

## К оценке параметров дисперсного состава частиц твердых ингредиентов в выделениях электросталеплавильного цеха

*К.С. Кошкарёв, С.А. Кошкарёв, А.Н. Курасов, Р.А. Лясин*  
*Волгоградский государственный технический университет*

**Аннотация:** Предприятия черной металлургии ежегодно выбрасывают в атмосферу значительное количество высокодисперсной пыли с размером частиц 10 мкм и менее. В статье представлены результаты выполненного исследования по определению дисперсного состава аэрозолей твердых ингредиентов в выделениях электросталеплавильного цеха. На основании результатов комплексного оптического анализа были определены фракционный состав, среднемедианные значения эквивалентных размеров частиц пыли и получены интегральные зависимости плотности распределения по эквивалентным размерам (диаметрам)  $D$  для принятых к исследованию ингредиентов. Математическая обработка результатов исследований позволила получить регрессионные зависимости плотности распределения  $D$  как функции эквивалентных размеров частиц пыли. На основании проведенного исследования сделан вывод о возможности применения пылеуловителей инерционного типа в системах обеспыливания с целью повышения экологической безопасности сталеплавильного цеха.

**Ключевые слова:** металлургия, аэрозоль, пыль, ингредиент, частица, пылеуловитель, электросталеплавильный цех, дисперсный анализ, плотность распределения, среднемедианный диаметр,  $d_{450}$

### Введение

Предприятия по производству стали составляют существенную базовую основу промышленности России. В соответствии со статистическими данными, до 30-40 % всех валовых выбросов загрязняющих веществ РФ относятся к предприятиям металлургического комплекса [1,2]. На долю предприятий металлургии комплекса приходится до 20% общих загрязнений атмосферы промышленностью, в районах расположения крупных металлургических комбинатов – до 50% [3]. Валовые выделения твердых загрязняющих веществ, относящихся к предприятиям сталеплавильного производства, например, поступающих на источники неорганизованных выбросов или на очистку систем аспирации, по различным имеющимся данным составляют около 20% от общего объема выбросов стационарных источников [1]. В принятом Распоряжении Правительства РФ от 28.12.2022 N 4260-р 2022 г. стратегии развития промышленного производства России до 2030 года установлены показатели

существенного роста экономики, в частности, черной металлургии. Так, в металлургической промышленности, предполагается увеличение производства стали в электрических печах, на 42% к 2030 г. (Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 N 4260-р «О Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года»). По данным статистики России, за 11 месяцев 2023 года металлургия увеличила производство на 9,5% по отношению к 2022-му году [3]. Возрастающие объемы производства стали определяют также соответствующий значительный рост объемов выбросов в атмосферу городов частиц твердых ингредиентов широкого гранулометрического и химического состава.

Значительное количество металлургических предприятий находятся в крупных городах в непосредственной близости от жилой застройки высокоурбанизированной территории. В ряде случаев, в санитарно-защитных зонах (СЗЗ) металлургических предприятий расположена жилая застройка. В выбросах предприятий черной металлургии преобладают твердые вещества 2 класса опасности. К первому классу опасности относятся: Cd, Hg, Se, CrO<sub>3</sub>. Ко второму классу опасности в значимых количествах относятся: Co, Ni, Cu, цинка сульфат (в пересчете на цинк), диалюминий триоксид Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в расчете на алюминий), к 3 классу - Vn, Mo, Mn [4,5]. Наиболее существенной экологической опасностью из твердых ингредиентов выбросов черной металлургии обладает цинк, имеющий аккумулирующее негативное влияние на экосистемы [4,5].

Дальнейшее техническое перевооружение черной металлургии предполагает модернизацию и техническое перевооружение в первую очередь систем обеспыливания выбросов аспирации, снижающих негативное техногенное воздействие предприятий отрасли на атмосферу.

Продуктом производства сталеплавильных печей электродугового типа являются различные стали сортов и сплавов по химическому составу: углеродистые и легированные, и ферромарганец (FeMn). В качестве сырья для дуговых сталеплавильных печей (ДСП) используют шихту, которая содержит смесь чушек передельного чугуна и стали, металлического лома, и необходимых по рецептуре, включая процесс раскисления (марганец), и ряд легирующих добавок черных металлов, например, ванадий, хром, никель. В незначительном количестве в шихту, в основном для раскисления, например, для получения легированных сталей специального назначения, добавляют некоторые цветные металлы, например, медь, алюминий, ниобий, свинец и другие.

