

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМОСОДЕРЖАЩЕГО ШЛАКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД И ВОДОПОДГОТОВКЕ

Е. В. Серазеева, Р. Н. Исмаилова, С. Ю. Гармонов

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань, Россия; ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия; ООО «УкуЛаб», Казань, Россия

Ключевые слова: алюминий; вторичное сырье; металло-содержащие отходы; синтезированный коагулянт; солевые шлаки; утилизация отходов; флюс.

Аннотация: При создании экологически безопасного производства необходимо учитывать такие критерии, как сокращение загрязнения окружающей среды отходами и экономию природных ресурсов за счет максимально возможного вторичного вовлечения отходов в хозяйственный оборот предприятия. Рассмотрена возможность рециклинга металлосодержащих отходов металлургического производства, при этом проанализированы способы вторичного использования шлаковых отходов, а также проведены исследования в области применения алюминиевых шлаков в качестве реагента для очистки сточных вод и в водоподготовке. Показан процесс получения синтезированного коагулянта. Дано описание экспериментов по его применению в технологии процесса очистки сточных вод предприятия молочной промышленности, а также в водоподготовке методом пробного коагулирования. Определены оптимальные дозы и рабочий диапазон синтезированного коагулянта, подтверждающие наибольшую эффективность его применения для достижения критериев качества очистки воды.

Введение

По данным Росприроднадзора в последние годы на российских предприятиях образуется порядка 9,3 млрд т отходов ежегодно. Основную массу отходов производят добывающие отрасли. Четвертое место среди от-

Серазеева Елена Владимировна – старший преподаватель кафедры «Инженерная экология и безопасность труда», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры «Инженерная экология», e-mail: elen-vs00@mail.ru, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия; Исмаилова Румия Няжиповна – кандидат химических наук, доцент, представитель руководства по качеству, ООО «УкуЛаб», Казань, Россия; Гармонов Сергей Юрьевич – доктор химических наук, профессор кафедры «Инженерная экология», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия.

дельных отраслей промышленности по техногенным отходам занимает металлургическое производство (195,5 млн т, или 2,1 %) [1]. Несмотря на то что в целом по стране утилизируется более 40 % отходов предприятий, большая часть до сих пор, подлежит захоронению и не утилизируется.

Цветная металлургия – одна из отраслей металлургического комплекса, характеризующаяся значительным расходом материальных и энергетических ресурсов, которые в свою очередь приводят к достаточному росту образования отходов [2].

Одним из ключевых производств в металлургии легких металлов является алюминиевая промышленность – крупнейшая по объему выпуска продукции. На предприятиях после основного технологического процесса образуется огромное количество побочных продуктов, которые практически не используются и представляют собой отходы производства. Но в то же время они потенциально обладают определенной материальной ценностью, так как имеют в своем составе компоненты, которые могут непосредственно использоваться в производстве другой продукции, то есть являются вторичным материальным ресурсом.

В настоящее время масштаб мирового производства алюминия превышает 60 млн т, при переработке которого в образующихся шлаках содержится значительное количество металлического алюминия [3]. Переработка вторичного алюминия из отходов и лома путем плавления – один из самых распространенных методов получения сырья. Сопутствующим отходом в результате такой плавки являются солевые шлаки, в которых также присутствует достаточно металлического алюминия [4, 5].

Для производства металлов и сплавов используют значительное количество вспомогательных материалов – флюсов, топлива и огнеупорных материалов. Флюсы при введении их в шихту способствуют повышению производительности извлечения металла в плавильных печах. Во вторичной металлургии алюминия также используют флюсы (рис. 1) [6].

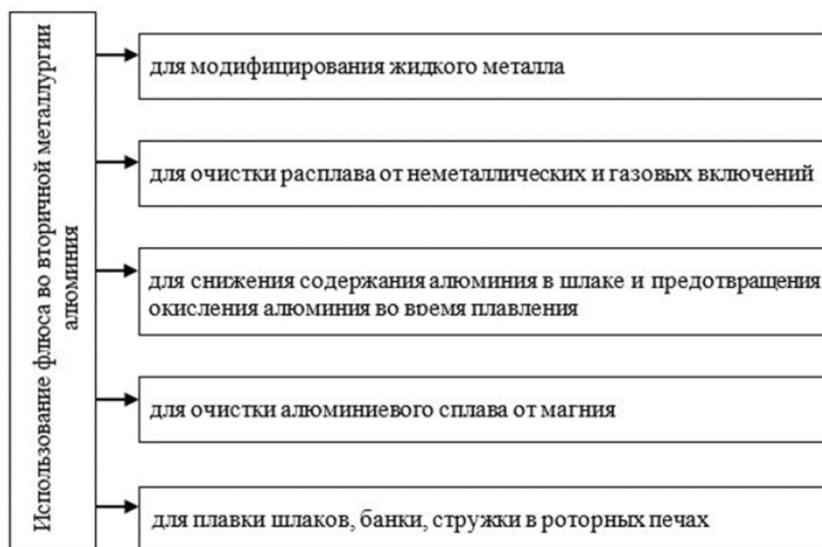


Рис. 1. Использование флюса во вторичной металлургии алюминия

Патентный анализ в области металлургии показывает множество изобретений использования алюминиевого шлака в различных технологических операциях. Известны способы применения шлака, такие как модифицирование и легирование стали, рафинирование, раскисление, где он используется как самостоятельное сырье. В работе [7] шлаки алюминиевого производства используются в кусковом виде фракцией 10...500 мм или в виде брикета с размерами 10...120 мм, полученного прессованием или спеканием отсевов шлака; шлакообразующая смесь представлена как раскислитель для стали используемого для ее производства в сталеплавильных печах [8, 9]; также во внепечной обработке стали алюмооксидную смесь используют для разжижения металлургических шлаков при производстве стали и сплавов [10]. В работе [11] молотый солевой шлак вторичного производства алюминия используется как сырьевая смесь для ячеистого бетона в качестве газообразователя.

Другие направления исследований включают в себя технологии глубокой переработки и модификации шлака с последующим осаждением, концентрированием, кристаллизацией алюмосодержащих компонентов. В работе [12] шлак подвергается измельчению, выщелачиванию в воде, выпариванию или обогащению рассола с помощью ионообменной или мембранной технологий с последующей сушкой выделяющихся солей и сушки нерастворимой в воде оксидной составляющей, из которой выделяют небольшое количество корольков алюминия; в [13] показан способ воздействия на расплавленный алюминиевый шлак скрещенными электрическими и магнитными полями, разработанный для извлечения металлического алюминия из шлака. Рассмотренные методы переработки шлаков характеризуются высокой степенью сложности и комплексности. Наиболее перспективными оказались методы, требующие наименьших затрат ресурсов, использующие алюмосодержащие отходы в качестве сырья для получения коагулянтов в очистке воды. В работе [14] показан способ получения алюмосодержащего коагулянта на основе сульфата алюминия из отходов производства (шлаки плавильного производства алюминиевых сплавов), который включает обработку суспензии отходов концентрированной серной кислотой, фильтрацию, нейтрализацию фильтрата аммиаком, охлаждение нейтрализованного фильтрата с выделением из него кристаллов, промывку кристаллов смесью воды и ацетона.

В результате проведенного анализа и обобщения данных из литературных и патентных источников, посвященных возможности применения флюсов, можно сделать вывод, что, несмотря на большое количество исследований, посвященных вторичному использованию отходов производства алюминия, большинство из них сосредоточено на развитии технологий в металлургической отрасли. В то же время работы, направленные на создание технологий производства алюмосодержащих коагулянтов, занимают гораздо меньшую долю. Таким образом, это свидетельствует об отсутствии рациональных технологий их комплексного использования.

Цель работы – определение области применения алюмосодержащих шлаков в качестве реагента в водоподготовке и очистке сточных вод.

Качество реагента для очистки воды может быть объективно оценено через его способность эффективно удалять загрязнители в соответствии

с установленными нормативными требованиями безопасности, согласно [15], где приведены критерии качества очищенных сточных вод, а также [16] при водоподготовке, где приводятся обобщенные критерии качества воды, как источника питьевого водоснабжения. Критерии качества воды включают физические, химические и биологические показатели воды, которые оценивают ее пригодность использования.

Для реализации поставленной цели выполнен комплексный подход, включающий решение ряда задач, которые представляли подбор оптимальных доз реагента и условий коагулирования для достижения требуемых показателей согласно [17], предназначенных для обработки воды в хозяйственно-питьевом водоснабжении и устанавливающих общие требования к коагулянтам и методам определения эффективности коагулянтов на модельных суспензиях мутности и модельных растворах цветности.

В качестве объекта исследования выбран отход шлака (флюса) алюминиевого производства предприятия, занимающегося переработкой лома и отходов цветных металлов, а также производством литейных алюминиевых сплавов, которые образуются в результате основного производства (рис. 2). Проведенная ранее экспертная оценка экологического воздействия на окружающую среду (ОС) данного предприятия показала, что значительную территорию организации занимают площадки под складирование отхода.

Флюс алюминиевого производства – это фракция сероватого оттенка, сыпучая, относится к 4 классу по степени негативного воздействия на окружающую среду (согласно расчету класса опасности отхода).

Образование шлака печей переплава алюминиевого производства представляет собой следующий процесс: в роторную печь загружаются солевой флюс и вспомогательные технологические материалы – смесь солей натрия хлорида и калия хлорида в соотношении 60 и 40 %. Процесс плавления происходит при рабочей температуре печи 900 °С. По завершению процесса плавки сначала из печи через летки в изложницы сливается расплавленный металл, затем жидкий конечный шлак – в шлаковни, где



Рис. 2. Шлак алюминиевого производства

остается до полного остывания, после чего перевозится ковшовым автопогрузчиком из производственного корпуса на открытый склад для хранения навалом.

Материалы и методы

Проведены лабораторные исследования химического состава алюмосодержащего отхода с применением аттестованных методик, включенных в перечень ФЗ № 102 (используемые аккредитованными лабораториями в национальной системе аккредитации), по определению массовой доли алюминия, железа, марганца и меди по ПНД Ф 16.3.85-17 «Методика измерений массовой доли алюминия, бария, бериллия, ванадия, железа, кадмия, кобальта, лития, марганца, меди, молибдена, мышьяка, никеля, свинца, стронция, титана, хрома, цинка в пробах отходов производства и потребления атомно-абсорбционным методом с электротермической атомизацией с использованием атомно-абсорбционных спектрометров модификаций МГА-915, МГА-915М, МГА-915МД и МГА-1000»; исследование на содержание аммонийного азота по ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.30-02 «Методика выполнения измерений содержания азота аммонийного в твердых и жидких отходах производства и потребления, осадках, шламах, активном иле, донных отложениях фотометрическим методом», основанное на способности ионов аммония образовывать с щелочным раствором йодида ртути (I) (реактивом Несслера) окрашенные в желтый цвет соединения йодида меркураммония и измерении оптической плотности полученного комплекса при $X = (400 \pm 0,5)$ нм; исследование проб на содержание водородного показателя среды по ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.33-02 «Методика выполнения измерений значения водородного показателя (рН) твердых и жидких отходов производства и потребления, осадков, шламов, активного ила, донных отложений потенциометрическим методом», основанное на получении водных вытяжек твердых отходов, получении фильтратов жидких объектов (жидких отходов, донных отложений, ила, осадков, шламов) с последующим измерением в водных вытяжках и фильтратах разности потенциалов, возникающих на границах между внешней поверхностью стеклянной мембраны электрода и исследуемым раствором с одной стороны и внутренней поверхностью мембраны и стандартным раствором – с другой. Определение содержания влаги проводилось по ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.58-08; исследование на содержание хлорид-ионов по ПНД Ф 16.2.2:2.3:3.28-02.

Результаты количественного химического анализа шлака алюминиевого производства представлены в табл. 1. Проанализировав результаты исследований на основные компоненты шлака алюминиевого производства, отмечено в его составе достаточное содержание алюминия, а именно: $9,9 \pm 3,1$ (результат в весовых %), также более половины составляет шихта. Такое количество алюминия в составе шлака дает возможность для использования его в качестве вторичного сырья.

Одной из областей применения флюса металлургического производства, содержащего алюминий, рассмотрено его применение в качестве реагента в системах технического водоснабжения для водоподготовки и водоочистки стоков в промышленности. Также можно отметить, что

Таблица 1

Химический состав шлака

Ингредиент, %	Норматив качества	Результаты испытаний	Массовая концентрация $\pm\Delta$, мг/кг	Метод исследований
Хлориды	–	0,868	8680 \pm 434	Меркуриметрический
Азот аммонийный		0,003	30 \pm 3,3	Фотометрический
Железо	6	0,9	9000 \pm 4050	Атомно-абсорбционный
Медь	1	0,1	1000 \pm 250	
Алюминий	7 – 22	9,9	99 000 \pm 31050	
Марганец	0,7	0,108	1080 \pm 486	
Влага	–	2,46	24 600 \pm 2460	Гравиметрический
Диоксид кремния	8	14,97	149 700 \pm 43413	
Водородный показатель, ед. рН	–	9,00	–	Потенциометрический

большинство предприятий стали использовать в качестве коагулянта полиоксихлорид алюминия (**ОХА**). Он отличается от обычного сульфата алюминия тем, что не снижает щелочность воды, уменьшает содержание хлорорганических соединений, обеспечивая меньший расход коагулянта при обработке сточной воды, а также более малые содержания остаточного алюминия, при этом обладая меньшей токсичностью, а эффективность коагуляции выше, так как диапазон рН больше [18, 19]. Высокая результативность его использования обусловлена тем, что алюминий в нем находится в виде аквагидроксикомплексов, а не в виде ионов алюминия. При наличии большой удельной поверхности гидроксикомплексы эффективно обеспечивают коагуляцию компонентов водной среды. Значительная экономичность, удобство применения в широком интервале рН, простота изготовления и большая вариация концентрации активного реагента (в товарных номенклатурах используют пересчет на Al_2O_3) делают его наиболее перспективным для использования на практике.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Синтезированный ОХА производится из флюса (алюмосодержащего шлама) металлургического производства. Коагулянт получают путем варки в 1 м³ 15%-ной хлороводородной кислоты 200 кг флюса при температуре 90...110 °С до тех пор, пока весь шлам не растворится. После завершения процесса полученную жидкость подвергают процедуре отстаивания и фильтрации.

Показателями эффективности использования реагента и выбор его оптимальной дозы являются минимальное время протекания реакции гидролиза образования хлопьев, качество отстоянной воды, характеристика осадка и его объем. В течение 30 мин, когда происходило отстаивание, наблюдалось появление мелких и крупных хлопьев и фиксировалось время

процесса осветления до полного его завершения. В качестве оптимального количества коагулянта принимают то количество, при котором образуется хорошо седиментированный осадок.

Исследование алюмосодержащего шлама в качестве коагулянта применили в технологии процесса очистки сточных вод молочного комбината методом пробного коагулирования. Данный метод позволяет выбрать подходящий коагулянт или флокулянт, определить его оптимальную дозировку и оценить эффективность применения для очистки исследуемых сточных вод [20]. Суть метода заключается в том, что сточные воды обрабатываются реагентами в специальных емкостях или стаканах при определенных условиях. Эти условия включают в себя стандартные режимы смешивания и образования хлопьев, а также условия, имитирующие процесс коагуляции на существующих очистных сооружениях.

Процесс смешивания осуществляется посредством применения специализированного механического перемешивающего оборудования. Сначала процесс происходит быстро, чтобы равномерно распределить реагент в воде. Затем скорость снижается, чтобы образовались крупные хлопья, которые быстро оседают, удаляя загрязнения. Для проведения экспериментов по пробному коагулированию используются специальные установки, позволяющие обрабатывать до шести проб сточных вод одновременно и перемешивать их с помощью механических мешалок, скорость вращения которых можно регулировать в диапазоне от 10 до 200 оборотов в минуту.

В ходе экспериментов в стаканы с неочищенной водой добавлялись различные дозы коагулянта в виде 10%-ных растворов. Диапазон варьирования дозировки коагулянта охватывал пределы, включающие предполагаемую оптимальную концентрацию, что позволило провести систематическое исследование влияния различных уровней дозирования на коагуляционные процессы [20].

Дозы реагентов указываются двумя способами: в количестве активного вещества и в общем объеме продукта. Для сравнения эффективности различных реагентов более целесообразно сравнивать расходы по активному веществу. Для эффективного практического применения и оптимизации затрат на реагенты, а также определения их потребности, целесообразно проводить сравнительный анализ расходов товарных продуктов. Дозировки основных солей алюминия, как правило, рассчитываются на основе содержания оксида алюминия. Для определения объема жидкого товарного реагента $V_{\text{тов}}$, м³/м³, используют специальную формулу, позволяющую выразить его в объемных единицах, что является критически важным для обеспечения точности и эффективности процесса [20]:

$$V_{\text{тов}} = \frac{D_{\text{акт}}}{\rho C_{\text{реаг}}} 100,$$

где $D_{\text{акт}}$ – доза реагента по активному веществу, кг/м³; ρ – плотность товарного продукта, кг/м³; $C_{\text{реаг}}$ – концентрация товарного продукта по активному веществу, вес. %.

Для определения оптимальных доз синтезированного ОХА, показывающего наилучший результат, изначально проверялся подходящий водородный показатель рН. Результаты представлены на рис. 3.

Для очистных сооружений ключевым фактором является скорость хлопьеобразования и масса осадка. Делая анализ исследований на зависимость коагуляции от рН воды, приходим к выводу, что наиболее подходящее значение рН – 9, при котором наблюдается наименьшее количество осадка. Это говорит о том, что процесс коагуляции при данном значении рН проходит значительно быстрее, так как при этом значении обеспечивается достаточная скорость хлопьеобразования, а также отсутствует мутность, чем при рН, равной 8 или 10.

Следующий этап исследований – выбор оптимального диапазона величины коагулянта, при котором обеспечивается хорошая осветляемость воды и высокая скорость осаждения. Критерии подбора – масса образовавшегося осадка в течение 20 минут коагуляции при температуре воды 20 °С; коагулянт с одинаковой исходной концентрацией был разбавлен в 10 раз (рис. 4).

Анализируя зависимость эффективности коагулянта, вводимого в воду, от его величины, делаем следующие выводы: наилучшим результатом при ожидании в течение 20 мин является величина коагулянта при 0,8 мл, масса осадка наименьшая, что свидетельствует о более быстром хлопьеобразовании.

Температурный режим водной среды играет ключевую роль в процессе коагуляции. Исследование проводилось при рН, равной 9, величине добавляемого коагулянта в 1,0 мл 10%-ного раствора алюмосодержащего флюса, время ожидания 20 мин.

При температуре 35 °С процесс хлопьеобразования не наблюдался. При более низких температурах процесс коагуляции существенно улучшается. Результаты опыта при времени осаждения 20 мин. показаны на рис. 5.

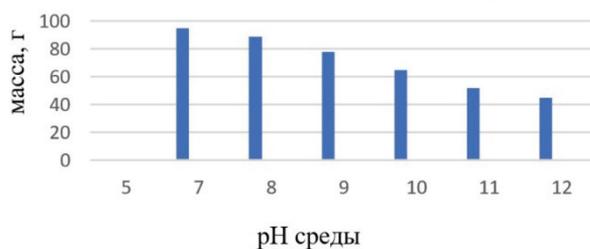


Рис. 3. Зависимость количества осадка от рН среды



Рис. 4. Диаграмма зависимости массы осадка от величины коагулянта

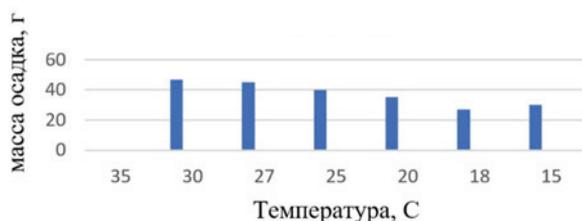


Рис. 5. Зависимость массы осадка от температуры воды

В результате проведенных экспериментов достигнуты оптимальные условия очистки сточных вод с применением синтезированного ОХА, что позволило существенно повысить эффективность удаления определенных загрязняющих веществ. Наиболее благоприятные условия для достижения наилучшего результата процесса коагуляции следующие: температура воды в диапазоне 20...25 °С, рН – 8...9 и величина содержания коагулянта от 1,4 мл/100 мл до 0,8 мл/100 мл (0,014 мг/мл – 0,008 мг/мл).

В таблице 2 представлены компоненты, входящие в состав сточных вод, и их остаточные концентрации, для которых определены оптимальные параметры очистки, показывающие большую эффективность при использовании синтезированного коагулянта, в сравнении с показателями традиционного реагента, который используется на предприятии.

В результате анализа отмечено значительное снижение показателей: БПК_{полн} – в 4,06 раза; ХПК – в 1,88 раз; хлориды – в 1,46 раз; фосфаты – в 6,33 раза; нитрит-ионы – в 3,3 раза; нитрат-ионов – в 4,35 раза; сульфаты – в 3,07; аммиак и аммоний-ион – в 62,5 раза.

Таким образом, согласно результатам лабораторных исследований, сделан следующий вывод: после определенной подготовки использование нового синтезированного коагулянта является целесообразным при очистке сточной воды.

Также исследования синтезированного коагулянта на основе металлургического шлама проводили для процесса водоподготовки. Как правило, вода, поступающая из источников природного происхождения, часто не соответствует нормам и требованиям, которые выдвигаются промышленными предприятиями. Для этого она проходит процесс очистки и подготовки для дальнейшего использования.

Несмотря на то что методы обработки воды с помощью реагентов на станциях водоподготовки хорошо известны, до сих пор существует потребность в изучении эффективности различных видов коагулянтов для улучшения процесса очистки. Данная необходимость возникает из-за таких факторов, как:

- 1) в период активного цветения, когда уровень рН превышает 8,5, эффективность работы коагулянтов снижается;
- 2) в условиях пониженных температур водной среды процесс коагуляции существенно затрудняется;
- 3) строгие критерии оценки качества водопроводной воды, в том числе по уровню остаточного алюминия.

Таблица 2

**Сравнительный анализ эффективности анализируемых образцов
коагулянтов в очистке сточных вод**

Химические показатели сточной воды	Результаты анализа сточных вод на этапе физико-химической очистки				
	На входе физико-химической очистки	После очистки традиционным ОХА	Эффективность очистки, %	После очистки синтезированным коагулянтом	Эффективность очистки, %
БПК _{полн} , мгО ₂ /л	1157	541,53	53,2	133,8	88,5
ХПК, мгО ₂ /л	1150	592,91	48,4	316	72,5
Хлорид-ионы, мг/л	548,7	541,47	1,3	372	32,2
Нитрит-ионы, мг/л	0,03	0,038	–	0,0115	61,7
Нитрат-ионы, мг/л	0,43	9,05		2,08	–
Сульфаты, мг/л	427	454		147,7	65,4
Аммиак и аммоний-ионы, мг/л	26,2	30		0,48	98,2
АПАВ мг/л	0,97	0,92		1,06	–
Фосфат-ионы, мг/л	200	157,54	21,2	24,87	87,6
Взвешенные вещества, г/л	4,576	4,08	10,8	1,26	72,5
рН	4,8	4,6	–	7,2	В пределах норматива
Электропроводность, мкСм/см	3584	3381		–	

В качестве объекта исследования взята вода из реки Волги, которая используется для забора на станции водоподготовки промышленного предприятия. Изучение характеристик нового синтезированного реагента проводилось в условиях зимы и во время весеннего половодья. В эти периоды можно наглядно наблюдать за изменениями качества воды в реке.

В ходе исследования минимальной дозы синтезированного коагулянта (10 мг/дм³) обнаружено, что уже через 5 мин после начала эксперимента начали образовываться мелкие и мельчайшие хлопья. Через 20 мин сформировались хлопья среднего размера и осадок в 1 мм. Через 30 мин выпал осадок в 2 мм, при этом наблюдалось образование мелких и средних хлопьев, а также осветление межхлопкового пространства. Увеличение размеров хлопьев и формирование осадка являются индикаторами более

эффективного протекания процесса коагуляции. Этот эксперимент демонстрирует «поршневое» оседание, при котором высота водяного столба уменьшается, а движение воды отсутствует. В реальных условиях количество столкновений хлопьев больше и процесс коагуляции происходит быстрее.

Лабораторные исследования всех показателей качества воды выполнены по аттестованным методикам. Подбор оптимальной дозы синтезированного коагулянта при водоподготовке питьевой воды велась согласно критериям качества воды по нормативам СанПиН 1.2.3685-21. Среди показателей для анализа выбраны наиболее приоритетные, показывающие наглядную степень очистки воды: рН [21], мутность [22], цветность [23], остаточный алюминий [24]; определение дозы вели по наименьшему количеству реагента, необходимого для наилучших результатов достижения соответствующих нормативов. Измерение показателей осуществлено по истечении двух часов с момента инициирования пробного процесса коагулирования.

Результаты исследований показали быстро оседающие флоккулы при использовании синтезированного ОХА, которые приводят к некоторому уменьшению рН воды, это может подтвердить снижение рН с 7,4 до 6,7 при увеличении дозы реагента. Резкое снижение могло быть обусловлено формированием кислотных продуктов гидролиза.

При определении мутности исследуемой воды результаты пробного коагулирования показали, что значения находились в допустимом диапазоне лишь в зимний период. При использовании реагента в период паводка наблюдались более низкие концентрации.

Исследование степени очистки воды от цветности показал достаточно эффективный результат, на что указывают стабильно более низкие показатели цветности обработанной воды (среднее значение цветности среди рассматриваемых доз – 9,0 мг/дм³).

При определении содержания алюминия в исследуемых пробах воды с применением коагулянта выявили, что эффективность удаления алюминия резко возросла при дозе реагента 20...30 мг/дм³, достигая более высоких показаний эффективности между дозой от 30 до 40 мг/дм³. Однако некоторое количество алюминия могло остаться в растворе, что в результате и привело к увеличению его содержания в очищенной воде (при дозе 50...60 мг/дм³). В течение всего рассматриваемого периода концентрация остаточного алюминия в обработанной воде не превышала 0,1 мг/дм³, что позволяет иметь запас до ПДК более 50 %.

Таблица 3 содержит результаты лабораторных испытаний традиционного коагулянта, используемого на станции водоподготовки и синтезированного ОХА на основе алюмосодержащего шлама.

На основании полученных результатов пробного коагулирования за оптимальную дозу синтезированного ОХА, показывающего наибольшую эффективность, принята доза 20 мг/дм³ по Al₂O₃ для очистки воды из источника водоснабжения, которые демонстрируют снижение качественных ключевых показателей после 30-минутного отстаивания:

Таблица 3

**Результаты лабораторных испытаний анализируемых образцов
коагулянтов в водоподготовке**

Коагулянт		pH		Цветность, град.		Мутность по коалину, мг/дм ³		Алюминий, мг/дм ³	
Марка	Доза по Al ₂ O ₃ , мг/дм ³								
Период года		Зима	Весна	Зима	Весна	Зима	Весна	Зима	Весна
Исходная вода		7,4	7,7	33	89	1,3	8,5	<0,04**	0,48
СА	10	7,4	7,6	29	68	1,5	8,8	0,14	0,50
	20	7,4	7,6	16	55	0,82	7,6	0,12	0,36
	30	7,4	7,5	13	47	0,41	5,1	0,10	0,22
	40	7,1	7,2	13	40	0,20	2,4	0,056	0,17
	50	7,1	7,2	10	36	<0,1*	1,0	0,044	0,088
	60	7,0	7,1	9,4	20	<0,1*	0,78	<0,04**	0,097
ОХА	10	7,1	7,3	16	34	0,61	2,3	0,056	0,24
	20	6,9	7,0	8,6	15	0,10	1,4	<0,04**	0,11
	30	6,8	6,9	8,1	10	<0,1*	0,85	<0,04**	<0,04**
	40	6,8	6,8	7,4	8,6	<0,1*	<0,1*	<0,04**	<0,04**
	50	6,7	6,8	7,0	7,7	<0,1*	<0,1*	<0,04**	0,042
	60	6,7	6,6	6,5	7,1	<0,1*	<0,1*	0,043	0,048
ПДК***		6,0...9,0		20		1,5		0,2	

* Ниже диапазона измерений.

** Ниже диапазона измерений.

*** СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 г. «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21».

– по мутности: в весенний период наблюдается значительное снижение до 1,6 мг/дм³, что соответствует очистке воды на 81 %; в зимний период мутность снижается до 0,10 мг/дм³, обеспечивая полную очистку (100 %);

– цветность: весной цветность уменьшается до 15 мг/дм³, что свидетельствует об эффективности очистки на 83 %; зимой цветность снижается до 8,6 мг/дм³, что составляет очистку воды на 74 %;

– остаточный алюминий: в весеннем периоде концентрация остаточного алюминия снижается до 0,11 мг/дм³, что демонстрирует очистку на 77 %; в зимний период концентрация остаточного алюминия остается ниже диапазона измерений, что указывает на его полное отсутствие.

При установленных концентрациях рабочих растворов достижение показателей качества воды, отвечающих требованиям СанПиН [16], становится возможным.

Заключение

В настоящее время производство вторичного алюминия требует гораздо меньше энергии, чем производство первичного алюминия, и не приводит к таким значительным выбросам вредных веществ в окружающую среду. По прогнозам, к 2030 году доля вторичного алюминия в общем потреблении может достичь 22...24 млн т в год, а это, в свою очередь, приведет к увеличению отходов производства [25]. Поэтому важно разработать инновационную технологию переработки алюмосодержащих отходов, которая позволит использовать сырьё и энергию наиболее эффективно и комплексно. Коэффициент комплексности представляет собой ключевой параметр, который количественно характеризует эффективность извлечения полезных компонентов из перерабатываемого сырья. Для безотходного производства этот коэффициент должен быть не менее 95 %, а для малоотходного – более 75 % [26].

По результатам проведенных исследований определены оптимальные дозы и рабочий диапазон синтезированного коагулянта для достижения критериев качества очистки воды. Эффективность алюмосодержащих отходов в качестве реагента подтверждена их высокими коагулирующими характеристиками.

Список литературы

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – URL : <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 30.01.2025).
2. Экопортал. Вся экология. Отходы российской промышленности превысили исторический максимум [Электронный ресурс]. – URL : <https://ecoportal.su/news/view/126205.html> (дата обращения: 10.12.2024).
3. Курдюмова, Л. Н. Технология комплексной утилизации отвальных солевых алюминиевых шлаков : автореф. ... канд. техн. наук : 03.00.16 / Курдюмова Лариса Николаевна. – Иваново, 2002. – 16 с.
4. Лысенко, А. П. Использование комплексной технологии переработки шлаков алюминиевой промышленности для последующего раскисления стали / А. П. Лысенко, Е. А. Шевченко // Цветные металлы. – 2020. – № 3. – С. 63 – 67. doi: 10.17580/tsm.2020.03.09
5. Применение алюминиевых шлаков и продуктов их переработки в металлургическом производстве / Л. В. Трибушевский, Б. М. Немененок, Г. А. Румянцева, А. В. Арабей // Литье и металлургия. – 2021. – № 4. – С. 42 – 49. doi: 10.21122/1683-6065-2021-4-42-49
6. Флюсы для получения качественных алюминиевых сплавов / В. А. Трусов, Н. Н. Вершинин, В. В. Трусов, В. В. Макаров, Д. П. Грузин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2012. – Т. 2. – С 149 – 151.
7. Патент № 2396364 Российская Федерация, МПК C22B 9/10 C21C 7/06. Флюс для раскисления, рафинирования, модифицирования и легирования стали : № 2009114226/02 : заявл. 15.04.2009 : опубл. 10.08.2010 / Шаруда А. Н., Павлов С. В. ; заявитель ООО «Промышленная Компания «Вторалюминпродукт». – Бюл. № 22. – 7 с.
8. Патент № 2638470 Российская Федерация, МПК C21C 7/06. Раскислитель для стали : № 2016144188 : заявл. 10.11.2010 : опубл. 13.12.2017 / Неретин С. Н., Павлов А. В., Хромагин А. Н., Главатских Ю. В. – Бюл. № 35. – 8 с.

9. Патент № 2605410 Российская Федерация, МПК C21C 7/076 C22B 9/10 B22D 7/00. Шлакообразующая смесь для рафинирования стали : № 2015119723/02 : заявл. 25.05.2015 : опубл. 20.12.2016 / Михеенков М. А., Некрасов И. В., Шешуков О. Ю., Овчинникова Л. А., Маршук Л. А., Егиазарьян Д. К. ; заявитель ФГБУН Институт металлургии УО РАН. – Бюл. № 35. – 11 с.
10. Патент № 2746198 Российская Федерация, МПК C22B 9/10 C21C 5/00 C21C 7/06 C22B 7/04. Смесь алюмооксидная для разжижения металлургических шлаков : № 2020118270 : заявл. 12.04.2020 : опубл. 08.04.2021 / Цыденов А. Г., Даричев В. В., Бугримов А. А. ; заявитель АО «Завод алюминиевых сплавов». – Бюл. № 10. – 7 с.
11. Патент № 2074844 Российская Федерация, МПК C04B 38/02 (1995.01); C04B 111/40 (1995.01) Сырьевая смесь для ячеистого бетона : № 9494025783 : заявл. 11.07.1994 : опубл. 10.03.1997 / Бирюков А. И., Дайч Ю. А., Колесниченко С. Н., Курячая В. А., Ленский В. В., Спиранде В. О. ; заявитель Харьковская государственная академия железнодорожного транспорта. – Бюл. № 16.
12. Куценко, С. А. Комплексная переработка солевых алюмосодержащих шлаков : монография / С. А. Куценко, Л. Н. Курдюмова, Н. В. Кубаткина. – Орел : ОрелГТУ, 2007. – 171 с.
13. Авт. свид. № 353990 СССР, МПК C22B 7/04 (2000.01), C22B 21/00 (2000.01). Способ извлечения металлического алюминия из расплавленных солевых шлаков : № 1349609 : заявл. 22.07.1969 : опубл. 09.10.1972 / Повх И. Л., Чекин Б. В., Смирнов В. А., Базилевский В. М., Окунев В. М., Попов В. А. ; Донецкий НИИ черной металлургии ; Государственный научно исследовательский проектный институт сплавов, обработки цветных металлов. – Бюл. № 30.
14. Патент № 2102323 Российская Федерация, МПК C01F 7/74. Способ получения алюмосодержащего коагулянта : № 96100432/25 : заявл. 09.01.1996 : опубл. 20.01.1998 / Акимов И. Я., Ермаков М. В., Мельников Г. М., Парахин Ю. А. ; заявитель Орловский государственный технический университет.
15. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения : Приказ Минсельхоза Российской Федерации № 552 от 13.12.2016. – URL : http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_211155/ (дата обращения: 10.07.2025).
16. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утвержден и введен в действие Главным государственным врачом Российской Федерации постановлением № 2: дата введения 28.01.2021. – 1143 с. – URL : https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (дата обращения: 06.10.2025).
17. ГОСТ Р 51642–2000. Коагулянты для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Общие требования и метод определения эффективности. – Введ. 2001-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 2001. – 11 с.
18. Соловей, Д. А. Современные коагулянты в технологии очистки воды / Д. А. Соловей, С. С. Горобей, Ю. С. Мельникова // Актуальные вопросы энергетики : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Омск, 17 мая 2018 года. – Омск, 2018. – С. 384 – 386.
19. Папертева, Д. П. Проблемы обращения с промывными водами станций водоподготовок / Д. П. Папертева // X Всероссийский фестиваль науки : сб. тр. конф., Нижний Новгород, 14–15 октября 2020 года. – Н. Новгород, 2020. – С. 709 – 712.

20. Гетманцев, С. В. Очистка промышленных сточных вод коагулянтами и флокулянтами / С. В. Гетманцев, И. А. Нечаев, Л. В. Гандурина. – М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 272 с.
21. ПНД Ф 14.1:2:3:4.121–97. Количественный химический анализ вод. Методика измерений pH проб вод потенциометрическим методом. – М. : Стандартинформ, 2004. – 14 с. – URL : <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/052/4293846478.pdf> (дата обращения: 06.10.2025).
22. ПНД Ф 14.1:2:4.213–05. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений мутности питьевых, природных и сточных вод турбидиметрическим методом по каолину и по формазину. – М. : ФГБУ «ФЦАО», 2019. – 27 с. – URL : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293727/4293727848.pdf> (дата обращения: 06.10.2025).
23. ПНД Ф 14.1:2:4.207–04. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений цветности питьевых, природных и сточных вод фотометрическим методом. – М., 2004. – 14 с. – URL : <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a3d/4293850908.pdf> (дата обращения: 06.10.2025).
24. ПНД Ф 14.1:2:4.166–2000. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации алюминия в пробах природных, очищенных сточных и питьевых вод фотометрическим методом с алюминоном. – М., 2000. – 13 с. – URL : <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/fe8/4293846499.pdf> (дата обращения: 06.10.2025).
25. Алюминиевой Вестник. – 2021. – № 01(48). – 23 с. – URL : <https://www.aluminas.ru/upload/documents/vestnik/Vestnik-AA-48.pdf> (дата обращения: 06.10.2025).
26. Инновационные технологии переработки окисленных отходов алюминия / Л. В. Трибушевский [и др.]. – Минск : Изд-во БНТУ, 2023. – 140 с.

References

1. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed 30 January 2025).
2. Available at: <https://ecoportal.su/news/view/126205.html> (accessed 10 December 2024).
3. Kurdyumova L.N. *Extended abstract of Candidate's of Engineering thesis*, Ivanovo, 2002, 16 p. (In Russ.)
4. Lysenko A.P., Shevchenko Ye. A. [Use of integrated technology for processing aluminum industry slags for subsequent steel deoxidation], *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous metals], 2020, no. 3, pp. 63-67. doi: 10.17580/tsm.2020.03.09 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Tribushevskiy L.V., Nemenenok B.M., Rumyantseva G.A., Arabey A.V. [Use of aluminum slags and their processed products in metallurgical production], *Lit'ye i metallurgiya* [Casting and metallurgy], 2021, no. 4, pp. 42-49. doi: 10.21122/1683-6065-2021-4-42-49 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Trusov V.A., Vershinin N.N., Trusov V.V., Makarov V.V., Gruzin D.P. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"* [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"], 2012, vol. 2, pp 149-151. (In Russ.)
7. Sharuda A.N., Pavlov S.V. *Flyus dlya raskisleniya, rafinirovaniya, modifitsirovaniya i legirovaniya stali* [Flux for deoxidation, refining, modification and alloying of steel], Russian Federation, 2009, Pat. 2396364. (In Russ.).
8. Neretin S.N., Pavlov A.V., Khromagin A.N., Glavatskikh Yu.V. *Raskislitel' dlya stali* [Deoxidizer for steel], Russian Federation, 2017, Pat. 2638470 (In Russ.).
9. Mikheyenkov M.A., Nekrasov I.V., Sheshukov O.Yu., Ovchinnikova L.A., Marshuk L.A., Yegiazar'yan D.K. *Shlakoobrazuyushchaya smes' dlya rafinirovaniya*

stali [Slag-forming mixture for refining steel], Russian Federation, 2016, Pat. 2605410 (In Russ.).

10. Tsydenov A.G., Darichev V.V., Bugrimov A.A. *Smes' alyumooksidnaya dlya razzhizheniya metallurgicheskikh shlakov* [Alumina mixture for liquefying metallurgical slags], Russian Federation, 2021, Pat. 2746198 (In Russ.).

11. Biryukov A.I., Daych Yu.A., Kolesnichenko S.N., Kuryachaya V.A., Lenskiy V.V., Spirande V.O. *Syr'yevaya smes' dlya yacheistogo betona* [Raw mix for cellular concrete], Russian Federation, 1994, Pat. 2074844 (In Russ.).

12. Kutsenko S.A., Kurdyumova L.N., Kubatkina N.V. *Kompleksnaya pererabotka solevykh alyumosoderzhashchikh shlakov: monografiya* [Integrated processing of salt aluminum-containing slags: monograph], Orel: OrelGTU, 2007, 171 p. (In Russ.).

13. Povkh I.L., Chekin B.V., Smirnov V.A., Bazilevskiy V.M., Okunev V.M., Popov V.A. *Sposob izvlecheniya metallichesкого alyuminiya iz rasplavlennykh solevykh shlakov* [Method of extracting metallic aluminum from molten salt slags], Russian Federation, 1972, A.S. 353990 (In Russ.).

14. Akimov I.Ya., Yermakov M.V., Mel'nikov G.M., Parakhin Yu.A. *Sposob polucheniya alyumosoderzhashchego koagulyanta* [Method for producing an aluminum-containing coagulant], Russian Federation, 1998, Pat. 2102323 (In Russ.).

15. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_211155/ (accessed 10 June 2025).

16. Available at: https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosuslugi.ru/netcat_files/19/8/SP123685_21_0.pdf (accessed 06 October 2025).

17. GOST R 51642–2000. *Koagulyanty dlya khozyaystvenno-pit'yevogo vodosnabzheniya. Obshchiye trebovaniya i metod opredeleniya effektivnosti* [Coagulants for domestic and drinking water supply. General requirements and method for determining efficiency], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 2001, 11 p. (In Russ.).

18. Solovey D.A., Gorobey S.S., Mel'nikova Yu.S. *Aktual'nyye voprosy energetiki: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiyem* [Current issues in energy: Proc. of the All-Russian scientific and practical conference with international participation], Omsk, 17 May 2018, Omsk, 2018, pp. 384–386. (In Russ.).

19. Paperteva D.P. *X Vserossiyskiy festival' nauki: sb. tr. konf.* [X All-Russian Science Festival: Coll. of Conf.], Nizhniy Novgorod, 14–15 October 2020, N. Novgorod, 2020, pp. 709–712. (In Russ.).

20. 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.).

21. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/052/4293846478.pdf> (accessed 06 October 2025).

22. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293727/4293727848.pdf> (accessed 06 October 2025).

23. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/a3d/4293850908.pdf> (accessed 06 October 2025).

24. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/fe8/4293846499.pdf> (accessed 06 October 2025).

25. Available at: <https://www.aluminas.ru/upload/documents/vestnik/Vestnik-AA-48.pdf> (accessed 06 October 2025).

26. Tribushevskiy L.V. [et al.]. *Innovatsionnyye tekhnologii pererabotki okislennykh otkhodov alyuminiya* [Innovative technologies for processing oxidized aluminum waste], Minsk: Izdatel'stvo BNTU, 2023, 140 p. (In Russ.).

Possibility of Using Aluminum-Containing Slag from Metallurgical Industrial Production in Wastewater Treatment and Water Treatment

E. V. Serazeeva, R. N. Ismailova, S. Yu. Garmonov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia;

Ukulab LLC, Kazan, Russia

Keywords: aluminum; secondary raw materials; metal-containing waste; synthesized coagulant; salt slags; waste recycling; flux.

Abstract: When creating environmentally friendly industrial facilities, it is necessary to consider criteria such as reducing environmental pollution from waste and conserving natural resources through the maximum possible reuse of waste within the enterprise's economic cycle. This article examines the possibility of recycling metal-containing waste from metallurgical production, analyzing methods for the secondary use of slag waste, and conducting research on the use of aluminum slag as a reagent for wastewater treatment and water treatment. The process for producing a synthesized coagulant is described. Experiments on its use in wastewater treatment technology at a dairy plant, as well as in water treatment using a trial coagulation method, are described. Optimal doses and the operating range of the synthesized coagulant are determined, confirming its maximum effectiveness in achieving water purification quality criteria.

© Е. В. Серазеева, Р. Н. Исмаилова, С. Ю. Гармонов, 2025