



УДК 669.531.5

DOI 10.17073/0368-0797-2026-1-14-22



Оригинальная статья

Original article

УДАЛЕНИЕ ХЛОРА ИЗ ПЫЛИ ДУГОВОГО СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА МЕТОДОМ СТАТИЧЕСКОЙ ПРОМЫВКИ ВОДОЙ*

Е. В. Григорьев[✉], Ю. Е. Капелюшин, А. Г. Рязанов,
А. Бильгенов, Д. В. Степанов, А. А. Халикулов

Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

✉ grigorev@susu.ru

Аннотация. Пыль электродугового сталеплавильного производства (ЭДП) представляет собой сложный многокомпонентный отход металлургической промышленности, содержащий такие ценные элементы, как железо и цинк. Однако, помимо железа и цинка, пыль ЭДП бывает загрязнена различными примесями, в частности хлором, что затрудняет её последующую переработку. В работе исследовалась возможность удаления хлора из пыли ЭДП методом статической промывки водой. Определены основные параметры: время выдержки, температурный режим, соотношение твёрдого к жидкому, а также оценена возможность повторного использования отработанной воды. В ходе исследований определены оптимальные параметры процесса промывки пыли водой: время выдержки 1 ч, соотношение твёрдого к жидкому 1:5 – 1:10 и температура в интервале 20 – 40 °С. Показано, что основными хлорсодержащими фазами в пыли являются NaCl и KCl, это подтверждается переходом ионов Na⁺, K⁺ и Cl⁻ в раствор. Максимальный переход хлора достигает 98 %, при этом его содержание в пыли снижается с 2 % до менее 0,2 %. Существенные потери цинка и других ценных элементов не зафиксированы. Установлено, что в исследуемой пыли основной хлорсодержащей фазой является NaCl ввиду того, что наличие натрия в сухих остатках не выявлено. Сложнорастворимые соединения PbOHCl и Pb₂CO₃Cl₂ отсутствуют. В меньшей степени хлор находится в виде KCl, что подтверждается наличием калия в сухом остатке. Также следует отметить активный переход кальция, что может свидетельствовать о наличии гидроксида кальция Ca(OH)₂ в пыли. Дополнительно установлена возможность использования отработанной воды для повторной промывки, что делает метод экологически и экономически целесообразным. Полученные результаты подтверждают эффективность и практическую применимость метода предварительной очистки пыли ЭДП от хлора посредством водной промывки перед последующей переработкой.

Ключевые слова: пыль ЭДП, хлор, цинк, удаление хлора, дехлорирование, переработка, водная промывка

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10120, <https://rscf.ru/project/24-79-10120/>.

Для цитирования: Григорьев Е.В., Капелюшин Ю.Е., Рязанов А.Г., Бильгенов А., Степанов Д.В., Халикулов А.А. Удаление хлора из пыли дугового сталеплавильного производства методом статической промывки водой. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2026;69(1):14–22. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-1-14-22>

* По материалам XVI Международной научной конференции «Физико-химические основы металлургических процессов» имени академика А.М. Самарина.

REMOVAL OF CHLORINE FROM ELECTRIC ARC FURNACE DUST BY STATIC WASHING WITH WATER*

E. V. Grigor'ev[✉], Yu. E. Kapelyushin, A. G. Ryazanov,
A. Bil'genov, D. V. Stepanov, A. A. Khalikulov

South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

✉ grigorevev@susu.ru

Abstract. Electric arc furnace (EAF) dust is a complex multi-component waste of metallurgical industry, containing such valuable elements as iron and zinc. However, in addition to iron and zinc, EAF dust can be contaminated with various impurities, in particular chlorine, which complicates its subsequent processing. The authors investigated the possibility of chlorine removal from EAF dust by static washing with water. The main parameters are washing time, temperature mode, solid-to-liquid ratio, as well as the possibility of reuse of the waste water after washing. During the research, the optimal values of these parameters were determined: washing time of 1 h, solid to liquid ratio of 1:5 – 1:10 and temperature in the range of 20 – 40 °C. The main chlorine-containing phases in the dust are NaCl and KCl, which is confirmed by the transition of Na⁺, K⁺ and Cl⁻ ions into solution. The maximum transition of chlorine reaches 98 %, while its content in the dust decreases from 2 % to less than 0.2 %. Significant losses of zinc and other valuable elements were not recorded. The main chlorine-containing phase in the dust under study is NaCl, since the presence of Na in dry residual portions was not detected. The poorly soluble compounds PbOHCl and Pb₂CO₃Cl₂ are absent. To a lesser extent, chlorine is in the form of KCl, which is confirmed by the presence of K in the dry residual portion. It should also be noted that calcium actively transfers, which may indicate the presence of calcium hydroxide Ca(OH)₂ in the dust. Additionally, the possibility of using waste water for repeated washing was established, which makes the method ecologically and economically feasible. The results obtained confirm the efficiency and practical applicability of the method of preliminary cleaning of EAF dust from chlorine by water washing before subsequent processing.

