МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.162.262 EDN: MQYRIT

Куберский С. В., Должиков В. В., Федотов О. В., Щербаков И. В.
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: Skuberskiy@yandex.ru*

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ПРИ АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ

Проведен анализ эффективности утилизации техногенных отходов при агломерации железорудной шихты с точки зрения удельной производительности агломашин и содержания железа в готовом агломерате. Рассмотрены характеристики различных железосодержащих флюсующих добавок, использовавшихся на металлургическом предприятии в составе агломерационной шихты. Предложены пути эффективной утилизации отходов в аглодоменном переделе.

Ключевые слова: *агломерационное производство, техногенные отходы, конвертерная пыль, шлам, металлургические шлаки, производительность, содержание железа, эффективность.*

Финансирование: *работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 218 ФБ (FRRU-2026-0003)).*

Стратегия научно-технологического развития металлургической промышленности Российской Федерации и её приоритетные направления в числе основных научно-технических задач предусматривают утилизацию различных техногенных отходов, что способствует улучшению состояния окружающей среды и снижению зависимости отечественных предприятий от импортного сырья.

В настоящее время основным видом окускованного железорудного сырья на предприятиях металлургического комплекса России является агломерат, содержание которого в железорудной части доменной шихты составляет 70–80 % [1].

Поэтому агломерационное производство является важным звеном технологической цепочки производства черных металлов и требует пристального внимания с точки зрения совершенствования технологии и применяемого оборудования [2, 3].

Важной особенностью этого передела является возможность переработки большого количества различных железосодержащих отходов: шламов и пылей коксовых, агломерационных, доменных, сталеплавильных цехов, продуктов переработки металлургических шлаков (МОД, МОС, МСП), прокатной окалины (сухой и промасленной) и др. [4, 5].

В условиях дефицита железорудного сырья, а также для решения экологических проблем, связанных с размещением металлургических отходов, шлаки текущего производства и отвальные, как правило, подвергаются переработке. Магнитные фракции крупностью от +10 до +350 мм, извлеченные из сталеплавильных шлаков, используются в качестве металлошихты при производстве чугуна и стали, а мелкие фракции (0–10 мм) с содержанием железа около 47 % направляются на агломерацию, заменяя часть агломерационной руды и концентрата [6–9].

По данным работы [10], такая технология на одном из предприятий отрасли позволила в 2018 и 2019 гг. снизить закупку железорудного концентрата на 318,5 и 258,4 тыс. т соответственно.

Большим преимуществом агломерационного производства является возможность переработки тонкодисперсных отходов, к которым в первую очередь относятся шламы и пыли. Данный подход способствует улучшению экологической обстановки, но с технологической точки зрения требует дополнительных исследований.

Поэтому ***целью*** настоящего исследования являлся анализ эффективности утилизации техногенных отходов при агломерации железорудной шихты в условиях действующего металлургического предприятия.

В качестве основных показателей эффективности в данной работе были выбраны удельная производительность агломерационного цеха (УП), которая определяется массой годного продукта, спеченного на одном квадратном метре агломерационной ленты в единицу времени (т агломерата/м^2 площади в «горячий час», т/м^2·ч) [3, 11], а также содержание железа в агломерате (Fe %), которое является одним из наиболее значимых факторов для доменного процесса.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие ***задачи***:

– анализ производственных данных по составу агломерационной шихты (АШ) и основным показателям производства;

– выбор наиболее важных и статистически значимых факторов, влияющих на производительность агломашин и качество агломерата;

– определение корреляционных связей между рассматриваемыми параметрами;

– разработка технологических рекомендаций, способствующих повышению эффективности производства.

Объект исследования — процесс агломерации железорудного сырья.

Предмет исследования — эффективность использования техногенных отходов при производстве агломерата.

Для определения влияния различных параметров и факторов агломерационного процесса на эффективность технологии были использованы методы математической статистики, позволяющие оценить тесноту связи между рассматриваемыми параметрами и показателями эффективности с помощью корреляционного анализа.

Для исследования были выбраны результаты работы агломерационной фабрики за период 2015–2025 гг. Этот период характеризовался нестабильными поставками сырья и длительными месячными простоями. После отсеивания аномальных значений выборка содержала среднемесячные показатели за 115 месяцев.

