

**РЕШЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА УРФУ 2.6.03.08
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК**

от «28» июня 2024 г. № 6

о присуждении Якорнову Сергею Александровичу, гражданство Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Технология переработки цинксодержащих пылей дуговых сталеплавильных печей с получением цинкового порошка» по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов принята к защите диссертационным советом УрФУ 2.6.03.08 «25» апреля 2024 г., протокол № 4.

Соискатель, Якорнов Сергей Александрович, 1972 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Переработка свинецсодержащих промпродуктов медного производства» защитил в 1998 г. в диссертационном совете, созданном на базе Уральского государственного технического университета;

работает в должности первого заместителя технического директора ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», г. Верхняя Пышма Свердловской обл.

Диссертация выполнена в ОАО «Уральская горно-металлургическая компания».

Научный консультант – доктор технических наук, старший научный сотрудник, **Скопов Геннадий Вениаминович**, ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», Управление стратегического планирования, главный специалист.

Официальные оппоненты:

Смирнов Леонид Андреевич – доктор технических наук, профессор, академик РАН, АО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург, научный руководитель института;

Архипов Павел Александрович – доктор химических наук, ФГБУН Институт высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, директор института;

Немчинова Нина Владимировна – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Металлургия цветных металлов», заведующий кафедрой

дали положительные отзывы на диссертацию.

Соискатель имеет 54 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликована 41 работа, из них 18 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 15 статей в журналах, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science; 7 патентов РФ на изобретения. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации 17,75 – п.л., авторский вклад – 5,01 п.л.

Основные публикации по теме диссертации

статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Якорнов С.А.** Кинетические закономерности выщелачивания цинка из промпродуктов / **С.А. Якорнов**, Г.И. Мальцев, Р.С. Воинков, А.А. Гребнева // *iPolytech Journal*. – 2024. – Т. 28. – №1 – С. 178-189. 1,0 п.л./0,25 п.л.

2. **Якорнов С.А.** Кинетический режим выщелачивания цинка щелочью / **С.А. Якорнов**, Г.И. Мальцев, Р.С. Воинков, А.А. Гребнева // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. – 2024. – Т.22. – № 1. – С. 29-38. 0,8 п.л./ 0,2 п.л.

Yakornov S.A. Kinetic mode of zinc leaching with alkali / **S.A. Yakornov**, G.I. Maltsev, R.S. Voinkov, A.A. Grebneva // *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]* – 2024. – Vol.22 – № 1. – P. 29-38. 0,8 п.л./ 0,2 п.л. (WoS).

3. Козлов П.А. Исследование поведения цинка и примесей при щелочном выщелачивании цинксодержащего продукта пирометаллургической переработки пылей черной металлургии. Исследование фазового состава остатка после выщелачивания / П.А. Козлов, А.М. Паньшин, **С.А. Якорнов**, Д.А. Ивакин // Цветные металлы. – 2021. – №3. – С. 52-58. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Kozlov P.A. Understanding the behavior of zinc and impurities during alkaline leaching of zinc bearing product obtained as a result of pyrometallurgical processing of ferrous metallurgy dusts and examining the phase composition of leaching residue / P.A. Kozlov, A.M. Panshin, **S.A. Yakornov**, D.A. Ivakin // Tsvetnye Metally. – 2021. – Vol. 2021. – № 3. – P. 52-58. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

4. Козлов П.А. Разработка и внедрение технологии получения цинкового порошка из цинксодержащих пылей черной металлургии / П.А. Козлов, **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, Д.А. Ивакин // Цветные металлы. – 2020 – №5. – С. 6-11. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Kozlov P.A. Production of zinc powder from zinc-bearing steel industry dusts: Process development and adoption / P.A. Kozlov, **S.A. Yakornov**, A.M. Panshin, D.A. Ivakin // Tsvetnye Metally. – 2020. – Vol. 2020. – № 5. – P. 6-11. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

5. Kozlov P.A. Reasearch and Development of Pyrohydrometallurgical Technology of Ferrous Dust Treatment with Zinc Powder Production / P.A. Kozlov, A.M. Panshin, **S.A. Yakornov** // Proceedings of the 10th European Metallurgical Conference, EMC 2019. – 2019. – Vol. 1. – P.199-209. 0,9 п.л./0,3 п.л. (Scopus).

