

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЫЛИ В ТРУБЧАТЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ НА ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

**С. В. КОРНЕЕВ**, канд. техн. наук  
Белорусский национальный технический университет

*В работе проведен анализ характерных особенностей переработки пыли в трубчатых вращающихся печах и расчета балансов материалов и энергии. Представлены результаты расчета удельного расхода топлива в зависимости от объемов переработки пыли во вращающихся трубчатых печах.*

**Ключевые слова:** пылевидные отходы, рециклинг, пирометаллургические способы, соединения цинка, эффективность переработки

## **ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE VOLUME OF PROCESSING ELECTRIC STEEL DUST IN TUBULAR ROTARY FURNACES ON ITS EFFICIENCY**

**S. V. KORNEEV**, Ph. D in Technical Science  
Belarusian National Technical University

*The paper analyzes the characteristic features of dust processing in rotary tubular furnaces and calculates material and energy balances. The results of calculating the specific fuel consumption depending on the volume of dust processing in rotary tubular furnaces are presented.*

**Keywords:** dust waste, recycling, pyrometallurgical methods, zinc compounds, processing efficiency

**Введение.** Современные технологии переработки электростале-плавильной пыли, содержащей значительное количество соединений цинка, предполагают в большинстве случаев отделение цинка и других металлов, например, кадмия и свинца с последующим их возвратом в производство чистых металлов. Образующийся железо-содержащий клинкер в данном случае не является отходом произ-

водства, так как его возможно использовать в цементной промышленности и в металлургии. Несмотря на общую для различных способов переработки схему переработки электросталеплавильной пыли с использованием вращающихся трубчатых печей, существует значительное количество технологий, различающихся по получаемому продукту и режиму работы [1].

**Использование трубчатых вращающихся печей для переработки пыли.** Схема процесса переработки электросталеплавильной пыли представлена на рисунке 1.

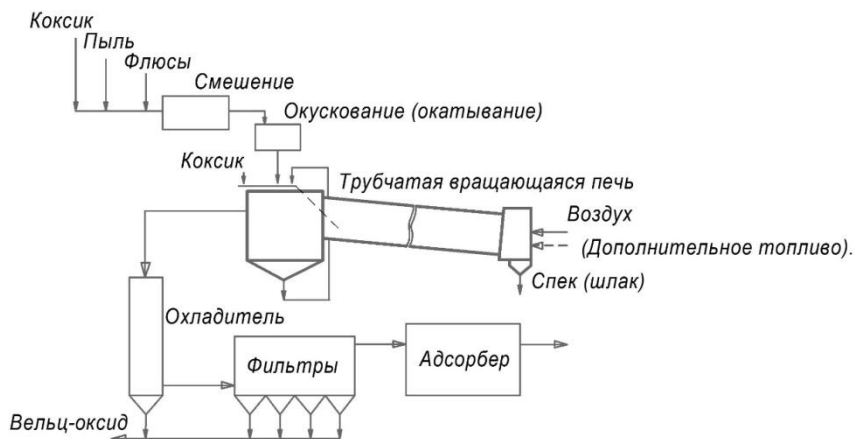


Рисунок 1 – Схема переработки пыли в трубчатых вращающихся печах

Основные направления исследований по повышению эффективности технологий с использованием вращающихся трубчатых печей связаны со снижением энергопотребления, уменьшением настылеобразования на внутренней поверхности печей, повышением степени извлечения цинка, селективным извлечением цинка и свинца, получением продуктов с большей стоимостью на рынке и др.

В подавляющем большинстве случаев производители электростали вынуждены передавать отходы пыли сторонним переработчикам, так как полный цикл переработки пыли с получением очищенного оксида цинка или металлического цинка требует оборудования на большие объемы переработки и больших финансовых инвестиций. В свою очередь перемещение больших объемов пыли

на значительные расстояния также требует экономического обоснования. В работе [2] проведена оценка средних затрат на обогащение пыли однократной инъекцией пыли в электродуговую печь. Определено увеличение содержания оксида цинка в обогащенной пыли, а также затраты на транспортировку пыли с предварительным обогащением и без него. Таким образом, актуальным является вопрос о зависимости коэффициента полезного действия трубчатых вращающихся печей и удельного расхода топлива от производительности печей или объемов переработки.