В работе [6] выполнены исследования с целью возможности замены рукавных фильтров в системе очистки выбросов аспирации электрофильтрами. Результатом работы стали новые перспективные аппараты, в которых одновременно производится коагуляция и агломерация частиц пыли с последующим их улавливанием [7]. В [8] рассмотрены некоторые перспективные способы сепарации пыли из пылегазовоздушных потоков и было предложено улавливать мелкодисперсную пыль с размером менее 50 мкм в устройствах магнитной сепарации при производстве нержавеющей стали. В источнике [9] были проведены исследования дисперсного состава частиц дисперсной пыли металлургического производства.

В источнике [10] представлены результаты исследования характеристик дисперсного и химического состава мелкодисперсных аэрозолей концентрации твердых частиц ингредиентов на неорганизованных источниках выбросов в производстве сталей с использованием оптических методов. В [11,12] приведены результаты исследования характеристик дисперсного состава и среднемедианные значения эквивалентных размеров

---

мелкодисперсных твердых частиц пыли. Результаты оценки мощности выбросов ингредиентов на неорганизованных источниках в производстве сталей приведена в [13].

В [14] приведены результаты исследований по определению параметров аэрозольных частиц произвольной формы с использованием оптико-электронного метода и компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли.

Химический состав аэрозолей, которые выделяются в основных периодах технологических стадий выплавки стали в дуговой сталеплавильной печи (ДСП), может претерпевать значительные изменения в зависимости от конкретно выплавляемого сорта стали. Максимально-разовые значения массовой концентрации ингредиентов по отношению к суммарному количеству пыли твердых веществ на всех стадия плавки (загрузки шихты, окисления – восстановления и розлив металла) составляют для следующих соединений: код 0123 - оксид железа III ( $Fe_2O_3$ ) - 66%, , код 0101 диалюминий триоксид  $Al_2O_3$  - 0,45%, оксиды марганца ( $MnO$   $MnO_2$ ), код 0143 (марганец и его соединения (в пересчете на марганец (IV) оксид) - 10,15%, код 0323 кремния диоксид  $SiO_2$  -35,22%, код 0128 оксид кальция  $CaO$  -6,3 %, код 0228 хрома трехвалентные соединения (в пересчете на  $Cr(3+)$  )-1,32%, код 0138 оксид магния  $MgO$  - 5,81%, оксид фосфора III  $P_2O_3$  -0,6% [16].

Проведенный обзор даже части литературных источников показывает существенную необходимость дальнейшего изучения проблемы более адекватного учета и нормирования ингредиентов твердых веществ, поступающих на очистку в системы обеспыливания выбросов аспирации и соответственно поступающих в атмосферу. Актуальной остается проблема выбора аппаратов сепарации пыли из пылегазовых потоков систем

---

аспирации источников и неорганизованных источников выбросов сталеплавильных цехов производств черной металлургии [10, 12, 13].

### **Цель и постановка задачи исследования**

Целью работы являлись уточнение химического и дисперсного состава аэрозолей, которые выделяются при выплавке стали от ДСП с учетом состава для более адекватного учета и нормирования ингредиентов твердых веществ выделяющихся в воздух рабочей зоны сталеплавильного цеха. Это актуально при реконструкции, ликвидации неорганизованных источников выбросов, когда места с интенсивным пылевыведением оснащаются отсосами систем аспирации и образуются организованные источники выбросов в атмосферу. Проводимый при этом анализ дисперсного состава аэрозолей, выделяющихся в рабочую зону и производственный объем цеха, и далее поступающих в системы обеспыливания аспирации позволяют принять к установке виды с незначительным проскоком дисперсных частиц  $\varepsilon$  в пылеуловителе. Это определяется величиной среднемедианного размера частиц в пробе каждого ингредиента  $d_{ч50}$ , поступающих на очистку в пылеуловители. При этом необходимо получить выходные параметры по коэффициенту проскока частиц в пылеуловителях, и следовательно, мощности поступления пыли на источниках выбросов аспирации в атмосферу.

