



<https://doi.org/10.70728/a.series.tab.v08.i04.174>

СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ХИТОЗАНА И СЛОИСТЫХ ДВОЙНЫХ ГИДРОКСИДОВ

Юсунов М.М.¹, Голубев Р.А.², Вохидова Н.Р.¹, Критченков А.С.²

¹Институт химии и физики полимеров Академии наук Республики Узбекистан,
100128, г. Ташкент, ул. А.Кадыри 7^б

²Институт технической акустики Национальной Академии наук Беларуси,
220023, г. Витебск, пр. Людникова, 13
E-mail: noira_vokhidova@yahoo.de

Аннотация. В данном исследовании композиты, состоящие из хитозана и слоистых двойных гидроксидов Mg^{2+}/Fe^{3+} , были синтезированы методом соосаждения. Анализ динамического светорассеяния показал, что в растворах композитов с соотношением $Mg^{2+}/Fe^{3+}:X3 = 1:10$ моль формируются наноструктуры, что обусловлено высокой стабилизирующей способностью хитозана. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в композите с соотношением $Mg^{2+}/Fe^{3+}:X3 = 1:0,125$ моль преобладают микропоры диаметром 0,3-5 нм, а их объем составляет 0,0094 см³/г. Это способствует увеличению поверхности и повышенной сорбционной активности. Полученные композиты демонстрируют перспективные возможности для эффективного удаления экологических загрязнителей.

Ключевые слова: слоистый двойной гидроксид, Mg^{2+}/Fe^{3+} , хитозан, сорбционные свойства

Annotatsiya. Mazkur ishda birgalikda cho'ktirish usulida qatlamli qo'shgidroksid - $Mg^{2+}/Fe^{3+}=3:1$ mol nisbatlarida xitozan asosidagi kompozitlar olindi. DLS natijalariga ko'ra, $Mg^{2+}/Fe^{3+}/X3=1:10$ mol nisbatdagi kompozitning erutmalarida nanostrukturalar shakllanib, xitozanning yuqori barqarorlashtirish xossasini ko'rsatadi. Natijalarga ko'ra, $Mg^{2+}/Fe^{3+}/X3=1:0,125$ mol namunasida 0,3-5 nm diapazondagi mikrog'ovaklar ulushi yuqori bo'lib, ularning hajmi 0,0094 sm³/g ni tashkil etadi. Bu esa yuqori sorbsion yuza shakllanishiga va sorbsiya samaradorligini ko'rsatadi. Olingan sorbentlar kelajakda ekologik pollyutantlarni tozalashda istiqbolli imkoniyatlarga ega.

Kalit so'zlar: qatlamli qo'sh gidroksid, Mg^{2+}/Fe^{3+} , xitozan, sorbsion xossalar

Abstract. In this study, composites consisting of chitosan and Mg^{2+}/Fe^{3+} layered double hydroxides are prepared using the co-precipitation method. Results from dynamic light scattering (light scattering) analysis show that nanostructures are formed in composites liquids obtained in the ratio $Mg^{2+}/Fe^{3+}:CS = 1:10$ mol, depending on the high stability potential of the chitosan. Experimental data suggest that the $Mg^{2+}/Fe^{3+}:CS = 1:0.125$ mol composite is dominated by micropores with a diameter of 0.3-5 nm, and the size of

micropores is $0.0094 \text{ cm}^3/\text{g}$. This contributes to the expansion of the surface and an increase in sorption activity. The sorbents obtained have promising opportunities for effective cleaning of environmental pollutants.

Keywords: layered double hydroxide, $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, chitosan, sorption properties

Введение. Рост количества производственных предприятий по всему миру способствует увеличению объема вторичной очистки промышленных сточных вод. Одной из наиболее острых экологических проблем является наличие вредных красителей в промышленных сбросах, что обусловлено их широким применением, биологической инертностью и токсичностью. Красители представляют особую угрозу для окружающей среды и здоровья человека, а также негативно влияют на флору и фауну водных экосистем [1]. Согласно статистическим данным, ежегодное использование красителей в текстильной промышленности достигает около 10 000 тонн, из которых более 10% попадает в водные потоки [2].

Особое значение имеет метилоранж (МО), являющийся одним из наиболее широко используемых красителей в текстильной промышленности. Он обладает выраженными токсическими, канцерогенными и мутагенными свойствами. Современные методы удаления МО включают окисление, фотокатализ, электрохимическую деградацию, коагуляцию и адсорбцию. Среди них особенно широко применяются адсорбционные технологии благодаря доступности исходного сырья, высокой эффективности, простоте эксплуатации и низкой стоимости [3].

