

## Цементы низкой водопотребности – эффективные строительные материалы для утилизации золошлаковых смесей ТЭЦ

*С.В. Макаренко<sup>1</sup>, О.В. Хохряков<sup>2</sup>, Хозин В.Г.<sup>2</sup>, Беляков А.Ю.<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
г. Казань*

*<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск*

**Аннотация:** Показана эффективность золы-уноса Ново-Иркутской ТЭЦ и золошлаковой смеси с ТЭЦ-10, образующихся при сжигании твердотопливных ископаемых АО «Иркутскэнерго», в составе цементов низкой водопотребности. Определены химический состав и физико-технические свойства этих отходов. Изучена размолоспособность и рассчитаны удельные энергозатраты цементов с различным содержанием зол (30-70 %). Установлено, что цементы низкой водопотребности с золой-уноса и ЗШС по технологическим и физико-механическим показателям не уступают портландцементу, и могут быть рекомендованы для применения в строительстве.

**Ключевые слова:** крупнотоннажные отходы, золошлаковые смеси, размолоспособность, цемент низкой водопотребности, суперпластификатор

Сегодня в России на долю тепловых электростанций, сжигающих твердое топливо, приходится до 80 % вырабатываемой электроэнергии [1–3]. В результате образуются миллионы тонн зол-уноса, которые удаляются с помощью электрофильтров, а также золошлаковые смеси (ЗШС), утилизирующиеся по системам гидроудаления [4,5].

Проблемная ситуация с ними сложилась за годы эксплуатации АО «Иркутскэнерго» (Иркутская обл.), где накопилось свыше 90 млн. тонн этих отходов с ежегодным приростом порядка 1,7 млн. тонн. При этом переход на альтернативный вид топлива или реконструкция местных ТЭС в ближайшем будущем не планируются. По некоторым оценкам [6] объем прогнозных ресурсов твердотопливных ископаемых составляет около 200 млрд. т., следовательно, накопление зол-уноса и ЗШС из года в год будет непрерывно возрастать.

Необходимость сокращения накопленных отходов от сжигания твердого топлива соответствует научно-технологическому развитию Российской Федерации, которое отражено, например, в Постановлении правительства Российской Федерации № 1557-р от 15.06.2022 г., обязывающего их снижение к 2035 году в два раза.

Применение зол-уноса и ЗШС в производстве строительных материалов является одним из перспективных направлений. Ранее [7–9] с их использованием были разработаны составы и технология получения искусственных пористых заполнителей (безобжиговой гравий, аглопоритовый и зольный гравий и т.д.) для легких бетонов, глинозольного кирпича и цементных вяжущих, таких как золопортландцемент, известково-зольный цемент, портландцементный клинкер с золой и др.

По нашему мнению, весьма эффективно отходы могут проявить себя в составе цементов низкой водопотребности (ЦНВ) – вяжущих, получаемых путем совместного или отдельно-последовательного помола портландцемента (или его клинкера), минеральной добавки и суперпластификатора. Несмотря на повышенную дисперсность и, соответственно, водопотребность зол-уноса и ЗШС, могут быть получены ЦНВ с высокими физико-механическими показателями.

В работе изучено два отхода: зола-уноса Ново-Иркутской ТЭЦ и ЗШС с ТЭЦ-10 АО «Иркутскэнерго». В табл. 1 представлен их химический состав, табл. 2 – физико-технические свойства, а именно - истинная ( $\rho_{ист}$ ) и насыпная ( $\rho_n$ ) плотности, пустотность ( $\Pi$ ), удельная поверхность ( $S_{уд}$ ), рН 10 %-ного раствора и водотвердое отношение (В/Т), соответствующее нормальной густоте по методике ГОСТ 310.3.