Keywords: EAF dust, chlorine, zinc, chlorine removal, dechlorination, recycling, water washing

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-79-10120, <https://rscf.ru/project/24-79-10120/>.

For citation: Grigor'ev E.V., Kapelyushin Yu.E., Ryazanov A.G., Bil'genov A., Stepanov D.V., Khalikulov A.A. Removal of chlorine from electric arc furnace dust by static washing with water. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(1):14–22. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-1-14-22>

* Based on the materials of the 16th International Scientific Conference “Physicochemical Foundations of Metallurgical Processes” named after Academician A.M. Samarin.

ВВЕДЕНИЕ

В мире на глобальном уровне остро стоит вопрос переработки металлургических отходов, которые представляют интерес для рециклинга. Одним из подобных отходов является пыль электродуговых печей (ЭДП). Пыль ЭДП образуется во время выплавки стали и накапливается в фильтрах. Основную ценность в ней представляют железо и цинк. Содержание железа варьируется в пределах 20 – 50 %, а содержание цинка 2 – 25 % [1 – 3]. В отвалах металлургических комбинатов Российской Федерации может ориентировочно находиться свыше 30 млн т пыли. При этом большая часть пыли в стране не перерабатывается¹ [4; 5]. Факторами, препятствующими переработке пыли ЭДП, являются сложный и неоднородный морфологический состав, а также присутствие загрязняющих примесей, таких как свинец, фтор и хлор [6 – 8]. При последующем электролитическом получении цинка наличие этих элементов приводит к проблемам удаления осажденного цинка [9], коррозии анода на основе свинца и повышенному расходу электроэнергии.

При проведении пирометаллургической переработки пыли требуется подбор условий ввиду того, что хлор может выступать катализатором высокотоксичных органических соединений в виде диоксинов и фуранов [10 – 12]. Одним из основных направлений по переработке пыли ЭДП является гидрометаллургическая металлургия. Работы проводятся для извлечения цинка, однако при гидрометаллургическом извлечении цинка почти все железо является непригодным для дальнейшей переработки [13; 14].

В литературе представлены методы удаления хлоридов из пыли ЭДП, включая промывку водой [15 – 17], которые являются достаточно эффективными при отсутствии нерастворимых соединений PbOHCl и Pb₂CO₃Cl₂. В работе [15] проведены исследования по водному выщелачиванию хлорид-ионов из пыли ЭДП с первоначальным содержанием хлора 2,14 %. Выявлено, что 99,9 % хлоридов удаляются из пыли при естественном pH = 12 и температуре 25 °C. Содержание хлоридов уменьшилось с 2,14 % до менее 0,02 – 0,04 %, что близко к пределу обнаружения элементов методом XRF.

Аналогичные исследования представлены в статье [18], в которой рассмотрен процесс выщелачивания пыли ЭДП. Эксперименты по промывке водой

¹ World Steel in Figures 2024. Available at URL: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/> (Accessed 12.03.2025).

Таблица 1. Средний состав исследуемой пыли ЭДП, мас. %

Table 1. Average composition of EAF dust, wt. %

Элемент	O	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	Сумма
Среднее значение	27,0	2,3	0,8	2,2	0,8	1,8	1,7	3,9	0,5	4,5	40,2	0,5	12,9	1,0	100,0

проводились с использованием дистиллированной воды. Соотношение твердого вещества к жидкости составляло 1:10, а время промывки варьировалось от 5 до 60 мин. В ходе исследований изучались изменения минерального состава пыли и ее поведение при выщелачивании. Наибольшая скорость дехлорирования наблюдалась в первые 5 мин, при этом основная часть хлоридов удалялась в течение 40 мин. В результате промывки общее содержание хлоридов в пыли снизилось с 70 200 до 17 500 мг/кг, что соответствует эффективности удаления 75 %. Температура оказала значительное влияние на процесс: при 80 °С хлориды удалялись быстрее, чем при комнатной температуре, а общая эффективность удаления достигла 88 %. Однако в данном исследовании эффективность дехлорирования оказалась ниже, чем в работе [15], где эффективность дехлорирования превысила 99 %, что может быть связано с образованием нерастворимых в воде соединений.

