

УДК 628.543

СУСЛОВА О. О., студент гр. ТБ-21М (НИУ МИЭТ)  
Научный руководитель БЕРЕЗИНА Н. В., к.т.н., доцент, (НИУ МИЭТ)  
г. Москва

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ АГРЕССИВНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕИОНИЗИРОВАННОЙ ВОДЫ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ**

Производство деионизированной воды играет важную роль в микроэлектронной промышленности — сфере, в которой постоянно требуется вода высокой степени очистки. Такая вода должна быть полностью очищена от ионов, примесей, растворенных солей и органических веществ, что достигается в том числе с помощью процесса ионного обмена и специальных реагентов. Однако этот процесс требует активного использования агрессивных химических веществ, таких как кислоты (соляная и серная) и щелочи (гидроксид натрия и калия): они служат для регенерации ионообменных смол, восстанавливая способность последних к удалению загрязнений. Перечисленные вещества требуют тщательно продуманной системы утилизации. Неэффективное управление такими отходами может привести к негативным последствиям для окружающей среды, среди которых можно назвать закисление и засоление почв, загрязнение водоемов и разрушение экосистем. В условиях возрастания экологических требований к обращению с агрессивными химическими отходами особенно важно внедрять эффективные методы их утилизации и минимизации их воздействия на окружающую среду.

Помимо регенерации ионообменных смол, кислоты и щелочи могут также использоваться в процессах очистки оборудования и предварительной подготовки воды. Кислотные и щелочные растворы помогают удалять отложения и загрязнения, такие как карбонаты и органические вещества, с поверхностей трубопроводов, фильтров, резервуаров и ионообменных колонн, что позволяет поддерживать стабильную работу системы. Карбонаты кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) и магния ( $\text{MgCO}_3$ ), а также органические вещества, такие как гуминовые кислоты, могут присутствовать в исходной воде. Эти отложения со временем снижают пропускную способность оборудования и в итоге ухудшают качество продукта. Разбавленные растворы соляной или серной кислот применяются для удаления карбонатных отложений, в то время как щелочные растворы (например,  $\text{NaOH}$ ) помогают избавиться от органических веществ.

При определенных условиях кислоты или щелочи также могут применяться для корректировки pH исходной воды в целях минимизации рисков накопления отложений и/или коррозии в системе.

Соляная кислота ( $\text{HCl}$ ) применяется для регенерации катионных смол, способствуя удалению накопленных ионов кальция и магния. Эта кислота характеризуется высокой коррозионной активностью, из-за чего требует использования устойчивых материалов для оборудования, к которому она

применяется, а также строгого контроля безопасности при эксплуатации. Утилизация  $\text{HCl}$  обходится в 4500–5000 руб./т; основной её метод — нейтрализация щелочами. При этом необходимо предотвращать выбросы хлора в атмосферу.

Серная кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) тоже используется для регенерации катионных смол, особенно в случае высокого содержания кальция в воде. Она также характеризуется сильной коррозионной активностью и требует соблюдения мер предосторожности для предотвращения разрушения металлических элементов оборудования. Стоимость утилизации этой кислоты составляет около 6000 руб./т; при неправильном обращении сульфаты, образованные в процессе регенерации, могут попасть в окружающую среду и вызвать закисление почвы и водоемов, что негативно скажется на состоянии экосистем.

Гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$ , каустическая сода), в свою очередь, применяется для регенерации анионных смол, удаляющих отрицательно заряженные ионы (хлориды, сульфаты, нитраты) из воды. Однако эта щелочь также проявляет высокую коррозионную активность: при неправильной эксплуатации она может вызвать химические ожоги у работников и разрушить подверженные воздействию материалы. Стоимость утилизации  $\text{NaOH}$  составляет около 3500 руб./т; его попадание в водные ресурсы может привести к ошелачиванию водоемов.

Гидроксид калия ( $\text{KOH}$ ) используется как альтернатива  $\text{NaOH}$  в высокочистых процессах.  $\text{KOH}$  также требует строгих мер безопасности. Утилизация  $\text{KOH}$  стоит примерно 4000 руб./т, а экологические риски его применения аналогичны  $\text{NaOH}$ .

Хлорид натрия ( $\text{NaCl}$ ) применяется для регенерации катионных смол, заменяя накопленные ионы кальция и магния на ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ). Этот метод регенерации широко применяется из-за доступности  $\text{NaCl}$ . Хотя  $\text{NaCl}$  менее агрессивен по сравнению с кислотами и щелочами, его правильная утилизация не менее важна. Стоимость утилизации  $\text{NaCl}$  варьируется от 1500 до 5000 руб./т.

Современные подходы к утилизации агрессивных химических веществ направлены на совершенствование методов их обработки, минимизацию выбросов и снижение их вредного воздействия на окружающую среду. «Зеленые» технологии пытаются минимизировать использование химических веществ и энергозатрат за счет внедрения биотехнологий для нейтрализации кислот и щелочей, что помогает значительно сократить выбросы и уменьшить образование опасных отходов. В рамках концепции циркулярной экономики предприятия стремятся к замкнутым производственным циклам, внутри которых химические вещества регенерируются и многократно используются, что снижает объем утилизируемых отходов. Вдобавок энергоэффективные системы (например, основанные на плазменных и высокотемпературных технологиях) в достаточной мере обеспечивают разложение химических отходов на безопасные компоненты при низком энергопотреблении, что также сокращает объем токсичных веществ, нуждающихся в утилизации.

Методы утилизации кислот и щелочей, применяемых при производстве деионизированной воды, включают несколько подходов:

— Химическая нейтрализация – наиболее распространенный способ утилизации кислот и щелочей. Этот метод заключается в добавлении к ним химического соединения, которое уравнивает pH раствора, делая его ближе к нейтральному значению (pH ~7) или же снижая его агрессивность до безопасного уровня. Этот метод позволяет уменьшить токсичность и коррозионные свойства отработанных кислот и щелочей перед их дальнейшей утилизацией или сбросом. В процессе нейтрализации важно правильно подбирать реагенты и поддерживать строгий контроль параметров процесса, чтобы избежать побочных реакций.

Нейтрализация требует не только постоянного мониторинга pH, но и соблюдения температурного режима, так как реакция между кислотами и щелочами может быть экзотермической, то есть сопровождаться выделением тепла. С целью минимизации этого эффекта используются системы охлаждения и механизмы автоматической подачи реагентов; это уменьшает риски и обеспечивает стабильность процесса.

— Электрохимическая нейтрализация, в свою очередь, представляет собой перспективный метод утилизации кислот и щелочей. В её основе лежит электролиз, позволяющий разлагать агрессивные вещества на отдельные ионы. В результате электрохимической реакции кислоты и щелочи могут быть преобразованы в воду и другие соединения.

— Использование биотехнологий – это инновационный метод утилизации, который использует микроорганизмы для разложения или преобразования химических веществ, позволяя снизить их кислотность или щелочность до безопасного уровня. Такой подход особенно перспективен, поскольку он снижает потребность в химических реагентах и при этом минимизирует образование токсичных отходов, делая процесс более экологически безопасным.

— Высокотемпературные технологии – это спектр современных методов переработки, которые позволяют утилизировать токсичные химические отходы при помощи высокотемпературного воздействия, эффективно разлагая нежелательные вещества на безопасные компоненты. К таким технологиям относятся плазменная газификация, индукционные печи и пиролиз. Перечисленные методы обладают высокой степенью эффективности и экологической безопасности: в процессе подобной обработки веществ происходит их полное разложение, что значительно снижает объем отходов и исключает образование вредных побочных продуктов. Так, хлорид натрия (NaCl), который при утилизации может загрязнять почвы, в индукционной печи при температуре выше 1200°C разлагается на нейтральные соединения (натриевую соль и воду), снижая тем самым риск засоления почвы. Индукционные печи также позволяют перерабатывать и щелочные отходы, такие как гидроксид натрия, разлагая их до безопасных оксидов и воды. Сравнение методов утилизации агрессивных химических веществ отображено в таблице 1.

Таблица 1. Методы утилизации агрессивных химических веществ

Метод утилизации	Принцип действия	Преимущества	Недостатки
Химическая нейтрализация	Добавление реагентов для приведения pH к нейтральному уровню (около 7)	Снижение агрессивности, широкий спектр реагентов	Требует постоянного контроля pH и системы охлаждения
Электрохимическая нейтрализация	Электролиз с применением электрического тока, который изменяет химическую природу соединений	Нет необходимости в дополнительных химических реагентах, минимальные отходы	Высокие энергетические затраты, сложность реализации
Биотехнологическая нейтрализация	Использование микроорганизмов для разложения кислот и щелочей	Отсутствие побочных химических отходов	Долгий процесс, зависимость от условий среды
Высокотемпературные технологии	Переработка при высоких температурах, разложение до безопасных соединений	Полное разложение вредных компонентов, минимизация побочных продуктов	Высокие затраты энергии, нужны специальные условия и оборудование

Таким образом, сравнение методов утилизации кислот и щелочей показывает, что каждый из них имеет свои особенности. Тем не менее, наиболее перспективным методом из представленных является электрохимическая нейтрализация. Она выгодно отличается от других методов тем, что не требует дополнительных химических реагентов, а также позволяет минимизировать объем побочных отходов. Несмотря на более высокие энергетические затраты, электрохимическая нейтрализация особенно актуальна для производств с высокими требованиями к чистоте и контролю выбросов.

При этом, например, химическая нейтрализация остается экономически доступной и универсальной, однако для неё необходим строгий контроль параметров, что делает методику менее гибкой. Биотехнологическая нейтрализация требует длительного времени обработки и подходит для менее агрессивных соединений. Наконец, высокотемпературные технологии обеспечивают полное разложение веществ, что эффективно при утилизации

сложных отходов, однако высокая стоимость такого метода ограничивает его применение.

Итак, можно с уверенностью утверждать, что электрохимическая нейтрализация сегодня становится предпочтительным методом утилизации агрессивных химических веществ благодаря своей гибкости, что особенно актуально для современных производств, ориентированных на снижение химического воздействия на окружающую среду.

#### Список литературы:

1. Бахонина Е. И. Современные технологии переработки и утилизации углеводородсодержащих отходов. Сообщение 2. Физико-химические, химические, биологические методы утилизации и обезвреживания углеводородсодержащих отходов // Баш. хим. ж.. 2015. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-tehnologii-pererabotki-i-utilizatsii-uglevodorodsoderzhaschih-othodov-soobschenie-2-fiziko-himicheskie-himicheskie> (дата обращения: 29.10.2024).
2. Ю П. Тихомиров, П А. Чеботарев, Л В. Кузнецова, В В. Куцовская, Г И. Макин, Д Б. Гелашвили, А В. Ганюшкин ГИГИЕНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УТИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ // Гигиена и санитария. 1989. №8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gigienicheskie-aspekty-utilizatsii-zhidkih-othodov-neftepererabatyvayushey-i-himicheskoy-promyshlennosti> (дата обращения: 29.10.2024).
3. Хасилов Илхам Нарматович, Маматова Фарангиз Кодир Кизи ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ УТИЛИЗАЦИИ И ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ХИМИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ // Universum: технические науки. 2024. №3 (120). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sovremennyh-metodov-utilizatsii-i-pererabotki-othodov-himicheskikh-produktov> (дата обращения: 29.10.2024).
4. Авсейко М. В., Яранцева Н. Д. ХИМИЧЕСКИЙ СПОСОБ УТИЛИЗАЦИИ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ОТХОДОВ ГРУППЫ ИНГИБИТОРОВ АНГИОТЕНЗИНПРЕВРАЩАЮЩЕГО ФЕРМЕНТА // Вестник ВГМУ. 2021. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/himicheskiy-sposob-utilizatsii-farmatsevticheskikh-othodov-gruppy-ingibitorov-angiotenzinprevraschayushego-fermenta> (дата обращения: 29.10.2024).
5. Чайка Анна Анатольевна, Гоготов Алексей Федорович, Панасенкова Елена Юрьевна, Станкевич Валерий Константинович Целенаправленная утилизация хлорорганических отходов химических производств. 2. Реакция конденсации с лигнином // Вестник ИрГТУ. 2013. №6 (77). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tselenapravlenneya-utilizatsiya-hlororganicheskikh-othodov-himicheskikh-proizvodstv-2-reaktsiya-kondensatsii-s-ligninom> (дата обращения: 29.10.2024).