

РЕАГЕНТ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО ОТХОДА В ОЧИСТКЕ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД

© И. В. Старостина¹✉, А. С. Лушников¹,
Л. В. Денисова¹, Ю. Т. Поленяка¹

¹ ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация
✉ starostinairinav@yandex.ru

Ключевые слова: кислотная модификация; коагулянт-флокулянт комбинированный; очистка многокомпонентных сточных вод; птицеперерабатывающее производство; пыль газоочистки; сталеплавильное производство.

Аннотация: Определены оптимальные условия режима кислотной модификации пыли газоочистки, обеспечивающей максимальный переход железа из твердой фазы в раствор. Установлено, что на данный процесс положительно влияют как концентрация серной кислоты, так и соотношение пыли и раствора модификатора. Исследовано влияние условий модификации пыли и составов полученных коагулянтов-флокулянтов комбинированных на эффективность очистки многокомпонентных сточных вод предприятий АПК. Максимальная эффективность, от 86,67 до 99,15 % в зависимости от состава, достигнута при очистке сточных вод цехов убоя птице- и мясоперерабатывающих предприятий с повышенным содержанием взвешенных веществ. Показана возможность и перспективность использования в системе водоотведения реагента, полученного в результате кислотной модификации пыли газоочистки сталеплавильного производства, взамен традиционного железосодержащего коагулянта.

Введение

Рост промышленного производства и повышение уровня потребления увеличивают и количество образующихся отходов. По состоянию на 2023 г. в Российской Федерации образовано 9278,8 млн т отходов производства и потребления, из которых на территории Белгородской области – 135,467 млн т отходов. Основными источниками образования отходов являются добывающая и обрабатывающая промышленность, сельское хозяйство, перерабатывающие предприятия АПК, транспорт, и. т.д.

Согласно динамике образования отходов производства и потребления в РФ по обрабатывающим производствам (рис. 1), в период с 2020 по 2023 гг. можно отметить устойчивую тенденцию увеличения объемов образования отходов. В 2023 г. данная цифра составила 406,55 тыс. т. [1].

На долю хозяйствующих субъектов Российской Федерации по виду экономической деятельности «обрабатывающие производства» в 2023 г. пришлось 21,9 % выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками; 7,0 % суммарного объема сточных вод, сброшенных в водные объекты; 4,4 % суммарного образования отходов производства и потребления.

Предприятия металлургии при реализации собственных программ развития решают задачу сохранения окружающей среды и проводят комплекс мероприятий по сокращению негативного воздействия производственной деятельности на нее. Согласно динамике образования отходов производства и потребления в период с 2019 по 2023 г. [2], количество отходов в Белгородской обл. в 2023 г. снизилось на 15 % по сравнению с 2022 г. (рис. 2).

Металлоинвест – мировой лидер в производстве товарного горячебрикетированного железа (ГБЖ), ведущий производитель и поставщик железорудной и металлизированной продукции, один из региональных производителей высококачественной стали. В составMetalloinvestа входят ведущие горно-обогатительные предприятия России – Лебединский и Михайловский горно-обогатительные комбинаты, металлургические предприятия – Оскольский электрометаллургический комбинат и компания по вторичной переработке металла «УралМетКом».

Акционерное общество «ОЭМК им. А. А. Угарова», находящееся на территории Белгородской области, представляет собой единственное в России металлургическое предприятие полного цикла, где реализованы технология прямого восстановления железа и плавка в электропечах, позволяющие получать металл, практически свободный от вредных примесей и остаточных элементов [3]. Именно электродуговые печи являются основным источником пылегазовых выбросов и характеризуются содержа-

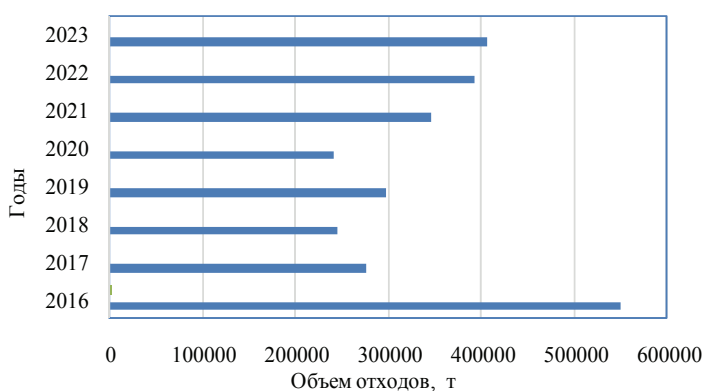


Рис. 1. Объем образования отходов производства и потребления в РФ по обрабатывающим производствам в период с 2016 по 2023 гг.

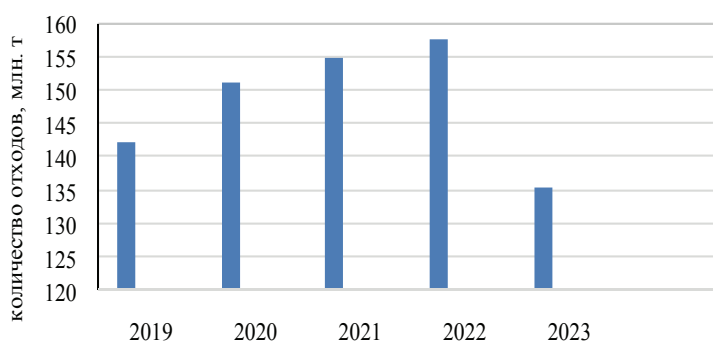


Рис. 2. Динамика образования отходов производства и потребления по Белгородской области в период с 2019 по 2023 гг.