Целью данной работы является изучение возможности удаления хлора из пыли одного из крупных металлургических предприятий страны методом статической промывки водой, а также исследование возможности повторного использования отработанной воды для повторной промывки.

МАТЕРИАЛЫ И ПРИБОРЫ

В исследованиях использовалась пыль одного из металлургических предприятий. Средний химический состав исходной пыли представлен в табл. 1.

Согласно данным рентгенофазового анализа и электронной микроскопии, основными хлорсодержащими фазами являются хлорид натрия и хлорид калия (NaCl и KCl). Анализ литературных данных показал, что NaCl и KCl хорошо растворяются в воде. Хлорид натрия имеет следующую растворимость: 35,6 г/100 мл (0 °С); 35,9 г/100 мл (+25 °С); 39,1 г/100 мл (+100 °С). Хлорид калия имеет следующую растворимость: 28,1 г/100 мл (0 °С); 34,0 г/100 мл (+25 °С); 56,7 г/100 мл (+100 °С) [19]. Перед началом экспериментов требовалось определить ряд параметров: время выдержки, температуру, соотношение твердого к жидкому. Результаты экспериментов обрабатывали на следующем оборудовании: спектрометр эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой OPTIMA 2100 DV (точность прибора составляет 5–7 % от массы элемента); сканирующий электронный микроскоп JEOL JSM 6460LV; иономер лаборатор-

ный И 160-МИ; электрод ионоселективный – электрод хлор-селективный ЭЛИС-131С1.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для определения времени выдержки в водном растворе брали по 50 г исходной пыли, заливали 500 мл воды (в разные тары); соотношение твердого к жидкому 1:10. Затем выдерживали определенное время при комнатной температуре. Для определения соотношения твердого к жидкому выдерживали одинаковое время при комнатной температуре и времени выдержки – 1 ч. Для экспериментов выбраны следующие соотношения: 1:1; 1:2; 1:5; 1:15; 1:20. После выдержки раствор сливали, а пробу высушивали. Для определения оптимальной температуры брали навеску исходной пыли, нагретую в сушильном шкафу вместе с водой, далее навеску смешивали в таре при соотношении 1:10 (в разных колбах) и времени выдержки 1 ч. После выдержки раствор сливали, а пробу высушивали. В растворе определяли концентрации хлоридов и других элементов. Остаток после промывки высушивали и анализировали на электронном микроскопе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 2 – 11 представлены результаты по изучению влияния времени выдержки, температуры, соотношения твердого к жидкому, а также эксперименты по повторному использованию отработанной воды.

Определение оптимального времени выдержки

Эксперименты проводились при температуре 20 °С и соотношении твердого к жидкому 1:10. Для каждого времени выдержки проводился один эксперимент.

При электронной микроскопии брали пять спектров и в каждом из них анализировали по три области; в табл. 3 представлено среднее значение по содержанию хлора в сухом остатке.

В результате экспериментов установлен одинаковый переход хлора из пыли в раствор при максимальном и минимальном времени выдержки; в дальнейших экспериментах брали минимальное время выдержки 1 ч. Помимо хлора, в раствор активно переходят следующие компоненты: калий, натрий и кальций. Переход данных элементов свидетельствует о том, что хлор в пыли содержится в виде NaCl и KCl. Также следует отметить активный переход кальция,

Таблица 2. Химический анализ воды при разном времени выдержки, мг/л

Table 2. Chemical analysis of solution after different washing time, mg/L

Выдержка, ч	Метод анализа															
	спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой														прямая ионометрия	
	Al	Ca	Co	Cr	Cu	K	Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Si	Ti	Zn	Cl-ион
1	3,4	361,5	0	1,5	0,1	95,96	1,4	0	597	0	2,0	0,3	2,5	0	0,8	2,91
3	1,3	572,8	0	2,5	0,3	107,3	3,9	0	637	0	1,7	1,8	3,3	0	2,1	2,99
6	1,0	407,4	0	2,1	0	105,4	6,1	0	656	0	1,7	0,5	5,8	0	1,2	2,90
12	7,1	477,9	0	2,5	0,3	102,0	6,9	0,4	605	0	7,4	0,3	6,5	0	2,1	3,25
24	0,3	479,5	0	2,1	0	98,76	4,1	0	597	0	0,6	0,8	4,8	0	0,2	2,96
72	0,4	445,6	0	2,7	0	94,48	2,8	0	559	0	0,2	0,3	5,0	0	1,0	3,13

