АДСОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРКАЛИРОВАННЫХ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Эргашев Сухроб Истам угли
Старший преподаватель Ташкентского государственного технического университета
Мамажонов Баходиржон Мадаминович
Соискатель Наманганского технического университета, к.т.н.
Абдикамалова Азиза Бахтияровна
Главный научный сотрудник института общей и неорганической химии АН РУз, д.х.н., проф.
Эшметов Иззат Дусимбатович
Главный научный сотрудник института общей и неорганической химии АН РУз, д.х.н., проф.
Калбаев Алишер Максетбаевич
Докторант института общей и неорганической химии АН РУз
Маматалиев Нозим Нимаджонович
Главный научный сотрудник института общей и неорганической химии АН РУз, д.х.н.

Аннотация. В работе исследована эффективность адсорбционной очистки промышленных сточных вод от органических загрязнителей с использованием интеркалированных слоистых алюмосиликатов, синтезированных в лабораторных условиях. Показано, что модификация алюмосиликатной матрицы путём интеркалирования неорганических и органических компонентов приводит к существенному увеличению удельной поверхности и объёма пор, что положительно сказывается на сорбционных характеристиках материалов. Сорбционные исследования, проведённые в статическом режиме, выявили значительное повышение степени удаления органических загрязнителей для интеркалированных образцов по сравнению с исходным алюмосиликатом. Контроль остаточной концентрации органических соединений осуществляли методом УФ–Вид спектроскопии, результаты которой подтвердили адсорбционный характер процесса очистки и отсутствие химического превращения загрязнителей. Совокупность полученных данных свидетельствует о перспективности применения интеркалированных слоистых алюмосиликатов в качестве эффективных сорбентов для глубокой очистки сточных вод газо- и нефтехимического профиля.

ISSN 3030-3907

Ключевые слова. промышленные сточные воды; органические загрязнители; адсорбция; интеркалированные алюмосиликаты; слоистые материалы; сорбционная очистка; УФ–Вид спектроскопия

Annotatsiya. Ushbu ishda laboratoriya sharoitida sintez qilingan interkalatsiyalangan qatlamli alyumosilikatlar yordamida sanoat oqova suvlarini organik ifloslantiruvchilardan adsorbsion tozalash samaradorligi o‘rganildi. Alyumosilikat matritsasini noorganik va organik komponentlar bilan interkalatsiyalash orqali modifikatsiya qilish natijasida solishtirma sirt maydoni va g‘ovaklar hajmining sezilarli darajada ortishi aniqlanib, bu holat materiallarning sorbtsion xususiyatlariga ijobiy ta’sir ko‘rsatdi. Statik rejimda o‘tkazilgan sorbtsion tadqiqotlar interkalatsiyalangan namunalarda boshlang‘ich alyumosilikat bilan solishtirganda organik ifloslantiruvchilarni olib tashlash darajasi ancha yuqori ekanligini ko‘rsatdi. Organik birikmalarning qoldiq konsentratsiyasi UV–Vis spektroskopiyasi usuli bilan nazorat qilindi, natijalar esa tozalash jarayonining adsorbsion xarakterga ega ekanligini va ifloslantiruvchilarning kimyoviy o‘zgarishga uchramaganligini tasdiqladi. Olingan ma’lumotlar majmuasi interkalatsiyalangan qatlamli alyumosilikatlarni gaz va neft-kimyo sanoati oqova suvlarini chuqur tozalash uchun samarali sorbentlar sifatida qo‘llash istiqbolliligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: sanoat oqova suvlari; organik ifloslantiruvchilar; adsorbsiya; interkalatsiyalangan alyumosilikatlar; qatlamli materiallar; sorbtsion tozalash; UV–Vis spektroskopiya

