

Код МРНТИ 87.19.15

*А.С. Нұртаева¹, Р.А. Исаева¹, У.П. Байысбай¹, С.Е. Головатый²

¹Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан),

²«Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова»
Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

ОЦЕНКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СХЕМ И УТИЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Статья посвящена оценке экологической безопасности технологических процессов фосфорной промышленности в условиях перехода от традиционных производственных схем к малоотходным технологическим модулям. Объектом исследования являются процессы образования, очистки и утилизации фторсодержащих газов и твердых отходов, возникающих при производстве кормовых обесфторенных фосфатов и аммофоса. Цель работы заключается в обосновании технологических решений, направленных на снижение техногенной нагрузки и повышение ресурсной эффективности производства. Показано, что переработка абсорбционного шлама с применением бентонитовых добавок позволяет получать гранулированный фторид кальция с улучшенными прочностными и термостойкими характеристиками, что обеспечивает экологический и экономический эффект.

Ключевые слова: экологическая безопасность промышленных производств, фосфорная промышленность, фторсодержащие газовые выбросы, очистка и утилизация промышленных отходов, малоотходные технологические модули, абсорбционная очистка газов, переработка шлама фторида кальция, гранулированный фторид кальция, эколого-экономическая эффективность.

Дәстүрлі өндірістік схемалар мен өнеркәсіптік қалдықтарды кәдеге жаратудың салыстырмалы экологиялық қауіпсіздігін бағалау

Аңдатпа. Мақала фосфор өнеркәсібіндегі технологиялық процестердің экологиялық қауіпсіздігін дәстүрлі өндірістік схемалардан аз қалдықты технологиялық модульдерге көшу жағдайында бағалауға арналған. Зерттеу нысаны ретінде жемдік дефторланған фосфаттар мен аммофос өндірісінде пайда болатын фторқұрамды газдар мен қатты қалдықтардың түзілу, тазалау және кәдеге жарату процестері қарастырылған. Жұмыстың мақсаты техногендік жүктемені төмендетуге және өндірістің ресурстық тиімділігін арттыруға бағытталған технологиялық шешімдерді негіздеу болып табылады. Бентонит қоспаларын қолдана отырып абсорбциялық шламды қайта өңдеу беріктік және термиялық төзімділік қасиеттері жақсартылған түйіршіктелген кальций фторидін алуға мүмкіндік беретіні көрсетілді.

Түйінді сөздер: өнеркәсіптік өндірістердің экологиялық қауіпсіздігі, фосфор өнеркәсібі, фторқұрамды газды шығарындылар, өнеркәсіптік қалдықтарды тазалау және кәдеге жарату, аз қалдықты технологиялық модульдер, газдарды абсорбциялық тазалау, кальций фториді шламын қайта өңдеу, түйіршіктелген кальций фториді, экологиялық-экономикалық тиімділік.

Comparative assessment of environmental safety of traditional production schemes and industrial waste utilization

Abstract. The article evaluates the environmental safety of technological processes in the phosphorus industry under the transition from traditional production schemes to low-waste technological modules. The study focuses on the formation, purification, and utilization of fluoride-containing gases and solid wastes generated during the production of defluorinated feed phosphates and ammophos. The aim of the research is to substantiate technological solutions that reduce technogenic load and improve resource efficiency. The methodology includes a comparative assessment of specific toxic mass flows and experimental studies on calcium fluoride granulation. The results indicate that processing absorption sludge with bentonite additives enables the production of granulated calcium fluoride with enhanced strength and thermal resistance, contributing to reduced emissions and waste generation.

Key words: environmental safety of industrial production, phosphorus industry, fluoride-containing gas emissions, industrial waste treatment and utilization, low-waste technological modules, gas absorption purification, calcium fluoride sludge processing, granulated calcium fluoride, environmental and economic efficiency.

Введение

Производственные процессы по выпуску кормовых обесфторенных фосфатов, экстракционной фосфорной кислоты и аммофоса сопровождаются выделением в атмосферу фторсодержащих газов с температурой 180–240 °С.

Основная масса фтористых соединений в отходящих газах предприятий Завода минеральных удобрений (далее «ЗМУ») представлена фтороводородом (свыше 90%) и SiF_4 (до 10 %) [1].

В работе [2] фторсодержащие газы классифицированы по степени загрязнения и возможности извлечения фтора, что определяет выбор методов их очистки и утилизации.

Очистка фторсодержащих газов первой категории основана преимущественно на абсорбции фтористых соединений водой или аммиачными растворами с образованием фторсодержащих солей; степень улавливания фтора при этом достигает 97–99% [3].

Что касается очистки фторсодержащих газов второй категории, применение абсорбционных методов здесь признано неэффективным [4], поскольку при таком подходе наблюдаются значительные потери фтористых соединений. Содержание фтора в газах третьей категории обычно

невелико – порядка 0,1–1,0 г/м³, и их использование в хозяйственных целях экономически неоправданно. Поэтому очистку таких газов от пыли целесообразно проводить одновременно с утилизацией фтора.

В работе [5] подчеркнута необходимость улавливания и утилизации фтористых газов. Предложенный процесс осуществляется в полых скрубберах, оснащенных форсунками с центральным и тангенциальным вводом; в качестве сорбентов применяются волокнистые ионообменные материалы.

В литературе описан ряд методов абсорбционной очистки фторсодержащих газов, включая использование известковых и карбонатных суспензий, содовых растворов и природных сорбентов, обеспечивающих степень удаления фтора до 99,9% [6–7]. Однако ряд технологий характеризуется высокой коррозионной активностью и значительными эксплуатационными затратами.

Методы исследования

В работе [8] рассмотрен двухступенчатый процесс очистки газов от вредных компонентов: на первой стадии применяется раствор ацетата натрия, на второй – известковая суспензия.

Анализ существующих методов очистки фторсодержащих газов показывает, что процессы абсорбции изучены достаточно глубоко: разработаны эффективные составы абсорбентов, установлены механизмы и кинетика абсорбции, проработана конструкция аппаратов. Однако проблема переработки шлама, образующегося при абсорбционных методах очистки, остается недостаточно решенной.

Для удаления фторсодержащих примесей применяются водные, щелочные и солевые абсорбенты, однако использование кислотных и алюминиевых растворов ограничено вследствие высоких коррозионных и эксплуатационных затрат; на практике наибольшее распространение получили водная промывка и щелочная абсорбция.

Для очистки малоконцентрированных и запыленных фторсодержащих газов широко применяется известковое молоко, что обусловлено высокой растворимостью фторсодержащих соединений в воде. Данный метод особенно эффективен при очистке газов, образующихся при производстве кормовых обесфторенных фосфатов по предлагаемой технологии, позволяя получать товарный фторид кальция в качестве продукта газоочистки.

Для лабораторных опытов по переработке на фторид кальция фторсодержащего шлама, полученного из фильтров отделения абсорбционной очистки газов производств трикальцийфосфата и фосфорных удобрений, использован шлам со следующими физическими свойствами:

- насыпной вес сухого материала без утряски (влагоудержание – 1%) – 0,5 г/см³;
- пикнометрическая плотность – 2,5 г/см³;
- угол естественного откоса – 363°.

Фракционный состав, %: 100–150 мкм – 810; 50–100 мкм – 6265; до 50 мкм – 2530. Химический состав шлама представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав фторсодержащего шлама

Кесте 1

Фторқұрамды шламның химиялық құрамы

Table 1

Chemical composition of fluorine-containing sludge

Компонент	CaF ₂	P ₂ O ₅	CaCO ₃	CaO	SiO ₂
Содержание, %	35-40	10-12,5	3-6	25-32	2,5-3

Для обеспечения удобства транспортировки и эффективного обжига фторид кальция целесообразно формировать в гранулы. Наиболее эффективным методом окускования является окатывание с последующим упрочняющим обжигом, обеспечивающее высокую производительность и стабильные физико-механические свойства гранул; для повышения эффективности процесса применяются связующие добавки, не снижающие содержание основного компонента и не вносящие вредных примесей [9–12].

Исследования по получению гранул фторида кальция осуществлены на укрупненно-лабораторном чашевом грануляторе с регулируемым углом наклона и диаметром 0,5 м. Опыты по сушке гранул осуществлены в лаборатор-

ной сушильной камере при 140–160°C, а по упрочняющему обжигу – в лабораторной вертикальной электропечи, теплоизолированной огнеупорным материалом.

Рабочая зона электропечи представляет собой кварцевую трубку, обогреваемую при помощи силитовых стержней. Гранулы фторида кальция размером 12–16 мм в печь загружались в корзине из нихромовой проволоки.

Полученные гранулы испытывались на прочность (статическая и динамическая) и термостойкость.

Для проведения опытов по получению гранулированного фторида кальция использовали шлам, образующийся в фильтрах абсорбционной очистки фтористых газов на заводе минеральных удобрений г. Тараза.

Результаты

Результаты исследований влияния бентонитовых глин на прочность сырых и обожженных гранул фторида кальция, а также на их термостойкость приведены на рис. 1.

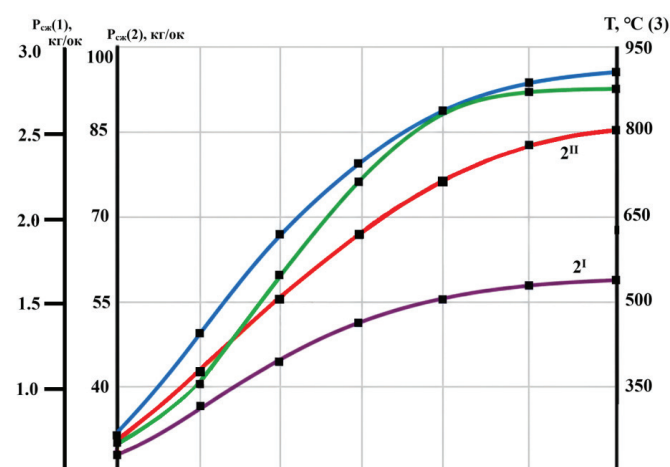


Рис. 1. Влияние бентонитовых глин на прочность сырых (1), обожженных (2) гранул фторида кальция и их термостойкость (3). 2' – обожженный при температуре 700 °C; 2'' – обожженный при температуре 900 °C.

Сурет 1. Бентонит саздарының кальций фторидінің шикі (1), күйдірілген (2) түйіршіктерінің беріктігіне және олардың термиялық төзімділігіне (3) әсері. 2' – 700 °C температурада күйдірілген; 2'' – 900 °C температурада күйдірілген.

Figure 1. Effect of bentonite clays on the strength of raw (1), calcined (2) calcium fluoride granules and their thermal resistance (3). 2' – calcined at a temperature of 700 °C; 2'' – calcined at a temperature of 900 °C.

Эксперименты по окомкованию фторида кальция показали, что добавление бентонитовых глин повышает пластичность материала, улучшает его смачиваемость, увеличивает капиллярное поглощение влаги и способствует формированию большего числа межчастичных контактов за счет пространственных мостиков. Важную роль бентонит играет и на стадии обжига: содержащиеся в нем ионы алюминия, кальция и магния, насыщая поровое пространство, формируют реакционную среду и образуют легко-

плавкие соединения, обеспечивающие прочное сцепление структурных элементов гранулы.

Опыты по сушке гранул показали, что оптимальным является режим 60–80 минут при температуре 140–160 °С. При таких условиях масса влаги снижается до 3–4%, а гранулы приобретают удовлетворительную прочность.

Как видно из рис. 1, в отсутствие добавок прочность сырых гранул на сжатие была менее 1 кг/ок, а при добавлении бентонитовых глин она повысилась до 2,8 кг/ок. Прочность гранул без добавок, обожженных при температурах 700 и 900 °С, была в пределах 35–38 кг/ок.

С введением бентонитовой глины прочность обожженных гранул также заметно увеличивается. Наиболее рациональным, на наш взгляд, является ее содержание в пределах 1,5–1,8%, при котором получают товарный гранулированный фторид кальция с прочностью на сжатие 80–84 кг/гранулу (при температуре обжига 900 °С).

Использование бентонитовой глины значительно повышает и термостойкость гранул фторида кальция. Так, при отсутствии добавок термостойкость составляет 330–360 °С, тогда как при введении 1,5% глины она увеличивается до 850–900 °С.

Испытания динамической прочности показали, что сырые гранулы выдерживают 3–7 ударов при падении с высоты 0,5 м, а высушенные – до 12–15 ударов. Таким образом, проведенные исследования подтвердили, что добавление бентонитов Кынгракского месторождения благодаря высокому содержанию ионов алюминия, кремния, кальция и магния способствует насыщению поровой жидкости легкоплавкими соединениями. Это приводит к формированию плотной и прочной структуры гранул фторида кальция, обеспечивающей хорошие прочностные свойства и высокую термостойкость конечного продукта.

Оценка относительной экологичности традиционных схем производств и малоотходных технологических модулей

Сравнительная оценка удельных потоков токсичной массы для традиционной технологии и малоотходных технологических модулей приведена на рисунках 2–3. Относительная экологичность (А) исследуемых технологических процессов рассчитывалась по формуле:

$$A = 1 - \frac{M_o}{M_c + M_p}, \quad (1)$$

где M_c , M_p , M_o – соответственно, масса сырья, вспомогательных ресурсов и отходов в единицах токсичной массы (етм).

Были сопоставлены данные полученных диаграмм удельных потоков токсичной массы и выполнена оценка относительной экологичности рассматриваемых производств.

В традиционной схеме производства КОФ основными источниками токсичных потоков являются фторсодержащие отходящие газы, шлам абсорбционного отделения и пылеунос, что обуславливает повышенную нагрузку на окружающую среду.

В случае получения КОФ по МТМ шлам из фильтров абсорбционного отделения полностью перерабатывается

в товарный фторид кальция. Также уменьшается объем выбросов фторсодержащих газов и исключается пылеунос благодаря измененной конструкции технологического оборудования.

Ниже приведены показатели А для традиционной схемы и МТМ КОФ:

$$A_{\text{Трад}}^{\text{КОФ}} = 1 - \frac{(29 + 51 + 70 + 263 + 11)}{(1170 + 342 + 79)} = 0,73$$

$$A_{\text{МТМ}}^{\text{КОФ}} = 1 - \frac{(22 + 2 + 3)}{(1170 + 96,5 + 172)} = 0,98$$

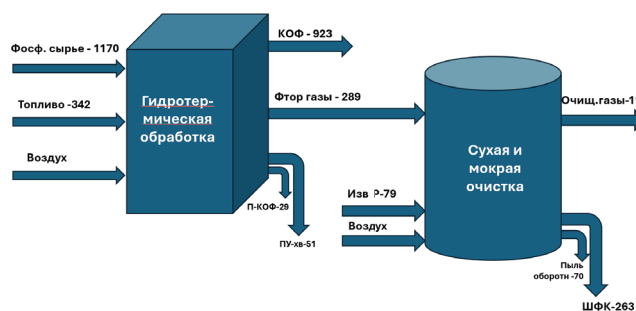


Рис. 2. Диаграмма удельных потоков относительной токсичной массы производства кормовых обесфторенных фосфатов по традиционной технологической схеме.

Сурет 2. Дәстүрлі технологиялық схема бойынша жемдік дефторланған фосфаттар өндірісінің салыстырмалы улы массаның меншікті ағындарының диаграммасы.

Figure 2. Diagram of specific flows of relative toxic mass in the production of defluorinated feed phosphates using a traditional technological scheme.

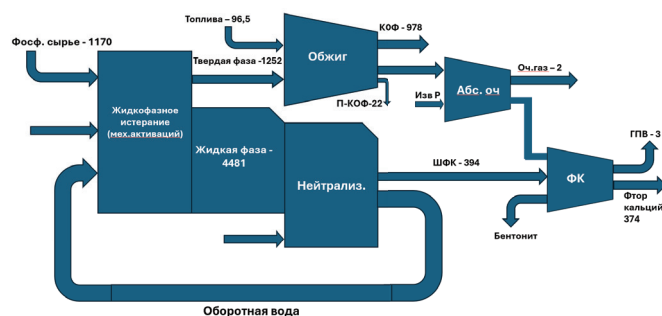


Рис. 3. Диаграмма удельных потоков относительной токсичной массы производства кормовых обесфторенных фосфатов по схеме малоотходного технологического модуля.

Сурет 3. Аз қалдықты технологиялық модуль схемасы бойынша жемдік дефторланған фосфаттар өндірісінің салыстырмалы улы массаның меншікті ағындарының диаграммасы.

Figure 3. Diagram of specific flows of relative toxic mass in the production of defluorinated feed phosphates using a low-waste technological module scheme.

Производительность МТМ «КОФ» и МТМ аммофос определяется уровнем освоения технологии и производственными возможностями конкретного предприятия.

Сравнительная оценка альтернативных вариантов осуществляется на основе минимизации приведенных затрат при выпуске основного и попутных продуктов при условии сопоставимого качества и равной техногенной нагрузки на окружающую среду.

Для предприятий фосфорной подотрасли характерна неполная загрузка производственных мощностей, обусловленная сырьевыми и организационными факторами, что повышает требования к стабильности и оптимизации технологических процессов.

Оценка эколого-экономических показателей разработок

Экономическая оценка результатов комплексной экологической оптимизации деятельности ЗМУ основана на определении совокупного экономического эффекта, достигаемого за счет рационального использования сырья и вспомогательных ресурсов.

В рамках блочно-модульного принципа основные технологические процессы объединяются в единый производственный блок, что обеспечивает упорядоченность материальных потоков и снижение потерь.

Вспомогательные производства целесообразно объединять в отдельный блок с локальной системой очистки сточных вод, что снижает затраты на их обработку и создает условия для утилизации загрязняющих компонентов. Компактная блочно-модульная компоновка производств, включая административно-бытовые здания, позволяет сократить протяженность коммуникаций и количество потенциальных источников аварийного загрязнения, повышая экологическую надежность предприятия.

Принципы создания малоотходных технологических модулей

Одним из ключевых критериев при разработке малоотходных технологических модулей является максимальное извлечение ценных и сопутствующих компонентов с получением дополнительной товарной продукции. Экономическая эффективность малоотходной схемы оценивается по величине совокупного экономического эффекта, учитывающего стоимость товарной продукции, предотвращенный экологический ущерб и затраты на ее получение, что позволяет определить ожидаемый эффект от внедрения разработок по комплексной экологической оптимизации деятельности предприятия.

Экономический эффект внедрения технологии кормового обесфторенного фосфата

Результаты экономических расчетов показали, что внедрение малоотходного технологического модуля производства кормового обесфторенного фосфата обеспечивает существенный экономический эффект. Он достигается за счет снижения удельных затрат на энергетические и материальные ресурсы, сокращения капитальных и эксплуатационных расходов, а также уменьшения численности обслуживающего персонала. Совокупный экономический эффект от внедрения разработанной технологии подтверждает ее целесообразность и эффективность при промышленной реализации.

Внедрение малоотходного технологического модуля производства кормового обесфторенного фосфата со-

провождается значительным снижением техногенной нагрузки на окружающую среду. Количество образующихся фторсодержащих газов уменьшается в несколько раз, полностью устраняется пылеунос из-под холодных воронок и шахты ЭТА, а абсорбционный шлам фильтров газоочистки полностью перерабатывается в товарный гранулированный фторид кальция.

Дополнительный экономический эффект достигается за счет переработки абсорбционного шлама, ликвидации накопления фосфогипса и других отходов, а также снижения эколого-экономического ущерба от загрязнения водных объектов и почв. Совокупный результат подтверждает экологическую и экономическую целесообразность внедрения разработанных технологических решений.

Обсуждение результатов

Полученные результаты обусловлены комплексным характером предложенных малоотходных технологических модулей, в которых процессы очистки газов, переработки отходов и получения товарной продукции интегрированы в единую схему. Снижение удельных потоков токсичной массы достигается за счет сокращения выбросов фторсодержащих газов, устранения пылеуноса и полного вовлечения абсорбционного шлама в повторный технологический цикл. Улучшенные прочностные и термостойкие характеристики гранул фторида кальция связаны с применением бентонитовых глин, способствующих формированию плотной структуры материала.

Преимущества предложенных решений обеспечивают использованием эффективных абсорбционных систем, оптимизацией режимов гранулирования и термической обработки, а также применением доступных природных связующих добавок. Это позволяет повысить степень улавливания фтора и обеспечить стабильное качество получаемого товарного продукта.

Преимущество данного исследования по сравнению с аналогами заключается в совмещении экологической и эколого-экономической оценки с экспериментальным подтверждением возможности переработки фторсодержащего шлама в товарную продукцию, что обеспечивает дополнительный экологический и экономический эффект.

К ограничениям исследования относится привязка экспериментальных данных к условиям конкретного предприятия и масштабам проведенных испытаний. Перспективы дальнейших исследований связаны с масштабированием разработанных решений, их адаптацией к различным типам фосфатного сырья и уточнением показателей экологической эффективности при длительной эксплуатации.

Заключение

Выполненные исследования по оптимизации вспомогательных технологических процессов ЗМУ и эколого-экономической оценке результатов показали, что повышение экологичности производств может быть достигнуто за счет внедрения узла доочистки сточных вод методом карбонизации с использованием флокулянтов. Реализация данного решения обеспечивает интенсификацию осаждения твердой фазы и снижение техногенной нагрузки на окружающую среду.

Соединения фтора, аккумулируемые в шламе абсорбционного отделения, целесообразно перерабатывать в товарный фторид кальция, получаемый в гранулированном виде. Установлено, что применение бентонитовых глин способствует повышению прочностных характеристик гранул, что расширяет возможности утилизации фторсодержащих отходов и повышает эколого-экономическую эффективность производства.

Благодарность

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры «Экология» Южно-Казахстанского университета им. М. Ауезова за методическую поддержку, научные консультации и содействие в обсуждении результатов исследования. Признательность также выражается специалистам, оказавшим помощь в проведении экспериментальных работ и интерпретации полученных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эшлан П.А. Улавливание и переработка фторсодержащих выбросов в химической промышленности // *Химическая технология*. 2016. № 4. С. 201–207 (на русском языке)
2. Бишимбаев В.К., Балтабаев Л.Ш. Экологические аспекты переработки фосфатного сырья: Алматы: Ғылым, 2017. 256 с. (на русском языке)
3. Тарат Э.Я., Воробьев О.Г. Очистка газов в производстве фосфорных удобрений: М.: Химия, 2018. 312 с. (на русском языке)
4. Исаева Р.К., Нуртаева А. Экологическая оценка малоотходных технологий в фосфорной промышленности // *Экология и промышленность Казахстана*. 2019. № 2. С. 45–52 (на русском языке)
5. Смирнов Д.С., Белов М.И. Современные методы утилизации фторсодержащих отходов // *Химическая промышленность сегодня*. 2020. № 6. С. 33–39 (на русском языке)
6. Архипова Л.И. Абсорбционные методы очистки газовых выбросов: СПб.: Профессия, 2015. 198 с. (на русском языке)
7. Zhang Y., Li H., Wang X. Удаление фтора из промышленных отходящих газов с использованием абсорбционных технологий // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Т. 6. № 4. С. 4752–4760 (на английском языке)
8. Olejarczyk M., Niesler A., Knapik E. (2022). Управление твердыми отходами, содержащими фтор, – обзор. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9147173/> (на английском языке)
9. Szulc A., Skotnicka E., Gupta M.K., Królczuk J.B. (2024). Процессы агломерации порошкообразных сыпучих материалов – современный обзор методов гранулирования и областей применения. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092> (на английском языке)
10. González A., Romero M. Малоотходные технологии в химической промышленности: экологическая и экономическая оценка // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Т. 122. С. 12–20 (на английском языке)
11. Smith D., Allen P. Комплексная экологическая оценка систем очистки промышленных газов // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Т. 104. С. 45–53 (на английском языке)
12. Рябова Н.Е., Стариков В.Ф. Методы абсорбционной очистки газов от фтористого водорода в производстве фосфорных удобрений // *Фосфорные удобрения и химическая экология*. 2020. Т. 38. № 10. С. 56–60 (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Эшлан П.А. Химия өнеркәсібіндегі фторқұрамды шығарындыларды ұстау және қайта өңдеу // *Химиялық технология*. 2016. № 4. Б. 201–207 (орыс тілінде)
2. Бишимбаев В.К., Балтабаев Л.Ш. Фосфатты шикізатты қайта өңдеудің экологиялық аспектілері: Алматы: Ғылым, 2017. 256 б. (орыс тілінде)
3. Тарат Э.Я., Воробьев О.Г. Фосфор тыңайтқыштары өндірісіндегі газдарды тазалау: М.: Химия, 2018. 312 б. (орыс тілінде)
4. Исаева Р.К., Нуртаева А. Фосфор өнеркәсібіндегі аз қалдықты технологияларды экологиялық бағалау // *Қазақстанның экологиясы және өнеркәсібі*. 2019. № 2. Б. 45–52 (орыс тілінде)
5. Смирнов Д.С., Белов М.И. Фторқұрамды қалдықтарды кәдеге жаратудың заманауи әдістері // *Химия өнеркәсібі бүгін*. 2020. № 6. Б. 33–39 (орыс тілінде)
6. Архипова Л.И. Газ шығарындыларын абсорбциялық тазалау әдістері: СПб.: Профессия, 2015. 198 б. (орыс тілінде)
7. Zhang Y., Li H., Wang X. Өнеркәсіптік шығарындылар газдарынан фторды абсорбциялық технологиялар арқылы жою // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Т. 6. № 4. Б. 4752–4760 (ағылшын тілінде)
8. Olejarczyk M., Niesler A., Knapik E. (2022). Фторы бар қатты қалдықтарды басқару – шолу. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9147173/> (ағылшын тілінде)
9. Szulc A., Skotnicka E., Gupta M.K., Królczuk J.B. (2024). Сусымалы материалдарды ұнтақ агломерациялау процесі – түйіршіктеу әдістері мен қолдану салаларына арналған қазіргі жағдайға шолу. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092> (ағылшын тілінде)
10. González A., Romero M. Химия өнеркәсібіндегі аз қалдықты технологиялар: экологиялық және экономикалық бағалау // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. Т. 122. Б. 12–20 (ағылшын тілінде)
11. Smith D., Allen P. Өнеркәсіптік газдарды тазалау жүйелерінің кешенді экологиялық бағасы // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. Т. 104. Б. 45–53 (ағылшын тілінде)

12. Рябова Н.Е., Стариков В.Ф. Фосфор тыңайтқыштары өндірісінде фторсутекті газдарды абсорбциялық тазалау әдістері // Фосфор тыңайтқыштары және химиялық экология. 2020. Т. 38. № 10. Б. 56–60 (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Eshlan P.A. Upravlyanie i pererabotka ftorsoderzhashchikh vybrosov v khimicheskoi promyshlennosti [Capture and processing of fluoride-containing emissions in the chemical industry], *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical technology]. 2016. No. 4. 201–207 pp. (in Russian)
2. Bishimbaev V.K., Baltabaev L.Sh. *Ekologicheskie aspekty pererabotki fosfatnogo syrya* [Environmental aspects of phosphate raw material processing]. Almaty: Gylym, 2017. 256 p. (in Russian)
3. Tarat E.Ya., Vorobyov O.G. *Ochistka gazov v proizvodstve fosfornykh udobrenii* [Gas purification in the production of phosphorus fertilizers]. Moscow: Khimiya, 2018. 312 p. (in Russian)
4. Issayeva R.K., Nurtayeva A. *Ekologicheskaya otsenka malootkhodnykh tekhnologii v fosfornoj promyshlennosti* [Environmental assessment of low-waste technologies in the phosphorus industry], *Ekologiya i Promyshlennost Kazakhstana* [Ecology and industry of Kazakhstan]. 2019. No. 2. 45–52 pp. (in Russian)
5. Smirnov D.S., Belov M.I. *Sovremennye metody utilizatsii ftorsoderzhashchikh otkhodov* [Modern methods for utilization of fluoride-containing waste] *Khimicheskaya promyshlennost segodnya* [Chemical industry today]. 2020. No. 6. 33–39 pp. (in Russian)
6. Arkhipova L.I. *Absorbtsionnye metody ochistki gazovykh vybrosov* [Absorptive methods for purification of gaseous emissions]. Saint-Petersburg: Professiya, 2015. 198 p. (in Russian)
7. Zhang Y., Li H., Wang X. Fluoride removal from industrial exhaust gases using absorption technologies // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. V. 6. No. 4. 4752–4760 pp. (in English)
8. Olejarczyk M., Niesler A., Knapik E. (2022). Management of solid waste containing fluoride – A review // *Environmental Science and Pollution Research*. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9147173/> (in English)
9. Szulc A., Skotnicka E., Gupta M.K., Królczyk J.B. (2024). Powder agglomeration processes of bulk materials – A state of the art review on different granulation methods and applications. *Powder Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119092> (in English)
10. González A., Romero M. Low-waste technologies in chemical industry: environmental and economic evaluation // *Resources, Conservation and Recycling*. 2017. V. 122. 12–20 pp. (in English)
11. Smith D., Allen P. Integrated environmental assessment of industrial gas cleaning systems // *Process Safety and Environmental Protection*. 2016. V. 104. 45–53 pp. (in English)
12. Ryabova N.E., Starikov V.F. *Metody absorbtsionnoi ochistki gazov ot ftoristogo vodoroda v proizvodstve fosfornykh udobrenii* [Absorption methods for purification of hydrogen fluoride gases in phosphorus fertilizer production], *Fosfornye udobreniya i khimicheskaya ekologiya* [Phosphorus Fertilizers and Chemical Ecology]. 2020. V. 38. No. 10. 56–60 pp. (in Russian)

Сведения об авторах:

Нұртаева А.С., докторант, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан), nurtayeva94@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0274-5976>

Исаева Р.А., к. т. н., доцент, преподаватель, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан), razia_68@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-2675-1987>

Байысбай У.П., к. т. н., доцент, декан, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауезова (г. Шымкент, Казахстан), omirbek_7819@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4209-3087>

Головатый С.Е., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологического мониторинга и менеджмента, «Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь), GolovatySE@bsu.by; <https://orcid.org/0000-0001-8039-1926>

Авторлар туралы мәліметтер:

Нұртаева А.С., докторант, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

Исаева Р.А., техника ғылымдарының кандидаты, доцент, оқытушы, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

Байысбай У.П., техника ғылымдарының кандидаты, доцент, декан, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті (Шымкент қ., Қазақстан)

Головатый С.Е., ауыл шаруашылығы ғылымдарының докторы, профессор, Беларусь мемлекеттік университетінің «А.Д. Сахаров атындағы Халықаралық мемлекеттік экологиялық институты» экологиялық мониторинг және менеджмент кафедрасының меңгерушісі (Минск қ., Беларусь)

Information about the authors:

Nurtayeva A.S., Doctoral student, South Kazakhstan University named after M. Auezov (Shymkent, Kazakhstan)

Issayeva R.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Lecturer, South Kazakhstan University named after M. Auezov (Shymkent, Kazakhstan)

Baiysbay U.P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean, South Kazakhstan University named after M. Auezov (Shymkent, Kazakhstan)

Golovaty S.E., Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Monitoring and Management, International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Belarus)