6. Мамяченков С.В. Обзор результатов исследований электролитического получения цинковых порошков из щелочных растворов / С.В. Мамяченков, **С.А. Якорнов**, О.С. Анисимова, Д.И. Блудова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23. – №2. – С. 367-394. 1,7 п.л./0,5 п.л.

7. Мамяченков С.В. Исследование влияния технологических параметров на эффективность электролиза цинка из щелочных растворов / С.В.

Мамяченков, **С.А. Якорнов**, О.С. Анисимова, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2018. – №6. – С. 12-19. 0,6 п.л./0,2 п.л.

Mamyachenkov S.V. Research into the Influence of Process Parameters on the Efficiency of Zinc Electrolysis from Alkaline Solutions / S.V. Mamyachenkov, **S.A. Yakornov**, O.S. Anisimova, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2019. – Vol. 60. – №1. – P. 1-7. 0,5 п.л./0,2 п.л. (Scopus, WoS).

8. **Якорнов С.А.** Способ переработки электросталеплавильной пыли методом прокалки с известью и последующим щелочным выщелачиванием / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.И. Грудинский, В.Г. Дюбанов, Л.И. Леонтьев П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Технология металлов. – 2017. – №11. – С. 13-19. 0,5 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. Method of Electric Arc Furnace Dust Processing by Calcination with Lime with Following Alkaline Leaching / **S.A. Yakornov**, A.M. Panshin, P.A. Kozlov, P.I. Grudinsky, V.G. Dyubanov, L.I. Leontiev, D.A. Ivakin // Russian Metallurgy (Metally). – 2018. – Vol. 2018. – № 13. – P. 1282-1287. 0,5 п.л./0,1 п.л. (Scopus, WoS).

9. **Якорнов С.А.** Применение электролитических цинковых порошков для цементации золота из цианистых растворов / **С.А. Якорнов**, К.Д. Наумов, В.Г. Лобанов, П.А. Козлов, Я.Д. Зелях, И.М. Крутиков, Д.Ю. Скопин, Д.А. Ивакин // Металлург. – 2018. – №5. – С.50-55. 0,5 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. Use of Electrolytic Zinc Powder for Cementation of Gold from Cyanide Solutions / **S.A. Yakornov**, K.D. Naumov, V.G. Lobanov, P.A. Kozlov, Ya.D. Zelyakh, I.M. Krutikov, D.Yu. Skopin, D.A. Ivakin // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62. – № 5-6. – P. 456-463. 0,5 п.л./0,1 п.л. (Scopus, WoS).

10. **Якорнов С.А.** Разработка технологии гидрometаллургической переработки вельц-оксида с получением карбонизированного свинцового кека / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин, Е.В. Голубева // Металлург. – 2017. – №10. – С. 60-66. 0,5 п.л./0,2 п.л.

Yakornov S.A. Development of waelz-oxide hydrometallurgical processing technology with preparation of carbonized lead cake / **S.A. Yakornov**, A.M.

Panshin, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin, E.V. Golubeva // Metallurgist. – 2017. – Vol. 61. – №. 9-10. – P. 891–898. 0,5 п.л./0,2 п.л. (Scopus, WoS).

11. **Якорнов С.А.** Изучение термодинамики и кинетики процесса взаимодействия оксида цинка в составе прокаленной пыли электродуговых печей с NaOH / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Цветные металлы. – 2017. – №10. – С. 57-62. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. Investigation of thermodynamics and kinetics of zinc oxide interaction in the composition of calcinated dusts of electric arc furnaces with NaOH / **S.A. Yakornov**, А.М. Panshin, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Tsvetnye Metally. – 2017. – Vol. 2017. – № 10. – P. 57-62. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