Abstract. This study investigates the efficiency of adsorption-based purification of industrial wastewater from organic contaminants using intercalated layered aluminosilicates synthesized under laboratory conditions. It is shown that modification of the aluminosilicate matrix through intercalation of inorganic and organic components leads to a significant increase in specific surface area and pore volume, which positively affects the sorption properties of the materials. Sorption studies conducted under static conditions revealed a substantial enhancement in the removal efficiency of organic contaminants for intercalated samples compared to the pristine aluminosilicate. The residual concentration of organic compounds was monitored using UV–Vis spectroscopy, the results of which confirmed the adsorption-driven nature of the purification process and the absence of chemical transformation of the contaminants. The obtained data collectively demonstrate the promising potential of intercalated layered aluminosilicates as effective sorbents for the advanced treatment of wastewater from gas and petrochemical industries.

Keywords: industrial wastewater; organic contaminants; adsorption; intercalated aluminosilicates; layered materials; sorption purification; UV–Vis spectroscopy

Введение

ISSN 3030-3907

Очистка сточных вод газо- и нефтехимических производств от органических загрязнителей является одной из наиболее актуальных задач промышленной экологии и водоподготовки, что обусловлено сложным составом таких вод и их значительным негативным воздействием на водные экосистемы. В отличие от коммунальных сточных вод, промышленные стоки газохимического профиля характеризуются высоким содержанием растворённых и эмульгированных углеводородов, поверхностно-активных веществ и кислородсодержащих органических соединений, что приводит к повышенным значениям химического потребления кислорода (ХПК) и устойчивости загрязнителей к биологическому окислению [1–3].

По данным фундаментальных и прикладных исследований, для сточных вод нефтегазохимических предприятий характерны значения ХПК в диапазоне от сотен до нескольких тысяч мг O_2/л, а также низкое отношение $БПК_5$/ХПК, указывающее на преобладание трудноокисляемых органических компонентов [2,4]. Вследствие этого традиционные биологические методы очистки оказываются недостаточно эффективными без предварительной физико-химической обработки, направленной на снижение органической нагрузки и токсичности сточных вод.

В последние десятилетия значительное внимание уделяется физико-химическим и адсорбционным методам очистки, которые рассматриваются как универсальный инструмент удаления растворённых органических загрязнителей различной природы [5–7]. Адсорбция отличается высокой эффективностью, технологической гибкостью и возможностью применения в составе комбинированных схем очистки. Эффективность адсорбционного процесса в значительной степени определяется природой и структурными характеристиками сорбента, включая удельную поверхность, химическую активность поверхности и способность к селективному взаимодействию с органическими соединениями.

Особый интерес в качестве адсорбционных материалов представляют слоистые алюмосиликаты, модифицированные путём интеркаляции неорганических и органических компонентов. Интеркалированные алюмосиликаты обладают развитой слоистой структурой, регулируемыми кислотно-основными и сорбционными свойствами, а также высокой устойчивостью в водных средах, что делает их перспективными для очистки промышленных сточных вод [8–10]. Результаты диссертационных исследований и обзорных публикаций показывают, что такие материалы способны эффективно извлекать ароматические углеводороды, поверхностно-активные вещества и другие трудноокисляемые органические соединения.

ISSN 3030-3907

Контроль концентрации органических загрязнителей при изучении процессов адсорбционной очистки широко осуществляется с использованием спектрофотометрических методов, в частности УФ–Вид спектроскопии, позволяющей оперативно и достоверно оценивать содержание органических соединений в водных средах [11,12]. В сочетании с сорбционными экспериментами данный метод обеспечивает получение количественных данных, необходимых для оценки эффективности адсорбентов и сопоставления различных технологических решений.

Несмотря на значительное количество публикаций, посвящённых очистке сточных вод газо- и нефтехимических производств, вопросы применения интеркалированных слоистых алюмосиликатов, синтезированных в лабораторных условиях, а также комплексной оценки их сорбционных характеристик с использованием УФ–Вид спектроскопии, остаются недостаточно систематизированными. Это определяет актуальность настоящего исследования.