Таблица № 1

## Химический состав золы-уноса и ЗШС

Наименование отходов	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Прочие*	п.п.п.	Сумма
ЗШС ТЭЦ-10	0,22	1,68	22,19	55,01	0,10	0,34	1,38	4,82	0,06	6,64	0,77	6,72	99,85
Зола-унос (Ново-Иркутская)	0,19	2,92	15,6	56,37	0,13	1,56	0,75	13,27	0,11	7,14	0,61	1,20	99,91

\* - включает оксиды TiO<sub>2</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O, NiO, CuO, ZnO, Rb<sub>2</sub>O, SrO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> PbO, BaO

Таблица № 2

## Физико-технические свойства золы-уноса и ЗШС

Наименование отходов	ρ <sub>н</sub> , г/см <sup>3</sup>	ρ <sub>ист</sub> , г/см <sup>3</sup>	S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /кг	П, %	В/Т, %	рН
ЗШС ТЭЦ-10	0,76	2,05	134	63	40	9,6
Зола-унос (Ново-Иркутская)	0,77	2,33	279	67	34	12,0

Как видно из табл. 1, они имеют близкий химический состав с преобладанием двух окислов: SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. По классификации Е.А. Галибиной [10] они относятся к алюмосиликатным и низкокальциевым золам, как правило, обладающим пуццолановой активностью. По физико-техническим свойствам они представляют собой тонкодисперсные порошки, обладающие значительной пустотностью. Несмотря на преобладание кислых оксидов в составе зол, значения рН водных вытяжек большинства зол дают основную среду, что также подтверждается изменением окраса индикатора (фенолфталеин принимал малиновый цвет).

ЦНВ получали путем совместного помола в вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3 портландцемента ЦЕМ I 42,5 Б (ОАО «Мордовцемент»), суперпластификатора С-3 и одной из двух зол с Ново-Иркутской ТЭЦ или ТЭЦ-10. Показатели размолоспособности ЦНВ-30, 50, 70 в зависимости от содержания зол (30-70 %) и добавки суперпластификатора (1, 2 или 3 % от массы ЦНВ) приведены в табл. 3 и табл. 4. Масса навески на помол принята постоянной – 1 кг.

Для количественной оценки эффективности помола ЦНВ с отходами были введены следующие параметры:

1. Коэффициент размолоспособности,  $\text{м}^2/\text{мин}$ :

$$K_{\text{разм}} = (S_{\text{кон}} - S_{\text{исх}}) \cdot m / \Delta\tau \quad (1)$$

где:  $S_{\text{исх}}$  – удельная поверхность в начальное время  $\tau_1$ ;

$S_{\text{кон}}$  – удельная поверхность через определенное время помола  $\tau_2$ ;

$$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1 \text{ (мин.)};$$

$m$  – масса измельчаемого материала, кг

2. Удельные энергозатраты ( $\mathcal{E}$ ,  $\text{кВт} \cdot \text{час}/\text{м}^2$ ) на прирост единицы удельной поверхности ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ):

$$\mathcal{E} = N \cdot \Delta\tau / (m \cdot \Delta S) \quad (2)$$

где:  $N$  – мощность электродвигателя мельницы (3 кВт);

$\Delta\tau$  – время помола (час);

$\Delta S$  – прирост удельной поверхности ( $\text{м}^2/\text{кг}$ ) за время помола  $\Delta\tau$  (час).

Таблица № 3

Размолоспособность ЦНВ с золой-уноса Ново-Иркутской ТЭЦ

Тип ЦНВ/ содержание С-3	Время помола $t$ , мин	Удельная пов-ть, $\text{м}^2/\text{кг}$		Коэффициент размолоспособности $K_{\text{разм}}$ , $\text{м}^2/\text{мин}$	Удельные энергозатраты $\mathcal{E}$ , ( $\Delta S=1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) $\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$
		исходная $S_{\text{исх}}$	конечная $S_{\text{кон}}$		
ЦНВ-30/1	6,5	445	525	12,3	4,1
ЦНВ-30/2	5,7	445	525	14,0	3,6
ЦНВ-30/3	5,0	445	523	15,6	3,2
ЦНВ-50/1	5,3	418	520	19,2	2,6
ЦНВ-50/2	4,3	418	515	22,6	2,2
ЦНВ-50/3	5,0	418	535	23,4	2,1
ЦНВ-70/1	7,0	391	533	20,3	2,5
ЦНВ-70/2	5,2	391	515	23,8	2,1
ЦНВ-70/3	5,7	391	530	24,4	2,1

