигания осадка бытовых сточных вод (ОБСВ) представляет пылящий, тонкодисперсный порошок коричневого цвета с удельной поверхностью  $7180 \text{ см}^2/\text{г}$  и насыпной плотностью  $0,74 \text{ г}/\text{см}^3$ . В твердом состоянии зола образует легко разрушающиеся комки. При увлажнении зола может находиться в жидкотекучем или пластичном состояниях, причем пластичное состояние золы неустойчивое, что может быть обусловлено существенной мономерностью структуры.

Зола от сжигания ОБСВ представлена в основном фракцией 1,0–50 мкм и по зерновому составу относится к тяжелым пылеватым суглинкам (табл. 1, 2).

Таблица 1  
Распределение частиц золы ОБСВ по фракциям

Размер фракции, мкм	Кол-во частиц, %
менее 1	6
1–5	17
5–10	20
10–50	47
более 50	10

Таблица 2  
Распределение частиц золы ОБСВ по крупности

Цвет	Содержание, %	Макс. размер, мм	Идентификация
Темные	20–30	0,1	Песок, пыль
Коричневые	20–25	0,01	Пыль
Желтые	50–60	0,005	Пыль, глина

Исследование золы методом электронной микроскопии и спектрального анализа показало, что очень мелкие частицы имеют овальную форму (рис. 1) и, помимо соединений Si, содержат существенное количество Al (3,5–6,7 %), Fe (2,4–3,6 %), P (1–1,5 %), Mn (~ 0,5 %), и Ca (0,3–0,4 %).

По химическому составу зола представляет собой кислое сырье с повышенным содержанием красящих оксидов (табл. 3). В водных вытяжках золы ОБСВ преобладают катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{K}^+$  (табл. 4).

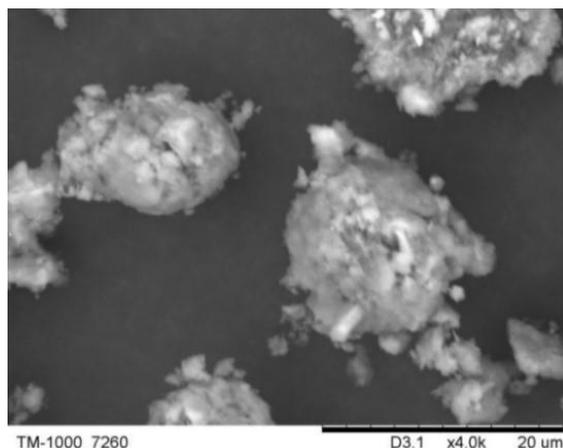


Рис. 1. Микрофотография частиц золы ОБСВ

Таблица 3

Химический состав (% масс.) золы ОБСВ

MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	Cu	Zn	O
1,9	10,6	53,9	6,1	3,1	6,2	6,3	0,2	7,5	0,12	0,3	47

Таблица 4

Содержание водорастворимых солей в золе ОБСВ по данным капиллярного электрофореза

№ п/п	Ионы	Концентрация, мг/кг золы	
		без УЗ-обработки	УЗ-обработка 10 мин
1	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	–	0,26
2	K <sup>+</sup>	6,442	9,579
3	Na <sup>+</sup>	14,54	1,071
4	Mg <sup>2+</sup>	–	2,639
5	Ca <sup>2+</sup>	100,9	157,8

Следует отметить, что наличие оксидов кальция и алюминия в золе в значительной степени обусловлено не столько составом коммунальных стоков, как технологией их обработки: в МУП «Горводоканал» г. Новосибирска в сброженный осадок вводятся известь (как самостоятельный коагулянт и для предотвращения загнивания) и минеральный коагулянт (оксихлорид алюминия Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl) (рис. 2). Дозы коагулянтов: оксихлорид алюминия 5–8 %, известь 15–30 % (от сухого вещества осадка).

При использовании золы ОБСВ для получения строительной керамики наличие в составе золы оксидов алюминия и кальция является позитивным фактором, поскольку с участием этих соединений при обжиге возможно образование кальцийсодержащих фаз, в частности анортита. Положительное влияние последнего на структурно-механические свойства керамики отмечено в целом ряде работ [14, 15].