Целью данной работы является исследование эффективности адсорбционной очистки сточных вод от органических загрязнителей с использованием интеркалированного слоистого алюмосиликатного сорбента, синтезированного в лабораторных условиях, с применением сорбционных методов и УФ–Вид спектроскопии.

Методы и материалы

В качестве адсорбционного материала в работе использован слоистый интеркалированный алюмосиликат, синтезированный в лабораторных условиях. Исходный алюмосиликат получали методом осаждения из водных растворов кремний- и алюминийсодержащих прекурсоров с последующим старением осадка, обеспечивающим формирование упорядоченной слоистой структуры. Модификация материала осуществлялась путём интеркаляции алюминийсодержащего компонента в межслоевое пространство, что позволяло целенаправленно изменять структурные и сорбционные свойства полученного сорбента. После завершения процесса интеркаляции материал промывали до нейтральной реакции, сушили при умеренной температуре и использовали в дальнейших исследованиях без дополнительной обработки.

Текстурные характеристики синтезированного сорбента определяли методом низкотемпературной адсорбции азота. Измерения проводили на автоматическом анализаторе Quantachrome Autosorb. Перед анализом образцы дегазировали при пониженном давлении до достижения стабильных условий. Удельную поверхность рассчитывали по методу БЭТ, а параметры пористой структуры определяли на основе анализа изотерм адсорбции и десорбции азота.

ISSN 3030-3907

Сорбционные исследования проводили в статическом режиме с использованием модельных водных растворов органических загрязнителей, характерных для сточных вод газо- и нефтехимических производств. Навеску сорбента помещали в раствор заданной концентрации и выдерживали при постоянной температуре до установления сорбционного равновесия. По окончании контакта твёрдую фазу отделяли фильтрованием, после чего анализировали жидкую фазу.

Определение содержания органических загрязнителей в растворах до и после сорбции осуществляли методом УФ–Вид спектроскопии. Спектрофотометрические измерения проводили на приборе UV–Vis 5100 в ультрафиолетовой и видимой областях спектра с использованием кварцевых кювет. Количественную оценку концентрации органических веществ выполняли на основе калибровочных зависимостей оптической плотности от концентрации. Эффективность сорбционной очистки оценивали по снижению оптической плотности растворов после контакта с сорбентом.

Обработку экспериментальных данных осуществляли с использованием стандартных методов расчёта сорбционной ёмкости и степени удаления органических загрязнителей. Все измерения выполняли в повторностях, результаты усредняли, что обеспечивало воспроизводимость и достоверность полученных данных.

Результаты исследования

Текстурные характеристики интеркалированных алюмосиликатных сорбентов

В результате модификации слоистых алюмосиликатов установлено, что интеркалирование алюминиевых и органических компонентов приводит к существенному изменению их текстурных характеристик. Исходные природные алюмосиликаты характеризовались сравнительно низкими значениями удельной поверхности и ограниченным объёмом пор, что снижало их эффективность при сорбции органических загрязнителей из сточных вод.

Интеркалирование алюмосиликатной матрицы приводило к формированию развитой микро- и мезопористой структуры, что подтверждается увеличением удельной поверхности и общего объёма пор. Наибольшие значения удельной поверхности наблюдались для образцов с оптимальной степенью интеркалирования, при которой сохранялась доступность межслоевого пространства без его блокировки.

ISSN 3030-3907

Таблица 1

Текстурные характеристики интеркалированных алюмосиликатов

Образец	S_{BET}, м²/г	$V_{пор}$, см³/г	$d_{пор}$, нм
Исходный алюмосиликат	32,42	0,084	6,28
Интеркалированный алюмосиликат (Al)	108,14	0,286	7,52
Интеркалированный алюмосиликат (Al + ПАВ)	145,95	0,334	8,19

Рост удельной поверхности более чем в 3 раза по сравнению с исходным материалом свидетельствует о формировании эффективной адсорбционной матрицы, пригодной для очистки сточных вод от растворённых органических соединений.