Таблица 3. Результаты изучения содержания хлора в пыли ЭДП электронной микроскопией при различном времени выдержки, мас. %

Table 3. Results of electron microscopy of chlorine content in EAF dust after different washing time, wt. %

Выдержка, ч	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4	Спектр 5
1	0,29	0,04	0,20	0,29	0,58
72	0	0,16	0,62	0	0,11

Таблица 4. Результаты химического анализа воды при разном соотношении твердое:жидкое, мг/л

Table 4. Results of chemical analysis of solution at different ratios of solid:liquid, mg/L

Твердое:жидкое	Метод анализа*										
	спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой										прямая ионометрия
	Al	Ca	Cr	K	Mg	Na	P	Pb	Si	Zn	Cl-ион
1:1	0,69	893,3	9,60	500,0	1,03	500,00	0,22	0,12	5,79	2,20	24,70
1:2	0,26	1083,0	3,61	455,9	3,59	500,00	0,13	0,09	4,86	1,52	12,10
1:5	0,23	678,7	2,41	243,6	2,09	500,00	0,10	0,02	3,57	0,10	6,42
1:15	0,07	299,4	0,93	70,7	1,71	446,62	0,06	0,01	2,70	0	2,36
1:20	0,14	241,9	0,70	52,5	2,00	326,92	0,17	0,21	2,90	0	1,77

* Содержание следующих элементов: Cu, Ti, Ni, Co, Fe, Mn не выявлено.

Таблица 5. Результаты электронной микроскопии пыли при разном соотношении твердое:жидкое, мас. %

Table 5. Results of electron microscopy of EAF dust at different ratios solid:liquid, wt. %

Твердое:жидкое	Элемент													Сумма
	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	
1:1	17,31	1,18	0,62	3,06	0,33	0,32	0,56	4,29	0,73	5,23	50,77	0,84	14,77	100,00
1:2	15,28	1,12	0,36	2,63	0,40	0,31	0,56	4,29	0,54	5,60	52,00	0,75	16,16	100,00
1:5	16,65	1,32	0,38	2,64	0,26	0,45	0,40	4,69	0,74	5,55	50,95	0,48	15,64	100,00
1:15	15,59	1,21	0,38	2,86	0,25	0,19	0,47	4,04	0,70	5,47	52,79	0,46	15,59	100,00
1:20	17,21	1,45	0,20	2,89	0,13	0,18	0,27	4,45	0,84	5,26	50,77	0,85	15,52	100,00

Таблица 6. Результаты химического анализа воды при разной температуре, мг/л

Table 6. Results of chemical analysis of solution at different temperatures, mg/L

Температура, °С	Метод анализа *											
	спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой											прямая ионометрия
	Al	Ca	Cr	Cu	K	Mg	Na	P	Ti	Si	Zn	Cl-ион
40	0,16	463,38	1,34	0,50	100,48	9,66	706,77	0,06	0,29	3,05	0,51	3,16
60	1,17	438,08	1,67	0,23	103,37	2,78	649,62	0,11	0,22	254,00	0,52	3,19
80	0,13	302,66	1,22	0,01	90,84	2,21	544,09	0,08	0,25	2,97	0,75	2,84

* Содержание следующих элементов: Ni, Co, Fe, Mn и Pb не выявлено.

Таблица 7. Результаты электронной микроскопии пыли ЭДП при разной температуре мас. %

Table 7. Results of electron microscopy of EAF dust at different temperatures, wt. %

Температура, °С	Элемент													Сумма
	O	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	
40	18,25	1,15	0,52	3,08	0,19	0,52	4,10	0,43	5,39	49,69	0,59	15,22	0,94	100,00
60	17,57	1,04	0,69	2,79	0,19	0,25	4,42	0,70	5,34	50,87	0,80	14,61	0,97	100,00
90	17,55	1,41	0,38	3,31	0,11	0,62	4,44	0,51	5,40	50,79	0,47	14,02	1,16	100,00