Рентгенофазовый анализ показал, что основной идентифицируемой фазой в золах, обожженных при температурах 400–1200 °С, является кварц (рис. 3).

При этом кварц частично находится в высокодисперсном состоянии. На это, в частности, указы-

вают результаты сравнения адсорбционной активности глины, кварцевого песка, золы, а также глины и золы, взятых при соотношении 1:1 (рис. 4).

Полученные результаты свидетельствуют, что зола обладает более высокой адсорбцией метиленового красителя по сравнению с основными компонентами шихты для получения кирпича: глиной и крупнокристаллическим песком, что, по нашему мнению, связано с присутствием в ней частиц кварца с диаметром менее 0,05 мм. Согласно [16], такие частицы нельзя классифицировать как отощающую добавку, поскольку по своим адсорбционным свойствам они близки к глине, при этом, однако, не обладая ее пластичностью.

В табл. 5 представлены экспериментальные результаты по определению гидравлической активности золы. С учетом рекомендаций [17], величина поглощения золой CaO свидетельствует о возможности использования золы в качестве активных добавок к цементному клинкеру.

Зола ОБСВ относится к 2 классу кислых шлаков ( $M_a \geq 0,33$ ). При этом значения силикатного ( $M_c = 1,8$ ) и глиноземистого ( $M_f = 2,06$ ) модулей свидетельствуют с учетом рекомендаций [18, 19] о возможности использования золы для получения вяжущих материалов.

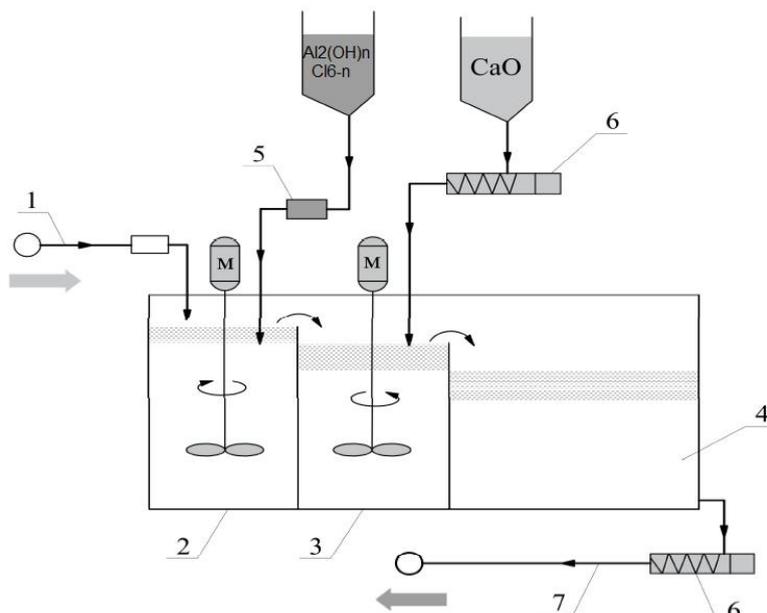


Рис. 2. Схема обработки ОБСВ коагулянт и известью [13]: 1 – подача ОБСВ; 2 – смеситель соли алюминия; 3 – смеситель извести; 4 – буферная камера; 5, 6 – насосы дозаторы; 7 – обработанный ОБСВ

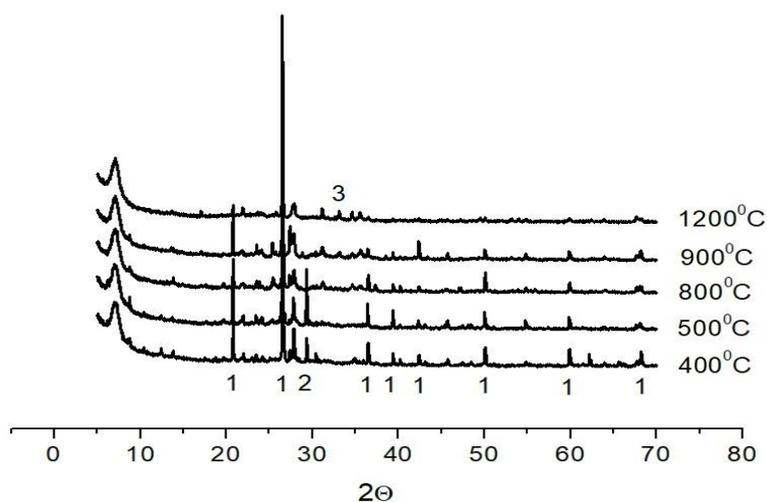


Рис. 3. Рентгенограммы золы ОБСВ: 1 – кварц; 2 – кальцит; 3 – гематит



Рис. 4. Интенсивность адсорбции метилового красителя: 1 – метиленовый красный; 2 – песок кварцевый; 3 – глина; 4 – 50 % глина + 50 % зола ОБСВ; 5 – зола ОБСВ

