

УДК 621.316

ЗАДУБРОВСКАЯ Т.А., студент гр. ХО-41м (ЮЗГУ)

БЕЛОЗЕРОВА Е.В., студент гр. ХО-41м (ЮЗГУ)

Научный руководитель КУВАРДИН Н.В., к.х.н., доцент (ЮЗГУ)

г. Курск

УГЛЕРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛУЧЕННЫЙ ИЗ ПОЛИМЕРНОЙ ФРАКЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

Проблема управления твердыми бытовыми отходами (ТБО) остается острой. Значительная часть ТБО отправляется на полигоны, где образуется фильтрат – высокотоксичная жидкость с органическими загрязнителями, тяжелыми металлами и микрозагрязнителями. Фильтрат загрязняет почву и воду, а традиционные методы его очистки неэффективны из-за высокой концентрации и изменчивости загрязнителей.

Адсорбционные методы с использованием углеродных материалов перспективны, но коммерческие адсорбенты дороги. Альтернативой могут стать углеродные материалы из полимерной фракции ТБО (пластиковых отходов). Их использование решает проблему утилизации пластика и создает ценный продукт. Исследование фокусируется на потенциале углеродных материалов из пластиковых отходов для очистки фильтрата полигонов [1].

Для эффективной очистки фильтрата полигонов ТБО важно учитывать его состав, который зависит от возраста полигона. На молодых полигонах (до 5 лет) фильтрат богат биоразлагаемыми органическими веществами, такими как летучие жирные кислоты и спирты с высоким БПК/ХПК. На зрелых и старых полигонах (более 10-15 лет) преобладают трудноразлагаемые вещества, такие как гуминовые и фульвокислоты, аммонийный азот и тяжелые металлы при низком БПК/ХПК.

Осадки, температура и состав ТБО влияют на образование и концентрацию фильтрата. Фильтрат содержит как простые органические соединения, так и сложные высокомолекулярные вещества. Характерной чертой зрелых полигонов является высокая концентрация аммонийного азота и тяжелых металлов, таких как цинк, свинец, медь, кадмий, никель, хром и железо, что представляет токсикологическую угрозу для водных организмов.

Также в фильтрате присутствуют органические микрополлютанты, такие как фармацевтические препараты, эндокринные разрушители и пестициды, в низких, но экологически значимых концентрациях. Высокий уровень общего растворенного твердого вещества и электропроводности также характерен для фильтрата.

Полимерная фракция ТБО (ПФ ТБО) представляет собой ценный ресурс для получения адсорбентов. К основным видам пластиков в ТБО относятся полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), полистирол (ПС), полиэтилентерефталат (ПЭТФ) и поливинилхлорид (ПВХ).

Термические методы переработки фильтрата полигонов ТБО таковы:

1. Пиролиз — это термическое разложение органических материалов без доступа кислорода или с его минимальным количеством. При нагревании пластиковых отходов до 300–900°C разрываются полимерные цепи, образуя газы (метан, водород, этилен), жидкие углеводороды (масла, смолы) и твердый углеродный остаток — биоуголь (biochar) или пиролитический углерод. Регулируя температуру, скорость нагрева и время выдержки, а также используя катализаторы, можно контролировать состав и свойства получаемого материала.

2. Газификация — это разложение органических материалов при высоких температурах с ограниченным доступом кислорода, пара или CO₂. В результате образуется синтез-газ (CO, H₂) и углеродный остаток.

3. Карбонизация — это мягкий пиролиз при более низких температурах до 500–600°C. Этот процесс позволяет получить твердый, богатый углеродом остаток [2].

Активация углеродного материала. Обычный углеродный материал, созданный пиролизом, имеет недостаточную пористость и удельную поверхность для эффективной адсорбции. Активация направлена на улучшение пористой структуры и увеличение удельной поверхности материала.

Физическая активация. Углеродный материал обрабатывают паром или углекислым газом при высоких температурах (600–1000°C). Эти газы реагируют с поверхностью углерода, разрушая некоторые атомы и создавая микро-, мезо- и макропоры.

Химическая активация. Углеродный прекурсор смешивают с химическим активатором, таким как ZnCl₂, H₃PO₄ или KOH, и затем карбонизируют при более низких температурах (400–800°C). Активатор помогает удалять влагу, предотвращает образование смол и формирует поры. После карбонизации активатор удаляют. Этот метод часто позволяет получить материалы с более сложной микропористой структурой.

