

Научная статья
УДК 691.54
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>
EDN: DWHWJB



ВЛИЯНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ РАЗЛИЧНОГО ГЕНЕЗИСА НА СВОЙСТВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

А. В. Явинский

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)

г. Омск, Россия

121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

АННОТАЦИЯ

Введение. Рост количества складываемых отходов ТЭЦ негативно сказывается на экологической и экономической обстановке в России. Содержание золоотвалов приводит к загрязнению близлежащих территорий и росту цен на энергию. Для решения данной проблемы предложено использовать отходы ТЭЦ различного генезиса в качестве компонента мелкозернистого бетона.

Материалы и методы. Перечислено оборудование, на котором выполнялся эксперимент. Для испытания на прочность при сжатии использовался пресс ТП-1-350 «Универсал». Для проведения испытания на прочность при изгибе использовалась машина МИИ-100. Удельная поверхность отходов ТЭЦ определялась на приборе ПСХ-12. Образцы набирали прочность в камере нормального твердения. Химический состав отходов ТЭЦ определялся рентгенофлуоресцентным методом.

Результаты. Приведены экспериментальные данные о прочности образцов с заменой части цемента отходами ТЭЦ различного генезиса. Часть образцов твердела в нормальных условиях, а часть подвергалась тепловлажностной обработке. Рассчитан удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии и при изгибе. Прочность при сжатии растворов с заменой 20% цемента на золу-уноса кузнецкой ТЭЦ позволяет получать образцы с прочностью на 8% меньше контрольного образца при нормальных условиях твердения. Использование кислой золы омской ТЭЦ и кузнецкой ТЭЦ при тепловлажностной обработке позволяет получать образцы с прочностью при сжатии выше, чем контрольный образец до 13%. Введение 30% основной золы новосибирской ТЭЦ взамен цемента позволяет получать образцы при нормальных условиях твердения по прочности при сжатии до 46,55 МПа. Расчет удельного расхода цемента на единицу прочности показал, что использование предложенных составов с кислой золой кузнецкой ТЭЦ снижает расход цемента на единицу прочности при тепловлажностной обработке образцов до 30%.

Обсуждение и заключение. Обосновано, что замена до 30% цемента золой гидроудаления новосибирской ТЭЦ позволяет получать мелкозернистые бетоны по прочности не ниже, чем контрольный цементный образец. При нормальных условиях твердения можно получать образцы с прочностью до 46,55 МПа при сжатии и 9,31 МПа при изгибе. Установлено, что использование тепловлажностной обработки для образцов с применением основной золы не дает прироста прочности по сравнению с кислыми золами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цемент, техногенные отходы, зола-унос, зола гидроудаления

Статья поступила в редакцию 07.06.2023; одобрена после рецензирования 21.06.2023; принята к публикации 26.06.2023.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Явинский А. В. Влияние техногенных отходов различного генезиса на свойства мелкозернистого бетона // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 3 (91). С. 396-404. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>

© Явинский А. В., 2023



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>
EDN: DWHWJB

INFLUENCE OF ANTHROPOGENIC WASTE OF DIFFERENT GENESIS ON PROPERTIES OF FINE-GRAINED CONCRETE

Aleksander V. Iavinskii

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia
121qqz@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-1717-9302>

ABSTRACT

Introduction. The growing amount of stored waste from TPPs has a negative impact on the environmental and economic situation in Russia. The content of ash dumps leads to pollution of nearby areas and increase in energy prices. To solve this problem, it is proposed to use TPP waste as a component of solutions.

Materials and methods. The equipment on which the experiment was performed is listed. For the test of compressive strength, the press TP-1-350 Universal was used. For the test of flexural strength, MII-100 machine was used. Specific surface area of TPP waste was determined on PSKh-12 device. The samples gained the strength in the chamber of normal hardening. The chemical composition of TPP waste was determined by the X-ray fluorescent method.

Results. The experimental data on the strength of specimens with the replacement of part of the cement by waste thermal power plants of different genesis are presented. The part of the samples were cured under normal conditions, and part was subjected to heat and humidity treatment. Specific cement consumption per unit of compressive and flexural strength was calculated. Compressive strength of mortars with replacement of 20% of cement by Kuznetsky TPP ash makes it possible to obtain samples with strength by 8% less than the control sample under normal curing conditions. The use of acid ash from Omsk TPP and Kuznetsky TPP under heat and moisture treatment makes it possible to obtain the samples with compressive strength higher than the control sample up to 13%. The introduction of 30 % of the basic ash from Novosibirsk TPP instead of cement allows to obtain samples with compressive strength up to 46,55 MPa. The calculation of specific consumption of cement per unit strength showed that the use of the proposed compositions is more cost-effective than the control ashless sample up to 30%.