Расчет физико-химических процессов, протекающих в агрегатах различных типов при переработке электросталеплавильной пыли разного состава при подаче дисперсного отхода без предварительной подготовки и с подготовкой представлен в работе [3].

При этом энергопотребление будет зависеть как от физико-химических параметров процесса, так и от коэффициентов полезного действия агрегатов, в которых данные процессы осуществляются.

Общее энергопотребление конкретных технологий будет определяться видом топлива, обеспечивающего дополнительный подвод теплоты (количеством удаляемых продуктов сгорания и их температурой), возможностями снижения потерь теплоты через ограждающие конструкции и временем нахождения в агрегатах (т. е. скоростью процессов). Например, потери теплоты вращающейся печью барабанного (трубчатого) типа возможно снизить только за счет использования качественной внутренней футеровки, так как металлический корпус печи имеет длину десятки метров и должен охлаждаться с внешней стороны для обеспечения высоких прочностных характеристик, а теплоизоляция снаружи барабана неизбежно увеличивает его температуру. Напротив, в печи кольцевого типа с вращающимся подом возможности теплоизоляции стенок значительно лучше. Поэтому снижение тепловых потерь для различных технологий будет ограничиваться разной величиной, которая к тому же определяется капитальными затратами на оборудование (в том числе количеством используемого огнеупорного и теплоизоляционного материала).

Вращающаяся печь представляет собой сварной пустотелый цилиндр, открытый с торцов, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом и установленный с уклоном 3–4 %. Печь работает по принципу противотока. Сырье подается со стороны верхнего, «хо-

лодного», конца печи, а топливно-воздушная смесь – со стороны нижнего, «горячего» конца.

Колосниковые холодильники предназначены для охлаждения клинкера, выдаваемого печью с температурой до 1250 °С, до температуры, при которой его можно транспортировать на склад или мельницу обычными средствами (60–80 °С). Клинкер из печи поступает в шахту холодильника на колосники острого дутья. Охлаждение происходит под действием холодного воздуха, подаваемого через слой клинкера, который перемещается по колосниковой решетке. Большая часть воздуха, прошедшая через слой клинкера и нагретая до 400–600 °С, направляется в печь для поддержания горения энергоносителя.

**Расчет параметров технологии переработки цинксодержащей пыли во вращающихся трубчатых печах различной производительности.** Количество угля необходимо корректировать исходя из текущего химического состава пыли.

Для расчета был принят модельный состав пыли и определен материальный баланс по сырью и материальный баланс печи. Дополнительные материалы, например, в виде флюсов в расчете не учитывались.

Содержание цинка принято на уровне  $Zn = 24 \%$ . Тогда содержание  $ZnO = 24 \cdot \frac{81,38}{65,38} = 30 \%$ . Следовательно, количество  $ZnO$  в 1 т пыли равно 300 кг.

Количество угля в гранулах (окатышах) получено расчетом исходя из количества оксида цинка в исходной пыли. Количество угля в подсыпке принято равным количеству угля в гранулах. Исходная пыль при 10 % влажности содержит 111 кг воды и 1 т сухой пыли.

Материальный баланс по сырью при принятом составе пыли представлен в таблице 1.

Так как печь работает в непрерывном режиме, составляется баланс мощностей, предварительно данные материального баланса приводим к потоку материалов (в кг/с) исходя из годовой производительности печи.

Таблица 1 – Материальный баланс по сырью

Приход	кг	Расход	кг
Пыль	1111	Клинкер железосодержащий	700
Уголь в гранулах	55,3	Унос ZnO в газы	300
Уголь в подсыпке	55,3	Газы:	111
Воздух	641,3	H <sub>2</sub> O	202,8
		CO <sub>2</sub>	484,1
		N <sub>2</sub>	64,5
		CO	
Всего	1862,9	Всего	1862,9

Производительность т/год переводим в кг/с, т. е., например, для печи 2,5×50 (2,5 – диаметр печи в метрах, 50 – длина печи) с годовым объемом производства 50000 т/год производительность печи составит 2,32 кг/с, а для печи 3,0×60 с годовым объемом производства 200000 т/год производительность печи составит 8,08 кг/с.