Таблица 5

## Активность золы ОБСВ по поглощению СаО

Материал	Кол-во СаО в растворе с золой в 1 сут, мг/л	Кол-во СаО в растворе с золой через 10 сут, мг/л	Кол-во поглощенного СаО на 10-е сутки, мг/л
Зола	2,370	1,497	0,873

Зола ОБСВ содержит потенциально вредные тяжелые металлы, такие как Zn, Cu, Cr, Pb, Ni, Cd и Hg (табл. 6). Содержание Zn, Cu, Ni, и Cd превышает предельно допустимую концентрацию для почвы, что вызывает опасения по поводу их выщелачивания при использовании золы в качестве строительного материала. Установлено, что зола имеет pH от умеренно кислой до значительно щелочной (средний pH 9,0), и в целом можно ожидать, что восприимчивость к выщелачиванию будет увеличиваться в более кислых или основных условиях.

Зола от сжигания ОБСВ по ряду характеристик (коэффициент фильности, истинная плотность (табл. 7), гранулометрический состав (рис. 5), содержание ряда оксидов (табл. 8) существенно отличается от используемых для получе-

ния строительных материалов зол ТЭС и суглинка. В то же время данные по количеству оксидов алюминия, кремния и кальция, грансоставу, адсорбционной активности, температуре плавления и интервалу размягчения (табл. 9) позволяют считать технически рациональным использование золы от сжигания ОБСВ в качестве легкоплавкого алюмосиликатного сырьевого компонента с расширенным интервалом спекания при производстве строительной керамики. Следует, однако, отметить, что зола ОБСВ, в отличие от глинистого сырья, представляет собой материал с увеличенной потребностью в воде из-за недостаточной пластичности, необходимой при формообразовании керамики.

С учетом полученных результатов золу от сжигания бытовых сточных вод можно охарактеризовать

Таблица 6

## Содержание тяжелых металлов в золе ОБСВ

Содержание металла	Cd	Cr	Co	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Зола ОБСВ, мг/кг	11,6	55,7	21,0	259	0,01	2140,0	21,9	69,9	644,0

Таблица 7

## Свойства частиц суглинка и зол

Характеристика	Зола ТЭС-3 (г. Новосибирск)	Зола ОБСВ	Суглинок Каменского месторождения
Коэффициенты фильности частиц	1,69	2,91	1,76
Истинная плотность частиц, г/см <sup>3</sup>	1,99–2,12	1,89	2,800
Удельная поверхность, см <sup>2</sup> /г	3200–5100	7180	3073

Таблица 8

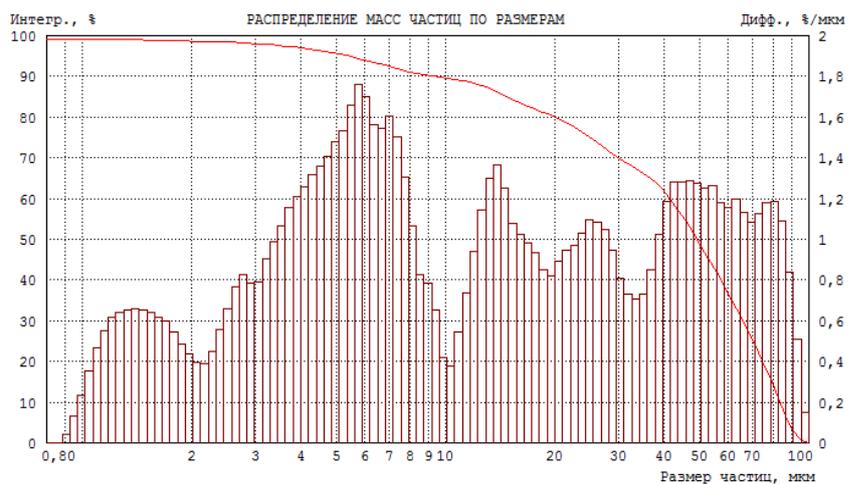
## Химические составы зол ТЭС-3, золы ОБСВ и суглинка