Discussion and conclusions. It has been proved that replacement of up to 30% of cement by TPP wastes makes it possible to obtain mortars with strength not lower than that of the control cement sample. Depending on curing conditions and the type of used TPP waste it is possible to receive samples with compressive strength up to 46,55 MPa and bending strength up to 9,31 MPa. It was found that the use of heat and moisture treatment for the samples using basic ash does not give an increase in strength, compared to acidic ash.

KEYWORDS: cement, technogenic waste, fly ash, pond ash

The article was submitted 07.06.2023; approved after reviewing 21.06.2023; accepted for publication 26.06.2023.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Yavinsky Aleksander V. Influence of anthropogenic waste of different genesis on properties of fine-grained concrete. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2023; 20 (3): 396-404. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-396-404>

© Iavinskii A. V., 2023



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Вследствие объема роста строительства дорог в России, который связан с национальным проектом «Безопасные и качественные дороги», растут и потребности регионов в дешевых строительных материалах. За последний год значительно выросла стоимость портландцемента, что является следствием введения антироссийских санкций [1]. Использование техногенных отходов взамен дорогостоящего вяжущего позволит значительно уменьшить стоимость строительства [2, 3, 4].

Проблема переработки отходов тепловых электростанций актуальна уже не первый год [5]. Объемы накопленных отходов ежегодно растут, а доля их утилизации сравнительно небольшая [6]. В России перерабатывается не более 10% от вырабатываемых золошлаковых отходов. Строительная отрасль является одним из наиболее актуальных направлений по переработке ЗШО [7, 8, 9, 10]. Одной из основных проблем переработки золошлаковых отходов является значительное отличие их химического состава в зависимости от вида сжигаемого угля, вследствие чего их влияние на свойства строительных материалов могут значительно различаться.

Многие отечественные и зарубежные авторы проводили исследования по замене компонентов бетонной смеси на отходы тепловых электростанций, однако большинство из них не проводит сравнение между различными по химическому составу отходами, а сравнивает результаты только с бездобавочным образцом. В работах [11, 12, 13, 14] рассматриваются результаты по использованию кислой золы в составе бетонов. Как правило, введение такой золы в количестве выше 20% взамен части цемента приводит к снижению прочности изделий.

В работах [15, 16, 17, 18] использовалась высококальцевая основная зола. Использование высококальцевых отходов приводит к меньшему снижению прочности по сравнению с кислыми отходами.

Для вовлечения в строительство как можно большего количества отходов необходимо использовать основные и кислые золы в рациональных пропорциях, что позволит снизить стоимость строительства и улучшить экологическую обстановку. Этот вопрос будет изучаться в дальнейших работах.

Цель данной работы установить влияние отходов тепловых электростанций различного генезиса на свойства мелкозернистого бетона при замене части цемента.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для изучения были отобраны пробы золы гидроудаления с отвалов омской ТЭЦ-5 (г. Омск) и новосибирской ТЭЦ-3 (г. Новосибирск), а также золы-уноса кузнецкой ТЭЦ (г. Кузнецк). Усредненный химический состав отходов, определенный рентгенофлуоресцентным методом и потери при прокаливании (ППП), представлены в таблице 1. Для испытания использовалась зола-унос кузнецкой ТЭЦ, поскольку по химическому составу она не отличается значительно от золы гидроудаления кузнецкой ТЭЦ, но удобнее в транспортировке.

По химическому составу можно сделать вывод, что зола-унос кузнецкой ТЭЦ и зола гидроудаления омской ТЭЦ-5 являются кислыми и не обладают собственной активностью (модуль основности $M_o < 1$), а зола гидроудаления новосибирской ТЭЦ-3 является основной (модуль основности $M_o > 1$). Также наблюдается значительное отличие внешнего вида у различных отходов ТЭЦ, зола гидроудаления предварительно высушивалась до постоянной массы в сушильном шкафу (рисунок 1).

Удельная поверхность отходов определялась с помощью прибора ПСХ-12 и составляет: для золы гидроудаления омской ТЭЦ-5 $S_{уд} = 220 \text{ м}^2/\text{кг}$; для золы гидроудаления новосибирской ТЭЦ-3 $S_{уд} = 240 \text{ м}^2/\text{кг}$; для золы уноса кузнецкой ТЭЦ $S_{уд} = 290 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Для изготовления мелкозернистого бетона использовался цемент ЦЕМ I 42,5 Н, который был исследован в лаборатории СибАДИ и показал соответствие всем требованиям ГОСТ 31108–2020.