12. **Якорнов С.А.** Разработка технологии и аппаратурной схемы пирометаллургической переработки пылей черной металлургии / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Цветные металлы. – 2017. – №9. – С. 39-44. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. Development of technology and instrumental scheme of pyrometallurgical processing of ferrous metallurgy dusts / **S.A. Yakornov**, А.М. Panshin, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Tsvetnye Metally. – 2017. – Vol. 2017. – № 9. – P. 39-44. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

13. **Якорнов С.А.** Разработка технологии грануляции шихты на основе пылей электродуговых печей для пирометаллургической переработки во вращающихся печах / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Металлург. – 2017. – №7. – С. 25-29. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. Development of Charge Pelletizing Technology Based on Electric Arc Furnace Dust for Pyrometallurgical Processing in Rotary Kilns / **S.A. Yakornov**, А.М. Panshin, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Metallurgist. – 2017. – Vol. 61. – № 7-8. – P. 25-29. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus, WoS).

14. Kozlov P.A. Research, Development and Implementation of Processing Zinc Oxided Raw Material for Zinc and Indium Recovery at Chelyabinsk Zinc Plant / P.A. Kozlov, А.М. Panshin, **S.A. Yakornov** // Proceedings of the 9th European Metallurgical Conference, EMC 2017. – 2017.– Vol. 4. – P. 1669-1679. 0,8 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

15. **Якорнов С.А.** Термодинамический анализ разложения феррита цинка в пыли электродуговой плавки стали известью / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.И. Грудинский, В.Г. Дюбанов, Л.И. Леонтьев, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Известия ВУЗов. Цветная металлургия. – 2017. – №5. – С. 28-33. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. Thermodynamic Analysis of Zinc Ferrite Decomposition in Electric Arc Furnace Dust by Lime / **S.A. Yakornov**, A.M. Panshin, P.I. Grudinsky, V.G. Dyubanov, L.I. Leontiev, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2017. – Vol. 58. – № 6. – P. 586-590. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus, WoS).

16. **Якорнов С.А.** Современное состояние технологий выщелачивания пылей черной металлургии и продуктов их пирометаллургической переработки (кислотная, аммонийная и щелочная технологии) / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Цветные металлы. – 2017. – №5. – С. 37-43. 0,5 п.л./0,2 п.л.

Yakornov S.A. Modern state of leaching technologies for ferrous metal dusts and their pyrometallurgical processing products (acid, ammonium and alkaline technologies) / **S.A. Yakornov**, A.M. Panshin, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Tsvetnye Metally. – 2017. – Vol. 2017. – № 5. – P. 37-43. 0,5 п.л./0,2 п.л. (Scopus).

17. **Якорнов С.А.** Современное состояние переработки пылей электродуговых печей / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Цветные металлы. – 2017. – №4. – С. 23-29. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Yakornov S.A. . Current state of electrical arc furnace dusts processing in Russia and abroad / **S.A. Yakornov**, A.M. Panshin, P.A. Kozlov, D.A. Ivakin // Tsvetnye Metally. – 2017. – Vol. 2017. – № 4. – P. 23-29. 0,4 п.л./0,1 п.л. (Scopus).

18. **Якорнов С.А.** Особенности процесса разложения феррита цинка известью в пыли электродуговой плавки стали / **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.И. Грудинский, В.Г. Дюбанов, Л.И. Леонтьев, П.А. Козлов, Д.А. Ивакин // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2017. – №3. С. 29-33. 0,4 п.л./0,1 п.л.

Патенты:

19. Патент 2802932 РФ. Способ переработки окисленного цинксвиинецсодержащего сырья: опубл. 05.09.2023 / П.А. Козлов, А.М. Паньшин, **С.А. Якорнов**, Д.А. Ивакин, О.В. Беляков; заявитель и патентообладатель НЧОУ ВО «Технический университет». – Изобретения. Полезные модели. – Бюл. № 25. 2023. – 6 с.

20. Патент 2757151 РФ. Способ получения цинкового порошка: опубл.:11.10.2021 / В.Г. Лобанов, К.Д. Наумов, **С.А. Якорнов**, М.А. Карпов, Е.Н. Селиванов, О.В. Нечвоглод; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – Изобретения. Полезные модели. –Бюл. № 29. 2021. – 6 с.