Таблица 8. Результаты химического анализа воды при повторной промывке водой «П2», мг/л

Table 8. Results of chemical analysis of water after repeated washing with waste water "P2", mg/L

Промывка	Метод анализа *											
	спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой											прямая ионометрия
	Al	Ca	Cr	Cu	K	Mg	Mn	Na	Pb	Si	Zn	Cl-ион
После первой промывки	1,4	427,95	2,5	1,9	112,2	0,6	0,2	500	0,1	2,2	12,2	3,70
П2 (навеска 1)	4,3	926,30	3,7	1,5	270,1	4,2	0,6	500	0,1	6,4	10,5	6,37
П2 (навеска 2)	0,2	940,52	3,9	0	264,0	2,4	0	500	0	2,0	0,34	6,25
П2 (навеска 3)	0,2	1014,4	4,0	0,3	283,1	2,2	0	500	0,1	2,1	0,44	6,24

* Содержание следующих элементов: Ti, Ni, Co, Fe и P не выявлено.

Таблица 9. Результаты электронной микроскопии твёрдого остатка пыли после повторной промывки «П2», мас. %

Table 9. Results of electron microscopy of solid dust residual portion after repeated washing with waste water "P2", wt. %

Промывка	Элемент													Сумма
	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	
П2 (1)	16,63	1,18	0,40	3,16	0,37	0,25	0,48	4,56	0,73	5,62	52,00	0,73	13,88	100,00
П2 (2)	17,09	0,94	0,49	3,32	0,19	0,19	0,62	4,34	0,74	5,38	55,53	0,74	13,61	100,00
П2 (3)	16,29	1,71	0,77	3,19	0,34	0,18	0,41	4,12	0,79	5,28	52,69	0,74	13,86	100,00

Таблица 10. Результаты химического анализа воды после повторной промывки «ПЗ», мг/л

Table 10. Results of chemical analysis of solution after additional repeated washing with waste water “P3”, mg/L

Промывка	Метод анализа*												
	спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой												прямая ионометрия
	Al	Ca	Cr	Cu	K	Mg	Mn	Na	P	Pb	Si	Zn	
Смешанная вода после П2	0,21	484,66	2,33	0,01	190,75	2,78	0	500	0,10	0	0,73	0,33	5,05
ПЗ (навеска 1)	0,35	754,29	3,14	0,11	316,06	6,32	0,01	500	0,07	0	1,32	0,56	7,20
ПЗ (навеска 2)	0,23	781,73	3,17	0,01	315,30	6,12	0,01	500	0,08	0,05	0,14	0,62	6,88
ПЗ (навеска 3)	0,53	807,38	3,03	0,29	318,48	7,92	0,02	500	0,30	0,06	0,13	0,75	6,59

* Содержание следующих элементов: Ti, Ni, Co, Fe и P не выявлено. Для Na представлены предельные значения анализа (≥ 500 мг/л).

Таблица 11. Результаты электронной микроскопии пыли после повторной промывки «ПЗ», мас. %

Table 11. Results of electron microscopy of EAF dust after repeated washing with waste water “P3”, wt. %

Промывка	Элемент													Сумма
	O	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb	
ПЗ (1)	17,85	1,14	0,52	3,09	0,16	0,38	4,18	0,63	5,58	50,40	0,60	14,34	1,11	100,00
ПЗ (2)	17,33	1,53	0,41	2,96	0,15	0,49	4,41	0,56	5,58	50,87	0,57	14,45	0,69	100,00
ПЗ (3)	17,43	1,17	0,43	3,32	0,19	0,48	4,50	0,75	5,48	49,78	0,51	14,77	1,20	100,00

что может свидетельствовать о наличии гидроксида кальция в пыли.

Определение влияния соотношения твердого к жидкому

Эксперименты проводились при температуре 20 °C и времени выдержки 1 ч. Для каждого соотношения твердого к жидкому выполнялся один эксперимент. В результате экспериментов установлено, что оптимальные соотношения твердого к жидкому составляют 1:5 и 1:10 (благодаря удобству фильтрации и высокой достоверности результатов). При соотношении 1:1 раствор слишком густой, потери пыли достигают 30 %. Большой объем фильтруемой массы приводит к разрыву фильтра. Потребовались три емкости с двумя фильтрами на каждой. При соотношении 1:2 густота раствора снижается, однако потери пыли достигают 15 % (фильтры также рвутся). Использовались две емкости с одним фильтром. При соотношении 1:5 раствор жидкий, потери пыли около 8 % (фильтрация равномерная без дополнительных емкостей). При соотношении 1:15 и выше потери пыли не наблюдаются, однако происходит перерасход воды (что делает такие соотношения нерациональными).