После анализа состава АШ была выделена группа «традиционных» составляющих: железорудный концентрат, агломерационная руда, колошниковая пыль, известняк, топливо. В группу «нетрадиционных» составляющих (добавок) включили железосодержащие материалы, использовавшиеся на предприятии не менее 9 месяцев (табл.). К этим материалам относятся:

– конвертерная пыль (КП), улавливаемая аспирационными установками на всех стадиях сталеплавильного передела в количестве 18–28 кг/т стали [12];

– прокатная окалина (ПО), образующаяся в прокатных цехах и нагревательных колодцах;

– скрап (СК) — зашлакованные железосодержащие отходы металлургического производства;

– шлак несортированный (ШН), крупность — 0–20 мм;

– шламы с радиальных отстойников (ШРО) и карт обезвоживания (ШКО);

– металлосодержащие отходы мартеновского (МОС-1), конвертерного (МСП-1) и доменного производства (МОД-1).

Данные добавки представляют собой техногенные отходы, основные характеристики которых приведены в таблице.

Шламы с карт обезвоживания (ШКО), радиальных отстойников (ШРО), окалина и МОС-1 использовались и ранее в 2008–2012 гг. Характеристики и особенности их использования описаны в работе [12].

Анализ корреляционной матрицы, созданной для получения целостной картины связей между основными анализируемыми факторами, показал, что из всего многообразия техногенных отходов в АШ только добавки ШКО, СК, МСП-1 и КП оказывают заметное влияние на рассматриваемые технологические показатели.

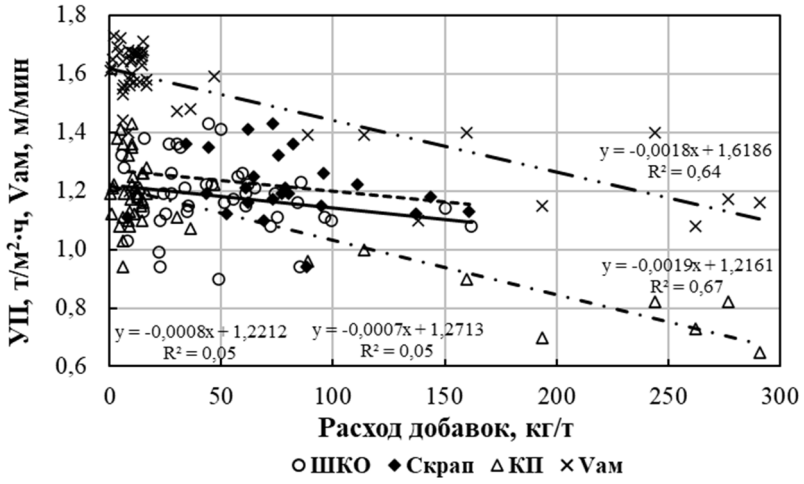
Для получения количественных оценок влияния добавок на показатели эффективности был проведен регрессионный анализ статистически значимых связей.

Моделирование выполняли с помощью линейных парных уравнений регрессии, для которых рассчитывали коэффициенты и статистические характеристики (рис. 1).

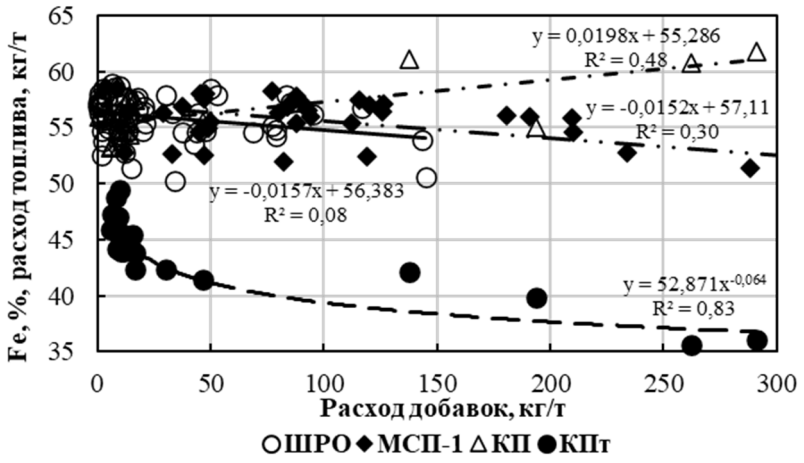
Таблица

Характеристики добавок

Добавка	Период применения, мес.	Расход, кг/т (min/max)	Содержание Fe, %	Фракция, мм
КП	47	1,5/290	46–61	0–0,1
ПО	112	1/134	71–74	0–5
СК	24	43/161	65–85	0–20
ШРО	61	0,5/143	41–44	0–0,1
ШКО	42	5,4/162	40–45	0–0,5
МОС-1	13	1/184	45–58	0–10
МОД-1	36	2/56	38–42	0–10
МСП-1	41	5/302	37–43	0–10