Доля  $D_{ZnO} = \frac{300}{1111} = 0,27$ ; доля железосодержащего клинкера

$D_{кл} = \frac{700}{1111} = 0,63$ ; доля угля  $D_y = \frac{55,3}{1111} = 0,049$ .

**Тепловой баланс переработки пыли в трубчатой вращающейся печи.** Поддержание необходимой температуры процесса и регулирование теплового баланса процесса обеспечивается сжиганием дополнительного топлива, в качестве которого принят природный газ.

Определение расхода природного газа возможно из уравнения теплового баланса печи. Методика определения расхода природного газа при переработке пыли во вращающихся трубчатых печах представлена ниже.

Запишем:

$$Q_y + Q_{газ} + Q_v = Q_{ZnO} + Q_{ух.г} + Q_{ух.г1} + Q_{кл} + Q_{исп} + Q_{тепл} + Q_{акк};$$

$$\begin{aligned}
& B_{\text{газ}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}} + B_{\text{газ}} \cdot V_{\text{в2}} \cdot C_{\text{в2}} \cdot t_{\text{в2}} - B_{\text{газ}} \cdot V_{\text{пс}} \cdot C_{\text{пс}} \cdot t_{\text{пс}} = \\
& = Q_{\text{ZnO}} + Q_{\text{ух,г}} + Q_{\text{ух,г1}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{акк}} - Q_{\text{y}}; \\
& B_{\text{газ}} (Q_{\text{H}}^{\text{p}} + V_{\text{в2}} \cdot C_{\text{в2}} \cdot t_{\text{в2}} - V_{\text{пс}} \cdot C_{\text{пс}} \cdot t_{\text{пс}}) = \\
& = Q_{\text{ZnO}} + Q_{\text{ух,г}} + Q_{\text{ух,г1}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{акк}} - Q_{\text{y}}; \\
& B_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{ZnO}} + Q_{\text{ух,г}} + Q_{\text{ух,г1}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{акк}} - Q_{\text{y}}}{(Q_{\text{H}}^{\text{p}} + V_{\text{в2}} \cdot C_{\text{в2}} \cdot t_{\text{в2}} - V_{\text{пс}} \cdot C_{\text{пс}} \cdot t_{\text{пс}})}.
\end{aligned}$$

*Приходные статьи баланса*

1. Теплота горения угля:

$$Q_{\text{y}} = B_{\text{y}} \cdot Q_{\text{ну}}^{\text{p}},$$

где  $B_{\text{y}}$  – расход угля, кг/с;  $B_{\text{y}} = D_{\text{y}} \cdot P_{\text{п}}$ ;  $D_{\text{y}}$  – доля угля по отношению к пыли;  $P_{\text{п}}$  – производительность печи по пыли, кг/с;  $Q_{\text{ну}}^{\text{p}}$  – теплота сгорания угля, Дж/кг.

2. Теплота горения газа:

$$Q_{\text{газ}} = B_{\text{газ}} \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p}},$$

где  $B_{\text{газ}}$  – расход газа м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{H}}^{\text{p}}$  – низшая рабочая теплота сгорания природного газа, Дж/м<sup>3</sup>.

3. Теплота, вносимая подогретым воздухом. Воздух, подаваемый для горения угля, практически не вносит тепловую энергию в печь, так как не подогревается. Воздух, подаваемый для горения природного газа, имеет температуру 480 °С. Соответственно имеем:

$$Q_{\text{в}} = B_{\text{газ}} \cdot V_{\text{в2}} \cdot C_{\text{в2}} \cdot t_{\text{в2}},$$

где  $V_{\text{в2}}$  – объем воздуха необходимый для горения 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>;  $C_{\text{в2}}$  – теплоемкость воздуха, Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $t_{\text{в2}}$  – температура воздуха, °С.

### Расходные статьи баланса

1. Теплота ZnO в уходящих газах:

$$Q_{\text{ZnO}} = D_{\text{ZnO}} \cdot P_{\text{п}} \cdot C_{\text{ZnO}} \cdot t_{\text{ZnO}},$$

где  $D_{\text{ZnO}}$  – доля ZnO в исходной пыли;  $C_{\text{ZnO}}$  – теплоемкость ZnO, Дж/(кг · К);  $t_{\text{ZnO}}$  – температура ZnO в уходящих газах, °С.

