

УДК 665.777.4

DOI: 10.35211/1990-5297-2023-10-281-78-85

В. С. Силантьев^{1,2}, С. С. Наумов^{1,2}, Л. В. Палаткина², В. С. Войнов^{1,2}, Н. В. Колобанов^{1,2}

**ОПЫТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПРОКАЛОЧНО-УТИЛИЗАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
«РУСАЛ Волгоград»**

¹Волгоградский алюминиевый завод ВгАЗ «РУСАЛ Волгоград»²Волгоградский государственный технический университетe-mail: silws11041973@gmail.com¹, lv.palatkina@yandex.ru²

В работе представлены основные направления комплексного подхода по обеспечению надежности работы прокалочного-утилизационного комплекса для производства прокаленного нефтяного кокса. За период эксплуатации с 2018 года специалистами «РУСАЛ Волгоград» реализован ряд конструктивных решений по усовершенствованию камеры дожига и системы газоходов, также подобран новый состав футеровки на основе муллитового огнеупора, повышающий ее стойкость. Полученные результаты обеспечили возможность увеличения производительности оборудования до 5 % с получением прокаленного нефтяного кокса стабильного качества.

Ключевые слова: нефтяной кокс, прокалочный-утилизационный комплекс, футеровка.

V. S. Silantev^{1,2}, S. S. Naumov^{1,2}, L. V. Palatkina², V. S. Voinov^{1,2}, N. V. Kolobanov^{1,2}

**TECHNICAL OPERATION EXPERIENCE ROLLING
AND UTILIZATION COMPLEX «RUSAL Volgograd»**

¹Volgograd Aluminum Smelter VgAZ «RUSAL Volgograd»²Volgograd State Technical University

The paper presents the main directions of the integrated approach to ensure the reliability of the operation of the Rolling and Utilization Complex for the production of calcined petroleum coke. During the period of operation since 2018, RUSAL Volgograd specialists have implemented a number of design solutions to improve the afterburning chamber and gas duct system, and also selected a new composition of lining based on mullite refractory to increase its durability. The obtained results provide the possibility to increase the productivity of the equipment up to 5 % with obtaining calcined petroleum coke of stable quality.

Keywords: petroleum coke, calcination and utilization complex, lining.

Успешный опыт реализации в 2018 году проекта строительства анодной фабрики на Волгоградском алюминиевом заводе («РУСАЛ Волгоград» ВгАЗ) обеспечил компанию РУСАЛ собственными уникальными мощностями по производству угольных обожженных анодов [1]. В рамках данного проекта была проведена модернизация отделения прокали печи кокса в прокалочный-утилизационный комплекс для производства прокаленного нефтяного кокса. Реализованные, специалистами компании оригинальные технические и технологические решения позволили:

- увеличить производительность прокалочной печи на 25 %;

- получить прокаленный нефтяной кокс высокого качества, используемый в технологии электролитического производства первичного алюминия как наполнитель анодных материалов [2].

Для производства 1 т первичного алюминия электрохимический расход углерода составляет от 410 до 530 кг [3], а сам процесс электролиза сопровождается образованием: парниковых газов (12,5 т CO₂ на 1 т алюминия), полиароматических углеводородов, бензпирена и серы. На сегодняшний день, компания РУСАЛ обладает промышленной технологией инертного анода, обеспечивающей получение экологически нейтрального алюминия со значением углеродного следа 0,01 т CO₂-экв. на 1 т алюминия (уровень 1) [4–9]. Несмотря на то, что экономическая стратегия компании направлена на внедрение технологии инертного анода на всех своих предприятиях (что должно обеспечить снижение себестоимости производства, за счет экономии анодов и электроэнергии, более чем на 10 % [10]) такой переход требует больших временных и финансовых затрат. Поэтому приоритетным остается производство качественных

анодов для электролиза алюминия на основе нефтяных коксов.

В настоящее время высококачественный прокаленный нефтяной кокс является дорогостоящим промышленным товаром спрос, на который ежегодно увеличивается [11]. Кокс широко используется в промышленности (металлургической и химической [3; 12–14]), в строительстве (наполнитель сверхлегких композитов на основе цемента [15]), в авиационной и ракетной технике. Также низкокачественные марки нефтяного кокса с высоким содержанием серы нашли широкое применение в качестве топлива в различных отраслях.