Свойства углеродного материала включают:

1. Пористую структуру с микропорами (менее 2 нанометров), мезопорами (2–50 нанометров) и макропорами (более 50 нанометров). Микропоры поглощают мелкие молекулы, а мезопоры служат транспортными каналами к ним;

2. Высокую удельную поверхность, достигающую сотен и тысяч квадратных метров на грамм — как, например, у активированного угля;

3. Поверхностную химию с разнообразными функциональными группами (гидроксильные, карбоксильные, карбонильные и лактонные). Эти группы влияют на адсорбционные свойства материала и его взаимодействие с загрязнителями, например, через ионный обмен или комплексообразование.

Механическая прочность важна для использования в адсорбционных колоннах и при регенерации.

Углеродные материалы эффективно очищают фильтрат благодаря нескольким механизмам адсорбции.

Физическая адсорбция (физсорбция) основана на Ван-дер-Ваальсовых силах, основном механизме для большинства органических загрязнителей. Молекулы притягиваются к поверхности адсорбента слабыми силами Ван-дер-Ваальса, такими как лондоновские, ориентационные и индукционные. Физсорбция зависит от микро- и мезопористой структуры адсорбента. Развитая пористая система увеличивает площадь контакта, позволяя загрязнителям проникать внутрь пор. Органические загрязнители, включая гуминовые кислоты и микрополлютанты, обычно гидрофобны. Углеродная поверхность также гидрофобна, что облегчает их адсорбцию из воды.

Химическая адсорбция (хемосорбция) – механизм, который включает образование прочных химических связей между загрязнителями и функциональными группами на поверхности адсорбента. Карбоксильные, гидроксильные и фенольные группы взаимодействуют с ионами металлов, образуя комплексы, или с полярными органическими молекулами. Если на поверхности адсорбента есть ионообменные группы, они могут обмениваться ионами с раствором. Например, катионы аммония или тяжелых металлов замещаются на ионы водорода или другие катионы [3].

При адсорбции тяжелых металлов ионы тяжелых металлов образуют комплексы с кислородсодержащими группами на поверхности адсорбента. Металлы замещают ионы водорода на кислотных группах. При определенных условиях (pH, концентрация) металлы осаждаются на поверхности адсорбента, образуя гидроксиды или карбонаты.

Адсорбция аммонийного азота включает ионный обмен, при котором катионы аммония (NH_4^+) адсорбируются на анионных сайтах поверхности углерода (например, карбоксильных группах) в обмен на другие катионы. В меньшей степени может происходить физсорбция молекул аммиака (NH_3) в порах при высоком pH.

Использование углеродных адсорбентов из пластиковых отходов приносит значительные выгоды.

Пластиковые отходы часто имеют отрицательную стоимость утилизации. Их переработка в адсорбенты снижает затраты по сравнению с использованием традиционных материалов, таких как кокосовая скорлупа, древесина или уголь. Возможность регенерации адсорбентов сокращает долгосрочные эксплуатационные затраты.

Утилизация трудноперерабатываемых или низкосортных пластиковых отходов предотвращает их попадание на полигоны или в окружающую среду. Пластик, состоящий из нефтепродуктов, содержит углерод. Пиролиз позволяет «вернуть» этот углерод в форме ценного адсорбента. Производство адсорбентов из пластика уменьшает потребность в добыче традиционных ресурсов. Это альтернатива сжиганию пластика, сокращающая выбросы парниковых газов и токсичных соединений.

При правильной обработке углеродные материалы из пластика обладают удельной поверхностью и пористостью, сравнимыми с активированным углем. Регулируя условия, можно настроить пористую структуру и химию поверхности, достигая селективности для определенных загрязнителей. Углеродные

адсорбенты удаляют широкий спектр загрязнителей: органические вещества, микрополлютанты, тяжелые металлы и аммонийный азот.

Насыщенный загрязнителями адсорбент можно термически обработать (например, при 500-800°C), чтобы удалить органические вещества и восстановить пористую структуру. Это позволяет многократно использовать адсорбент, снижая затраты и жизненный цикл. Для некоторых типов загрязнителей, таких как металлы, можно использовать кислоты или щелочи для регенерации адсорбента.