Теплота, затраченная на восстановление цинка и его испарение в расходе, не учитывается, так как она в последующем выделяется в пределах печи при окислении паров цинка и переходе цинка в его оксид.

2. Теплота, уносимая продуктами горения природного газа:

$$Q_{\text{у.г}} = B_{\text{газ}} \cdot V_{\text{пс}} \cdot C_{\text{пс}} \cdot t_{\text{пс}},$$

где  $V_{\text{пс}}$  – объем продуктов сгорания газа на 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>;  $C_{\text{пс}}$  – теплоемкость продуктов сгорания газа, Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $t_{\text{пс}}$  – температура продуктов сгорания, °С.

3. Теплота железосодержащего клинкера:

$$Q_{\text{кл}} = D_{\text{кл}} \cdot P_{\text{п}} \cdot C_{\text{кл}} \cdot t_{\text{кл}},$$

где  $D_{\text{кл}}$  – доля клинкера к исходной пыли;  $C_{\text{кл}}$  – теплоемкость клинкера, Дж/(кг · К);  $t_{\text{кл}}$  – температура клинкера, °С.

4. Тепловые потери теплопроводностью:

$$Q_{\text{тепл}} = \sum (q_i \cdot F_i),$$

где  $q_i$  – удельный тепловой поток на  $i$ -м участке печи, Вт/м<sup>2</sup>.

Удельный тепловой поток на участках печи:

$$q_i = K \cdot (t_1 - t_2),$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи через стенку печи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $t_1$  – средняя температура футеровки в  $i$ -зоне печи, °С;  $t_2$  – среднегодовая температура окружающей среды, °С.

Коэффициент теплопередачи через стенку печи :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2}},$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности печи к окружающей среде, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $S_1, S_2$  – толщины слоев футеровки печи, м;  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности слоев футеровки печи, Вт/(м · К).

Площадь участков печи:  $F_1 = \pi \cdot D_{\text{печ}} \cdot L_1$ ,  $F_2 = \pi \cdot D_{\text{печ}} \cdot L_2$ ,  $F_3 = \pi \cdot D_{\text{печ}} \cdot L_3$ .

5. Теплота, аккумулированная кладкой:

$$Q_{\text{акк}} = 0,2 \cdot Q_{\text{тепл}}.$$

6. Теплота, затрачиваемая на испарение воды:

$$Q_{\text{исп}} = D_{\text{вод}} \cdot P_{\text{п}} \cdot q_{\text{исп}},$$

где  $D_{\text{вод}}$  – доля влаги в исходной пыли;  $q_{\text{исп}}$  – удельная теплота испарения воды, Дж/кг

7. Теплота, уносимая газами, выделяющимися при переработке материала.

Масса газов (из таблицы материального баланса):

$$m_{\text{ух.г1}} = 111 + 202,8 + 484,1 + 64,5 = 862,4 \text{ кг}$$

Доля газов по сырью  $D_{\text{г}} = 862,4/1111 = 0,7762$ .

$$Q_{\text{ух.г1}} = \frac{D_{\text{г}} \cdot P_{\text{п}}}{\rho_{\text{г}}} \cdot C_{\text{ух.г1}} \cdot t_{\text{ух.г1}},$$

где  $C_{\text{ух.г1}}$  – теплоемкость газов, Дж/(м<sup>3</sup> · К);  $t_{\text{ух.г1}}$  – температура газов, °С;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газов при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>.

**Определение влияния производительности печей на удельный расход топлива.** Из полученных результатов расчетов, проведенных для различных печей, следует, что существенное влияние на тепловую работу печи оказывает производительность печи. Для оценки



влияния производительности печи на ее коэффициент полезного действия (КПД) и удельный расход топлива были взяты данные по техническим параметрам вращающихся печей, приводимых различными производителями печей, например, [4]. Технические параметры вращающихся трубчатых печей для вельцевания представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические параметры вращающихся печей для вельцевания [4]