### **Основной раздел**

В проведенном исследовании были определены качественный и количественный состав пылей твердых веществ в пылегазоводушной смеси, выделяющейся в воздух рабочей зоны в процессе производства стали на ДСП в электросталеплавильном цехе предприятия. Отбор проб был произведен в соответствии с ГОСТ Р 70230-2022 (ГОСТ Р 70230-2022 Качество воздуха. Методика определения массовой концентрации взвешенных частиц PM<sub>2.5</sub>,

---

PM10 в воздухе рабочей зоны на основе анализа фракционного состава пыли. М. Стандартиформ, 2022).

Дисперсный состав пыли, отобранной из пылегазовоздушной смеси, определялся в соответствии с методикой ГОСТ Р 70230-2022 (ГОСТ Р 70230-2022 Качество воздуха. Методика определения массовой концентрации взвешенных частиц PM2.5, PM10 в воздухе рабочей зоны на основе анализа фракционного состава пыли. М. Стандартиформ, 2022). Дисперсный состав пыли, отобранной из пылегазовоздушной смеси, определялся в соответствии с методикой [14,15].

Подготовленные и отобранные образцы пыли фотографировались электронным микроскопом МБС-10 Микромед. Методикой предполагается проводить исследования с количеством частиц в пробе от 300 до 500 ед.

Обработка полученных изображений проводилась с использованием пакета графического редактора Adobe Photoshop. Определение количества частиц различного диаметра, а также сканирование изображения производится в программном обеспечении SPOTEXPLORER 2018, которое разработано на основе методик, приведенных в [14, 15].

При обработке данных результатов анализа определения фракционного состава пыли с использованием микроскопа МБС-10 Микромед были получены кривые отклика в виде функций распределения частиц по эквивалентным размерам (диаметрам  $d_{\text{ч}}$ )  $D$  интегрального вида для исследуемых ингредиентов, которые изображены на рис. 1. Параметр эквивалентного среднемедианного размера частиц в пробе по видам пыли  $d_{\text{ч}50}$ , получен графическим способом по кривой плотности распределения частиц по размерам  $D$  (см.рис. 1) для значения  $D=50$ .

Для веществ, содержащихся в пробе, при обработке результатов эксперимента с использованием математического аппарата были получены уравнения регрессии для интегральной плотности распределения  $D(d_{\text{ч}})$

---

следующего вида: а) для *Al*, уравнение регрессии в неявном виде логарифмической функции:

$$lg(d_q) = 1,9 * lg(d_q) - 1,13$$

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_q) = 10^{-1,13} * d_q^{1,9}$$

б) для *Ca*, уравнение регрессии в неявном виде логарифмической функции:

$$lg(d_q) = 2,57 * lg(d_q) - 2,76$$

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_q) = 10^{-2,76} * d_q^{2,57}$$

в) для *Fe*, уравнение регрессии в неявном виде логарифмической функции:

$$lg(d_q) = 2,73 * lg(d_q) - 3,03$$

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_q) = 10^{-3,03} * d_q^{2,73}$$

г) для *Mg*, Уравнение кривой в логарифмическом виде:

$$lg(d_q) = 1,24 * lg(d_q) - 0,54$$

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_q) = 10^{-0,54} * d_q^{1,24}$$

д) для *Mn*, Уравнение кривой в логарифмическом виде:

$$lg(d_q) = 2,06 * lg(d_q) - 1,86$$

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_q) = 10^{-1,86} * d_q^{2,06}$$

е) для *Si*, Уравнение кривой в логарифмическом виде:

$$lg(d_q) = 1,69 * lg(d_q) - 1,23$$

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_q) = 10^{-1,23} * d_q^{1,69}$$

ж) для *C*, Уравнение кривой в логарифмическом виде:

$$lg(d_q) = 2,28 * lg(d_q) - 2,64$$

---

в явном виде, - степенной функции:

$$D(d_{\text{ч}}) = 10^{-2,64} * d_{\text{ч}}^{2,28}$$

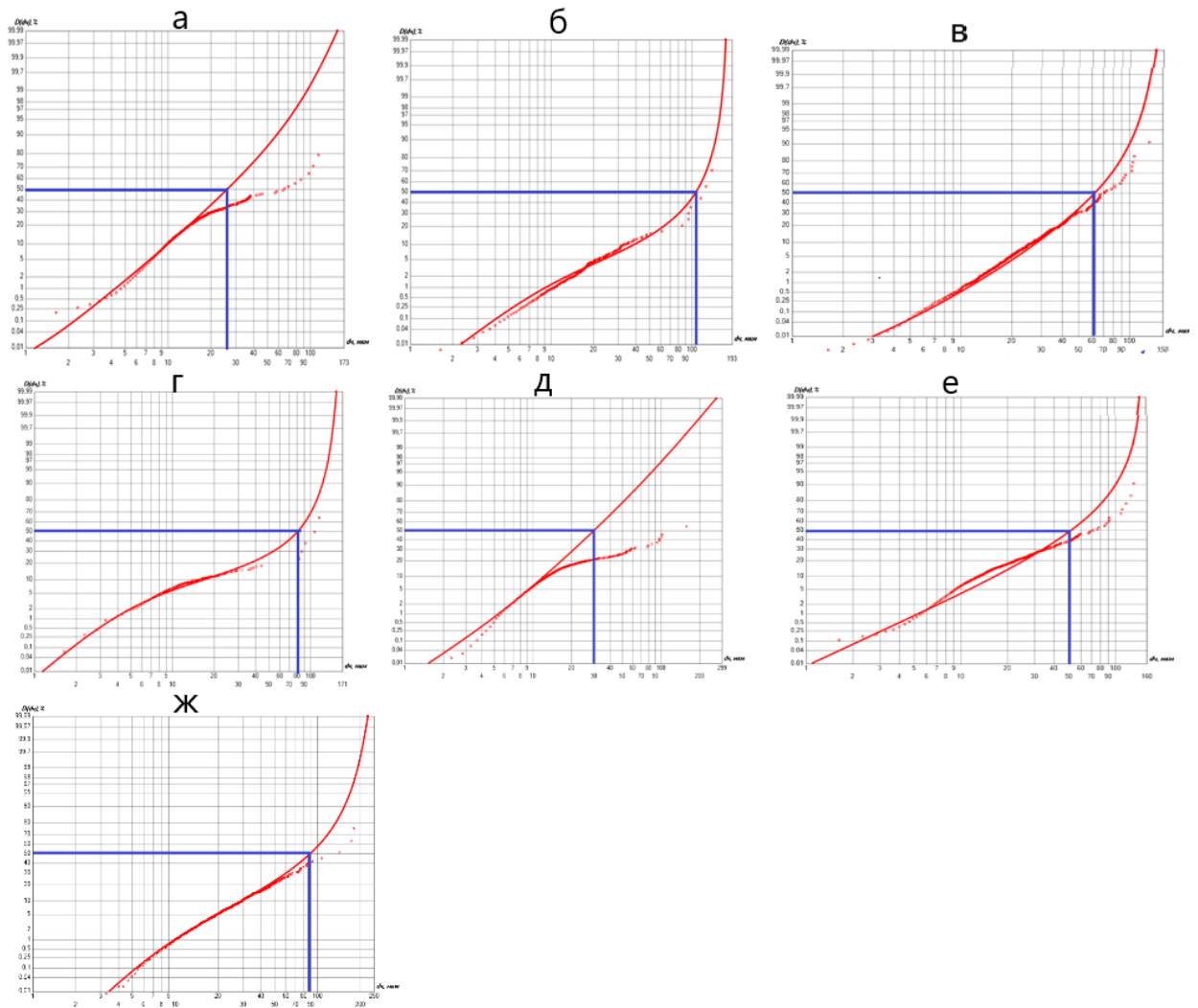


Рис.1. – Зависимость плотности распределения частиц в *D*-пробе. Интегральная функция распределения для ингредиентов оксидов: : *Al*, *Ca*, *Fe*, *Mg*, *Mn*, *Si*, *C*. а) *Al*  $d_{450}=25$  мкм, б) *Ca* - среднемедианный размер  $d_{450}=100$  мкм, в) *Fe* среднемедианный размер  $d_{450}=60$  мкм, г) *Mg* среднемедианный размер  $d_{450}=90$  мкм, д) *Mn* среднемедианный размер  $d_{450}=30$  мкм, е) *Si* среднемедианный размер  $d_{450}=50$  мкм, ж) *C* среднемедианный размер  $d_{450}=90$  мкм.