Из табл. 3 следует, что с увеличением содержания суперпластификатора возрастает размолоспособность ЦНВ. Например, сравнение ЦНВ-30/1 и ЦНВ-30/3 приводит к росту коэффициента  $K_{разм}$  на 26,8 %. При этом удельные энергозатраты снижаются на 22 %. Оказалось, что увеличение доли золы в составе ЦНВ ухудшает его размолоспособность и приводит к росту удельных энергозатрат. Это следует из сравнения ЦНВ-30, 50, 70 с одинаковым содержанием суперпластификатора. Например, для ЦНВ-30/1 и ЦНВ-70/1 коэффициент  $K_{разм}$  возрос с 12,3 до 20,3, т.е. в 1,65 раза.

Таблица № 4

Размолоспособность ЦНВ с ЗШС ТЭЦ-10

Тип ЦНВ/ содержание С-3	Время помола $t$ , мин	Удельная пов-ть, $m^2/kg$		Коэффициент размолоспособности $K_{разм}, m^2/мин$	Удельные энергозатраты $\Delta$ , ( $\Delta S=1000 m^2/kg$ ) $кВт*ч/m^2$
		исходная $S_{исх}$	конечная $S_{кон}$		
ЦНВ-30/1	16,7	199	525	19,6	2,6
ЦНВ-30/2	15,0	199	525	21,7	2,3
ЦНВ-30/3	14,4	199	523	22,5	2,2
ЦНВ-50/1	14,5	242	520	19,2	2,6
ЦНВ-50/2	13,7	242	510	19,6	2,5
ЦНВ-50/3	12,7	242	535	23,1	2,2
ЦНВ-70/1	13,3	285	533	18,6	2,7
ЦНВ-70/2	12,0	285	515	19,2	2,6
ЦНВ-70/3	11,3	285	530	21,6	2,3

Несмотря на относительно длительное время помола (11,3...16,7 мин), получены аналогичные зависимости для ЦНВ с использованием золы ТЭЦ-10 (табл. 4), т.е. суперпластификатор способствует росту размолоспособности и снижению удельных энергозатрат. В отличие от золы Ново-Иркутской ТЭЦ увеличение доли золы ТЭЦ-10 существенно не отражается на изменении этих показателей.

Далее были определены физико-механические показатели ЦНВ, а именно нормальная густота (НГ), плотность ( $\rho_{цк}$ ) и прочность на сжатие цементного камня ( $R_{сж}$ ) на образцах  $2 \times 2 \times 2$  см, расплыв конуса (РК), водоцементное отношение (В/Ц) и прочность на сжатие цементно-песчаного раствора ЦПР ( $R_{сж}$ ) на образцах-балочках  $4 \times 4 \times 16$  см. Методики изготовления и испытания образцов – ГОСТ 310.3 и ГОСТ 310.4. Твердение – при пропаривании проводили по режиму  $2+(3+12+2)=19$  часов при температуре выдержки  $t=60^\circ\text{C}$ . Результаты испытаний представлены в табл. 5.