В качестве мелкого заполнителя применялся речной кварцевый песок с модулем крупности 2,5, поставленный АО «Омский речной порт».

Для испытания на прочность при сжатии использовался пресс ТП-1-350 «Универсал». Для проведения испытания на прочность при изгибе использовалась машина МИИ-100.

В качестве пластифицирующей добавки применялся поликарбоксилатный пластификатор SikaViscoCrete 20 Gold, рациональное количество которого было определено в прошлых работах [19] и составляет 0,7% от массы вяжущего.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проведения испытаний изготавливались образцы-балочки размером 4х4х16 см, составы которых представлены в таблице 2.

Таблица 1
Химический состав золы гидроудаления
Источник: составлено авторами.

Table 1
Chemical composition of pond ash
Source: compiled by the authors.

Материал	Содержание оксидов, % по массе										
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП
Омск	56,55	1,01	22,25	9,29	0,14	0,78	1,44	0,29	0,71	0,32	7,22
Новосибирск	17,58	0,59	9,72	6,54	4,85	5,5	45,28	0,36	0,92	0,11	8,55
Кузнецк	59,55	2,25	22,12	8,13	0,8	0,81	1,05	1,47	0,26	0,21	3,35

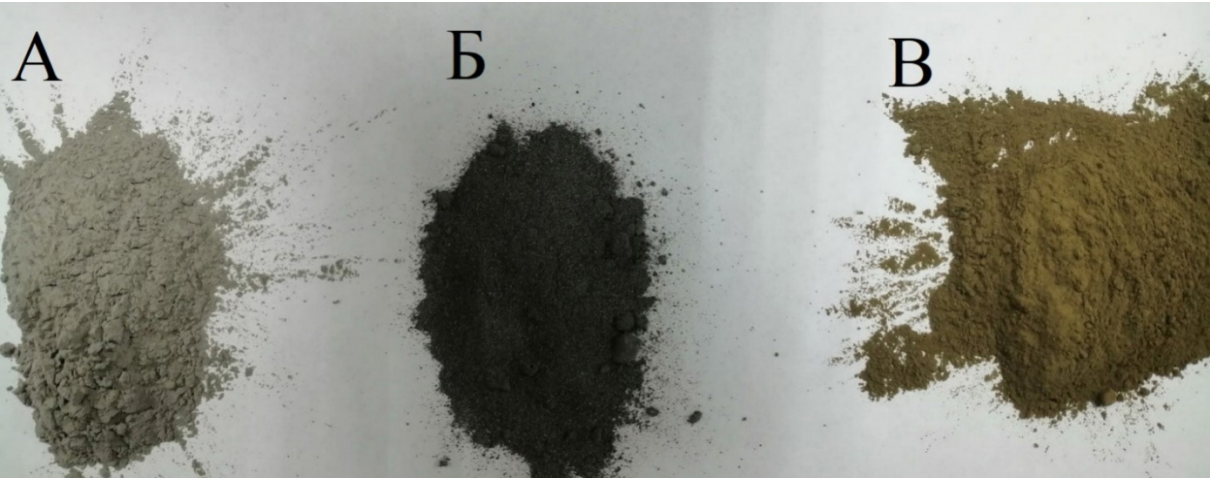


Рисунок 1 – Внешний вид отходов:
а – зола-унос кузнецкой ТЭЦ;
б – зола гидроудаления омской ТЭЦ-5;
в – зола гидроудаления новосибирской ТЭЦ-3
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Appearance of waste:
A – fly ash from Kuznetskaya TPP;
B – pond ash from Omskaia TPP-5;
C – pond ash from Novosibirskaia TPP-3
Source: compiled by the authors.

Часть образцов твердела в нормальных условиях (НУ) в камере нормального твердения, а часть подверглась тепловлажностной обработке (ТВО) по режиму 3 ч предварительной выдержки и 6 ч изотермического прогрева при температуре +70 °С, затем 3 ч плавного остывания.

Образцы, твердевшие в НУ, были испытаны после 28 сут твердения, а образцы, прошедшие ТВО, сразу после остывания. Результаты испытаний мелкозернистых бетонов представлены в таблице 3 и на рисунках 2, 3.

Удельный расход цемента на единицу прочности при сжатии рассчитывался по формуле [20]:

$$\text{Ц}_{\text{сж}}^{\text{уд}} = \frac{\text{Ц}}{R_{\text{сж}}}, \text{ кг/МПа},$$

где Ц – расход цемента, кг/м³; R_{сж} – прочность образца при сжатии, МПа.