Данная работа посвящена анализу причин внеплановых остановок в работе прокально-утилизационного комплекса ВгАЗа и результатов по их устранению, что необходимо для проведения дальнейших работ по повышению надежности его эксплуатации и увеличению производительности по выпуску высококачественной готовой продукции (прокаленного нефтяного кокса).

Сырой нефтяной кокс является инертным и химически стабильным материалом, содержит [3]: 88,0–95,0 % углерода, 3,0–4,0 % водоро-

да, 1,0–2,0 % азота, 0,58–6,0 % серы и 1,0–7,0 % кислорода. Для придания сырому коксу специальных свойств его подвергают кальцинации (прокаливанию) в специальных вращающихся печах. Процесс кальцинации сырого нефтяного кокса протекает при высоких температурах (так, например, для кокса марки КЭП1 это порядка 1250–1280 °С, а для кокса марки КЭП2 уже необходима температура прокалики 1280–1330 °С [16]) и характеризуется большим объемом отходящих газов с еще большей температурой. Последнее обусловлено высоким содержанием в нефтяном коксе летучих веществ и образованием (при вращении барабана прокалочной печи) коксовой пыли, что и было учтено специалистами Компании при модернизации отделения прокалики кокса. Так прокально-утилизационный комплекс был оснащен технологическим комплексом управления прокаливания кокса, котлом-утилизатором с камерой дожигания отходящих газов, очисткой охлажденных газов от пыли и сажи в рукавных фильтрах, а также оборудованием для генерации электроэнергии за счет вырабатываемого котлом-утилизатором пара высокого давления (рис. 1).

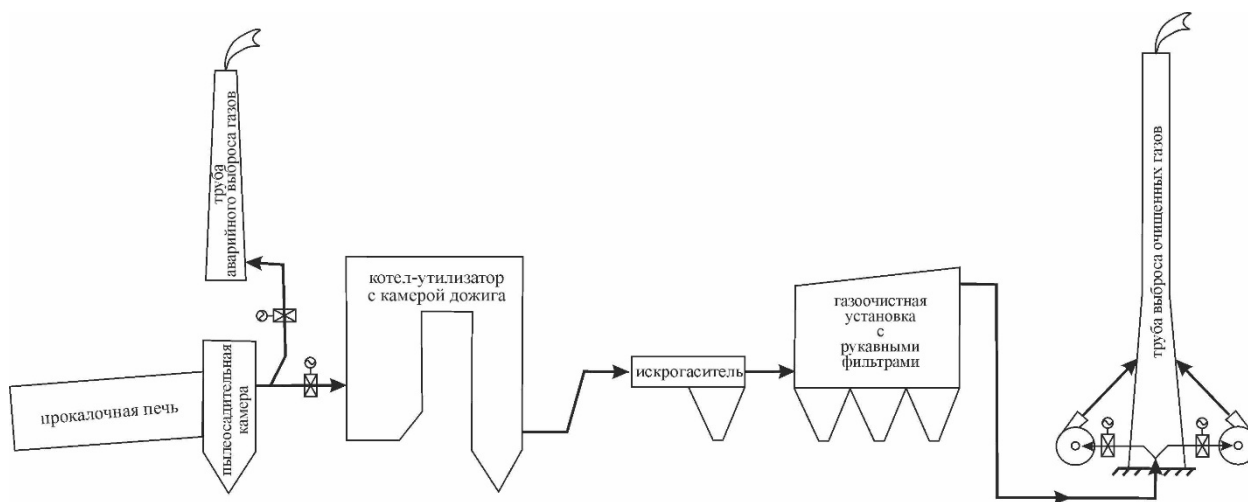


Рис. 1. Принципиальная схема основных узлов прокально-утилизационного комплекса ВгАЗ (стрелками показано направление движения газового потока по газоходам комплекса)