а



б

Рисунок 1 — Влияние различных добавок в АШ на показатели эффективности

В соответствии с полученными зависимостями УП снижается при увеличении в составе АШ количества СК, ШКО и КП. Незначительное снижение содержания железа в агломерате наблюдается при добавках ШРО и МСП-1, а использование КП обеспечивает рост этого важного для доменного процесса показателя, что можно объяснить высоким содержанием железа в этой добавке (табл.).

Таким образом, полученные результаты (рис. 1) свидетельствуют о значительном влиянии на рассматриваемые показатели именно КП.

Используемая КП представляет собой смесь восьми пылей, собранных на различных участках кислородно-конвертерного цеха (ККЦ). Общее содержание железа в пыли шести участков составляет 30–66 %, причем в двух пылях присутствует от 28 до 30 % металлического железа. Пыль, собранная на участках подачи сыпучих и ферросплавов к конвертеру, а также выгрузки и хранения сыпучих и ферросплавов, богата основными окислами (CaO — более 60 %, MgO — 9–10 %) при низком содержании кремнезема (3–4 %) и содержит незначительное количество железа (Fe_2O_3 — 5–6 %). Особенностью КП является большое содержание в ней мелких фракций (фракция <0,4 мм составляет около 91 %).

Расчеты, проведенные с использованием установленных уравнений регрессии, позволили определить, что добавка 1 кг КП повышает содержание железа в среднем на 0,0198 %, при этом УП уменьшается на 0,0019 т/м^2·ч (0,156 %) и скорость агломашины ($V_{ам}$) — на 0,0018 м/мин (0,11 %).

Рассматривая повышение содержания железа в агломерате при использовании КП, необходимо отметить, что этот показатель является одним из наиболее значимых для доменного процесса. Повышение содержания железа на 1 % снижает расход кокса на 1,7 % и повышает производительность доменной печи на 1 % [13]. Поэтому КП является весьма эффективной добавкой в АШ.

Одной из основных причин уменьшения УП является снижение скорости спекания при добавке КП в АШ, что обусловлено высоким содержанием в КП тонкодисперсных частиц, которые ухудшают газопроницаемость шихты и замедляют процесс спекания.

Дополнительные исследования влияния КП на агломерационный процесс показали, что расход её на уровне 10 кг/т способствует снижению расхода топлива на 0,355 кг/т.

Механизм этого явления можно объяснить особенностями технологии доменной плавки. При выплавке чугуна образующийся шлак должен иметь определенный состав, что обеспечивается вводом в доменную шихту флюсующих добавок. Основная часть этих добавок состоит из флюсующего компонента CaO. Однако в природе это соединение входит в состав известняка ($CaCO_3$) и может быть выделено из него при термическом разложении. Для экономии доменного кокса этот процесс целесообразно реализовать в условиях агломерационного производства, вводя известняк в состав АШ и добавляя необходимое количество топлива. Корреляционный анализ данных показал статистически значимую связь между количествами топлива и известняка в АШ.

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что в КП содержится значительное количество CaO (около 19 %). Часть его связана в силикаты, а оставшееся количество ($CaO_{своб}$) может переходить в агломерат, обеспечивая частичную замену известняка и снижение расхода топлива. Корреляционный анализ данных подтверждает статистически значимую связь между количествами КП и известняка в АШ (рис. 2).

Кроме того, дополнительным источником тепла при агломерации может быть металлическое железо, содержащееся в КП, окисление которого в ходе спекания имеет экзотермический характер.

Зависимость основности агломерата от расхода КП носит экстремальный характер:

максимум достигается при 150–200 кг/т, а при более высоких значениях (до 300 кг/т) основность снижается.

С целью снижения расхода основного флюса в АШ в течение 9 месяцев вводили 20–80 кг/т ШН, что обеспечило замещение 15–20 % традиционно используемого известняка (рис. 3). Данные рисунка 3 показывают, что добавки КП и ШН способствуют снижению расхода известняка, являясь дополнительным источником $CaO_{своб}$. Однако основность агломерата при этом снижается.