Удельный расход цемента на единицу прочности позволяет оценить экономическую эффективность используемых составов. Чем меньше данный показатель, тем меньше расход цемента на единицу прочности.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы. При НУ у составов с использованием золы-уноса кузнецкой ТЭЦ наблюдается снижение на 6, 8, 20, 37%, соответственно для составов с заменой 10, 20, 30, 40% цемента золой-уноса, по сравнению с контрольным составом № 1.

Таблица 2
Составы мелкозернистых бетонов на м3
Источник: составлено авторами.

Table 2
Compositions of cement-sand mortars per m3
Source: compiled by the authors.

№ состава	Цемент, кг	Песок, кг	Вода, кг	Добавка, кг	Кузнецк, кг	Омск, кг	Новосибирск, кг
1(контрольный)	500	1250	225	3,5	-	-	-
2 (замена 10% цемента)	450	1250	230	3,5	50	-	-
3 (замена 20% цемента)	400	1250	237	3,5	100	-	-
4 (замена 30% цемента)	350	1250	241	3,5	150	-	-
5 (замена 40% цемента)	300	1250	245	3,5	200	-	-
6 (замена 10% цемента)	450	1250	235	3,5	-	50	-
7 (замена 20% цемента)	400	1250	240	3,5	-	100	-
8 (замена 30% цемента)	350	1250	248	3,5	-	150	-
9 (замена 40% цемента)	300	1250	251	3,5	-	200	-
10 (замена 10% цемента)	450	1250	225	3,5	-	-	50
11(замена 20% цемента)	400	1250	229	3,5	-	-	100
12(замена 30% цемента)	350	1250	236	3,5	-	-	150
13(замена 40% цемента)	300	1250	245	3,5	-	-	200

Прочность при изгибе у составов № 2, 3, 4 при НУ выше, чем у контрольного состава до 13%. При введении 40% золы-уноса прочность при изгибе в НУ начинает снижаться. Введение золы повышает отношение $R_{изг}/R_{сж}$ по сравнению с контрольным образцом при НУ, а значит, что составы с золой обладают повышенной однородностью.

При ТВО составов № 2-5 наблюдается повышение прочности при сжатии по сравнению с контрольным образцом до 13%. Состав № 3 показывает прочность при изгибе выше, чем контрольный состав № 1 на 20%.

Стоит отметить, что если при НУ прочность при сжатии и изгибе составов с кузнецкой золой снижалась пропорционально количеству вводимой золы, то при ТВО наблюдается рост прочности при сжатии и изгибе при 20% вводимой золы по сравнению с 10%. При проведении ТВО в составах № 2, 3, 4, 5 наблюдается повышение прочности при сжатии и изгибе по сравнению с твердением в НУ. Повышение прочности при сжатии и изгибе связано с ускорением прохождения пуццоланической реакции золы вследствие её термоактивации [21].

У составов № 6, 7, 8, 9 при НУ с заменой части цемента золой гидроудаления омской ТЭЦ-5 показывают прочность при сжатии ниже, чем

контрольный состав на 3, 20, 46, 54%. Однако прочность при изгибе у составов с заменой 10 и 20% не уступает контрольному образцу. Составы с введением 30 и 40% золы гидроудаления показывают сниженную прочность при изгибе на 20 и 33% соответственно при НУ по сравнению с контрольным образцом. Снижение прочности при введении отходов омской ТЭЦ-5 может быть следствием повышенной водопотребности золы гидроудаления, а также большого количества частиц не сгоревшего топлива (потери при прокаливании составляют 7,22%). Сниженная прочность при сжатии образцов с использованием омской золы гидроудаления при НУ по сравнению с образцами, в которых использовалась зола-уноса кузнецкой ТЭЦ является следствием того, что омская зола обладает пониженной $S_{уд}$ по сравнению с золой уноса.

Тепловлажностная обработка составов с заменой части цемента омской золой гидроудаления позволяет получать образцы, сопоставимые по прочности при сжатии с контрольным беззолым образцом. Состав № 6, в который вводилось 10% омской золы, показывает прочность при сжатии выше, чем контрольный образец на 8%. Состав № 7 показывает прочность при сжатии, равную контрольному составу.

Таблица 3

Результаты испытаний

Источник: составлено авторами.

Table 3

Test results

Source: compiled by the authors.