## Вывод

Результаты выполненных экспериментов микроскопического анализа фракционного состава пыли и последующей их статистической обработки позволили получить интегральные зависимости плотности распределения по эквивалентным размерам (диаметрам)  $D$  и регрессии  $D(dc)$ , и определить значения среднемедианных эквивалентных размеров (диаметров) частиц пыли для принятых к исследованию ингредиентов. Величина коэффициента проскока частиц пыли ингредиентов в системах обеспыливания аспирации печей ДСП, например, с аппаратами на встречно закрученных потоках типа ВЗП, или пылеуловителями инерционного типа мокрой очистки, составит около 4-6%.

## Литература

1. Груздев, В. С. Влияние черной металлургии на состояние окружающей среды // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2008. – № 4(40). – С. 47-51.
2. Терехов, Е. А. Гигиеническая характеристика аэрозолей доменных и сталеплавильных шлаков: специальность 14.00.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата медицинских наук / Терехов Евгений Александрович. – Санкт-Петербург, 1997. – 19 с.
3. Аналитика | Prometall. URL: [prometall.info/analitika/](http://prometall.info/analitika/) (дата обращения: 19.05.2024).
4. Петров, Б. А. Петров, С. Б. Цапок, П. И. Медико-экологические значение производственных аэрозолей / Киров: Кировская государственная медицинская академия, 2011. 225 с.
5. Груздев, В. С. Комплексная оценка техногенного воздействия предприятий черной металлургии на окружающую природную среду центра Европейской России: теория, методология, практика. Автореферат

диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. 25.00.36. – Геоэкология. М, 2010. 42 с.

6. Li H, Xue H, Zhang J, Zhang G. Study on Efficient Removal Method of Fine Particulate Dust in Green Metallurgy Process. Processes. 2023; Vol. 11(9): 2573. URL: doi.org/10.3390/pr11092573.

7. She, Xf., Wang, Js., Xue, Qg. et al. Basic properties of steel plant dust and technological properties of direct reduction. Int J Miner Metall Mater. Vol. 18, 277–284 (2011). URL: doi.org/10.1007/s12613-011-0434-9.

8. Wang, Z., Li, Q., Yang, F. et al. Experimental Study on Stainless Steel Dust by Reduction and Enrichment for Preparation Raw Material of Powder Metallurgy. Trans Indian Inst Met 74, 119–127 (2021). URL: /doi.org/10.1007/s12666-020-02121-5.

9. Kero, Ida & Grådahl, Svend & Fardal, H & Wittgens, Bernd. Fugitive Dust Measurements in the Metallurgical Industry. Conference: Sustainable Industrial Processing Summit - Metals and Materials Processing in a Clean Environment Series: Takano International Symposium on Metals and Alloys. Takano Intl. Symp. on Metals and Alloys. 2015. Vol.3.

10. Кошкарев К.С., Кошкарев, С.А., Батаев, Д.К.-С., Курасов, А.Н., Лясин, Р.А. К определению дисперсного состава частиц твердых ингредиентов в воздушной среде и оценке величины концентрации пыли на неорганизованных источниках выбросов в атмосферу электросталеплавильного цеха // Инженерный вестник Дона. 2023. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8879.

11. Семенов, В. В. Определение параметров взвешенных частиц произвольной формы параметров взвешенных частиц произвольной формы оптико-электронным методом // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88, № 12. с. 36-43.

---

12. Блинов, К. А., Ровенский, А. И., Славин, В. И. Экологические проблемы сталеплавильного производства // Сталь. 1983. №1. С. 21-22.

13. Калюжина, Е. А., Сахарова, А. А., Козловцева, Е. Ю., Гвоздков, И.А., Кисленко, Т.А., Килих, Е.О., Боженкова, А.С., Маркин, В.С. Анализ неорганизованных пылевых выбросов в атмосфере города от электросталеплавильного цеха // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4975.

14. Азаров, В. Н., Ребров, В. А. Козловцева, Е. Ю. Азаров, А.В. Добринский, Д.Р., Тertiшников, И.В., Поляков, И.В., Абухба, Б.А. О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4976.

15. Азаров, В. Н., Есина, Е. Ю., Азарова, Н. В. Анализ дисперсного состава пыли в техносфере: учебное пособие. Волгоград: Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет, 2008. 44 с.

16. Стефаненко, В. Т. Об измерениях дисперсного состава промышленных пылей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2012. № 3(1347). С. 79-85.

### References

1. Gruzdev B. C. Zemleustrojstvo, kadastr i monitoring zemel'. 2008. № 4(40). pp. 47-51.

2. Terehov E. A. Gigienicheskaja harakteristika ajerozolej domennyh i staleplavil'nyh shlakov [Hygienic characteristics of aerosols of blast furnace and steelmaking slags]: special'nost' 14.00.07: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata medicinskih nauk Terehov Evgenij Aleksandrovich. Sankt-Peterburg, 1997. 19 p.

3. Analitika [Analytics]. | Prometall. URL: prometall.info/analitika/.

4. Petrov B. A., Petrov S. B., Capok P. I. Mediko-jekologicheskie znachenie proizvodstvennyh ajerozolej [The medical and environmental significance of industrial aerosols]. Kirov: Kirovskaja gosudarstvennaja medicinskaja akademija, 2011. 225 p.

5. Gruzdev B. C. Kompleksnaja ocenka tehnogenogo vozdejstvija predpriyatij chernoj metallurgii na okruzhajushhuju prirodnuju sredu centra Evropejskoj Rossii: teorija, metodologija, praktika [Comprehensive assessment of the technogenic impact of ferrous metallurgy enterprises on the environment of the center of European Russia] Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora geograficheskikh nauk. 25.00.36. Geojekologija. M., 2010. 42 p.

6. Li H, Xue H, Zhang J, Zhang G. Study on Efficient Removal Method of Fine Particulate Dust in Green Metallurgy Process. Processes. 2023; Vol. 11(9): 2573. URL: [doi.org/10.3390/pr11092573](https://doi.org/10.3390/pr11092573).

7. She, Xf., Wang, Js., Xue, Qg. et al. Basic properties of steel plant dust and technological properties of direct reduction. Int J Miner Metall Mater. Vol. 18, 277–284 (2011). URL: [doi.org/10.1007/s12613-011-0434-9](https://doi.org/10.1007/s12613-011-0434-9).

8. Wang, Z., Li, Q., Yang, F. et al. Experimental Study on Stainless Steel Dust by Reduction and Enrichment for Preparation Raw Material of Powder Metallurgy. Trans Indian Inst Met 74, 119–127 (2021). URL: [doi.org/10.1007/s12666-020-02121-5](https://doi.org/10.1007/s12666-020-02121-5).

9. Kero, Ida & Grådahl, Svend & Fardal, H & Wittgens, Bernd. Fugitive Dust Measurements in the Metallurgical Industry. Conference: Sustainable Industrial Processing Summit - Metals and Materials Processing in a Clean Environment Series: Takano International Symposium on Metals and Alloys. Takano Intl. Symp. on Metals and Alloys. 2015. Vol.3.

10. Koshkarev K.S., Koshkarev S.A., Bataev D.K.-S., Kurasov A.N., Lyasin R.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8879](https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2023/8879).

---



11. Semenov V. V. Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov. 2022. T. 88, № 12. pp. 36-43.
12. Blinov K. A., Rovenskij A. I., Slavin V. I. Stal'. 1983. №1. pp. 21-22.
13. Kaljuzhina E.A., Saharova A.A., Kozlovceva E.Ju., Gvozdkov I.A., Kislenco T.A., Kilih E.O., Bozhenkova A.S., Markin V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4975](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4975).
14. Azarov V. N., Rebrov V. A., Kozlovceva E. Ju., Azarov A.V., Dobrinskij D.R., Tertishnikov I.V., Poljakov I.V., Abuhba B.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2.URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4976](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4976).
15. Azarov V. N., Esina E. Ju., Azarova N. V. Analiz dispersnogo sostava pyli v tehnosfere : uchebnoe posobie.[Analysis of the dispersed composition of dust in the technosphere]. Volgograd: Volgogradskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, 2008. 44 p.
16. Stefanenko V. T. Chernaja metallurgija. Bjul'ten' nauchno-tehnicheskoi i jekonomicheskoi informacii. 2012. № 3(1347). pp. 79-85.

**Дата поступления: 11.05.2024**

**Дата публикации: 19.06.2024**