Параметры печи	Производительность (т/сутки)	Скорость вращения (об/мин)
2×40	180	0,44–2,44
2,5×50	200	0,62–1,86
2,5×54	280	0,48–1,45
2,7×42	280	0,10–1,52
2,8×44	320	0,437–2,18
3,0×45	450	0,5–2,47
3,0×48	500	0,6–3,48
3,0×60	700	0,3–2
3,2×50	800	0,6–3
3,3×52	1000	0,266–2,66
3,5×54	1300	0,55–3,4
3,6×70	1500	0,25–1,25
4,0×56	1800	0,41–4,07
4,0×60	2300	0,41–4,07
4,2×60	2500	0,41–4,07
4,3×60	2750	0,396–396
4,5×66	3200	0,41–4,1
4,7×74	4500	0,35–4
4,8×74	5000	0,396–3,96

На основе многовариантных балансовых расчетов для печей различных размеров и производительностей была получена зависи-

мость отношения потерь теплоты через футеровку печи к полезной теплоте, представленная на рисунке 2.

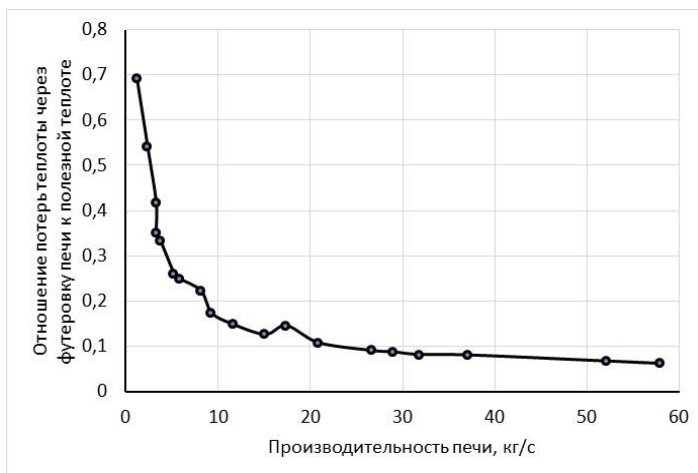


Рисунок 2 – Зависимость отношения потерь теплоты через футеровку печи к полезной теплоте

На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента полезного действия печи от производительности.

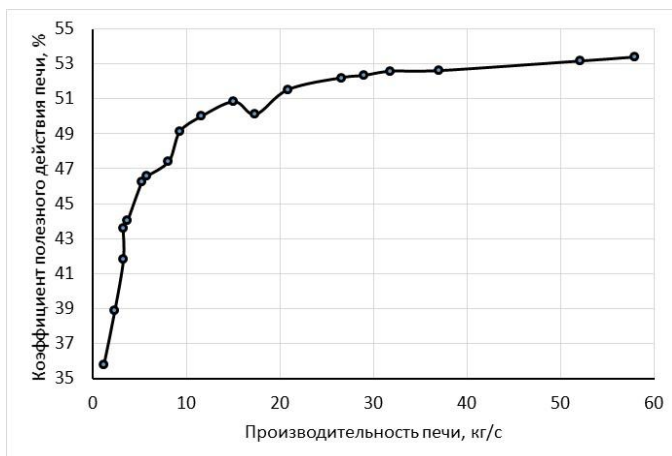


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента полезного действия печи от производительности

Разделив расход природного газа в  $\text{м}^3/\text{с}$  на производительность печи в  $\text{кг}/\text{с}$ , можно получить удельный расход природного газа, который характеризует топливную эффективность технологического процесса.

На рисунке 4 представлена зависимость удельного расхода природного газа от производительности печи.