Материал	Содержание оксидов, масс %				
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
Зола ТЭС-3 г. Новосибирск (уголь из Назаровского разреза Канско-Ачинского бассейна)	24,2–27,0	6,7–7,5	13,8–20,7	38,0–44,1	4,1–5,5
Зола ОБСВ	53,9	10,6	7,5	6,2	1,9
Суглинок Каменского месторождения	61,0	12,54	4,03	5,67	1,89

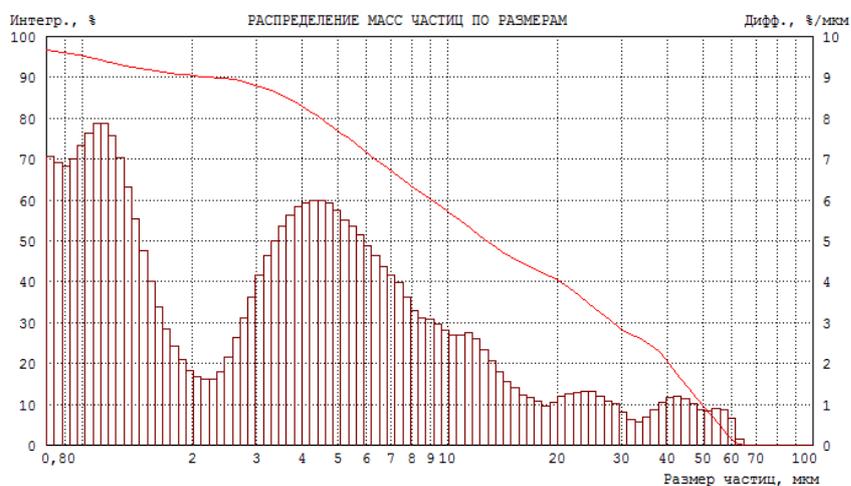
Таблица 9

## Температуры плавления и интервалы размягчения зол ТЭС [20–22], золы ОБСВ и суглинка Каменского месторождения

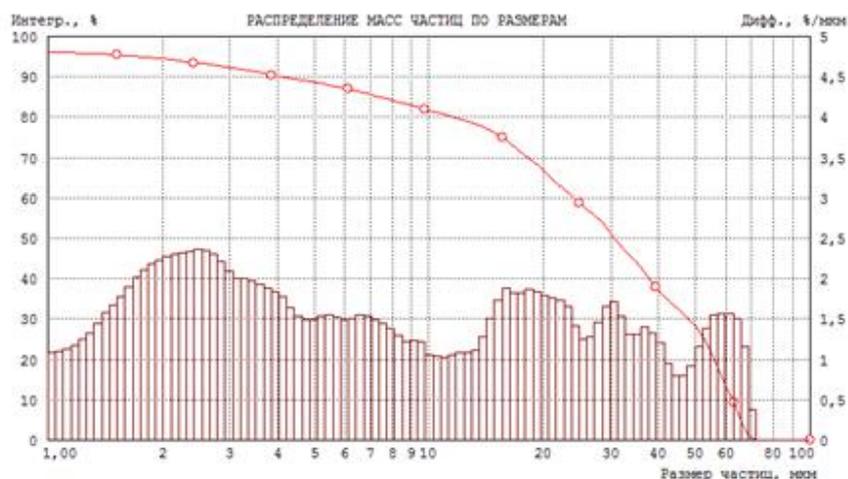
Золы ТЭС		Зола ОБСВ		Суглинок	
Температура начала плавления, °С	Интервал размягчения, °С	Температура начала плавления, °С	Интервал размягчения, °С	Температура начала плавления, °С	Интервал размягчения, °С
1100–1430	90–175	970	180	940	160



а)



б)



в)

Рис. 5. Распределение частиц по размерам: а – зола ТЭС-3 (г. Новосибирск); б – зола ОБСВ; в – суглинок Каменского месторождения (Новосибирская обл.)