В табл. 5 представлены средние значения из трех разных точек. Как видно из результатов экспериментов, при разных соотношениях твердого к жидкому

наблюдаются похожие переходы исследуемых элементов. В дальнейшем исследования проводили при соотношении 1:10 ввиду удобства проведения экспериментов.

Статические эксперименты по определению влияния температуры

Эксперименты осуществлялись при времени выдержки 1 ч и соотношении твердого к жидкому 1:10. Для каждой температуры проводился один эксперимент.

В результате исследований при различной температуре установлено следующее: переход хлора осуществляется в полном объеме вне зависимости от температуры, содержание остальных элементов остается на прежнем уровне.

Эксперименты по повторному использованию воды

В целях изучения возможности дехлорирования образцов пыли ЭДП уже отработанной водой, исследовалась возможность многократного использования воды при промывке. Выявлено, что на поверхности отработанной воды и по стенкам тары наблюдается белый хлопьевидный осадок. Химический состав осадка на данном этапе экспериментов не определялся (не удалось собрать нужное количество для проведения

анализа). Предварительно, перед повторной промывкой, вода фильтровалась для удаления осадка. Соотношение твердого к жидкому составляло 1:10, время выдержки 1 ч, подогрев раствора не осуществлялся (комнатная температура). В качестве удобства эксперименты по повторной промывке водой обозначены символами «П2» и «П3». Таким образом, промывка разных партий пыли ЭДП одной и той же водой осуществлялась три раза.

Для оценки воспроизводимости экспериментов отработанной водой промывались повторно несколько одинаковых навесок пыли ЭДП массой 50 г каждая.

В результате повторных промывок отработанной водой обнаружено, что хлор продолжает переходить в воду, однако по некоторым элементам наблюдаются противоречивые данные. Образцы воды П2 (1), П2 (2) и П2 (3) перемешали и провели третью промывку этой же самой водой трех новых навесок пыли массой 50 г. Результаты представлены в табл. 10.

После третьей промывки той же водой можно сделать вывод о переходе хлора в уже использованную воду (после двух промывок).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех экспериментах по статической промывке пыли ЭДП водой наблюдается небольшая потеря массы в пределах 3 – 5 г, что может быть связано с дисперсностью пыли и ее потерями вследствие налипания на стенки стеклянной тары.

Выявлена одинаковая степень переход хлора из пыли ЭДП в раствор при максимальном и минимальном времени выдержки, поэтому в последующих экспериментах использовалось минимальное время выдержки 1 ч. Помимо хлора, отмечается активный переход следующих элементов в раствор: K^+ , Na^+ и Ca^{2+} ; этому свидетельствуют данные из табл. 2, 3, 5. Переход данных элементов указывает на то, что хлор в пыли содержится в виде $NaCl$ и KCl . Также следует отметить активный переход кальция, что может свидетельствовать о наличии гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ в пыли.

При проведении экспериментов отмечено, что оптимальным соотношением твердого к жидкому являются диапазоны 1:5 или 1:10, что связано с удобством проведения экспериментов и наибольшей достоверностью.

В табл. 4, 5 представлены средние значения из трех разных точек. Как видно из результатов эксперимента, при разных соотношениях твердого к жидкому наблюдаются похожие переходы изучаемых элементов.

В результате экспериментов при различной температуре установлено следующее: переход хлора осуществляется в полном объеме вне зависимости от температуры, содержание остальных элементов остается на прежнем уровне. Однако важно отметить повышение адсорбции тяжелых металлов в раствор, а также увеличение скорости протекания реакций.

После повторной промывки установлено, что хлор продолжает переходить в воду, степень дехлорации новых партий пыли ЭДП составила порядка 86 %. Потери цинка не выявлены. Результаты после повторных экспериментов представлены в табл. 8 – 11. В пробе после первого применения воды для промывки содержание хлорид-ионов составляло 3,7 мг/л, а после второго использования воды для промывки (эксперименты П2) среднее содержание хлорид-ионов в воде увеличилось до 6,5 мг/л. После третьего применения той же самой воды (эксперименты П3) содержание хлорид-ионов достигло 7,2 мг/л. В свою очередь, количество хлора в каждой партии пыли ЭДП, промытой одной и той же водой, не превышает 0,2 мас. %.