Прокально-утилизационный комплекс состоит из оборудования непрерывного действия, надежность работы которого (безаварийная эксплуатация) является гарантией стабильности качества прокаленного кокса. Известно, что путем сокращения частоты возникновения отказов и длительности простоев возможно решить задачу повышения надежности [17], при этом для анализа причин и формирования общей картины

распределения простоев применяются статистические методы повышения качества. Например, с помощью диаграмм Парето возможно выявить причины появления немногочисленных существенно важных отказов, сосредоточив усилия на ликвидации именно этих причин и отложив рассмотрение причин, приводящих к остальным, менее существенным отказам [18]. На рис. 2 представлена диаграмм Парето вре-

менных потерь из-за аварийных остановок прокально-утилизационного комплекса по различным причинам (без учета плановых остановок) за период эксплуатации с 2018 года по первое

полугодие 2023 года. Для оценки мер и проведения первоочередных мероприятий по повышению надежности прокально-утилизационного комплекса использовали соотношение 20/80.

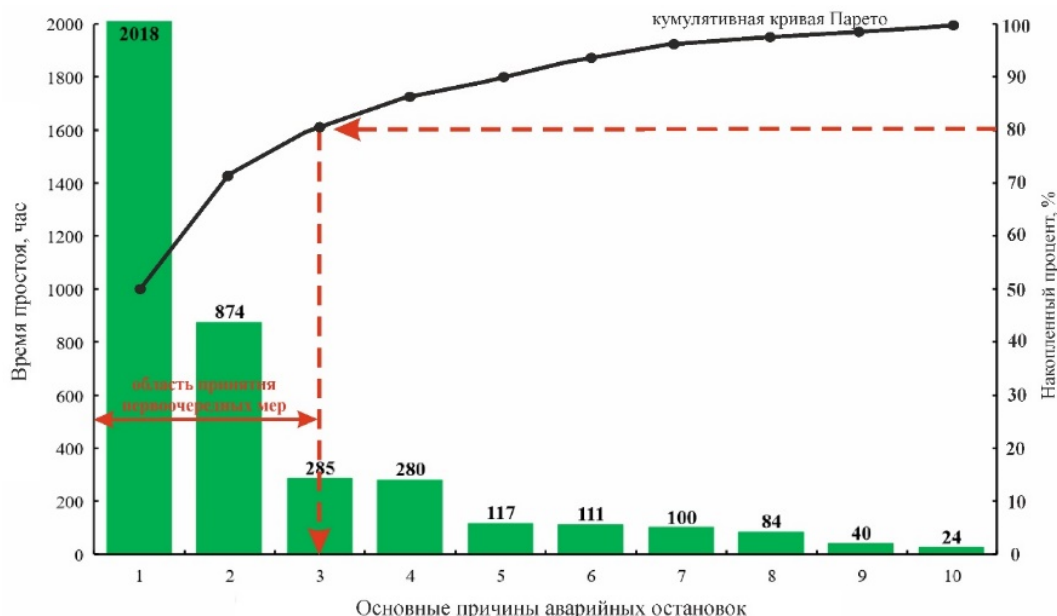


Рис. 2. Диаграмма Парето временных потерь из-за внеплановых остановок прокально-утилизационного комплекса по причине:

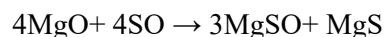
1 – разрушения футеровки камеры дожига котла-утилизатора дымовых газов и разрушения футеровки в расположенном до камеры дожига газохоме; 2 – выхода из строя механической части привода печи прокаливания; 3 – разрушения футеровки печи прокаливания; 4 – выхода из строя загрузочного тракта печи прокаливания; 5 – уплотнения на загрузочном обресе; 6 – выхода из строя электрооборудования; 7 – выхода из строя трубной части котла-утилизатора; 8 – выхода из строя среднего бандаж печи прокаливания; 9 – выхода из строя клапана регулировки подачи газа на горелку печи прокаливания; 10 – прочее

По результатам анализа разрушения футеровки камеры дожига котла-утилизатора дымовых газов и разрушения футеровки в газохоме расположенном до камеры дожига следует отметить, что традиционные решения для огнеупорной и теплоизоляционной футеровки, применяемые на установках обжига сырого кокса [19] не в полной мере, обеспечивают ее стойкость. За период эксплуатации проводимые визуальные осмотры позволили установить характерные виды разрушения футеровки, показанные на рис. 3.