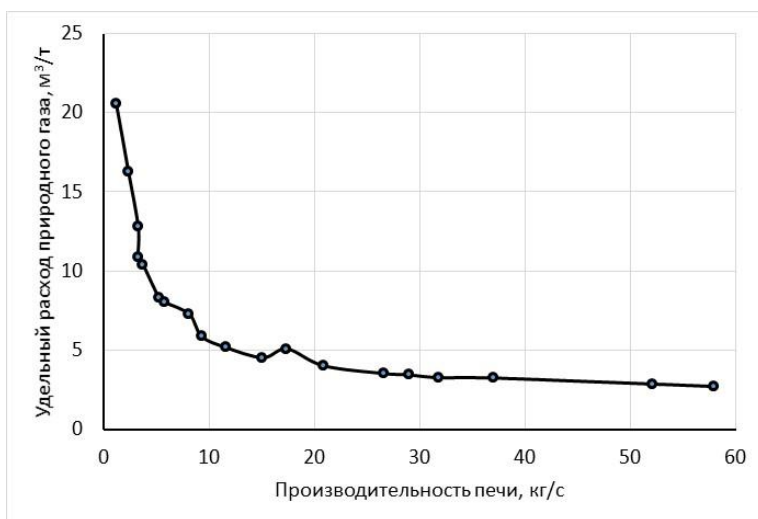


Рисунок 4 – Зависимость удельного расхода природного газа от производительности печи

**Закключение.** Анализируя особенности использования технологии переработки пыли во вращающихся трубчатых печах можно отметить следующее:

- в данной печи используется наиболее эффективная противоточная схема;
- затраченная на восстановление цинка и его испарение энергия снова передается материалу в пределах самой печи;
- значительное влияние на технико-экономические показатели работы печей оказывают удельные потери теплоты в окружающую среду через футеровку печи, которые зависят от производительности печей;
- при небольшой производительности печи (небольших годовых объемах переработки пыли) технология, как правило, оказывается

нерентабельной в связи с высокими значениями удельного расхода топлива, что необходимо учитывать при выборе минимальной производительности;

– при небольшой производительности также высоки удельные затраты на обслуживание печей и удельные капиталовложения, отнесенные к единице мощности. Все это приводит к необходимости увеличивать производительность переработки, осуществляя сбор пыли от различных предприятий, которые могут находиться на значительных расстояниях друг от друга.

### Список литературы

**1. Корнеев, С. В.** Технологии переработки пылей газоочисток электродуговых печей, содержащих соединения цинка / С. В. Корнеев, Н. И. Урбанович, Е. В. Розенберг // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. трудов.* – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 57–69.

**2. Корнеев, С. В.** Оценка затрат предварительного обогащения цинком электросталеплавильной пыли путем инъекции в электродуговую печь / С. В. Корнеев, Н. И. Урбанович // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. трудов.* – Минск: БНТУ, 2023. – вып. 44. – С. 37–47.

**3. Корнеев, С. В.** Энергетические параметры физико-химических процессов переработки пыли газоочисток сталеплавильных цехов / С. В. Корнеев, И. А. Трусова // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. трудов.* – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 42. – С. 7–15.

**4. Оборудование** для обжига // Электронный ресурс. URL: <https://ru.zkeqpt.com/products/duanshaob/> (дата обращения: 10.05.2024).

### References

**1. Korneev, S. V.** *Tekhnologii pererabotki pylej gazoochistok elektrodugovyh pechej, sodержashchih soedineniya cinka* [Technologies for processing dust from gas cleaning of electric arc furnaces containing zinc compounds] / S. V. Korneev, N. I. Urbanovich, E. V. Rozenberg // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhvedomstvennyj sbornik nauchnyh*

*trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2021. – Vyp. 42. – P. 57–69.

**2. Korneev, S. V.** *Ocenka zatrat predvaritel'nogo obogashcheniya cinkom elektrostaleplavil'noj pyli putem inzhekcii v elektrodugovuyu pech'* [Estimation of the costs of preliminary enrichment of electric furnace dust with zinc by injection into an electric arc furnace] / S. V. Korneev, N. I. Urbanovich // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2023. – Vyp. 44. – P. 37–47.

**3. Korneev, S. V.** *Energeticheskie parametry fiziko-himicheskikh processov pererabotki pyli gazoochistok staleplavil'nyh cekhov* [Energy parameters of physical and chemical processes for processing dust from gas purification of steelmaking shops] / S. V. Korneev, I. A. Trusova // *Metallurgiya: Respublikanskij mezhdovedomstvennyj sbornik nauchnyh trudov = Metallurgy: Republican interdepartmental collection of scientific papers.* – Minsk: BNTU Publ., 2021 – Vyp. 42. – P. 7–15

**4. <https://ru.zkeqpt.com/products/duanshaob/>**

*Поступила 14.11.2024*

*Received 14.11.2024*