Выводы

Достаточно эффективным методом дехлорирования пыли ДСП является промывка водой при отсутствии нерастворимых соединений $PbONCl$ и $Pb_2CO_3Cl_2$. При проведении статических экспериментов выявлены следующие параметры: для лабораторных условий оптимальное время выдержки с целью перевода хлора в водный раствор составляет 1 ч, соотношение твердого к жидкому в пределах 1:5 – 1:10. При этом установлено, что в исследуемом материале основной хлорсодержащей фазой является $NaCl$, что следует из данных табл. 3, 4 при анализе на электронном микроскопе, наличие натрия в сухих остатках не выявлено. В меньшей степени хлор находится в виде KCl , что подтверждается наличием калия в сухом остатке. В связи с высоким переходом кальция в раствор можно сделать вывод о том, что кальций частично содержится в виде соединения $Ca(OH)_2$, которое обладает хорошей растворимостью в воде. Установлена возможность многократного использования одной и той же отработанной воды для промывки пыли ЭДП от хлора, при этом в проведенных экспериментах не удалось достичь полного насыщения раствора по хлору.

Во всех экспериментах наблюдается стабильный переход иона хлора в водный раствор, степень его перехода достигает 98 %. Содержание хлора в исходной пыли с 2 мас. % снижается до 0,2 мас. % после статической промывки водой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Рошин В.Е., Рошин А.В. Электрометаллургия и металлургия стали: Учебник. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2013:572.
2. Снурников А.А. Гидрометаллургия цинка: Учебник. Москва: Металлургия; 1981:384.
3. Зайцев В.Я. Металлургия свинца и цинка. Москва: Металлургия; 1985:262.
4. Топоркова Ю.И., Блудова Д., Мамяченков С.В., Анисимова О.С. Обзор методов переработки пылей электроду-

- говой плавки. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):643–680.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>
- Toporkova Yu.I., Bludova D., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. A review of processing methods for electric arc furnace dust. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):643–680. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-643-680>
5. Козлов П.А. Вельц-процесс. Москва: ИД «Руда и металлы»; 2002:173.
 6. Рязанов А.Г., Михайлов Г.Г., Сенин А.В., Соколов Д.И. Эффективность удаления хлоридов из цинксодержащих продуктов в зависимости от параметров прокаливании электромагнитным полем СВЧ. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Metallurgy*. 2021;21(2):18–29.
Ryazanov A.G., Mikhailov G.G., Senin A.V., Sokorov D.I. Efficiency of chloride removal from zinc-containing products depending on the parameters of calcination by microwave electromagnetic field. *Bulletin of South Ural State University. Metallurgy*. 2021;21(2):18–29. (In Russ.).
 7. Chmielarz A., Gnot W. Conversion of zinc chloride to zinc sulphate by electro dialysis – a new concept for solving the chloride ion problem in zinc hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2001;61(1):21–43.
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00153-0)
 8. Li C.L., Tsai M.S. A crystal phase study of zinc hydroxide chloride in electric-arc-furnace dust. *Journal of Materials Science*. 1993;28:4562–4570.
<https://doi.org/10.1007/BF00414243>
 9. Adhia J.D. Effect and control of impurities in electrolytic zinc production. In: *Symposium on Non-Ferrous Metals Technology. Vol. III: Nickel, Lead, Zinc, Rare earth and Nuclear Metals. NML, Jamshedpur*; 1969:1–10.
 10. Симонян Л.М., Демидова Н.В. Диоксины и фураны в цинксодержащей металлургической пыли: процессы формирования и поведение. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(7):557–563.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-7-557-563>
Simonyan L.M., Demidova N.V. Dioxins and furans in zinc-containing metallurgical dust: behavior and formation processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(7):557–563. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-7-557-563>
 11. Симонян Л.М., Демидова Н.В. Изучение поведения диоксинов и фуранов в процессе удаления цинка и свинца из пыли ДСП. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(11):840–845.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-840-845>
Simonyan L.M., Demidova N.V. Dioxins and furans' behavior in the process of zinc and lead removing from EAF dust. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(11):840–845. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-840-845>
 12. Stanmore B.R. The formation of dioxins in combustion systems. *Combustion and Flame*. 2004;136(3):398–427.
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.11.004>
 13. Yoo J.G., Kim G.S., Jo Y.M. Separation of chlorides from EAF dust. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2004;10:894–898.
 14. Iliiev P., Stefanova V., Lucheva B., Kolev D. Purification of zinc containing Waelz oxides from chlorine and fluorine. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2017;52(2):252–257.
 15. Bruckard W.J., Davey K.J., Rodopoulos T., Woodcock J.T., Italiano J. Water leaching and magnetic separation for decreasing the chloride level and upgrading the zinc content of EAF steelmaking baghouse dusts. *International Journal of Mineral Processing*. 2005;75(1-2):1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.04.007>
 16. Wang Q., Yang J., Wang Q., Wu T. Effects of water-washing pretreatment on bioleaching of heavy metals from municipal solid waste incinerator fly ash. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;162(2–3):812–818.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.125>
 17. Блудова Д.И., Мамяченков С.В., Анисимова О.С. Методы удаления хлорид-ионов при производстве цинка из пыли электродуговой плавки. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):392–421.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-392-421>
Bludova D.I., Mamyachenkov S.V., Anisimova O.S. Methods for removing chloride ions to manufacture zinc from arc melting dust. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):392–421. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-392-421>
 18. Chen W.-S., Shen Y.-H., Tsai M.-S., Chang F.-C. Removal of chloride from electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2011;190(1–3):639–644.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.096>
 19. Некрасов Б.В. Основы общей химии: Т. 1. Москва: Химия, 1973:656.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Евгений Вячеславович Григорьев, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет
E-mail: grigorev@susu.ru