Такие различия в изменении основности при использовании КП (рис. 2), а также комплекса КП-ШН (рис. 3) требуют дополнительных исследований.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что увеличение содержания железа, обусловленное добавкой КП в состав АШ в количестве 50–70 кг/т, обеспечивает эффективность агломерационного производства, несмотря на снижение УП. При этом обеспечивается полная утилизация этого техногенного отхода (при суточной производительности аглофабрики 10–12 тыс. т, а ККЦ — 15–20 тыс. т стали), снижение расхода известняка, агломерационного топлива, железорудного концентрата и агломерационной руды, а также кокса при производстве чугуна и повышение производительности доменной печи.

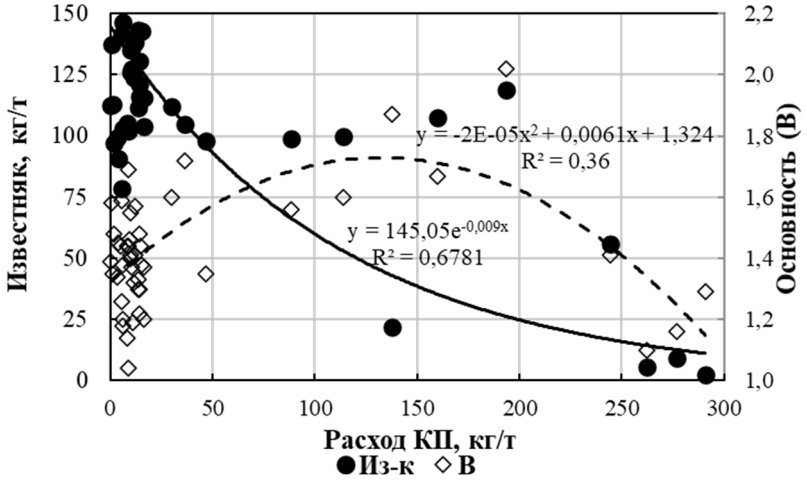


Рисунок 2 — Влияние КП на расход известняка и основность агломерата

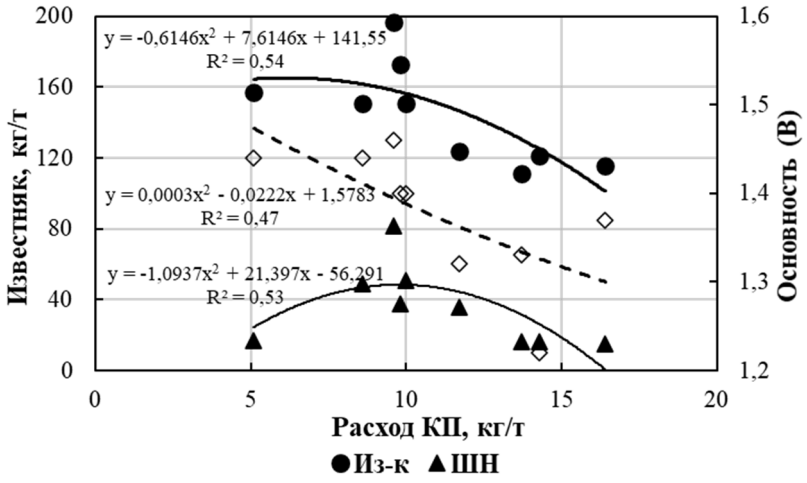


Рисунок 3 — Влияние КП на расход известняка, ШН и основность агломерата

Для обеспечения эффективности при вводе в АШ большего количества КП необходимы дополнительные исследования, связанные с совершенствованием технологии подготовки её к агломерационному переделу и оптимизацией состава АШ при утилизации этих техногенных отходов.

По результатам исследований можно сделать следующие **выводы:**

– проведен анализ эффективности утилизации техногенных отходов при агломерации железорудной шихты с точки зрения УП агломашин и содержания железа в агломерате;

– рассмотрены характеристики железосодержащих добавок, использовавшихся на предприятии в составе АШ не менее 9 месяцев;

– показано, что значительное влияние на исследованные технологические параметры оказывает количество КП в составе АШ;

– проведена количественная оценка влияния КП на показатели агломерационного процесса;

– определено, что расход КП в количестве 50–70 кг/т позволяет реализовать полную её утилизацию при допустимом снижении УП в агломерационном процессе, не приводящем к падению эффективности аглодоменного передела в целом.