как сыпучий мелкозернистый материал, цвет которого варьируется от красного до коричневого. Зола состоит из частиц с шероховатой текстурой поверхности и пористой микроструктурой и проявляет высокие впитывающие свойства (в среднем 15–18 %). Основные оксиды, присутствующие в золе ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaO}$ ), обычно встречаются в цементных смесях и в глинах. Аморфная составляющая (варьируется от 55 до 75 %) указывает на то, что материал реакционноспособен, проявляет определенную гидравлическую активность и потенциально может быть использован в качестве пуццолановой добавки.

При благоприятных условиях сжигания стойкость золы ОБСВ к раздавливанию значительно меньше, чем у гранитного щебня, и сравнима с керамзитом, что допускает в ряде случаев пригодность ее в качестве наполнителя или мелкого заполнителя.

Зола ОБСВ имеет «среднюю» водопроницаемость и сопоставима в этом отношении с чистым песком, что позволяет рассматривать ее в качестве

материала для строительства оснований автомобильных дорог.

#### Заключение

1. По химическому составу зола представляет собой кислое алюмосиликатное сырье с повышенным содержанием красящих оксидов.

2. Оксидный состав, грансостав и адсорбционная активность золы от сжигания осадков сточных вод свидетельствует о возможности ее использования при производстве строительной керамики в качестве легкоплавкого алюмосиликатного сырьевого компонента с расширенным интервалом спекания.

3. Анализ системы модулей показывает наличие технологического потенциала золы при использовании ее для получения вяжущих материалов. Зола обладает гидравлической активностью, что позволяет ее использовать в качестве активной минеральной добавки к цементному клинкеру.

4. Дренажные характеристики допускают использование золы при строительстве оснований автомобильных дорог.

#### Список литературы

1. Островский Н.В. Обращение с отходами. М.: Дашков и К, 2020. 538 с.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности: учебно-справочное пособие. Ростов н/Д.: Феникс, 2007. 368 с.
3. Цыльковский Ю.К. Направления использования золошлаковых отходов тепловых электростанций в строительной индустрии и строительстве // Электрические станции. 2000. № 10. С. 23–25.
4. Химико-технологические особенности золошлаковых отходов канско-ачинских бурых углей и перспективные направления их использования в строительстве / М.А. Савинкина, А.Т. Логвиненко, Л.Я. Анищенко и др. // Изв. СО РАН. Хим. науки. 1987. Вып.4, N 12(441). С.125–132.
5. Румянцев Д.Е. Использование золошлаков ТЭС для производства строительных материалов // Проблемы энергетики: докл. науч.-практ. конф. к 30-летию ИПКГосслужбы, Москва, 25–26 марта 1998 г. Ч. 3. М.: Изд-во ИПКГосслужбы, 1998. С. 171–176.
6. Селиванов В.М., Шильцина А.Д., Селиванов Ю.В. Применение золошлаковых отходов ТЭЦ в производстве строительных материалов и изделий // Вестник Хакасского технического института – филиала КГТУ. 2004. № 17. С. 179–186.
7. Вайсфельд Б.А., Кремер А.И. О направлениях обработки и утилизации отходов, образующихся на городских очистных сооружениях // Сборник докладов. 4-й Международный конгресс по управлению отходами ВЭЙСТЭК. Москва. 31 мая – 3 июня 2005 г. М., 2005. С. 347–348.
8. A long term study of the effects of heavy metals in sewage sludge on soil fertility and soil microbial activity / J.R. Bacon, C.D. Campbell, M.C.Coull, B.J. Chambers, P.A. Gibbs, A. Chaudri, S.P. Mcgrath, C. Carlton-Smith, M. Aitken // Dhir R (Ed.), Recycling and Reuse of Sewage Sludge. Thomas Telford, 2001. P. 87–96
9. Wiebusch B., Seyfried C.F. Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry // Water Science and Technology. 1997. 36 (11). P. 251–258.
10. Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – a review / R.O. Yusuf, Z.Z. Noor, M.F.M. Din, A.H. Abba // International Journal Global Environmental Issues. 2012. Vol. 12 (2–4). P. 214–228. DOI: 10.1504/IJGENVI.2012.049382
11. The recycling of incinerated sewage sludge ash as a raw material for  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$  glass ceramic production / Z. Zhang, L. Zhang, Y. Yin, X. Liang, A. Li // Environmental Technology. 2015. Vol. 36 (9). P. 1098–1103. DOI: 10.1080/09593330.2014.982208
12. Fytli D., Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. No. 12. P. 116–140. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014
13. Воронов Ю.В. Водоотведение. М.: Изд-во АСВ, 2014. 416 с.

14. Shakhov S.A., Nikolaev N.Yu. Phase composition of sewage sludge ash ceramics modified by drinking water treatment sludge filtrate // *Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 173. P. 93–98. DOI: 10.1007/978-3-030-81289-8\_13
15. Особенности использования некондиционных видов сырья для получения аноритовой керамики / В.А. Власов, М.А. Семеновых, Н.К. Скрипникова, В.В. Шеховцов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. Т. 22, № 5. С. 122–128. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-122-128
16. Industrial sewage slurry utilization for red ceramics production / V.A. Mymrin, K.P. Alekseev, E.V. Zelinskaya, N.A. Tolmacheva, R.E. Catai // *Construction and Building Materials*. 2014. № 66. P. 368–374. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.036
17. Книгина Г.И. Строительные материалы из горелых пород. М.: Стройиздат, 1966. 297 с.
18. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцементный клинкер. М.: Стройиздат, 1967. 303 с.
19. Бутт Ю.М., Горбаковская Е.Л., Вайсфельд Л.Д. Шлаковые цементы без добавок – возбудителей твердения // *Сб. трудов РОСНИИМС*. 1953. № 3. С. 25–31.
20. Лошкарева А.В., Губонина З.И. Экологические проблемы при хранении золоотходов от сжигания твёрдого топлива на тепловых электростанциях // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2014. № 6. 06TVN614. DOI: 10.15862/06TVN614
21. Путилин Е.И., Цветков В.С. Применение зол уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог: Обзор. информ. отеч. и зарубеж. опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М.: Союздорнии, 2003. 58 с.
22. Сайбулатов С.Ж. Ресурсосберегающая технология керамического кирпича на основе зол ТЭС. М.: Стройиздат, 1990. 436 с.

#### References

1. Ostrovskiy N.V. *Obrashchenie s otkhodami* [Waste management]. Moscow: Dashkov i K Publ.; 2020. 538 p. (In Russ.)
2. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. *Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennosti: uchebno-spravochnoe posobie* [Construction materials from industrial waste: an educational and reference manual]. Rostov-on-Don: Feniks Publ.; 2007. 368 p. (In Russ.)
3. Tselykovskiy Yu.K. [Directions of using ash and slag waste from thermal power plants in the construction industry and construction]. *Electrical Stations*. 2000;10:23–25. (In Russ.)
4. Savinkina M.A., Logvinenko A.T., Anishchenko L.Ya. et al. [Chemical and technological features of ash and slag waste of Kansk-Achinsk brown coals and promising directions of their use in construction]. *Izv. SO RAN. Khim. nauki*. 1987;4,12(441):125–132. (In Russ.)
5. Rumyantsev D.E. [The use of ash and slag from thermal power plants for the production of building materials] In: *Problemy energetiki: dokl. nauch.-prakt. konf. k 30-letiyu IPKgossluzhby, Ch.3* [Problems of energy: reports of the scientific and practical conference on the 30th anniversary of the IPKgossluzhby, Moscow, March 25–26, 1998]. Moscow: IPKgossluzhby Publ., 1998. P. 171–176. (In Russ.)
6. Selivanov V.M., Shil'tsina A.D., Selivanov Yu.V. [The use of ash and slag waste from thermal power plants in the production of building materials and products] *Vestnik Khakasskogo tekhnicheskogo instituta - filiala KGTU* [Bulletin of the Khakass Technical Institute - branch of KSTU]. 2004;17:179–186. (In Russ.)
7. Weisfeld B.A., Kremer A.I. [On the directions of processing and disposal of waste generated at urban wastewater treatment plants] In: *Sbornik dokladov. 4-y Mezhdunarodnyy kongress po upravleniyu otkhodami VEYSTEK*. [WasteTech – 2005: 4th International Waste Management Congress. Collection of reports. Moscow, May 31 – June 3, 2005]. Moscow, 2005. P. 347–348. (In Russ.)
8. Bacon J.R., Campbell C.D., Coull M.C., Chambers B.J., Gibbs P.A., Chaudri A., Mcgrath S.P., Carlton-Smith C., Aitken M. A long term study of the effects of heavy metals in sewage sludge on soil fertility and soil microbial activity. In: *Dhir R (Ed.), Recycling and Reuse of Sewage Sludge*. Thomas Telford; 2001:87–96
9. Wiebusch B., Seyfried C.F. Utilization of sewage sludge ashes in the brick and tile industry. *Water Science and Technology*. 1997;36 (11):251–258.
10. Yusuf R.O., Noor Z.Z., Din M.F.M., Abba A.H. Use of sewage sludge ash (SSA) in the production of cement and concrete – a review. *International Journal Global Environmental Issues*. 2012;12(2–4):214–228. DOI: 10.1504/IJGENVI.2012.049382
11. Zhang Z., Zhang L., Yin Y., Liang X., Li A. The recycling of incinerated sewage sludge ash as a raw material for CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> glass ceramic production. *Environmental Technology*. 2015;36(9):1098–1103. DOI: 10.1080/09593330.2014.982208
12. Fyttili D., Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008;12:116–140. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014

13. Voronov Yu.V. *Vodootvedenie* [Drainage]. Moscow: ASV Publ.; 2014. 416 p. (In Russ.)
14. Shakhov S.A., Nikolaev N.Yu. Phase composition of sewage sludge ash ceramics modified by drinking water treatment sludge filtrate. *Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022;173:93–98. DOI:10.1007/978-3-030-81289-8\_13
15. Vlasov V.A., Semenovikh M.A., Skripnikova N.K., Shekhovtsov V.V. Nonstandard raw materials for anorthite ceramics production. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2020;22(5):122–128. (In Russ.) DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-122-128 (In Russ.)
16. Mymrin V.A., Alekseev K.P., Zelinskaya E.V., Tolmacheva N.A., Catai R.E. Industrial sewage slurry utilization for red ceramics production. *Construction and Building Materials*. 2014;66:368–374. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.036
17. Knigina G.I. *Stroitel'nye materialy iz gorelykh porod* [Building materials from burnt rocks]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1966. 297 p. (In Russ.)
18. Butt Yu.M., Timashev V.V. *Portlandsementnyy klinker* [Portland cement clinker]. Moscow, Stroyizdat Publ.; 1967. 303 p. (In Russ.)
19. Butt Yu.M., Gorbakovskaya E.L., Vaysfel'd L.D. [Slag cements without additives – hardening agents]. In: *Sb. trudov ROSNIIMS* [Collection of works of ROSNIIMS.]. 1953. № 3. P. 25–31. (In Russ.)
20. Loshkareva A.V., Gubonina Z.I. Ecological problems of storage of the ash dumps from the combustion of solid fuels in thermal power stations. *Internet journal Naukovedenie*. 2014;6:06TVN614 (In Russ.) DOI: 10.15862/06TVN614
21. Putilin E.I., Tsvetkov V.S. *Primenenie zol unosa i zoloshlakovykh smesey pri stroitel'stve avtomobil'nykh dorog: Obzor. inform. otech. i zarubezh. opyta primeneniya otkhodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TES*. [The use of fly ash and ash-slag mixtures in the construction of highways: Overview of domestic and foreign experience in the use of solid fuel combustion waste at thermal power plants]. Moscow: Soyuzdornii Publ.; 2003. 58 p. (In Russ.)
22. Saybulatov S.Zh. *Resursosberegayushchaya tekhnologiya keramicheskogo kirpicha na osnove zol TES* [Resource-saving technology of ceramic bricks based on ashes of thermal power plants]. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1990. 436 p. (In Russ.)

**Информация об авторе:**

**Шахов Сергей Александрович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Гидравлика, водоснабжение, химия», Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия, sashakhov@mail.ru

**Information about the author:**

**Sergey A. Shakhov**, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Hydraulics, Water Supply, and Chemistry, Siberian Transport University (SGUPS), Novosibirsk, Russia, sashakhov@mail.ru

**Статья поступила в редакцию 31.01.2023, принята к публикации 01.03.2023.**

**The article was submitted 31.01.2023; approved after reviewing 01.03.2023.**