Физико-химические факторы влияющие на надежность и долговечность футеровки оценивали по изменению макроструктуры переклазохромитовых кирпичей (ПХС) разрушенного рабочего слоя кладки (рис. 4). Изменение внутренней структуры переклазохромита после года эксплуатации наблюдается на глубине 40–50 мм от рабочей поверхности. Механическая прочность отработанных образцов переклазохромита на порядок ниже, чем у образцов, вы-

полненных из новых кирпичей, и составляет от 3 до 10 МПа. Данные факторы могут образовываться только при условии образования легкоплавких продуктов с низкой механической прочностью.

Зная химический состав футеровки ПХС, состоящий на 60 % из оксида магния и состав отходящих газов, содержащих серу, смоделировали процесс прохождения химических реакций:



В результате реакции оксида магния (MgO) и оксида серы (IV) (SO₂) образуется сульфат магния (MgSO₄) и сульфид магния (MgS), который в свою очередь при контакте с кислородом также образует сульфат магния. Сульфат и сульфид магния являются солями магния с температурами плавления ниже 1140 °С и механической прочностью не более 0,4–0,7 МПа [20]. Таким образом, возникает коррозия с образованием легкоплавких продуктов (MgSO₄) и последующее оплавление.



а



б



в



г

Рис. 3. Характерные виды разрушения футеровки камеры дожига котла-утилизатора дымовых газов:

а – раскрытие температурных швов по горизонту с последующим обгоранием стального крепежа керамических блоков; *б* – провисание футеровки над входом в трубную часть котла с раскрытием теплоизоляционного слоя; *в* – выпадение клинового кирпича из верхнего свода с последующим частичным обрушением; *г* – дугообразное отклонение футеровки короткой стены (напротив газохода) и длинной стены (напротив малых арок) от вертикальной плоскости кожуха, растрескивание и обрушение верхней части футеровки газохода



а



б

Рис. 4. Кирпичи из переклазохромита после года эксплуатации с характерными признаками коррозионного разрушения:

а – изменения высоты кирпича и оплавление рабочей поверхности кладки. Уменьшено в 5 раз;

б – зонное строение продуктов коррозии. Увеличенный фрагмент

Кроме традиционных решений по использованию кирпичной футеровки, на базе Прокально-утилизационного комплекса продолжа-

ются исследовательские работы по применению неформованных огнеупорных материалов (огнеупорных бетонов). Бетоны превосходят

формованные огнеупоры по таким показателям как [21]: затраты на производство, эффективность укладки, долговечность, безопасность, расход материалов. Однако качество футеровки из огнеупорных бетонов зависит как от качества материала, так и от качества выполненных работ по их укладке (требуется высокая квалификация специалистов), а также от соблюдения режимов проведения сушки и обжига бетона.

Так, например, специалисты ВгАЗа обладают опытом использования торкрет-бетонов различных производителей для двухслойной футеровки газопроводов: первый слой – теплоизоляционный, второй слой – рабочий, толщиной не более 235 мм. На первом слое используются более легкие бетоны с коэффициентом теплопроводности 0,22–0,30. На втором слое используется торкрет-бетон с максимальной темпера-

турой применения до 1500 °С. Торкрет-бетон теплоизоляционного слоя наносится единым слоем, а рабочий слой наносится картами площадью от 0,7 до 0,9 м². Расположенные между картами температурные швы заполняются керамическим волокном.

Исследование образцов бетонов после эксплуатации показывает характерное зонное строение (рис. 5, *а, б*), сформированное путем протекания сложных механизмов процесса перерождения и износа огнеупоров. Также при исследовании образцов затвердевшей торкрет-массы после ее нанесения (то есть до начала эксплуатации) были обнаружены несплошности, пустоты и неравномерное распределение частиц смеси (рис. 5, *в, г*), что также возможно является причиной преждевременного разрушения футеровки.

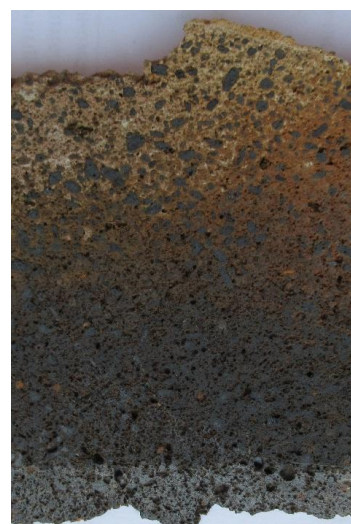
*а**б**в**г*

Рис. 5. Фрагменты образцов бетонов:
а и б – после эксплуатации. Уменьшено в 2,5 раза; *в и г* – характерные несплошности, пустоты и неравномерное распределение частиц смеси. Увеличено в 25 раз

Для выявления конструктивных особенностей, снижающих стойкость футеровочных материалов газохода (расположенного до камеры дожиг котла-утилизатора) было проведено компьютерное моделирование (в программном комплексе Solid Works) движения потока газа, рис. 6 с граничными условиями: максимальная температура на входе в газоход 950 °С; макси-

мальная температура на входе в котел 1350 °С; объемный расход газов на входе в котел от прокалочной печи 63 220 м³/час. При этом учитывали, что в этой зоне у газов из печи прокалки практически отсутствует теплосъем, температура и количество газа нестабильны и напрямую зависят от режима работы печи прокалки.

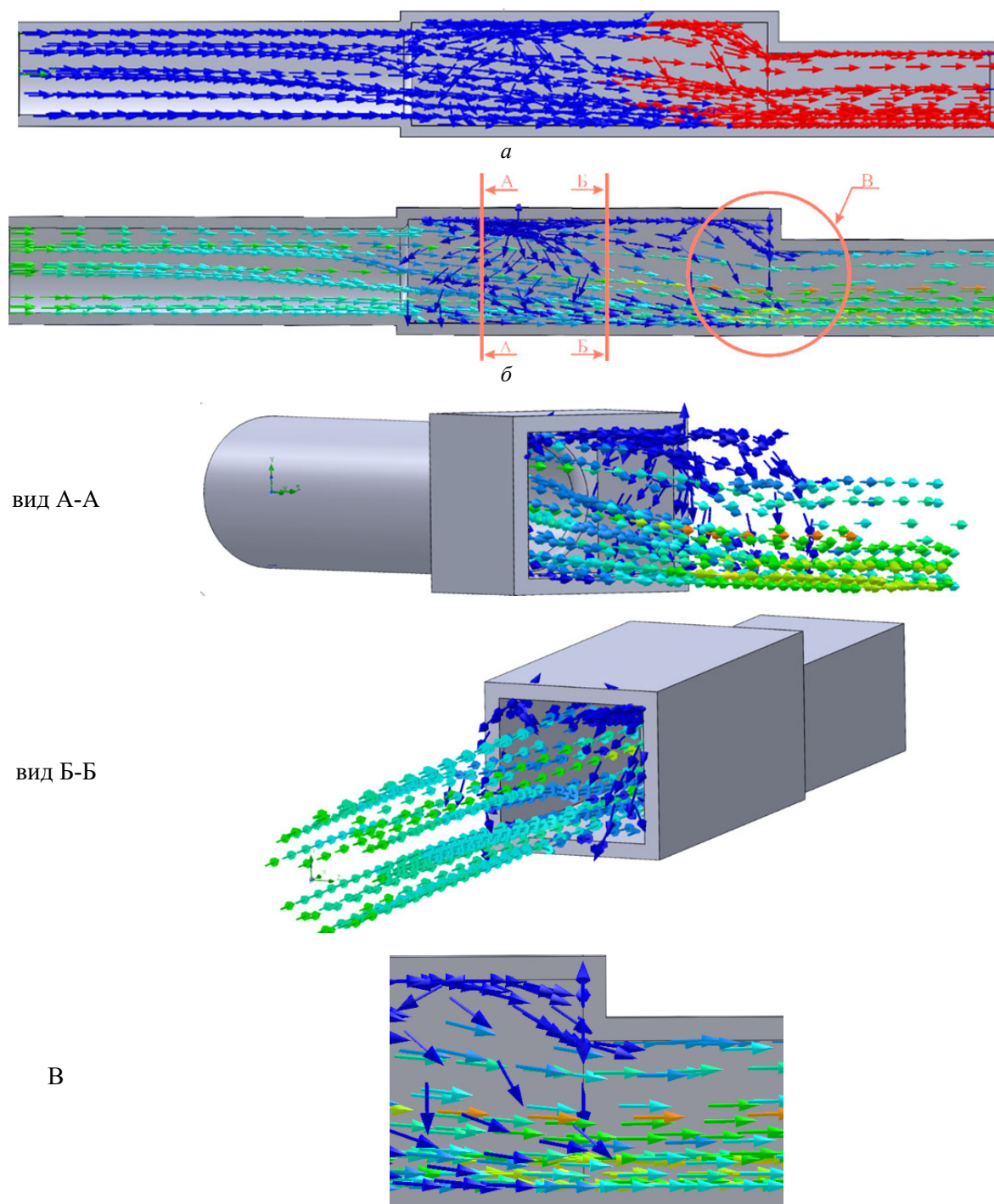


Рис. 6. Схема движения потоков в газоходе до камеры дожиг котла-утилизатора:
 а – температурное поле (синяя зона – температура 950 °С, красная зона – 1390 °С); б – изменение скорости потока от 4,0 до 7,5 м/с

В центральной части газохода было обнаружено аномальное замедление потока газа до 2,0 м/с (синие стрелки рис. 6, б) в пристеночных зонах см. сечения А-А, Б-Б; при этом в центральной зоне газового потока формируется течение газа со скоростью порядка 10 м/с (стрелка оранжевого цвета на увеличенном фрагменте В). В период эксплуатации максимально часто разрушение футеровки фиксировали именно в переходной зоне где происходит резкое уменьшении сечения с большего на меньшее (рис. 6, ув. фрагмент В), а на практике при контроле температур в этой области был зафиксирован ее минимальный прогрев, что, возможно, и приводит к разрушению.

В заключении следует отметить, что результатом проведенной исследовательской работы стала разработка нового проекта футеровки газохода с устройством арочного свода вместо горизонтального и нового проекта по камере дожига на основе муллитового огнеупора и целого ряда конструктивных решений, ранее прошедших испытания с положительным результатом. Принятые изменения по футеровке газохода и камеры дожига котла утилизатора дают возможность эксплуатации Прокалочного утилизационного комплекса с исключением внеплановых остановок, а также позволяют увеличить производительность оборудования до 5 % с получением прокаленного кокса стабильного качества.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Францев, Ю. А. Успешный опыт организации производства обожженных анодов на «РУСАЛ Волгоград» / Ю. А. Францев, И. Ф. Беспалый, В. Ю. Яковлев, М. В. Голубев // Цветные металлы и минералы – 2019 : сб. докл. XI междунар. конгресса, Красноярск, 16–20 сентября 2019 года. – Красноярск: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-инновационный центр», 2019. – С. 328–334.
2. Рахманов, М. Л. Производство алюминия / М. Л. Рахманов, О. С. Ежова // Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий. – Москва, Санкт-Петербург : Центр экологической промышленной политики, 2019. – С. 346–381.
3. Твердохлебов, В. П. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технологии и свойства / В. П. Твердохлебов, С. А. Храменко, Ф. А. Бурюкин, И. В. Павлов, С. Е. Прошкин // Журнал СФУ. Химия. 2010. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/neftyanoy-koks-dlya-alyuminiyevoy-promyshlennosti-tehnologiya-i-svoystva> (дата обращения: 21.08.2023)
4. РУСАЛ подтвердил беспрецедентно низкий углеродный след алюминия ALLOW INERTA. Официальный сайт компании РУСАЛ <https://rusal.ru/press-center/press-releases/rusal-podtverdil-bespretsedentno-nizkiy-uglerodnyy-sled-alyuminiya-allow-inerta/> (дата обращения: 21.08.2023)
5. Инертный анод. Официальный сайт компании РУСАЛ <https://rusal.ru/innovation/technology/inertnyy-anod/> (дата обращения: 21.08.2023)
6. Пат. 2408743 Российская Федерация, МПК C25C 3/12, C1. Инертный анод электролизера для производства алюминия / Гусев А. О., Симаков Д. А., Кирко В. И., Степанов Е. И. Побызиков В. И., Васильев Ю. В. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Объединенная Компания РУСАЛ Инженерно-технологический центр" (ООО "РУСАЛ ИТЦ") Заявка: 2009119068/02 2009.05.21 (дата обращения: 21.08.2023)
7. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 11-2022 «Производство алюминия» Москва Бюро НДТ 2022 / Официальный сайт РОССТАНДАРТ(www.gost.ru) страница <https://www.rst.gov.ru/portal/gost/home/activity/NDT/actualizationdirectory2022>(дата обращения: 21.08.2023)
8. Морозов, Ю. А. Технология инертного анода в концепции зеленой металлургии алюминия / Ю. А. Морозов, В. С. Ялунин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 15–22. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-15-22>
9. Edwards, Les & Hunt, Maia & Weyell, Peter & Nord, Julia & Côté, Jules & Coulombe, Patrick & Morais, Nadia. (2022). Quantifying the Carbon Footprint of the Alouette Primary Aluminum Smelter. JOM. 74. 1-11. 10.1007/s11837-022-05501-y
10. Стратегические приоритеты En+ Group. Внедрение инноваций. Официальный сайт Компании En+ Group <https://enplusgroup.com/ru/company/strategy/> (дата обращения: 21.08.2023)
11. Анализ мирового рынка нефтяного кокса в 2018–2022 гг., прогноз на 2023–2027 гг. <https://businessat.ru/catalog/id8149/>
12. Edwards, Les. (2014). The History and Future Challenges of Calcined Petroleum Coke Production and Use in Aluminum Smelting. JOM. 67. 10.1007/s11837-014-1248-9.
13. Ножко, С. И. Некоторые аспекты прокатки сырых нефтяных коксов для нужд алюминиевой промышленности / С. И. Ножко, А. А. Верегитин, Д. Н. Демичев, А. В. Гуляев // Системы. Методы. Технологии. – 2017. – № 4(36). – С. 127-133. – DOI 10.18324/2077-5415-2017-4-127-133.
14. Sharikov, F. Y. Selection of key parameters for green coke calcination in a tubular rotary kiln to produce anode pet-coke / F. Y. Sharikov, Y. V. Sharikov, K. A. Krylov // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2020. – Vol. 15, No. 23. – P. 2904-2912.
15. Ran, H. Self-sensing high-performance ultra-light-weight engineered cementitious composites using calcined petroleum coke / Ran H, Elchalakani M, Yehia S, Cai J, Yang B. // Journal of Cleaner Production. 2023 Sept 15;418:138241. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.138241
16. Лапаев, И. И. О футеровке вращающихся печей для прокаливания нефтяного кокса / И. И. Лапаев,

В. В. Сорокин, С. Е. Голоскин, А. В. Орлов // Новые огнеупоры. 2019;(1):3-7. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-1-3-7>

17. *Хитосе, К.* Статистические методы повышения качества / Хитосе Кумэ // – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.

18. *Нетес, В. А.* Применение анализа Парето для повышения надежности / В. А. Нетес // Методы менеджмента качества. 2002 № 11. – С. 35–39.

19. Служба огнеупоров : справ. изд. / Л. М. Аксельрод [и др.] ; под ред. И. Д. Кашеева, Е. Е. Гришенкова. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 656 с.

20. *Евстигнеев, А. И.* Исследование свойств смесей с связующими на основе сульфата магния / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, А. А. Тарасова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2010. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-svoystv-smesey-s-svyazuyuschimi-na-osnove-sulfata-magniya> (дата обращения: 25.08.2023).

21. *Маргишвили, А. П.* Разработка и внедрение в производство новых огнеупорных материалов и пропантов. / А. П. Маргишвили, С. И. Гершкович, А. Н. Иксанова, И. Г. Белова, Ф. Р. Иксанов, В. В. Скурихин // Новые огнеупоры. 2017; (6). – С. 16–24.