В ходе последующих исследований предполагается проанализировать влияние КП на основность агломерата при больших её присадках, усовершенствовать технологию её подготовки к агломерационному переделу, а также оптимизировать состав АШ в условиях утилизации большого количества техногенных отходов.

Список источников

1. Одинцов А. А. Современное состояние технологии производства железорудного агломерата в отечественной металлургии // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2022. № 3 (41). С. 28–36. EDN BGRHTT

2. Совершенствование технологии производства окатышей и нового железорудного сырья для современной доменной плавки : в 2 т. Т. 1. Теория, технология и оборудование подготовки шихт и их окомкования в производстве окатышей : монография / Ф. М. Журавлёв [и др.] ; Национальная металлургическая академия Украины, Криворожский национальный университет. Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. 332 с.

3. Савельев С. Г., Кондратенко М. Н. Системное исследование технологических параметров, определяющих интенсивность агломерационного процесса // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 184–191. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-184-191 EDN WETYKV

4. Рецикл техногенных от ходов при производстве агломерата и чугуна / В. А. Долинский, Л. Д. Никитин, А. А. Одинцов, К. И. Домнин // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 8. С. 41–44. EDN QCHJJV

5. Dasgupta R., Reddy P. S. R. Sintering by recirculation of ferrogenous waste // Transactions of the Indian Institute of Metals. Vol. 63. 2010. C. 859–862. DOI: 10.1007/s12666-010-0131-9 EDN SDNIUT

6. Утилизация отходов металлургического производства черных металлов : монография / Н. В. Панишев [и др.]. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2018. 69 с. EDN VKUROW

7. Bondarenko V., Filonenko O. Analysis of the accumulation and influence of metallurgical slag to the environment // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2020. Vol. 61. P. 78–93. EDN DAYVKV

8. Иванков С. И., Шубов Л. Я., Скобелев К. Д. Систематизация методов переработки отходов горно-металлургического комплекса // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2020. № 6. С. 2–93. DOI: 10.36535/0869-1002-2020-06-1 EDN JEMGOU

9. Makhotkina E. S., Shubina M. V. Industrial, Ecological and Resource-Efficient Aspects of Vanadium Production and Use of Technogenic Vanadium Sources // Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. P. 994–998. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.994 EDN ZSRIJH

10. Айкашев А. В., Панишев Н. В., Махоткина Е. С. Эффективность переработки металлургических шлаков // Теория и технология металлургического производства. 2021. № 4 (39). С. 9–12. EDN SCCCJY

11. Панычев А. А. Математическое моделирование параметров агломерационного процесса : монография. Москва, Вологда : Инфра-Инженерия. 2023. 164 с.

12. Анализ работы агломерационного цеха АМК в условиях нестабильного поступления природного сырья / И. Ф. Русанов, С. В. Куберский, И. М. Мищенко, В. Ф. Кузьменко // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2020. № 21 (64). С. 46–52. EDN MFQEXP

13. Товаровский И. Г. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Сталь. 2014. № 5. С. 4–11. EDN UADSMV

© Куберский С. В., Должиков В. В., Федотов О. В., Щербаков И. В., 2026

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Романчуком А. Н., начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.

Статья поступила в редакцию 05.10.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Куберский Сергей Владимирович, *канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru*

Должиков Валерий Васильевич, *канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия*

Федотов Олег Витальевич, *старший преподаватель каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия*

Щербаков Илья Витальевич, с*тудент каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия*

***Kuberskii S. V., Dolzhikov V. V., Fedotov O. V., Shcherbakov I. V.** *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)*

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF MAN-MADE WASTE UTILIZATION IN IRON ORE CHARGE SINTERING

This study analyzes the efficiency of man-made waste utilization in iron ore charge sintering from the stand point of the specific productivity of sintering machines and the iron content of the finished sinter. The characteristics of various iron-bearing fluxing additives used in charge sintering at a metallurgical plant are reviewed. Ways to improve the efficiency of waste utilization in the sintering and blast furnace process are proposed.