21. Патент 2743567 РФ. Способ получения цинкового порошка из цинксодержащих отходов: опубл. 19.02.2021 / П.А. Козлов, **С.А. Якорнов**, П.А. Избрехт, А.М. Паньшин, Ф.П. Головки, Д.А. Ивакин; заявитель и патентообладатель НЧОУ ВО «Технический университет». – Изобретения. Полезные модели. –Бюл. № 5. 2021. – 5 с.

22. Патент 2732817 РФ. Способ переработки пылей электродуговых печей: опубл.: 22.09.2020 / П.А. Козлов, **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Избрехт, В.А. Лапин, Ф.П. Головки, Д.А. Ивакин, Л.И. Леонтьев, В.Г. Дюбанов; заявитель и патентообладатель НЧОУ ВО «Технический университет». – Изобретения. Полезные модели. –Бюл. № 27. 2020. – 5 с.

23. Патент 2663918 РФ. Способ получения цинкового порошка из цинксодержащих отходов: опубл. 13.08.2018 / П.А. Козлов, **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Избрехт, Д.И. Махмудов, А.В. Затонский, Д.А. Ивакин; заявитель и патентообладатель ПАО «Челябинский цинковый завод». – Изобретения. Полезные модели. –Бюл. № 23. 2018. – 5 с.

24. Патент 2653394 РФ. Способ переработки цинксодержащих пылей электродуговых печей: опубл. 08.05.2018 / П.А. Козлов, **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Избрехт, Д.И. Махмудов, А.В. Затонский, Д.А. Ивакин, Л.И.

Леонтьев, В.Г. Дюбанов; заявитель и патентообладатель ПАО «Челябинский цинковый завод». – Изобретения. Полезные модели. –Бюл. № 13. 2018. – 5 с.

25. Патент 2659513 РФ. Шихта для вельцевания цинксодержащих материалов: опубл. 27.09.2006 / П.А. Козлов, **С.А. Якорнов**, А.М. Паньшин, П.А. Избрехт, Д.И. Махмудов, А.В. Затонский, Ю.В. Решетников, Д.А. Ивакин; заявитель и патентообладатель ОАО «Челябинский цинковый завод». – Изобретения. Полезные модели. –Бюл. № 27. 2006. – 4 с.

На автореферат и диссертацию поступили отзывы:

1. Суздальцева Андрея Викторовича, доктора химических наук, заведующего научной лабораторией электрохимических устройств и материалов Химико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург. Содержит вопросы об экспериментальной оценке доли протекания реакции разложения феррита цинка с образованием оксида цинка и оксида железа (III); способе подбора соотношения известняка и пыли дуговых сталеплавильных печей (ДСП) для опытно-промышленных испытаний и возможности использования железосодержащего продукта для производства чугуна/стали.

2. Гребцова Владимира Анатольевича, главного инженера филиала ООО «УМК-Сталь» - «Металлургический завод «Электросталь Тюмени», г. Тюмень. Содержит вопрос о характере изменения кинетики перехода цинка из феррита цинка в оксид цинка при изменении состава пылей.

3. Жукова Владимира Петровича, доктора технических наук, профессора, ведущего научного сотрудника лаборатории «Окускование и физико-механические испытания» АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург. Содержит вопросы о влиянии примесных элементов в составе пылей на эффективность предложенной технологии и возможности получения товарного железного концентрата, пригодного для переработки на сталеплавильных предприятиях.

4. Вохмяковой Ирины Сергеевны, кандидата технических наук, руководителя группы перспективных технологий и металлизации ООО

«Научно-производственное внедренческое предприятие «ТОРЭКС», г. Екатеринбург. Содержит замечания о приведении требований к флюсующей добавке, используемой для замещения цинка на кальций при высокотемпературной обработке; обосновании необходимости использования пылей ДСП с содержанием цинка свыше 12 % для предлагаемой технологии, а также о неполном раскрытии темы подготовки спека перед стадией щелочного выщелачивания.

5. Харченко Александра Сергеевича, доктора технических наук, доцента, заведующего кафедрой металлургии и химических технологий, и **Бигеева Вахита Абдрашитовича**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры металлургии и химических технологий ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск. Содержит замечания об увеличении стоимости логистики и затруднении сбыта при выведении потребителя железосодержащего остатка выщелачивания за границы предприятия; отсутствии прослеживаемой связи между исследованиями, выполненными в главе 2 диссертации, и разработкой технологии, а также об уместности представления в автореферате данных по образованию феррита цинка при вельцевании без добавления оксида кальция.

6. Пышминцева Игоря Юрьевича, доктора технических наук, генерального директора ООО «Исследовательский центр ТМК», г. Москва. Содержит замечания о необходимости представления рекомендаций по целевой концентрации цинка и оксида цинка в пыли для электросталеплавильного производства и по переработке пыли с низкой концентрацией цинка; неоднозначности употребления фразы «кальцийсодержащая добавка», и вопрос о типе кальцийсодержащей добавки. Также содержит ряд замечаний по оформлению текста и рисунков в автореферате.

7. Избрехта Павла Александровича, генерального директора АО «Челябинский цинковый завод», г. Челябинск. Содержит замечания о недостаточном освещении вопросов, связанных с поддержанием замкнутого

цикла в щелочном гидрометаллургическом переделе и сохранением активности цинкового порошка, полученного электроэкстракцией, во времени.

8. Богатыревой Елены Владимировны, доктора технических наук, доцента, профессора кафедры Цветных металлов и золота ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва. Содержит вопрос о содержании в объекте исследования и способе отделения сферических частиц стали, замечания о целесообразности пояснения соответствия между выводом б, где речь идет о плотном контакте частиц феррита цинка и оксида кальция, и использованием известняка при апробации на пилотной установке, о некорректности заключения о режиме протекания процесса щелочного выщелачивания (внешнедиффузионный, внутридиффузионный, кинетический) только на основании значения энергии активации.

9. Цымбулова Леонида Борисовича, доктора технических наук, профессора, директора Департамента по исследованиям и разработкам ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург. Содержит замечания о необходимости применения методики твердофазных диффузионных отжигов на реальном образце пыли ДСП; отличии результатов термодинамического анализа системы $ZnFe_2O_4-CaO$ в присутствии углерода от имеющихся в работе результатов термодинамического анализа; и вопрос о степени отгонки цинка в процессе спекания за счет присутствия в пыли углерода.

10. Бажина Владимира Юрьевича, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой металлургии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», г. Санкт-Петербург. Содержит замечания об отсутствии единства единиц измерения температуры в работе и о теоретической возможности диссоциации карбоната кальция при плавке стали в дуговой печи; вопрос о корреляции между собой данных по содержанию цинка в растворах выщелачивания и электроэкстракции, а также о возможности получения цинксодержащего электролита с более высокими концентрациями.

11. Метелкина Анатолия Алексеевича, кандидата технических наук, доцента, главного специалиста научно-исследовательского центра АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», г. Нижний Тагил. Содержит вопросы о поведении изучаемой шпинели с оксидом магния при замене известняка доломитом и возможности использования железокальциевого шлама после его подготовки в качестве добавки в железосодержащее сырье с дальнейшей переработкой в доменной печи.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их компетентностью и широкой известностью в области гидрометаллургических и электрохимических процессов цветной металлургии, в частности, разработки и исследования технологий извлечения ценных компонентов, что подтверждается публикациями в рецензируемых российских и международных научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что представленная диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, в которой содержится решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, а именно разработка научно-обоснованного подхода к комплексной переработке цинксодержащих пылей дуговых сталеплавильных печей в щелочных средах с получением цинкового порошка и железо-кальциевого продукта для цементного производства.

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку, наиболее значимые из которых:

1. Выявлены механизмы твердофазного взаимодействия в системе $ZnFe_2O_4-CaO$, закономерности процессов, протекающих при прокатке гранул в трубчатой печи. Показано, что кальций диффундирует из фазы оксида кальция в фазу феррита цинка и в зоне локализации обменного твердофазного

взаимодействия вблизи границы соприкосновения образцов вытесняет цинк из феррита цинка.

2. Предложена схема диффузии элементов внутри фазы феррита цинка в результате взаимодействия её с оксидом кальция и впервые установлено образование зональной структуры (3 зоны) внутри фазы феррита цинка.

3. Выявлено, что кинетические характеристики выщелачивания спека в щелочных средах, механизм и лимитирующая стадия процесса зависят от концентрации каустической щелочи и отношения жидкости к твердому (Ж:Т). При $C_{\text{NaOH}} \leq 9$ моль/дм³, Ж:Т=9 процесс протекает в диффузионном режиме и характеризуется значением энергии активации $E = 12,44$ кДж/моль; при Ж:Т = 4–8; C_{NaOH} более 9, но менее 10 моль/дм³ процесс протекает в кинетическом режиме и характеризуется значением энергии активации $E = 41,57$ кДж/моль.

4. Установлено, что оптимальный диапазон плотности тока для электроэкстракции щелочных цинкатных растворов с получением порошкообразного продукта составляет 1000-2000 А/м². Увеличение плотности тока выше 2000 А/м² увеличивает сопротивление электролита (напряжение на ванну) и удельный расход электроэнергии.

5. Выявлено влияние содержания свинца в цинкатном растворе на форму и размер частиц осаждаемых цинковых порошков. Показано, что при электроэкстракции цинка из растворов, содержащих 2-5 мг/дм³ свинца, частицы порошка имеют древовидную форму и обладают повышенной удельной площадью поверхности, а при электроэкстракции из неочищенных от свинца растворов цинковые порошки имеют форму сросшихся шарообразных частиц.

6. Разработана технология переработки пылей ДСП, включающая спекание с оксидом кальция взамен кокса, выщелачивание спека в растворах NaOH, очистку растворов от свинца, электроэкстракцию цинка с получением тонкодисперсного цинкового порошка для цементации золота, очистки

растворов от примесей при производстве цинка по классической технологии и железо-кальциевого продукта для цементного производства.

Научные результаты, полученные в работе, апробированы в лабораторных и опытно-промышленных масштабах. На основе результатов математического планирования лабораторных экспериментов оптимизированы параметры щелочного выщелачивания спеченных с оксидом кальция пылей ДСП; исследованы свойства цинковых порошков; проведены опытно-промышленные испытания комбинированной технологии переработки пылей ДСП с получением высококачественных цинковых порошков и железо-кальциевого продукта, пригодного для цементного производства; выполнена оценка экономической эффективности разработанной технологии переработки пылей ДСП. Выявленные закономерности позволяют прогнозировать получение товарного продукта с заданными свойствами и минимизировать количество установочных экспериментов. Полученные в ходе исследования данные служат фундаментальной основой для промышленной реализации новой технологии переработки ранее складированных в отвал техногенных отходов – пылей дуговых сталеплавильных печей.

По результатам исследования и опытно-промышленных испытаний подготовлен и принят к практической реализации институтом АО «Уралмеханобр» (г. Екатеринбург) технологический регламент на проектирование промышленной установки с получением высококачественных цинковых порошков и железосодержащего продукта, реализуемого на предприятия строительной индустрии и горнодобывающей промышленности.

Технико-экономическая оценка проекта строительства завода по переработке 150 тыс. т в год пылей ДСП показала, что при капитальных затратах 7,9 млрд руб. срок окупаемости без учета срока строительства составит 6,7 года, ожидаемый экономический эффект – 694 млн руб/год.

На заседании 28 июня 2024 г. диссертационный совет УрФУ 2.6.03.08 принял решение присудить Якорнову С.А. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет УрФУ 2.6.03.08 в количестве 16 человек, из них 11 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 16, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного
совета УрФУ 2.6.03.08

 Олег Юрьевич Шешуков

Ученый секретарь
диссертационного совета
УрФУ 2.6.03.08

 Андрей Андреевич Шопперт

28.06.2024 г.