№ состава	Условия твердения	Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа	Отношение $R_{изг}/R_{сж}$	Плотность ρ , кг/м ³	Индекс расхода цемента на единицу прочности при сжатии $\Pi_{сж}^{уд}$, кг/МПа	Индекс расхода цемента на единицу прочности при изгибе $\Pi_{изг}^{уд}$, кг/МПа
1	НУ	43,55	7,33	0,17	2235	11,48	68,21
	ТВО	40,14	6,98	0,17	2198	12,46	71,63
2	НУ	41,05	7,5	0,18	2230	10,96	60,00
	ТВО	44,83	7,12	0,16	2241	10,04	63,20
3	НУ	40,34	8,32	0,21	2294	9,92	48,08
	ТВО	45,34	8,4	0,19	2312	8,82	47,62
4	НУ	35,09	7,66	0,22	2211	9,97	45,69
	ТВО	37,35	6,99	0,19	2220	9,37	50,14
5	НУ	27,55	6,87	0,25	2171	10,89	43,67
	ТВО	30,09	6,58	0,22	2175	9,97	45,59
6	НУ	42,35	7,65	0,18	2269	10,63	58,82
	ТВО	43,32	7,12	0,16	2250	10,39	63,20
7	НУ	34,86	7,38	0,21	2192	11,47	54,20
	ТВО	39,90	7,08	0,18	2178	10,03	56,50
8	НУ	23,54	5,88	0,25	2132	14,87	59,52
	ТВО	30,21	5,91	0,20	2122	11,59	59,22
9	НУ	19,18	4,96	0,26	2032	15,64	60,48
	ТВО	24,22	5,08	0,21	1997	12,39	59,06
10	НУ	46,55	8,8	0,19	2251	9,67	51,14
	ТВО	45,01	9,31	0,21	2244	10,00	48,34
11	НУ	45,12	8,25	0,18	2240	8,87	48,48
	ТВО	44,32	8,54	0,19	2211	9,03	46,84
12	НУ	40,74	7,9	0,19	2210	8,59	44,30
	ТВО	40,8	8,32	0,20	2212	8,58	42,07
13	НУ	33,1	7,35	0,22	2168	9,06	40,82
	ТВО	28,84	7,77	0,27	2158	10,40	38,61

ТВО составов № 6, 7, 8, 9 позволяет получить прочность при сжатии больше, чем у образцов, которые твердели в НУ. Введение 10% золы гидроудаления омской ТЭЦ позволяет получать прочность на 8% больше, чем у контрольного образца при ТВО. У составов с 20, 30, 40% прочность ниже, чем у контрольного состава прошедшего ТВО на 6, 25, 40% соответственно. Результаты прочности при изгибе при ТВО незначительно отличаются, от результатов при НУ твердения.

Составы № 10, № 11, твердевшие в НУ, показывают прочность при сжатии, идентичную контрольному составу, а составы № 12, 13 показывают прочность ниже на 7 и 24%

соответственно. Прочность при сжатии у составов с использованием основной золы новосибирской ТЭЦ при НУ выше до 20%, чем у контрольного состава. Вследствие высокого содержания оксида кальция в золе образцы показывают снижение прочности только при замене 30% и более цемента в составе мелкозернистого бетона при НУ.

Тепловлажностная обработка составов № 10-12 с основной золой показывает прочность при сжатии выше, чем контрольный образец до 12%. Состав № 13 с заменой 40% цемента основной золой новосибирской ТЭЦ показал прочность значительно ниже, чем контрольный образец (снижение на 30%) при ТВО.

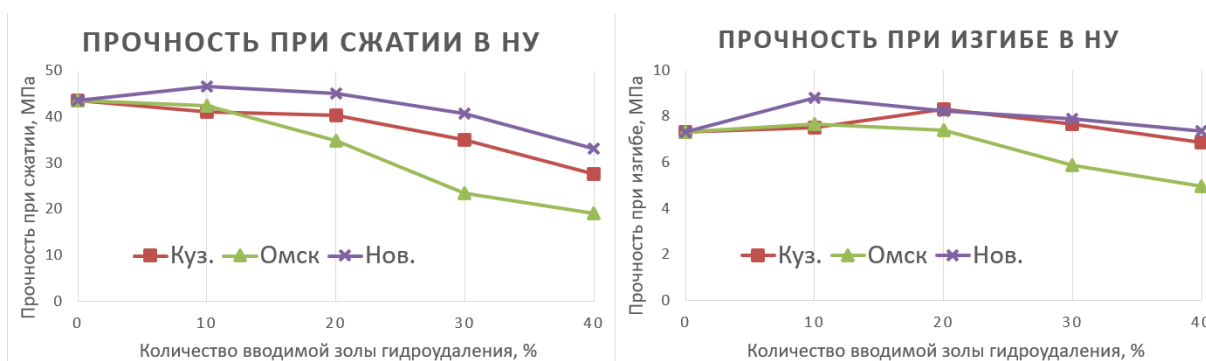


Рисунок 2 – Прочность испытуемых образцов в нормальных условиях твердения
Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Strength of test specimens under normal curing conditions
Source: compiled by the authors.