Несмотря на значительный потенциал, существуют вызовы, которые необходимо преодолеть для широкого внедрения данной технологии.

Пластиковые отходы в виде твердых бытовых отходов (ТБО) сильно загрязнены и неоднородны. В них содержатся различные типы полимеров, добавки и примеси. Для получения чистого сырья требуется эффективная сортировка, мойка и сушка. Различия в типах пластика, таких как полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП) и полиэтилентерефталат (ПЭТФ), влияют на выход и свойства конечного углеродного материала [4]. Точный контроль температуры, времени и атмосферы при пиролизе и активации критически важен для получения адсорбентов с нужными характеристиками: пористостью, удельной поверхностью и поверхностной химией. Отклонения от заданных параметров могут привести к неэффективности материала. Пластик также может содержать тяжелые металлы, такие как свинец и кадмий, в красителях и стабилизаторах. Кроме того, в нем могут быть токсичные добавки, например, бромированные антипирены. При пиролизе эти вещества остаются в углеродном материале или образуют новые токсичные соединения, такие как диоксины и фураны, особенно при использовании ПВХ в неоптимальных условиях. Это требует тщательного контроля и оптимизации процесса. Переход от лабораторных исследований к промышленному производству требует разработки крупномасштабных и экономичных реакторов для пиролиза и активации. После нескольких циклов регенерации адсорбент теряет активность или накапливает неразлагаемые загрязнители, которые требуют безопасной утилизации.

Высококачественные пластики (например, полиэтилен или полипропилен) или их смеси используются для создания углеродных материалов с нужными свойствами. Экологически чистые и эффективные способы активации (например, с помощью микроволнового или плазменного излучения) разрабатываются для улучшения адсорбционных характеристик при снижении энергопотребления. Функционализация поверхности углеродного материала специфическими группами (например, аминными или сульфоновыми) производится с целью повышения селективности к определённым загрязнителям, таким как тяжёлые металлы или микрополлютанты [5]. Включение адсорбции углеродными материалами в многоступенчатые системы очистки фильтрата сочетается с биологической очисткой мембранными процессами или окислительными методами. Горючие газы и жидкие углеводороды, образующиеся при пиролизе, применяются для обеспечения энергией самого процесса или других нужд, что повышает общую

энергоэффективность. Важно также создание стандартов качества и безопасности для углеродных адсорбентов, полученных из отходов.

Использование углеродных материалов из полимерных отходов для очистки фильтрата полигонов ТБО — перспективное направление. Эта технология решает сразу три задачи: очищает опасные стоки, утилизирует пластик и создает ценный продукт. Пластик преобразуют в адсорбенты, которые удаляют из фильтрата загрязнения: органические вещества, аммонийный азот и тяжелые металлы. Хотя всё ещё существуют проблемы с качеством сырья, контролем процессов и загрязнением, ученые продолжают работать над их решением. Масштабирование технологии улучшит экологическую обстановку, снизит нагрузку на управление отходами и переведет экономику к устойчивости.

Список литературы:

1. Dzebisashvili, N. Treatment of leachate by the carbon material obtained from polymer fraction of municipal solid waste / N. Dzebisashvili, G. Tatishvili, D. Dughashvili // *Kimya Problemleri*. – 2024. – Vol. 22, No. 1. – P. 33-44.
2. Патент № 2613507 С Российская Федерация, МПК C08J 11/00, C08L 21/00, C08L 89/00. Способ порционной переработки органических и твердых полимерных бытовых отходов : № 2015101930 : заявл. 23.01.2015 : опубл. 16.03.2017 / Н. Н. Худокормов, А. Н. Назаров, Г. Л. Звягинцев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ).
3. Свойства и методы анализа углеродных материалов / Г. И. Раздьяконова, Л. Г. Пьянова, Ю. В. Суловикин, В. А. Лихолобов. – Омск : федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Омский государственный технический университет", 2014. – 172 с.
4. Рахимов, М. А. Проблемы утилизации полимерных отходов / М. А. Рахимов, Г. М. Рахимова, Е. М. Иманов // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 8-2. – С. 331-334.
5. Natela Dzebisashvili. Treatment of leachate by the carbon material obtained from polymer fraction of municipal solid waste / Natela Dzebisashvili, Grigor Tatishvili, Darejan Dughashvili // *CHEMICAL PROBLEMS* 2024 no. 1 (23). – С. 33-44.