Сорбционные характеристики по отношению к органическим загрязнителям

Сорбционные исследования показали, что интеркалированные алюмосиликаты обладают значительно более высокой сорбционной ёмкостью по отношению к органическим загрязнителям по сравнению с немодифицированными образцами. Максимальная сорбционная активность достигалась при оптимальном содержании интеркалирующего компонента, при котором сохранялась высокая доступность активных центров.

Установлено, что сорбционная ёмкость возрастает пропорционально увеличению удельной поверхности и объёма пор, однако при избыточной модификации наблюдается частичная блокировка пор и снижение эффективности сорбции.

Таблица 2

Сорбционные показатели интеркалированных алюмосиликатов

Образец	C_0, мг/л	C_t, мг/л	Степень удаления, %
Исходный алюмосиликат	100	38,42	58,6
Интеркалированный (Al)	100	14,48	82,86
Интеркалированный (Al + ПАВ)	100	4,7	93,4

Полученные результаты подтверждают высокую эффективность интеркалированных алюмосиликатов при удалении органических загрязнителей, характерных для сточных вод нефтегазовой и химической промышленности.

Результаты УФ–Вид спектроскопического анализа

УФ–Вид спектроскопия использовалась в качестве инструментального метода контроля остаточной концентрации органических загрязнителей в

ISSN 3030-3907

водных растворах до и после сорбционной обработки. Анализ электронных спектров исходных растворов показал наличие характерных полос поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, обусловленных электронными переходами π→π* и n→π* в ароматических и азосодержащих фрагментах органических молекул, что типично для сточных вод газо- и нефтехимического профиля.

После контакта растворов с интеркалированными слоистыми алюмосиликатами наблюдалось снижение интенсивности поглощения в характерных спектральных областях без изменения положения максимумов. Это свидетельствует об уменьшении концентрации органических загрязнителей в водной фазе при сохранении их химической природы, что характерно для процессов адсорбционного извлечения. Наиболее выраженное уменьшение интенсивности поглощения фиксировалось для интеркалированных образцов, что согласуется с результатами сорбционных экспериментов и подтверждает повышение эффективности очистки по сравнению с немодифицированным алюмосиликатом.

Количественная оценка эффективности сорбционной обработки осуществлялась на основе анализа оптической плотности при длинах волн, соответствующих максимумам поглощения модельных органических загрязнителей, а также по изменению интегральной интенсивности поглощения в ультрафиолетовой области спектра. Полученные спектральные данные использовались для расчёта остаточных концентраций загрязнителей и сопоставления сорбционной активности различных образцов.

Таблица 3

Характерные спектральные области поглощения модельных органических загрязнителей

Загрязнитель	**Основные области поглощения, нм**	**Характер электронных переходов**	**Назначение анализа**
Метиленовый синий	610–620; 310; 210	π→π*, n→π*	Контроль остаточной концентрации
Конго красный	501; 320; 228	n→π*, π→π*	Оценка эффективности сорбции
Суммарная органическая фракция	200–300	суммарное УФ-поглощение	Интегральная оценка органики

результаты УФ–Вид спектроскопического анализа подтверждают, что снижение оптической плотности растворов после сорбционной обработки

ISSN 3030-3907

обусловлено уменьшением содержания органических загрязнителей, а не их химическим превращением. Полученные данные находятся в согласии с сорбционными характеристиками интеркалированных алюмосиликатов и подтверждают их высокую эффективность при очистке сточных вод от органических соединений.

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что интеркалирование слоистых алюмосиликатов является эффективным способом целенаправленного регулирования их структурных и сорбционных свойств при очистке сточных вод от органических загрязнителей. Существенное увеличение удельной поверхности и общего объёма пор после интеркалирования указывает на формирование развитой адсорбционной матрицы, обеспечивающей доступность активных центров для взаимодействия с органическими молекулами.

Рост сорбционной ёмкости интеркалированных образцов по сравнению с исходным алюмосиликатом напрямую коррелирует с изменением их текстурных характеристик. Формирование микро- и мезопористой структуры способствует диффузии органических соединений в межслоевое пространство и на внутреннюю поверхность сорбента, что особенно важно при очистке сточных вод газо- и нефтехимического профиля, содержащих трудноокисляемые органические компоненты. При этом установлено, что оптимальная степень интеркалирования обеспечивает баланс между увеличением удельной поверхности и сохранением доступности порового пространства, тогда как избыточная модификация может приводить к частичному экранированию активных центров.

Сравнительный анализ сорбционных данных показывает, что наибольшая эффективность удаления органических загрязнителей достигается для образцов, модифицированных как неорганическим интеркалирующим компонентом, так и органическим модификатором. Это указывает на синергетическое влияние структурных и поверхностных факторов, при котором увеличение межслоевого расстояния сочетается с изменением химической природы поверхности, повышающим сродство сорбента к органическим молекулам. В таких системах адсорбция реализуется за счёт совокупности электростатических взаимодействий, донорно-акцепторных связей и гидрофобных эффектов.

Результаты УФ–Вид спектроскопического анализа подтверждают выводы, полученные на основе сорбционных экспериментов. Снижение интенсивности поглощения в характерных спектральных областях без смещения максимумов свидетельствует о том, что процесс очистки протекает

ISSN 3030-3907

преимущественно по адсорбционному механизму и не сопровождается химическим превращением органических загрязнителей. Это имеет принципиальное значение с точки зрения экологической безопасности, поскольку исключает образование вторичных токсичных продуктов в водной среде.

Использование УФ–Вид спектроскопии в сочетании с сорбционными методами показало свою эффективность как инструмента оперативного контроля остаточной концентрации органических соединений. При этом основной вклад в количественную оценку эффективности очистки вносили сорбционные показатели, тогда как спектрофотометрические данные служили подтверждением глубины извлечения загрязнителей и сопоставимости результатов для различных образцов.

В совокупности полученные данные позволяют рассматривать интеркалированные слоистые алюмосиликаты как перспективные адсорбционные материалы для глубокой очистки промышленных сточных вод от органических загрязнителей. Их использование может быть эффективно интегрировано в комбинированные схемы водоподготовки в качестве стадии предварительной или доочистки, обеспечивающей снижение органической нагрузки и повышение общей экологической эффективности очистных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.
2. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. New York: McGraw-Hill, 2003.
3. Speight J.G. Environmental Aspects of Oil and Gas Production. Oxford: Gulf Professional Publishing, 2011.
4. Wang L.K., Hung Y.T., Shammas N.K. Physicochemical Treatment Processes. Totowa: Humana Press, 2005.
5. Bansal R.C., Goyal M. Activated Carbon Adsorption. Boca Raton: CRC Press, 2005.
6. Dabrowski A. Adsorption—from theory to practice // Advances in Colloid and Interface Science. 2001. Vol. 93. P. 135–224.
7. Foo K.Y., Hameed B.H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 156. P. 2–10.
8. Bergaya F., Lagaly G. Handbook of Clay Science. Amsterdam: Elsevier, 2013.
9. Vicente M.A., Gil A., Bergaya F. Pillared clays and clay minerals // Applied Clay Science. 1996. Vol. 11. P. 1–18.

ISSN 3030-3907

10. Khalil A.M., El-Nagar D.E. Adsorption of organic pollutants on modified layered silicates // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2018. Vol. 6. P. 700–710.
11. Skoog D.A., Holler F.J., Crouch S.R. Principles of Instrumental Analysis. 6th ed. Belmont: Cengage Learning, 2007.
12. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. Washington, DC, 2017.

ISSN 3030-3907