нием СО до 70 % от общего объема образования в производстве, а выбросы пыли составляют 10...20 кг/т стали или 150 т в год [4]. Для предотвращения загрязнения окружающей среды пылегазовые выбросы отводятся от печей в газоочистную систему – рукавные фильтры, где очистка газов от пыли доводится до норм ПДК, а СО дожигается на выходе из рабочего пространства до нуля. В результате образуется пылевидный отход, характеризующийся как мелкодисперсный железосодержащий материал – до 80 % частиц имеют размер менее 1 мкм, а по химическому составу – до 50 % приходится на оксиды железа.

Введение в эксплуатацию в электросталеплавильном цехе второго модуля газоочистки от сталеплавильных печей № 1 и № 2 позволило снизить валовые выбросы в атмосферу загрязняющих веществ более чем в два раза, а концентрацию пыли в отходящих газах уменьшить в три и более раз. При этом запыленность на рабочих местах сталеваров снизилась в среднем вдвое [5]. Но это в свою очередь отразилось на увеличении образования и накопления отхода газоочистки.

В целях предотвращения негативного воздействия металлургического производства на окружающую среду проводятся исследования по переработке и использованию пыли. Известно ее использование в качестве сырья для получения цинка и свинца. Применение высокотемпературного способа обработки пыли позволяет достигнуть степени их извлечения 97 – 99 % при отсутствии значительных потерь железа [6].

В работе [7] рассматривается использование пыли в качестве модифицирующей добавки керамических масс производства керамического кирпича. Показано, что железистые компоненты пыли позволяют увеличить прочность керамического кирпича и корректировать цветовую гамму – цвет изменится от бледно-розового до светло-шоколадного в зависимости от количества вводимой добавки.

В работе [8] представлены исследования процесса восстановления железа из железосодержащих побочных продуктов металлургического производства АО «ВМЗ», которые показали, что процесс восстановления железа углеродом начинается при температуре свыше 600 °С и полностью завершается при температуре 1100 °С, а длительность процесса восстановления железа зависит от скорости достижения требуемой температуры.

Повышение температуры влечет за собой увеличение степени металлизации брикетов и растворимости углерода в железе, что позволяет получать не просто восстановленное железо, а вторичный чугу́н с переходом металла из твердофазного в жидкофазное состояние. Таким образом, появляется возможность определить тип и параметры агрегата для восстановления железа в зависимости от желаемого конечного результата – степени восстановления железа, степени науглероживания металла и выбора между твердофазным и жидкофазными процессами.

Результаты, представленные авторами в работе [9], показали, что основными направлениями использования мелкодисперсных отходов электросталеплавильного производства является собственное производство. Возможность утилизации пыли в агломерационном процессе ограничена, так как электросталеплавильная пыль имеет значительные колебания в химическом составе в зависимости от марки выплавляемой стали, а также содержит большое количество цветных металлов. Извлечение цветных металлов возможно при использовании уловленной пыли в собственном производстве.

В Германии разработан процесс переработки и утилизации пылей электрофильтров металлургических печей, основанный на непрерывной подаче в бассейн с щелочным раствором ($\text{pH} = 9,3 \dots 9,8$). В этих условиях растворимые соли цинка и свинца переходят в нерастворимые соединения. Полученная гомогенная суспензия перекачивается в смеситель, разбавляется водой (1 : 2), доводится pH среды до $8,7 \dots 9,0$. После осветления и обезвоживания шлама в фильтр-прессе образуется кек с содержанием цинка и свинца 25 – 35 и 8 – 12 % соответственно [10].

В работе [11] представлены результаты исследования по использованию пыли газоочистки сталеплавильного производства, модифицированной 1 Н раствором серной кислоты, в качестве сорбционного материала для извлечения белковых компонентов из сточных вод. Максимальная эффективность очистки – 60 % достигнута при использовании модифицированного отхода в количестве 5 г/дм^3 в интервале pH среды 2...6.

Ранее проведенные исследования [12 – 14] показали возможность использования пыли сталеплавильного производства в качестве железосодержащего сырья для получения коагулирующих препаратов. Коагулянты (вещества, введение которых в жидкую среду, содержащую мелкие частицы, вызывают слипание частиц [15]) используются для ускорения процесса отстаивания. В большинстве случаев в качестве коагулянтов используют соли алюминия и железа. Однако по сравнению с алюминиевыми коагулянтами соли железа имеют ряд преимуществ: повышенную эффективность и более широкую зону оптимальных значений pH среды при низких температурах воды; большую гидравлическую крупность и прочность образующихся хлопьев; возможность применения для сточных вод с более широким диапазоном состава; способность устранения неприятных запахов [16].

В последние годы контроль за соблюдением нормативов очистки сточных вод предприятий мясной промышленности постоянно ужесточается. Белгородская область является крупным промышленным и сельскохо-

зайственным регионом страны, и вопрос очистки многокомпонентных сточных вод перерабатывающих предприятий АПК стоит очень остро [17 – 19].

Многокомпонентные и высококонцентрированные сточные воды птице- и мясoperерабатывающих производств перед сбросом в систему городской канализации или направлением на биологическую очистку подвергаются физико-химическим процессам очистки с использованием коагулянтов и флокулянтов с последующим отделением образующейся взвеси напорной флотацией.

До недавнего времени в системах водоотведения предприятий АПК традиционно использовались железосодержащие коагулянты импортного производства. Но в связи с изменением политической ситуации в мире и введением санкций против Российской Федерации рынок химических реагентов для очистки сточных вод существенно изменился. Коагулянты, выпускаемые в настоящее время, очень дороги, поэтому разработка более дешевых препаратов, особенно на основе отходов производства [20], является актуальной задачей.

Цель работы – определение оптимальных условий химической модификации пыли газоочистки сталеплавильного производства, обеспечивающих максимальный переход ионов железа из твердой фазы в раствор, и определение эффективности использования продукта химической модификации для очистки многокомпонентных сточных вод птицеперерабатывающих предприятий АПК.

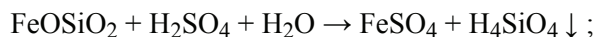
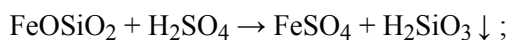
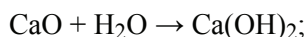
Материалы и методы

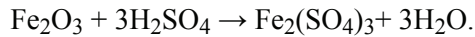
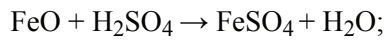
В качестве объекта исследований использовали пыль газоочистки электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) АО «ОЭМК», г. Старый Оскол, химический состав которой следующий, масс. %: Fe₂O₃ – 47,96; CaO – 13,49; Na₂O – 11,47; SiO₂ – 6,47; K₂O – 5,52; ZnO – 5,31; MgO – 3,86; MnO – 2,0; Al₂O₃ – 0,7; Cr₂O₃ – 0,27; CuO – 0, 12. Железо в пыли находится в виде различных соединений – FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, силикатов и т. д.

В качестве модифицирующего реагента использовали растворы серной кислоты следующих концентраций – 1 Н, 2 Н, 4 Н и 6 Н. Процесс модификации проводили перемешиванием компонентов в течение 30 мин при соотношениях т(г) : ж (см³) = 1 : 3; 1 : 4; 1 : 6 при температуре 25 °С.

Затем полученные суспензии отфильтровывали, и осадки на фильтре отмывали дистиллированной водой до нейтрального уровня рН среды и отсутствия ионов железа в промывных водах. Подготовленные таким образом осадки высушивали при температуре 105 °С и определяли их химические составы. По разнице содержания оксидов железа в исходной пыли ЭСЦ и осадках, полученных в результате кислотной модификации, оценивали степень перехода ионов железа в раствор.

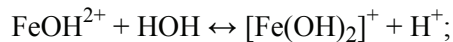
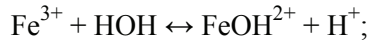
При смешивании пыли ЭСЦ и растворов H₂SO₄ происходит растворение соединений металлов по схеме:





Таким образом, можно сделать вывод, что в кислой среде в растворе после контактирования с пылью ЭСПЦ должны присутствовать ионы Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , проявляющие высокие коагуляционные свойства вследствие гидролиза.

Продукт модификации пыли ЭСПЦ содержит сульфаты железа (II) и (III), которые относятся к группе коагулянтов. Поэтому при переходе этих соединений в раствор происходит гидролиз по схеме:



После контактирования пыли с раствором кислоты происходит растворение CaO , который находится в свободном состоянии и входит в состав силикатов типа $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2$, что приводит к повышению уровня pH среды, следовательно, и возможному образованию отрицательно заряженных ионов $[\text{Fe}(\text{OH})_4]^-$, $[\text{Fe}(\text{OH})_5]^{2-}$, $[\text{Fe}(\text{OH})_6]^{3-}$ и др. [21].

Кроме соединений железа, в составе пыли ЭСПЦ содержатся соединения алюминия и цинка, ионы которых в процессе модификации могут переходить в жидкую фазу и также подвергаться гидролизу по аналогичной схеме с образованием соответствующих гидроксидов. Это позволяет рассматривать полученный продукт модификации пыли в качестве коагулянта-флокулянта комбинированного (**КФК**) и использовать в системе очистки сточных вод.

С целью определения оптимальных условий получения КФК варьировали параметры кислотной модификации пыли ЭСПЦ. Полученные суспензии подвергали сушке до постоянной массы при температуре 105°C , далее измельчали до порошкообразного состояния и использовали в качестве КФК.

Полученные порошки КФК различных составов в зависимости от условий кислотной модификации условно названы – А1, А2, Б1, Б2. Коагулянт-флокулянт комбинированный вводили в сточную воду в количествах 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2 г/дм³. В качестве сравнения использовали реагент марки Feгix-3, состоящий из сульфата железа (III), в таких же дозировках. Эффективность очистки, %, определяли по формуле

$$\mathcal{E} = \frac{M_{\text{исх}} - M_{\text{кон}}}{M_{\text{нач}}} 100\%, \quad (1)$$

где $M_{\text{исх}}$, $M_{\text{кон}}$ – мутность сточной воды соответственно исходная и конечная после очистки, NTU.

В качестве водных систем использовали реальные сточные воды цехов убой птице- и мясоперерабатывающих предприятий АПК Белгородской области. Некоторые характеристики используемых сточных вод представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Некоторые характеристики сточных вод
цехов убой птицеперерабатывающих предприятий АПК**

Сточные воды	Мутность, NTU	Взвешенные вещества мг/дм ³	Жиры, мг/дм ³	ХПК, мгО/дм ³	БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³
Убойного цеха птицеперерабатывающего предприятия	1040,6	603,6	63	8850	4106
Птицеперерабатывающего предприятия + 3 % ливневого стока	1282,4	743,8	48	7980	3502
Предприятия по производству и переработке мяса индейки	102	59,2	32	6540	2920

Перемешивание проб сточных вод объемом 500 см³ и реагентов осуществляли в стаканах объемом 1 дм³, доводили рН среды до 8 единиц добавлением 2Н NaOH. Смесь перемешивали с использованием магнитной мешалки: время быстрого перемешивания составляло 2 мин, медленного – 8 мин. Далее пробы переливали в цилиндры, время отстаивания – 1 ч.

Результаты и обсуждение

Результаты оценки влияние условий кислотной модификации пыли ЭСПЦ на процентное содержание железа показали, что концентрация серной кислоты, соотношение пыли и раствора модификатора положительно влияют на процесс растворения оксидов железа и переход ионов железа из твердой фазы в жидкую.

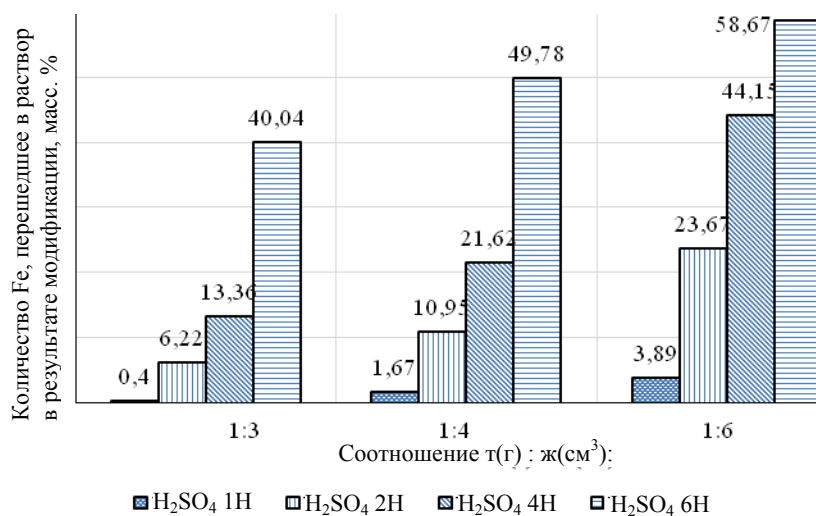
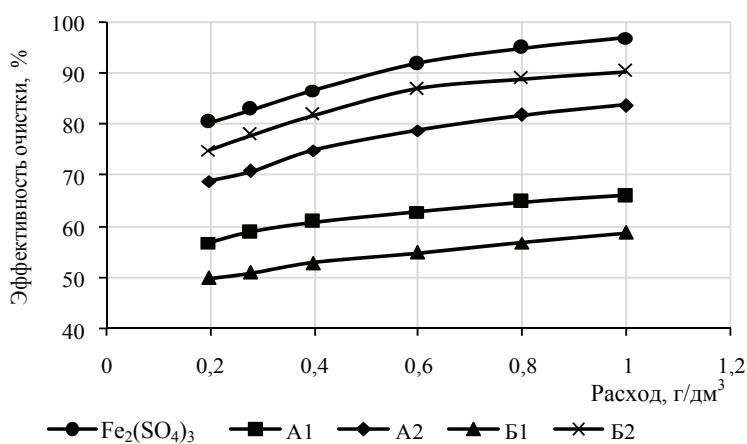


Рис. 3. Влияние условия кислотной модификации пыли ЭСПЦ на степень перехода ионов железа в растворенное состояние

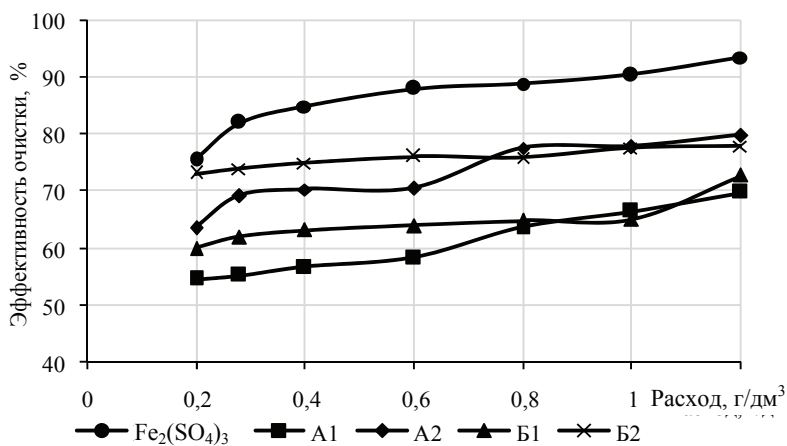
В качестве оптимальных условий модификации, обеспечивающих максимальную полноту перехода ионов железа в раствор (58,7%), можно принять: концентрация серной кислоты – 6 Н, соотношение пыль (г) : раствор кислоты (см³) – 1 : 6 (рис. 3).

Результаты исследования эффективности очистки реальных многокомпонентных сточных вод предприятий АПК Белгородской области с использованием КФК различных составов в сравнении с традиционно применяемым коагулянт – сульфатом железа (III) марки Ferix-3 представлены на рис. 4.

Состав стока существенно влияет на эффективность применения КФК различных составов. Результаты показали (см. рис. 4, а), что для очистки стоков птицеперерабатывающего предприятия эффективность приме-



а)



б)

Рис. 4. Зависимости эффективности очистки сточных вод убойного цеха птицеперерабатывающего предприятия (а), предприятия по производству и переработке мяса индейки (б) от различного расхода реагентов (начало)

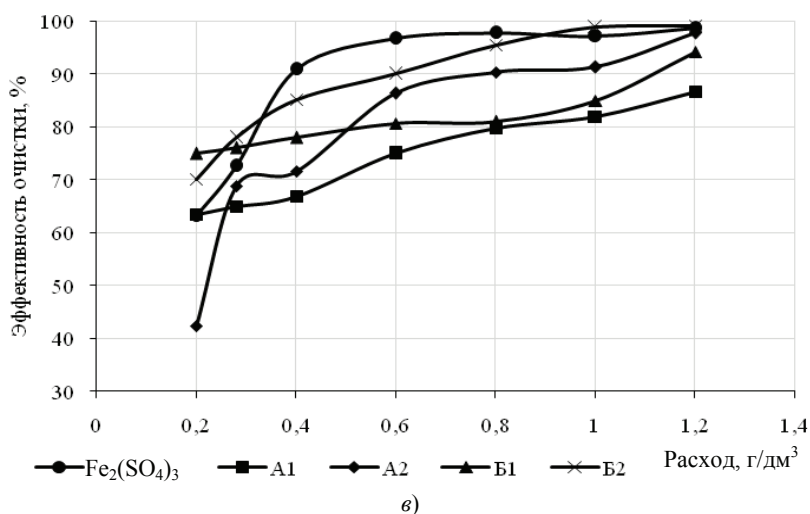


Рис. 4. Окончание. Птицеперерабатывающего предприятия + 3 % ливневого стока (в)

ния КФК с маркировкой Б2 практически сопоставима с использованием Ferix-3 – разница составляет 5 – 7 %, что указывает на возможность замены традиционного коагулянта на реагент, полученный из пыли ЭСПЦ.

Сточные воды предприятия по производству и переработки мяса индейки характеризуются низким содержанием взвешенных веществ и высокой цветностью, что обусловлено присутствием компонентов крови. В этом случае эффективность использования КФК по сравнению с $Fe_2(SO_4)_3$ несколько ниже, хотя имеет достаточно высокие значения – в пределах 69,8 – 79,9 % в зависимости от состава, при расходе 1,2 г/дм³ (см. рис. 4, б).

Необходимо отметить следующее: при очистке сточных вод с повышенным содержанием взвешенных веществ, что обусловлено наличием ливневого стока в количестве около 3 % от общего объема, использование КФК при расходах в интервале 0,8...1,2 г/дм³ является более перспективным,

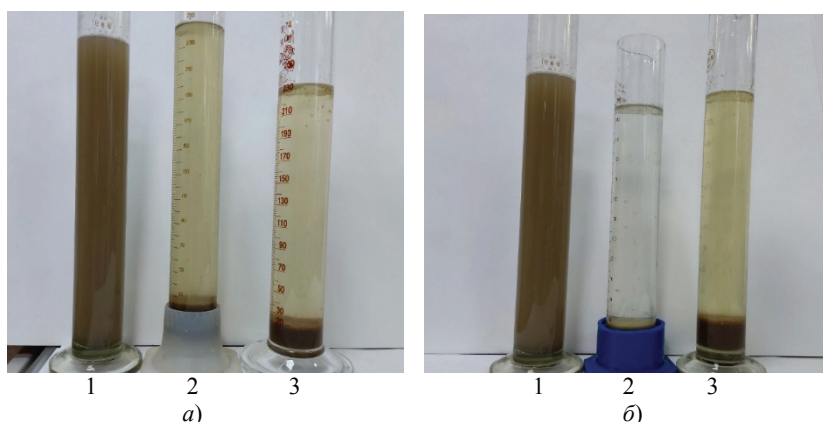


Рис. 5. Сравнительная оценка эффективности очистки стока птицеперерабатывающего предприятия + 3 % ливневого стока при использовании реагентов Б2 и $Fe_2(SO_4)_3$ с одинаковым расходом, г/дм³: а – 0,8; б – 1,0;

1 – исходный сток; 2, 3 – после применения реагентов Б2 и $Fe_2(SO_4)_3$ соответственно

чем $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ – эффективность очистки изменяется в интервале 95,5 – 99,15 % (см. рис. 4, в).

Кроме того, использование реагента Б2 с расходом 1 г/дм³ приводит к значительному снижению цветности очищенной сточной воды в сравнении с применением $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ (см. рис. 5).

Заключение

Продукты модификации пыли ЭСПЦ растворами серной кислоты различной концентрации содержат сульфаты железа (II) и (III), соединения алюминия, которые относятся к группе коагулянтов, и кремниевую кислоту, относящуюся к группе флокулянтов. Это позволяет рассматривать продукт модификации пыли ЭСПЦ в качестве коагулянта-флокулянта комбинированного.

Увеличение концентрации раствора серной кислоты и соотношения пыль ЭСПЦ (г) : раствор серной кислоты (см³) при модификации способствует увеличению содержания соединений железа (II) и железа (III) в растворенной форме в готовом продукте.

Эффективность применения коагулянта-флокулянта оптимального состава, полученного в результате химической модификации отхода металлургического производства, практически сопоставима с использованием коагулянта $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ марки Ferix-3.

Наиболее эффективно использование КФК различных составов для очистки сточных вод цехов убой птице- и мясоперерабатывающих предприятий АПК с повышенным содержанием взвешенных веществ. Эффективность очистки составляет 86,67 – 99,15 % в зависимости от состава, что указывает на перспективность замены традиционного железосодержащего коагулянта на реагент, полученный в результате кислотной модификации пыли газоочистки сталеплавильного производства.

Работа выполнена в рамках Программы развития опорного университета на базе Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ имени В. Г. Шухова.

Список литературы

1. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году : государственный доклад. [Электронный ресурс]. – URL : <https://gosdoklad.mnr.gov.ru/> (дата обращения: 12.12.2025).
2. О состоянии и охране окружающей среды Белгородской области в 2023 г. : государственный доклад. – Белгород : [б. и.], 2024. – 215 с.
3. Металлоинвест : офиц. сайт [Электронный ресурс]. – URL : <https://www.metalloinvest.com/about/company-profile/> (дата обращения: 12.12.2025).
4. Симонян, Л. М. Свойства электросталеплавильной пыли и анализ возможных направлений ее использования / Л. М. Симонян, А. А. Хилько, С. В. Зубкова // Электрометаллургия. – 2010. – № 8. – С. 24–28.

5. Комплекс газоочистки ОЭМК вдвое сократил количество выбросов пыли в атмосферу // Безформата [Электронный ресурс]. – URL : <https://belgorod.bezformata.com/listnews/gazoochistki-oemk-vdvoe-sokratil/47173121/> (дата обращения: 12.12.2025).
6. Римошевский, С. Л. Исследование процессов переработки пыли газоочистки сталеплавильных производств / С. Л. Римошевский, Д. А. Прокопчук, Д. М. Голуб // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 1. – С. 106–113. doi: 10.21122/1683-6065-2021-1-106-113
7. Спирина, О. В. Утилизация вторичного сырья металлургического производства при модификации составов керамического кирпича / О. В. Спирина // *Химия и инженерная экология – XXII* : сб. трудов Междунар. науч. конф., Казань, 23–24 сентября 2022 г. – Казань, 2022. – С. 129–133.
8. Просвиркин, С. П. Исследование процесса восстановления железа из железосодержащих побочных продуктов металлургического производства АО «ВМЗ» / С. П. Просвиркин // *Физико-химические основы металлургических процессов (ФХОМП 2022)* : сб. тр. Междунар. науч. конф. им. академика А. М. Самарина, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося ученого-металлурга, академика АН СССР Самарина А. М., 265-летию со дня основания Выксунского металлургического завода и 20-летию Выксунского филиала НИТУ «МИСиС», Выкса, 10–14 октября 2022 года, Выкса, 2022. – С. 435–439.
9. Пугин, К. Г. Снижение экологической нагрузки сталеплавильного производства за счет использования мелкодисперсных железосодержащих отходов в металлургии / К. Г. Пугин // *Научные исследования и инновации*. – 2010. – Т. 4, № 3. – С. 64–71.
10. Троянский, А. А. Технология рециклингапылевыноса сталеплавильных агрегатов с извлечением цветных металлов / А. А. Троянский, Г. С. Клягин, В. И. Ростовский // *Сталь*. – 2002. – № 8. – С. 119–122.
11. Использование химически модифицированного отхода металлургического производства для извлечения альбумина из водных сред / А. С. Лушников, И. В. Старостина, Е. В. Локтионова, М. А. Писклов, В. И. Сыса, Н. Ю. Кирюшина, А. А. Чепурных // *Безопасность, защита и охрана окружающей среды: фундаментальные и прикладные исследования* : сб. докл. Всерос. науч. конф., Белгород, 04–08 октября 2022 г. – Белгород, 2022. – С. 66–70.
12. Коагулянт на основе пыли ЭСПЦ / С. В. Свергузова, И. В. Старостина, Е. В. Суханов, Д. В. Сапронов, И. Г. Шайхиев // *Вестник Технологического университета*. – 2015. – Т. 18, № 10. – С. 202–205.
13. Свергузова, С. В. Влияние условий модификации пыли ЭСПЦ на ее коагуляционные свойства / С. В. Свергузова, И. В. Старостина, Д. В. Сапронов // *Вестник Технологического университета*. – 2016. – Т. 19, № 9. – С. 158–163.
14. Возможные направления использования твердого отхода электросталеплавильного производства - пыли электродуговых сталеплавильных печей / И. Г. Шайхиев, С. В. Свергузова, Л. А. Порожнюк, Л. А. Ипанов, Е. В. Суханов // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – № 6. – С. 199–201.
15. Шукин, Е. Д. Коллоидная химия / Е. Д. Шукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – Москва : Высшая школа, 2004. – 445 с.
16. Гетманцев, С. В. Очистка промышленных сточных вод коагулянтами и флокулянтами / С. В. Гетманцев, И. А. Нечаев, Л. В. Гандурина. – Москва : Издво ассоциации строительных вузов, 2008. – 272 с.
17. Vasilenko, T. A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag from wastewater treatment / T. A. Vasilenko, A. A. Koltun // *Solid State Phenomena*. – 2017. – Vol. 265. – P. 403–409. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.403

18. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва : Химия, 1971. – 456 с.
19. Натянчик, Т. М. Значение и уровни очистки сточных вод на мясоперерабатывающих предприятиях / Т. М. Натянчик, О. Н. Левшук, Т. И. Засимович // Инновационные подходы в ветеринарной и зоотехнической науке и практике : материалы Международной научно-практической интернет-конференции, Ставрополь, 1–5 февраля 2016 г. Ставрополь, 2016. – С. 519–526.
20. Очистка сточных вод мясоперерабатывающих предприятий / С. В. Степанов, Т. В. Соколова, Ю. Е. Сташок, А. С. Степанов // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии : сб. ст. – Самара, 2017. – С. 259–262.
21. Степанов, С. В. К вопросу очистки сточных вод птицефабрик / С. В. Степанов, Т. В. Соколова, Е. В. Стукановская // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительные технологии : сб. ст. – Самара, 2016. – С. 201–205.

References

1. Available at: <https://gosdoklad.mnr.gov.ru/> (accessed: 26 December 2025).
2. *O sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Belgorodskoy oblasti v 2023 g.: gosudarstvennyy doklad* [On the state and protection of the environment of the Belgorod Region in 2023: state report], Belgorod: [b. i.], 2024, 215 p. (In Russ.)
3. Available at: <https://www.metalloinvest.com/about/company-profile/> (accessed: 26 December 2025).
4. Simonyan L.M., Khil'ko A.A., Zubkova S.V. [Properties of electric steelmaking dust and analysis of possible directions of its use], *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy], 2010, no. 8, pp. 24-28. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Available at: <https://belgorod.bezformata.com/listnews/gazoochistki-oemkvdvoe-sokratil/47173121/> (accessed 12 December 2025).
6. Rimoshevskiy S.L., Prokopchuk D.A., Golub D.M. [Study of dust processing processes from gas cleaning in steelmaking production], *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and Metallurgy], 2021, no. 1, pp. 106-113. doi: 10.21122/1683-6065-2021-1-106-113 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Spirina O.V., *Khimiya i inzhenernaya ekologiya – XXII: sb. trudov Mezhdunar. nauch. konf.* [Chemistry and Engineering Ecology - XXII: collected papers of the Int. scientific conf.], Kazan', 23-24 September 2022, Kazan', 2022, pp. 129-133. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Prosvirkin S.P., *Fiziko-khimicheskiye osnovy metallurgicheskikh protsessov (FKHOMP 2022) : sb. tr. Mezhdunar. nauch. konf. im. akademika A. M. Samarina, posvyashchennoy 120-letiyu so dnya rozhdeniya vydayushchegosya uchenogo-metallurga, akademika AN SSSR Samarina A.M., 265-letiyu so dnya osnovaniya Vyksunskogo metallurgicheskogo zavoda i 20-letiyu Vyksunskogo filiala NITU "MISiS"* [Physicochemical foundations of metallurgical processes (FKhMP 2022): collected papers of the Int. scientific conf. im. Academician A. M. Samarin, dedicated to the 120th anniversary of the birth of the outstanding metallurgist, Academician of the USSR Academy of Sciences A. M. Samarin, the 265th anniversary of the founding of the Vyksa Metallurgical Plant and the 20th anniversary of the Vyksa branch of MISiS], Vyksa, 10-14 October 2022, Vyksa, 2022, pp. 435-439. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Pugin K.G. [Reducing the environmental burden of steelmaking through the use of finely dispersed iron-containing waste in metallurgy], *Nauchnyye issledovaniya i*

innovatsii [Scientific Research and Innovation], 2010, vol. 4, no. 3, pp. 64-71. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Troyanskiy A.A., Klyagin G.S., Rostovskiy V.I. [Technology of recycling of steelmaking units' dust with extraction of non-ferrous metals], *Stal'* [Steel], 2002, no. 8, pp. 119-122. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Lushnikov A.S., Starostina I.V., Loktionova Ye.V., Pisklov M.A., Sysa V.I., Kiryushina N.Yu., Chepurnykh A.A. *Bezopasnost', zashchita i okhrana okruzhayushchey sredy: fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya: sb. dokl. Vseros. nauch. konf.* [Safety, protection and conservation of the environment: fundamental and applied research: collection of reports of the All-Russian Scientific Conf.], Belgorod, 04-08 October 2022, Belgorod, 2022, pp. 66-70. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Sverguzova S.V., Starostina I.V., Sukhanov Ye.V., Sapronov D.V., Shaykhiyev I.G. [Coagulant based on electric arc furnace dust], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 10, pp. 202-205. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Sverguzova S.V., Starostina I.V., Sapronov D.V. [Effect of electric arc furnace dust modification conditions on its coagulation properties], *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2016, vol. 19, no. 9, pp. 158-163. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Shaykhiyev I.G., Sverguzova S.V., Porozhnyuk L.A., Ipanov L.A., Sukhanov Ye.V. [Possible Uses of Solid Waste from Electric Steelmaking – Electric Arc Furnace Dust], *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, no. 6, pp. 199-201. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Shchukin Ye.D., Pertsov A.V., Amelina Ye.A. *Kolloidnaya khimiya* [Colloid Chemistry], Moscow: Vysshaya shkola, 2004, 445 p. (In Russ.)

16. Getmantsev S.V., Nechayev I.A., Gandurina L.V. *Ochistka promyshlennykh stochnykh vod koagulyantami i flokulyantami* [Industrial Wastewater Treatment with Coagulants and Flocculants], Moscow: Izdatel'stvo assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2008, 272 p. (In Russ.)

17. Vasilenko T.A., Koltun A.A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag from wastewater treatment, *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 403-409. doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.265.403

18. Lur'ye Yu.Yu. *Spravochnik po analiticheskoy khimii* [Handbook of Analytical Chemistry], Moscow: Khimiya, 1971, 456 p. (In Russ.)

19. Natynchik T.M., Levshuk O.N., Zsimovich T.I. *Innovatsionnyye podkhody v veterinarnoy i zootekhnicheskoy nauke i praktike: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii* [Innovative Approaches in Veterinary and Zootechnical Science and Practice: Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference], Stavropol', 1-5 February 2016, Stavropol', 2016, pp. 519-526. (In Russ., abstract in Eng.)

20. Stepanov S.V., Sokolova T.V., Stashok Yu.Ye., Stepanov A.S. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'nyye tekhnologii: sb. st.* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies: collection of articles], Samara, 2017, pp. 259-262. (In Russ., abstract in Eng.)

21. Stepanov S.V., Sokolova T.V., Stukanovskaya Ye.V. *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'nyye tekhnologii: sb. st.* [Traditions and innovations in construction and architecture. Construction technologies: collection of articles], Samara, 2016, pp. 201-205. (In Russ., abstract in Eng.)

Combined-Action Reagent Based on Iron-Containing Waste for Multi-Component Wastewater Treatment

© I. V. Starostina¹✉, A. S. Lushnikov¹,
L. V. Denisova¹, Yu. T. Polenyaka¹

¹ *Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation*

✉ starostinairinav@yandex.ru

Keywords: acid modification; combined coagulant-flocculant; multi-component wastewater treatment; poultry processing; gas cleaning dust; steelmaking production.

Abstract: Optimal conditions for acid modification of gas cleaning dust ensuring maximum transfer of iron from the solid phase to solution were determined. It was found that both sulfuric acid concentration and dust-to-modifier solution ratio positively affect this process. The influence of dust modification conditions and compositions of obtained combined coagulants-flocculants on the efficiency of multi-component wastewater treatment from agricultural enterprises was studied. Maximum efficiency, from 86.67 to 99.15% depending on composition, was achieved in treating wastewater from poultry and meat processing plant slaughter departments with elevated suspended solids content. The possibility and prospects of using a reagent obtained by acid modification of steelmaking gas cleaning dust in wastewater treatment systems as a replacement for traditional iron-containing coagulants are demonstrated.

Сведения об авторах

Старостина Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой экобиотехнологии, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-4744-152X; e-mail: starostinairinav@yandex.ru

Лушников Артём Сергеевич – аспирант кафедры экобиотехнологии, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация; ORCID 0000-0001-9956-6941; e-mail: BNV59nata@yandex.ru

Денисова Любовь Васильевна – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация; ORCID 0000-0002-8967-5447; e-mail: loveden13@mail.ru

Поленяка Юлия Тарасовна – аспирант кафедры экобиотехнологии, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», Белгород, Российская Федерация; ORCID 0009-0006-9014-2177; e-mail: ecnata@mail.ru

About the author

Irina V. Starostina – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Ecobiotechnology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; ORCID 00000-0002-4744-152X; e-mail: starostinairinav@yandex.ru

Artyom S. Lushnikov – Postgraduate Student of the Department of Ecobiotechnology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, ORCID 0000-0001-9956-6941; e-mail: BNV59nata@yandex.ru

Lyubov V. Denisova – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; ORCID 0000-0002-8967-5447; e-mail: loveden13@mail.ru

Yulia T Polenyaka – Postgraduate Student of the Department of Ecobiotechnology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation; ORCID 0009-0006-9014-2177; e-mail: ecnata@mail.ru



© Старостина И. В., Лушников А. С., Денисова Л. В., Поленяка Ю. Т., 2026.
Данная статья находится в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии Creative Commons Attribution (CC BY) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>