Юрий Евгеньевич Капелюшин, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет
ORCID: 0000-0002-3352-1780
E-mail: kapelyshnye@susu.ru

Андрей Геннадьевич Рязанов, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Материаловедение и физико-химия материалов», Южно-Уральский государственный университет
ORCID: 0000-0002-3727-8757
E-mail: riazanovag@susu.ru

Evgenii V. Grigor'ev, Research Engineer of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University
E-mail: grigorev@susu.ru

Yurii E. Kapelyushin, Senior Researcher of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University
ORCID: 0000-0002-3352-1780
E-mail: kapelyshnye@susu.ru

Andrei G. Ryazanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Materials Science and Physical Chemistry of Materials, South Ural State University
ORCID: 0000-0002-3727-8757
E-mail: riazanovag@susu.ru

Арман Бильгенов, старший преподаватель кафедры «Пирометаллургические и литейные технологии», Южно-Уральский государственный университет

ORCID: 0009-0001-8592-7870

E-mail: bilgenova@susu.ru

Дмитрий Владимирович Степанов, инженер-исследователь управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет

E-mail: aqaseq@gmail.com

Артур Алексеевич Халикулов, лаборант управления научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет

E-mail: artur.dragonil@mail.ru

Arman Bil'genov, Senior Lecturer of the Chair "Pyrometallurgical and Foundry Technologies", South Ural State University

ORCID: 0009-0001-8592-7870

E-mail: bilgenova@susu.ru

Dmitrii V. Stepanov, Research Engineer of Department of Scientific and Innovation Activities, South Ural State University

E-mail: aqaseq@gmail.com

Artur A. Khalikulov, Laboratory Assistant of Department of Scientific and Innovation Activities, South Ural State University

E-mail: artur.dragonil@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Е. В. Григорьев – проведение исследований, обработка данных, написание статьи.

Ю. Е. Капелюшин – руководство, написание статьи, редактирование статьи.

А. Г. Рязанов – постановка экспериментов, участие в написании статьи.

А. Бильгенов – редактирование статьи, анализ литературных данных.

Д. В. Степанов – проведение экспериментов, написание статьи, подготовка литературного обзора.

А. А. Халикулов – проведение экспериментов.

E. V. Grigor'ev – conducting the research, data processing, writing the text.

Yu. E. Kapelyushin – scientific guidance, writing and editing the text.

A. G. Ryazanov – conducting the experiments, writing the text.

A. Bil'genov – editing the text, analysis of literary data.

D. V. Stepanov – conducting the experiments, writing the text, preparing a literary review.

A. A. Khalikulov – conducting the experiments.

Поступила в редакцию 20.05.2025

После доработки 02.07.2025

Принята к публикации 28.08.2025

Received 20.05.2025

Revised 02.07.2025

Accepted 28.08.2025