Key words: *sintering production, man-made waste, converter dust, slurry, metallurgical slags, productivity, iron content, efficiency.*

Funding: *the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme № 218 FB (FRRU-2026-0003)).*

References

1. Odintsov A. A. The current state of iron ore agglomerate production technology in the domestic metallurgy [Sovremennoe sostoyanie tekhnologii proizvodstva zhelezorudnogo aglomerata v

otechestvennoj metallurgii]. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2022. No. 3 (41). Pp. 28–36. EDN BGRHTT

2. Zhuravlyov F. M. [et al.]. Improvement of the pellets' production technology and the new iron ore raw material for modern blast furnace smelting: in 2 vol. Vol. 1. Theory, technology and equipment for preparing charges and their pelletizing in the production of pellets : monograph [Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva okatyshej i novogo zhelezorudnogo syr'ya dlya sovremennoj domennoj plavki : v 2 t. T. 1. Teoriya, tekhnologiya i oborudovanie podgotovki shiht i ih okomkovaniya v proizvodstve okatyshej : monografiya]. National Metallurgical Academy of Ukraine, Kryvyi Rih National University. Vologda : Infra-Inzheneriya. 2020. 332 p.

3. Savel'ev S. G., Kondratenko M. N. Systemic investigation of technological parameters that determine the intensity of sintering process [Sistemnoe issledovanie tekhnologicheskih parametrov, opredelyayushchih intensivnost' aglomeracionnogo processa]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 2021. Vol. 64. No. 3. Pp. 184–191. DOI: 10.17073/0368-0797-2021-3-184-191 EDN WETYKV

4. Dolinskij V. A., Nikitin L. D., Odincov A. A., Domnin K. I. Recycling of man-made wastes in the production of sintering and iron [Recikl tekhnogennyh othodov pri proizvodstve aglomerata i chuguna]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 2010. No. 8. Pp. 41–44. EDN QCHJJV

5. Dasgupta R., Reddy P. S. R. Sintering by recirculation of ferrogenous waste. Transactions of the Indian Institute of Metals. Vol. 63. 2010. Pp. 859–862. DOI: 10.1007/s12666-010-0131-9 EDN SDNIUT

6. Panishev N. V. [et al.]. Waste utilization of ferrous metal production: a monograph [Utilizaciya othodov metallurgicheskogo proizvodstva chernyh metallov : monografiya]. Magnitogorsk : Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G. I. Nosova. 2018. 69 p. EDN VKUROW

7. Bondarenko V., Filonenko O. Analysis of the accumulation and influence of metallurgical slag to the environment. Zbirnik naukovikh prats NGU. 2020. Vol. 61. Pp. 78–93. EDN DAYVKV

8. Ivankov S. I., Shubov L. Ya., Skobelev K. D. Systematization of methods for processing waste from the mining and metallurgical complex [Sistematizaciya metodov pererabotki othodov gorno-metallurgicheskogo kompleksa]. Scientific and technical aspects of environmental protection. 2020. No. 6. Pp. 2–93. DOI: 10.36535/0869-1002-2020-06-1 EDN JEMGO

9. Makhotkina E. S., Shubina M. V. Industrial, Ecological and Resource-Efficient Aspects of Vanadium Production and Use of Technogenic Vanadium Sources. Solid State Phenomena. 2017. Vol. 265. Pp. 994–998. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.994 EDN ZSRIJH

10. Ajkashev A. V., Panishev N. V., Makhotkina E. S. The efficiency of metallurgical slag processing [Effektivnost' pererabotki metallurgicheskih shlakov]. Theory and Process Engineering of Metallurgical Production. 2021. No. 4 (39). Pp. 9–12. EDN SCCCJY

11. Panychev A. A. Mathematical modeling of agglomeration process parameters : a monograph. [Matematicheskoe modelirovanie parametrov aglomeracionnogo processa : monografiya]. Moscow, Vologda : Infra-Inzheneriya. 2023. 164 p.

12. Rusanov I. F., Kuberskii S. V., Mishchenko I. M., Kuz'menko V. F. Overview the work of sintering shop of Alchevsk Iron-and-Steel Works in conditions of unstable input of natural raw materials [Analiz raboty aglomeracionnogo cekha AMK v usloviyah nestabil'nogo postupleniya prirodnogo syr'ya]. Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2020. No. 21 (64). Pp. 46–52. EDN MFQEXP

13. Tovarovskij I. G. Normative assessment of the influence of blast furnace smelting parameters on coke consumption and productivity [Normativnaya ocenka vliyaniya parametrov domennoj plavki na raskhod koksa i proizvoditel'nost']. Stal'. 2014. No. 5. Pp. 4–11. EDN UADSMV

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuberskii Sergey Vladimirovich, *PhD in Engineering, Professor, Professor of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ

Dolzhikov Valeriy Vasilyevich, *PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Fedotov Oleg Vitalievich, *Senior lecturer of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Shcherbakov Il'ya Vital'evich, *Student of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia