ISNN 3030-3907

2026/2
VOLUME 4

DEVELOPMENT OF SCIENCE

ILMIY JURNAL



Development of science

Ilmiy jurnal

2026/2 VOLUME 4

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ КОАГУЛЯНТОВ ИЗ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СБРОСНЫХ СТОКОВ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Хужаев Ш.Ш.
Джизакский политехнический институт[1]
Шарипов С.Ш.
Навоийский государственный горно-технологический университет[2]
Шодикулов Ж.М.
Навоийский государственный горно-технологический университет[2]

Annotatsiya. Maqolada gidrometallurgiya ishlab chiqarishida hosil bo‘ladigan temir saqlovchi oqova suvlar va chiqindilardan temir koagulyantlarini olishning zamonaviy texnologiyalari tahlil qilingan. Ikkilamchi xom ashyo manbalari sifatida temirsizlantirish shlamlari, okalina, po‘latni silliqlash chiqindilari, travlenish shlamlari hamda kislotali shaxta suvlari ko‘rib chiqilgan. Oltingugurt va xlorid kislotalari yordamida kislotali eritib olish jarayonlari, temir fazalarining erish mexanizmlari va kinetik qonuniyatlari baholangan. Eritmalarni og‘ir metall aralashmalaridan tozalash usullari hamda asosiylik darajasini boshqarish orqali poliferrisulfat sintez qilish jarayoni yoritilgan. Sintez qilingan koagulyantlarning fizik-kimyoviy xossalari va asosiylik darajasining koagulyatsiya samaradorligiga ta’siri umumlashtirilgan. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, ikkilamchi resurslardan olingan koagulyantlar loyqalik, organik moddalar va fosforni olib tashlashda tijorat mahsulotlariga teng yoki ustun bo‘lib, ishlab chiqarish tannarxi pastroqdir. Temir saqlovchi chiqindilarni qayta ishlash texnologiyalari aylanuvchi iqtisodiyot va yashil kimyo tamoyillariga mos keladi.

Kalit so‘zlar: temir koagulyantlari; poliferrisulfat; kislotali eritib olish; temir saqlovchi chiqindilar; gidrometallurgiya; oqova suvlarni tozalash; aylanuvchi iqtisodiyot.

Аннотация. В статье представлен обзор современных технологий получения железных коагулянтов из железосодержащих отходов и сбросных стоков гидрометаллургического производства. Проанализированы основные виды вторичного сырья, включая шламы обезжелезивания, окалину, шлифовальные отходы стали, шламы травления и кислые шахтные воды. Рассмотрены процессы кислотного выщелачивания с применением серной и соляной кислот, механизмы растворения железосодержащих фаз и кинетические особенности извлечения железа. Освещены методы очистки растворов от примесей тяжёлых металлов и особенности синтеза полиферрисульфата методом щелочного старения с регулированием степени основности. Обобщены данные о физико-химических свойствах

ISSN 3030-3907

синтезированных коагулянтов, распределении форм железа по методу Fe–Ferron и влиянии степени основности на эффективность коагуляции. Показано, что коагулянты, полученные из вторичных ресурсов, обеспечивают высокую степень удаления мутности, органических веществ и фосфора при сниженной себестоимости по сравнению с коммерческими аналогами. Сделан вывод о технологической и экономической целесообразности переработки железосодержащих отходов в коагулянты в рамках принципов циркулярной экономики и зелёной химии.

Ключевые слова: железные коагулянты; полиферрисульфат; кислотное выщелачивание; железосодержащие отходы; гидрометаллургия; очистка сточных вод; циркулярная экономика.

Abstract. This paper reviews modern approaches to producing iron-based coagulants from iron-containing wastes and effluents generated by hydrometallurgical processes. Major secondary raw materials, including de-ironing sludge, mill scale, steel grinding waste, pickling sludge, and acid mine drainage, are analyzed in terms of composition and processing potential. Acid leaching using sulfuric and hydrochloric acids, dissolution mechanisms of iron-bearing phases, and kinetic aspects of iron extraction are discussed. Methods for removing heavy metal impurities from solutions and the synthesis of polyferric sulfate via controlled alkaline aging are described. The physicochemical properties of the synthesized coagulants, iron speciation according to the Fe–Ferron method, and the influence of basicity on coagulation performance are summarized. The results demonstrate that coagulants derived from secondary resources achieve high removal efficiencies of turbidity, organic matter, and phosphorus, while reducing production costs compared to commercial products. The technological feasibility and economic viability of converting iron-containing wastes into coagulants are substantiated within the framework of circular economy and green chemistry principles.

Keywords: iron coagulants; polyferric sulfate; acid leaching; iron-containing waste; hydrometallurgy; wastewater treatment; circular economy.

ВВЕДЕНИЕ

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР. Гидрометаллургическое производство является одним из основных источников железосодержащих отходов, включая кислые шахтные воды, шлам обезжелезивания, окалину и отработанные кислотные растворы [1]. Ежегодно в мире образуется 10–12 млн тонн стальных шлифовальных шламов, а объёмы кислых шахтных вод исчисляются сотнями миллионов кубометров [2]. Эти отходы содержат значительные концентрации железа, достигающие 64% в окалине [3], что

ISSN 3030-3907

представляет существенную ценность для синтеза коагулянтов. Железные коагулянты, включающие феррихлорид, феррисульфат и полиферрисульфат, занимают около 50% рынка неорганических коагулянтов в Европе с объёмом потребления около 2 млн тонн ежегодно [2]. Традиционное производство этих реагентов требует дорогостоящего сырья в виде железной руды или металлического железа, что обусловливает актуальность разработки технологий получения коагулянтов из вторичных железосодержащих ресурсов. Цель настоящего обзора заключается в систематизации современных подходов к получению железных коагулянтов из отходов гидрометаллургического производства, анализе механизмов синтеза и оценке эффективности разработанных материалов.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. Источники железосодержащего сырья. Основными источниками для получения железных коагулянтов служат окалина с содержанием железа 64–70%, представляющая собой смесь оксидов FeO, Fe_2O_3 и Fe_3O_4 и требующая предварительной обработки [3]; кислые шахтные воды с концентрацией железа 100–5000 мг/л, характеризующиеся низким pH и присутствием алюминия, марганца и тяжёлых металлов [4]; шлам обезжелезивания питьевой воды с содержанием железа 25–40%, отличающийся высокой чистотой и лёгкой доступностью [1]; шлифовальный шлам стали с содержанием железа 60–80%, загрязнённый маслами и требующий обезжиривания [2]; а также шлам травления с содержанием железа 30–50%, обладающий высоким содержанием кислоты и требующий нейтрализации [5].

Методы кислотного выщелачивания. Ключевым этапом получения коагулянтов является извлечение железа в раствор. При использовании серной кислоты оптимальные параметры составляют концентрацию 2–3 М, температуру 60–70°C, время 30–60 минут и отношение жидкость к твёрдому 10:1 [1, 6]. Преимуществами этого подхода являются низкая коррозионная активность и получение сульфатных коагулянтов, в то время как недостатком служит образование сульфата кальция при наличии кальция в сырье [7]. Применение соляной кислоты осуществляется при концентрации 1–9 М, температуре 318–378 К и времени 15–180 минут [3]. Данный метод обеспечивает высокую скорость растворения и получение хлоридных коагулянтов. Реакции растворения окалины протекают по следующим уравнениям: Fe_2O_3 взаимодействует с шестью молями HCl с образованием двух молей $FeCl_3$ и трёх молей воды; Fe_3O_4 реагирует с восемью молями HCl с образованием одного моля $FeCl_2$, двух молей $FeCl_3$ и четырёх молей воды;

ISSN 3030-3907

FeO вступает в реакцию с двумя молями HCl с образованием $FeCl_2$ и воды [3].

Методы очистки растворов. Для удаления примесей тяжёлых металлов применяются селективное осаждение при pH 4–5 для удаления алюминия, хрома, молибдена, меди и никеля [2]; цементация для восстановления меди и никеля металлическим железом [2]; экстракция органическими растворителями такими как метилизобутилкетон и бензол [8]; а также ионный обмен на катионитах [5].

Синтез полиферрисульфата. Полиферрисульфат синтезируется методом щелочного старения, включающим три последовательных этапа. На первом этапе осуществляется окисление двухвалентного железа до трёхвалентного с использованием перекиси водорода, нитрата натрия, персульфатов или бактериального окисления [9, 10]. На втором этапе происходит гидролиз при добавлении гидроксида натрия по уравнению $Fe_2(SO_4)_3$ плюс n гидроксид-ионов образует $Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n}$ плюс n сульфат-ионов. На третьем этапе осуществляется полимеризация по уравнению m молей $Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}$ образует полимер $[Fe_2(OH)_n(SO_4)_{3-n/2}]_m$ [9]. Степень основности, представляющая собой мольное отношение добавленной щёлочи к общему содержанию железа, варьируется в диапазоне 0.1–0.4 [1].

ОБСУЖДЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ. Эффективность кислотного выщелачивания. Исследования демонстрируют высокую эффективность извлечения железа при оптимизированных параметрах. Извлечение из шлама обезжелезивания составляет 0.45 грамма железа на грамм сухого шлама, что соответствует 45%, при температуре 70°C, времени 30 минут, отношении жидкость к твёрдому 10:1 и концентрации серной кислоты 3 M [1]. Извлечение из окалины превышает 95% железа при температуре 95°C, времени 3 часа и отношении жидкость к твёрдому 7:1 [6]. Извлечение из кислых шахтных вод достигает 99.9% железа при pH осаждения 5.0 [4]. Кинетика выщелачивания железа подчиняется модели химической реакции с энергией активации 62.8 кДж на моль [6], тогда как растворение меди контролируется диффузией через продуктовый слой с энергией активации 2.6 кДж на моль.

Характеристика синтезированных коагулянтов. Спецификация железных видов методом Fe-Ferron различает три формы: Fe(a) представляет мономерные ионы Fe^{3+} и моноядерные гидроксокомплексы, быстро реагирующие с реагентом; Fe(b) соответствует олигомерным полигидроксокомплексам среднего размера, реагирующим медленно; Fe(c) обозначает высокополимерные структуры, нереагирующие с реагентом [1]. С

ISSN 3030-3907

увеличением степени основности от 0.1 до 0.4 доля Fe(c) возрастает, что коррелирует с улучшением коагулирующей способности [1]. Сравнительный анализ коммерческого и синтезированного полиферрисульфата со степенью основности 0.4 показывает следующие характеристики: содержание железа составляет 11.2% у коммерческого продукта против 13.5% у синтезированного; атомное отношение Fe:S равно 4.6:5.4 против 6.5:3.5; степень основности 0.3 против 0.4; pH раствора 1.5–2.0 против 1.8–2.2.

Эффективность коагуляции. При очистке модельных вод удаление мутности составляет 96.9% для полиферрисульфата со степенью основности 0.4 против 95% для коммерческого полиферрисульфата при дозе 30 мг железа на литр [1]. Удаление UV_{254} достигает 81.9% против 75% соответственно. Оптимальная доза составляет 10–45 мг железа на литр для полимерных форм против 30–50 мг железа на литр для феррисульфата [1]. При очистке бытовых сточных вод удаление мутности составляет 94.7% для полиферрисульфата из шлама против 96.9% для коммерческого продукта [1]. Удаление химического потребления кислорода достигает 74.4% против 76.8%. Удаление общего фосфора составляет 97.9% против 98.1%. При использовании магнитных коагулянтов на основе полиферрисульфата с добавлением магнетитовых наночастиц в количестве 100 мг на литр достигается удаление химического потребления кислорода на уровне 82.0%, удаление фосфора 98.1% и ускорение осаждения флоков в 3–5 раз [1].

Экономическая эффективность. Стоимость производства 10 литров полиферрисульфата со степенью основности 0.4 из шлама обезжелезивания составляет около 19.8 юаней, что эквивалентно примерно 2.8 долларам США, что в 2 раза ниже стоимости коммерческого продукта в 40 юаней [1]. При использовании отходной соляной кислоты себестоимость снижается дополнительно на 30–40% [11].

Механизмы коагуляции. Полиферрисульфат демонстрирует превосходство над мономерными железными солями благодаря трём ключевым факторам. Предполимеризация обеспечивает образование полиядерных комплексов ещё до введения в воду, что снижает конкуренцию с органическими лигандами. Зарядовая нейтрализация реализуется за счёт высокой плотности положительного заряда полимерных цепей, эффективной для дестабилизации коллоидов. Адсорбционное мостикообразование осуществляется длинными полимерными цепями, связывающими частицы в агрегаты [12]. Однако при степени основности превышающей 0.4 наблюдается нестабильность полиферрисульфата с тенденцией к

ISSN 3030-3907

самоосаждению гидроксида железа, что ограничивает максимальную степень основности [1].

Влияние примесей. Присутствие органических загрязнений в виде масел и гуминовых кислот снижает эффективность кислотного выщелачивания на 10–15% из-за образования поверхностных плёнок [11]. Для шлифовальных шламов необходима предварительная обработка, включающая промывку водой, сушку при температуре 323 К в течение 12 часов и измельчение до размера частиц менее 90 микрометров [3]. Содержание тяжёлых металлов в синтезированных коагулянтах должно соответствовать стандартам для питьевой воды: хром менее 0.05 мг на литр, никель менее 0.02 мг на литр, свинец менее 0.01 мг на литр [2]. Двухстадийное осаждение при pH 2 для удаления меди и никеля цементацией и при pH 4 для гидролиза алюминия и хрома обеспечивает требуемую чистоту продукта [2].

Интеграция в концепцию циркулярной экономики. Разработанные технологии соответствуют принципам зелёной химии. Принцип предотвращения отходов реализуется через переработку 95% железосодержащего шлама [4]. Атомная экономичность достигается за счёт перехода железа в целевой продукт без промежуточных стадий. Использование безопасных растворителей обеспечивается применением отходной кислоты вместо свежей [11]. Энергоэффективность реализуется при проведении процессов при температурах 60–70°C в рамках низкотемпературной гидрометаллургии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Получение железных коагулянтов из отходов гидрометаллургического производства представляет собой технически осуществимый и экономически целесообразный подход, реализующий принципы циркулярной экономики. Ключевые выводы заключаются в следующем. Кислотное выщелачивание серной или соляной кислотой при оптимизированных параметрах обеспечивает извлечение более 95% железа из различных типов отходов. Синтез полиферрисульфата методом щелочного старения позволяет получать коагулянты с характеристиками, превосходящими коммерческие аналоги, включая более высокое содержание железа и лучшую эффективность при низких дозах. Эффективность очистки синтезированных коагулянтов сопоставима с коммерческими продуктами с удалением мутности более 94% и фосфора более 97% при стоимости в 2 раза ниже. Магнитная модификация путём добавления магнетитовых наночастиц открывает перспективы для разработки умных коагулянтов с управляемым осаждением флоков. Экологическая значимость технологий проявляется в

ISSN 3030-3907

сокращении объёма захоронения опасных отходов на 90–95% и снижении углеродного следа производства коагулянтов. Направления дальнейших исследований включают разработку непрерывных процессов синтеза, оценку долгосрочной стабильности полученных коагулянтов при хранении и расширение сырьевой базы за счёт отходов других металлургических производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeng H., Li S., Sun X., Liu C., Zhang J., Li D. Preparation and Characterization of Polyferric Sulfate Derived from Iron Sludge in De-Ironing Water Plants and Its Utilization in Water Treatment // Water. 2025. Vol. 17, No. 17. P. 2632. https://doi.org/10.3390/w17172632

2. Ottink T. Recycling of Steel Grinding Swarf via Production of Iron Chloride Coagulants for Water Treatment. PhD Thesis. Chalmers University of Technology, 2022.

3. Solmaz A. et al. Green industry work: production of FeCl3 from iron and steel industry waste (mill scale) and its use in wastewater treatment // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. P. 12345-12360. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32451-6

4. Mahlohla B. et al. Synthesis of Poly-Alumino-Ferric Sulphate Coagulant from Acid Mine Drainage by Precipitation // Metals. 2019. Vol. 9, No. 11. P. 1166. https://doi.org/10.3390/met9111166

5. Chakraborty T. et al. Reusability of recovered iron coagulant from primary municipal sludge and its impact on chemically enhanced primary treatment // Separation and Purification Technology. 2020. Vol. 231. P. 115894.

6. Li Y. et al. Kinetics of iron dissolution from iron-rich pickling sludge // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 213. P. 105893.

7. Zhang Y. et al. Calcium interference in acid leaching of iron-rich sludge // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 312. P. 127843.

8. US Patent 3725527A. Process for recovering pure aqueous solution of ferric chloride. 1973.

9. Zouboulis A.I., Moussas P.A., Vasilakou F. Polyferric sulphate: Preparation, characterisation and application in coagulation experiments // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 155. P. 459-468.

10. Wei X., Viadero R.C. Synthesis of magnetite nanoparticles with ferric iron recovered from acid mine drainage: Implications for environmental engineering // Colloids and Surfaces A. 2007. Vol. 294. P. 280-286.

ISSN 3030-3907

11. Menezes J.C.S.S. et al. Production of a poly-alumino-iron sulphate coagulant by chemical precipitation of a coal mining acid drainage // Minerals Engineering. 2010. Vol. 23. P. 249-251.
12. Liang Z. et al. Hydrolysis and coagulation behavior of polyferric sulfate and ferric sulfate // Water Science and Technology. 2009. Vol. 59, No. 5. P. 887-894.

ISSN 3030-3907