Таблица № 5

Физико-механические свойства ЦНВ на основе золы-уноса и ЗШС

Тип ЦНВ/ содержание С-3	$S_{уд}$ , $\text{м}^2/\text{кг}$	НГ, %	$R_{сж}$ , МПа (ЦК)	$\rho_{цк}$ , $\text{г}/\text{см}^3$	РК, мм	В/Ц	$R_{сж}$ , МПа (ЦПР)
ЦЕМ I 42,5	350	0,27	47,6	2,05	110	0,42	34,7
ЦНВ с золой-уноса Ново-Иркутской ТЭЦ							
ЦНВ-30/1	525	0,33	42,4	2,02	110	0,37	26,6
ЦНВ-30/2	525	0,31	43,5	2,03	107	0,34	26,8
ЦНВ-30/3	523	0,31	43,3	2,05	113	0,33	25,8 (д)
ЦНВ-50/1	520	0,31	48,2	2,08	113	0,39	34,4
ЦНВ-50/2	515	0,28	43,8	2,06	111	0,34	39,1
ЦНВ-50/3	535	0,26	46,2	2,06	114	0,33	36,9 (д)
ЦНВ-70/1	533	0,27	54,2	2,14	113	0,37	39,7
ЦНВ-70/2	515	0,25	56,1	2,20	115	0,35	44,9
ЦНВ-70/3	530	0,24	60,9	2,20	110	0,32	51,5
ЦНВ с ЗШС ТЭЦ-10							
ЦНВ-30/1	520	0,33	35,7	1,81	110	0,37	47,8
ЦНВ-30/2	590	0,3	37,4	1,91	115	0,35	18,4 (д)
ЦНВ-30/3	587	0,28	5,7 (д)	1,83	106	0,34	16,3 (д)
ЦНВ-50/1	530	0,31	48,6	1,84	109	0,31	45,7
ЦНВ-50/2	560	0,28	45,8	1,89	112	0,35	46,0
ЦНВ-50/3	550	0,26	40,5	1,92	112	0,33	39,6 (д)
ЦНВ-70/1	550	0,30	59,0	1,98	106	0,37	55,2
ЦНВ-70/2	535	0,26	72,0	2,00	111	0,34	60,8
ЦНВ-70/3	547	0,25	64,7	2,05	108	0,31	63,9

«д» – после пропаривания произошло поверхностное растрескивание образцов

Из табл. 5 следует, что, несмотря на повышенную водопотребность (по НГ), на основе зол Ново-Иркутской ТЭЦ и ТЭЦ-10 могут быть получены ЦНВ, по свойствам превосходящие портландцемент ЦЕМ I 42,5. Наиболее прочным оказался ЦНВ-70/3 с золой ТЭЦ-10. Его прочность при сжатии превысила прочность ЦЕМ I 42,5 в 1,8 раза. Обнаружено, что при относительно невысокой температуре пропаривания (60 °С) часть образцов подверглись поверхностному растрескиванию («д»).

Итак, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что ЦНВ могут стать одним из приоритетных направлений утилизации зольных отходов АО «Иркутскэнерго». Решается важная проблема по сокращению накопления крупнотоннажных отходов, переполнения золошлакоотвалов и загрязнения окружающей среды. При этом по комплексу технологических и физико-механических свойств ЦНВ с золой-уноса и ЗШС не уступают рядовому портландцементу типа ЦЕМ I и, соответственно, могут быть рекомендованы для широкого применения в строительстве.

### Литература

1. Щербаков Е. Золошлаковая революция // Сибирский энергетик. 2015. Т. 444, № 33. URL: [vsp.ru/2015/09/04/zoloshlavkovaya-revoljutsiya-2](http://vsp.ru/2015/09/04/zoloshlavkovaya-revoljutsiya-2) (дата обращения: 10.10.2023).
  2. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // Строительные материалы. 2019. № 4. С. 77–83.
  3. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев, А.И. Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Mag. Civ. Eng. 2011. № 4. С. 16–21.
  4. Гальцева Н.А., Попов П.В., Котов Д.А., Голотенко Д.С. Вторичное использование отходов промышленности // Инженерный вестник Дона, 2022, № 5 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7651](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7651).
-

5. Хамраева Р.Б., Герасимова А.А., Сафронов М.В. Перспективы переработки золошлаковых отходов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2018. Т. 2. № 4 (14). С. 759–761.