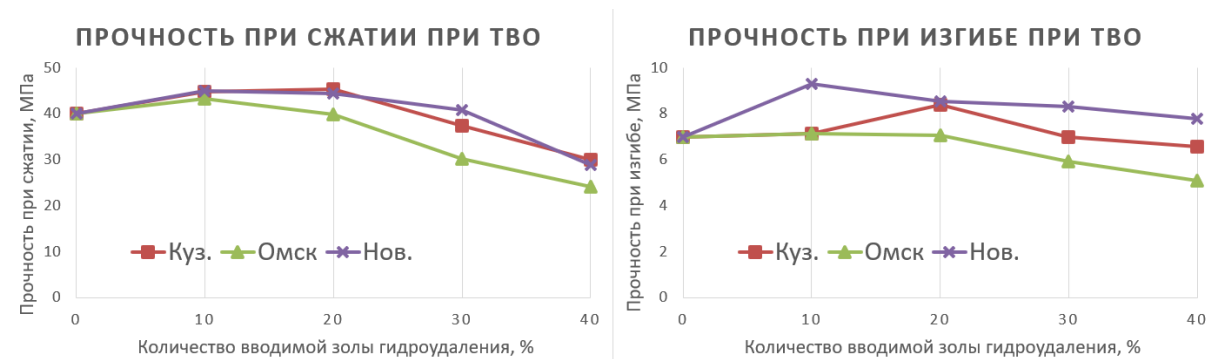


Рисунок 3 – Прочность испытуемых образцов при тепловлажностной обработке
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Strength of test specimens during heat and humidity treatment
Source: compiled by the authors.

Составы с основной золой № 10, № 11, № 12, № 13 не показали повышения прочности после прохождения ТВО по сравнению с НУ. Это связано с тем, что основная зола содержит меньше SiO_2 и Al_2O_3 , которые принимают участие в пуццоланической реакции.

Составы № 2-13 независимо от условий твердения показывают удельный расход цемента на единицу прочности ниже, чем контрольный состав № 1. Из чего можно сделать вывод, что составы с применением отходов ТЭЦ будут экономически более эффективны по сравнению с контрольным беззолым составом.

Для повышения количества вводимых отходов ТЭЦ в состав мелкозернистого бетона необходимо изучить возможность совместного введения кислых и основных зол в рациональных пропорциях, что будет в дальнейшем изучаться.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено влияние замены части цемента в составе мелкозернистого бетона на золу-уноса кузнецкой ТЭЦ. В НУ твердения прочность образцов с заменой 20% цемента золой-уноса позволяет получать образцы с прочностью меньше всего на 8%. При использовании ТВО прочность образцов с введением до 20% золы-уноса выше, чем у контрольного образца. Замена 30% цемента золой-уноса позволяет получать образцы по прочности ниже всего на 7% по сравнению с контрольным образцом.

2. Выявлено влияние замены части цемента в составе мелкозернистого бетона на золу гидроудаления омской ТЭЦ-5. Установлено, что при НУ твердения замена более 10% цемента золой гидроудаления приводит к значительному снижению прочности. При ТВО возможно получать образцы с прочностью, сопоставимой с контрольным образцом при введении до 20% золы гидроудаления взамен цемента.

3. Установлено, что замена до 20% цемента основной золой новосибирской ТЭЦ-3 при НУ твердения позволяет повысить прочность мелкозернистого бетона до 7%. При замене 30% в НУ твердения получаются образцы с прочностью при сжатии на 6% ниже, чем у контрольного беззолного состава. ТВО образцов с применением основной золы не дает прироста прочности по сравнению с кислыми золами.

4. Установлено, что при замене до 20% цемента на кислую золу омской или кузнецкой ТЭЦ возможно получать образцы, не уступающие по прочности при изгибе контрольному беззолному образцу вне зависимости от условий твердения. При использовании основной золы новосибирской ТЭЦ можно получать образцы с прочностью при изгибе до 12% выше, чем контрольный образец.

5. Установлено, что удельный расход цемента у составов с введением до 20% кислой золы кузнецкой ТЭЦ ниже, чем у контрольного беззолного состава вне зависимости от условий твердения. Удельный расход цемента при использовании омской ТЭЦ ниже, чем у контрольного образца, при замене до 20% цемента. Применение основной золы новосибирской ТЭЦ показывает наименьший удельный расход цемента на единицу прочности (снижение до 30%) по сравнению с контрольным образцом, что позволяет значительно снизить стоимость мелкозернистого бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Павлова С. А., Павлов И. Е., Амирасланов И. Д. Экономические санкции как предпосылка развития национальной экономики России // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 11 (125). 27 с.
2. Лесовик Р. В., Володченко А. А., Швецов А. В., Поспелов М. А., Минакова А. В., Гладких Е. А. К вопросу использования отходов промышленности для создания строительных композитов // *Научные технологии и инновации*. 2019. С. 290–294.
3. Ghosh S. K., Kumar V. *Circular economy and fly ash management*. – Singapore: Springer, 2020. P. 160.
4. Sun, J., Shen, X., Tan, G., Tanner, J. E. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019. Vol. 136. P. 565–580.
5. Sharma A., Sharma A., Singh K. Bearing capacity of sand admixed pond ash reinforced with natural fiber // *Journal of Natural Fibers*. 2022. Vol. 19. no 9. P. 3394–3407.
6. Калютин А. А., Трещев Д. А., Поздеева Д. Л. Утилизация твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга // *Материаловедение. Энергетика*. 2019. Т. 25, № 3. С. 59–70.
7. Осокин Н. А., Золотова И. Ю., Никитушкина Ю. В. Снижение антропогенного воздействия дорожного строительства за счет применения золошлаковых отходов // *Экономическая наука современной России*. 2022. № 1. С. 81–93.
8. Rastogi A., Paul V. K. A critical review of the potential for fly ash utilisation in construction-specific applications in India // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 76. no 2. P. 65–75.
9. Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants // *Resources, Conservation and Recycling*. 2019. Vol. 150. P. 104427.
10. Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obianyo, I. I. Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 338. P. 127624.
11. Федюк Р. С. [и др.] Особенности структурообразования композиционных материалов на основе цемента, известняка и кислых зол // *Неорганические материалы*. 2019. Т. 55, № 10. С. 1141–1148.
12. Лесовик В. С., Федюк Р. С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16, № 10. С. 1346–1356.
13. Srikanth A., Nandini K. A., Babu Y. A. Performance of Fine Aggregate Replaced Pond Ash on strength of Concrete // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. T. 1112. № 1. C. 012029.
14. Yimam Y. A. et al. Effect of pond ash on properties of C-25 concrete // *Materials Today: Proceedings*. 2021. T. 46. C. 8296–8302.
15. Wang Y. et al. Physicochemical characterization of unconventional fly ashes // *Fuel*. 2022. T. 316. C. 123318.
16. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete // *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019. T. 7. № 3. P. 12–20.
17. Nwankwo C. O. et al. High volume Portland cement replacement: A review // *Construction and Building materials*. 2020. T. 260. P. 120445.
18. Alaloul W. S. et al. Utilizing of oil shale ash as a construction material: A systematic review // *Construction and Building Materials*. 2021. T. 299. P. 123844.
19. Ращупкина М. А., Явинский А. В., Чулкова И. Л. Влияние водоредуцирующих суперпластификаторов и золы гидроудаления на свойства цементного камня // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2021. № 3. С. 49–55.
20. Калашников В. И., Хвастунов А. В., Хвастунов В. Л. Физико-механические и гигрометрические свойства порошково-активированных высокопрочных щебеночных бетонов и фибробетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2011. № 5. С. 161–164.
21. Явинский А. В., Чулкова И. Л. Влияние золы гидроудаления на свойства тяжелого бетона для строительства дорожного покрытия // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2022. № 3. С. 16–24.

REFERENCES

1. Pavlova S. A., Pavlov I. E., Amiraslanov I. D. Jekonomicheskie sankcii kak predposylka razvitiya nacional'noj jekonomiki Rossii [Economic sanctions as a prerequisite for the development of the national economy of Russia]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2022;11 (125): 27. (In Russ.)
2. Lesovik R. V., Volodchenko A. A., Shvecov, A. V., Pospelov, M. A., Minakova, A. V., Gladkih, E. A. K voprosu ispol'zovaniya othodov promyshlennosti dlja sozdaniya stroitel'nyh kompozitov [On the issue of using industrial waste to create construction composites]. *Naukoemkie tehnologii i innovacii*. 2019: 290-294. (In Russ.)
3. Ghosh S. K., Kumar V. Circular economy and fly ash management. Singapore: Springer, 2020:160.
4. Sun, J., Shen, X., Tan, G., Tanner, J. E. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2019; Vol. 136: 565-580.
5. Sharma A., Sharma A., Singh K. Bearing capacity of sand admixed pond ash reinforced with natural fiber. *Journal of Natural Fibers*. 2022; 19. no 9: 3394-3407.
6. Kaljutik A. A., Treshhev D. A., Pozdeeva D. L. Utilizacija tverdyh bytovykh othodov na TJeC g. Sankt-Peterburga [Municipal solid waste disposal at the CHPP in St. Petersburg]. *Materialovedenie. Jenergetika*. 2019; 25. No. 3: 59-70. (In Russ.)
7. Osokin N. A., Zolotova I. Ju., Nikitushkina Ju. V. Snizhenie antropogennogo vozdejstviya dorozhnogo stroitel'stva za schet primeneniya zoloshlakovykh othodov [Reduction of anthropogenic impact of road construction due to the use of ash and slag waste]. *Jekonomicheskaja nauka sovremennoj Rossii*. 2022; 1: 81-93. (In Russ.)
8. Rastogi A., Paul V. K. A critical review of the potential for fly ash utilisation in construction-specific applications in India. *Environmental Research, Engineering and Management*. 2020; 76. no 2: 65-75.
9. Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants. *Resources, Conservation and Recycling*. 2019; 150: 104427.
10. Al Biajawi, M. I., Embong, R., Muthusamy, K., Ismail, N., & Obianyo, I. I. Recycled coal bottom ash as sustainable materials for cement replacement in cementitious Composites: A review. *Construction and Building Materials*. 2022; 338: 127624.
11. Fedjuk R. S. i dr. Osobennosti strukturoobrazovaniya kompozicionnykh materialov na osnove cementa, izvestnjaka i kislyh zol [Features of structure formation of composite materials based on cement, limestone and acid ash]. *Neorganicheskie materialy*. 2019; T. 55. no. 10: 1141-1148. (In Russ.)
12. Lesovik V. S., Fedjuk R. S. Povyshenie jefektivnosti malopronicaemykh cementnykh kompozitov [Increased efficiency of low-permeability cement composites]. *Vestnik MGSU*. 2021; T. 16. no. 10:1346-1356.
13. Srikanth A., Nandini K. A., Babu Y. A. Performance of Fine Aggregate Replaced Pond Ash on strength of Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021; T. 1112. no. 1: 012029.
14. Yimam Y. A. et al. Effect of pond ash on properties of C-25 concrete. *Materials Today: Proceedings*. 2021; T. 46: 8296-8302.
15. Wang Y. et al. Physicochemical characterization of unconventional fly ashes. *Fuel*. 2022; T. 316: 123318.
16. Harle S. M. Experimental Investigation on the use of Pond Ash in the Concrete. *International Journal of Scientific Research in Network Security and Communication*. 2019. T. 7. №. 3. P. 12-20.
17. Nwankwo C. O. et al. High volume Portland cement replacement: A review. *Construction and Building materials*. 2020. T. 260: 120445.
18. Alaloul W. S. et al. Utilizing of oil shale ash as a construction material: A systematic review. *Construction and Building Materials*. 2021. T. 299: 123844.
19. Rashhupkina M. A., Javinskij A. V., Chulkova I. L. Vlijanie vodoreducirujushhih superplastifikatorov i zoly gidroudalenija na svojstva cementnogo kamnja [The influence of water-reducing superplasticizers and hydraulic removal ash on the properties of cement stone]. *Izvestija vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2021; 3: 49-55. (In Russ.)
20. Kalashnikov V. I., Hvastunov A. V., Hvastunov V. L. Fiziko-mehanicheskie i gigrometricheskie svojstva poroshkovo-aktivirovannykh vysokoprochnykh shhebenochnykh betonov i fibrobetonov s nizkim udel'nym rashodom cementa na edinicu prochnosti [Physical-mechanical and hygrometric properties of powder-activated high-strength crushed stone concretes and fibrobetons with low specific cement consumption per unit strength]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja*. 2011; 5: 161-164. (In Russ.)
21. Javinskij A. V., Chulkova I. L. Vlijanie zoly gidroudalenija na svojstva tjazhelogo betona dlja stroitel'stva dorozhnogo pokrytija [Influence of hydraulic removal ash on the properties of heavy concrete for the construction of the road surface]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova*. 2022; 3: 16-24. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Явинский Александр Викторович – преподаватель кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», SPIN-код: 4276-7420.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksander V. Javinskii – Postgraduate student of the Industrial and Civil Engineering Department, teacher of the Technosphere and Environmental Safety Department, SPIN-код: 4276-7420.