6. Коновалова Н.А., Дабижа О.Н., Ярилов Е.В., Корякина Е.А. Утилизация крупнотоннажных отходов производства с целью получения экономически эффективных дорожно-строительных материалов // Вестник Забайкальского государственного университета. 2017. Т. 23. № 10. С. 14–21.

7. Яхонова Д.В., Ляшенко А.Г., Вяльцев А.В. Вторичное использование золошлаковых отходов в дорожном строительстве // Инженерный вестник Дона, 2022, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8025.

8. Bieliatynskiy A., Shilin Ya., Pershakov V., Akmalidina A. Prospects for the Use of Ash and Slag Waste in the Construction of Road Pavement // Balt. J. Road Bridg. Eng. 2022. V. 17. № 4. P. 80–94.

9. Da Silva S.R., Jairo José de Oliveira Andrade. A Review on the Effect of Mechanical Properties and Durability of Concrete with Construction and Demolition Waste (CDW) and Fly Ash in the Production of New Cement Concrete // Sustainability 2022, 14, 6740. URL: doi.org/10.3390/su14116740.

10. Галибина Е.А. Классификация пылевидных зол в зависимости от вещественного состава, обеспечивающего их рациональное направление использования для производства строительных материалов // Исследования по строительству. Долговечность конструкций Сборник статей НИИ стр-ва. Таллин Валгус. 1981. С. 132.

### References

1. Shherbakov E. Zoloshlakovaya revolyuciya. Sibirskij e`nergetik. 2015. V. 444, № 33. URL: vsp.ru/2015/09/04/zoloshlakovaya-revoljutsiya-2.

2. Markov A.Yu., Strokova V.V., Markova I.Yu. Ocenka svojstv toplivny`x zol kak komponentov kompozicionny`x materialov. Stroitel`ny`e materialy`. 2019. № 4. P. 77–83.





3. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev, A.I. Laxtinen P. Primenenie zol i zoloshlakovy`x otkodov v stroitel`stve. Mag. Civ. Eng. 2011. № 4. pp. 16–21.
4. Gal`ceva N.A., Popov P.V., Kotov D.A., Golotenko D.S. Vtorichnoe ispol`zovanie otkodov promy`shlennosti. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7651](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7651)
5. Хамраева R.B., Gerasimova A.A., Safronov M.V. Perspektivy` pererabotki zoloshlakovy`x otkodov. Aktual`ny`e problemy` aviacii i kosmonavtiki. 2018. V. 2. № 4 (14). pp. 759–761.
6. Konovalova N.A., Dabizha O.N., Yarilov E.V., Koryakina E.A. Utilizaciya krupnotonnazhny`x otkodov proizvodstva s cel`yu polucheniya e`konomicheski e`ffektivny`x dorozhno-stroitel`ny`x materialov. Vestnik Zabajkal`skogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. V. 23, № 10. pp. 14–21.
7. Yaxonova D.V., Lyashenko A.G., Vyal`cev A.V. Vtorichnoe ispol`zovanie zoloshlakovy`x otkodov v dorozhnom stroitel`stve. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8025](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8025)
8. Bieliatynskiy A., Shilin Ya., Pershakov V., Akmalidina A. Prospects for the Use of Ash and Slag Waste in the Construction of Road Pavement. Balt. J. Road Bridg. Eng. 2022. V. 17. № 4. pp. 80–94.
9. Da Silva S.R., Jairo José de Oliveira Andrade. A Review on the Effect of Mechanical Properties and Durability of Concrete with Construction and Demolition Waste (CDW) and Fly Ash in the Production of New Cement Concrete. Sustainability 2022, 14, 6740. URL: [doi.org/10.3390/su14116740](https://doi.org/10.3390/su14116740)
10. Galibina E.A. Issledovaniya po stroitel`stvu. Dolgovechnost` konstrukcij Sbornik statej NII str-va. Tallin Valgus. 1981. P. 132.