Ключевыми материалами в современных исследованиях являются слоистые двойные гидроксиды (СДГ), известные также как гидротальциты. Эти двухслойные неорганические соединения имеют характерную структуру и химическую формулу: $[\text{Me}^{2+}_{1-x}\text{Me}^{3+}_x(\text{OH})_2]^{x+}[\text{An}^-] \cdot m\text{H}_2\text{O}$, где Me^{2+} и Me^{3+} - ионы с радиусами 0,65-0,80 Å и 0,62-0,69 Å соответственно, а An^- - межслойный анион. Благодаря уникальной структуре, анионной обменной способности и термической стабильности гидротальциты широко исследуются в различных областях, включая катализ, медицину, фотохимию, электрохимию и очистку воды [4-6]. Метод получения гидротальцитов посредством совместного осаждения является наиболее распространенным и позволяет получать материалы с высокой химической стабильностью и адаптируемостью. В зависимости от условий синтеза - таких как природа раствора, pH, температура и соотношение Me^{2+} и Me^{3+} - возможно получение гидротальцитов с различными структурными характеристиками. Наиболее часто в очистке воды используют $\text{Mg}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ и $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -гидротальциты, отличающиеся по кристалличности и спектроскопическим свойствам [7-8]. Степень растворимости (K_{sp}) $\text{Al}(\text{OH})_3$ и $\text{Fe}(\text{OH})_3$ значительно различается, что оказывает влияние на их стабильность и свойства в водных системах.

В исследовании изучена адсорбционная эффективность гидротальцитов, синтезированных методом совместного осаждения, на основе систем Zn^{2+} - Fe^{3+} , Mg^{2+} - Fe^{3+} и Ni^{2+} - Fe^{3+} , в качестве адсорбентов для 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты. Для повышения фотокаталитической активности применены композиции $\text{CdS}/\text{Ni}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$ с плазменными наночастицами серебра. Проведены физико-химические анализы,

включая определение морфологии, площади поверхности ($113,10 \text{ м}^2/\text{г}$), размера частиц (68 нм), пористости ($0,1658 \text{ см}^3/\text{г}$), средней поры (5,86 нм), pH поверхности (8,34) и ширины запрещенной зоны (1,96 эВ). Максимальная адсорбционная емкость NFL достигала $203,75 \text{ мг/г}$ при температуре 230°C . Кинетика адсорбции характеризовалась быстрым достижением равновесия в течение 8 часов. Анализ изотермических зависимостей показал, что адсорбция носит экзотермический и спонтанный характер и хорошо подчиняется моделям Авраами, псевдовторичного порядка, а также изотермам Редлих-Петеран и Ленгмюра. При освещении видимым светом гетерогенная структура Ag@CNFL продемонстрировала высокую фотокаталитическую активность в разложении 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты: при концентрации 100 мг/л за 110 минут достигался уровень разложения около 15%. Эффективность фотокаталитического разложения после 8 циклов снизилась незначительно, что подтверждает стабильность материала [9].

Хитозан (ХЗ), обладающий множеством функциональных групп, способен образовывать стабильные комплексы с гидрооксидными слоями за счет электронных взаимодействий. В качестве примера синтезированы композитные гидрогели ХЗ/СДГ-ХЗ, в которых глутаровый гальдегид выступает агентом сшивания, обеспечивая повышенную механическую устойчивость и адсорбционную активность в кислых условиях ($\text{pH} \approx 3$). В результате получены гибридные гидрогели, применяемые в косметической промышленности в качестве наполнителей [10-11].

Также рассмотрены сорбенты на основе полимерных и неорганических материалов, такие как $\text{Zn}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ и $\text{Zn}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ -ХЗ композиты, полученные методом совместного осаждения и характеризующиеся моделями изотерм Фрейндлиха. Максимальная адсорбционная ёмкость для $\text{Zn}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ -ХЗ достигала $98,039 \text{ мг/г}$, что свидетельствует о высокой эффективности регенерации и многократном использовании данных сорбентов [12].

ХЗ является одним из наиболее эффективных биополимеров для удаления тяжелых металлов и органических загрязнителей благодаря наличию аминных и гидроксильных групп, способных образовывать координационные соединения и стабильные комплексы с гидрооксидными слоями. Исследования показывают, что введение хитозана в состав гидротальцитов увеличивает сорбционную активность $\text{Ni}^{2+}/\text{Al}^{3+}$ - СДГ с $3,3 \text{ м}^2/\text{г}$ до $9,5 \text{ м}^2/\text{г}$, что демонстрирует перспективность использования таких композитов для очистки воды от тяжелых металлов и органических веществ [13].

На основе проведенных исследований предлагается разработка новых полимерных и неорганических сорбентов высокой эффективности, обладающих долгим сроком службы и низкой стоимостью сырья, для очистки сточных вод от красителей и тяжелых металлов в таких отраслях, как текстильная, нефтехимическая и металлургическая промышленность. В рамках данного исследования синтезированы СДГ на основе $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ и их модификация хитозаном методом соосаждения.

Экспериментальная часть

В работе использовался хитозан с молекулярной массой 50 кДа и степенью деацетилирования 95%. Для синтеза использовались растворы $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$,

$\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$, NaOH и CH_3COOH . Все химические вещества были приобретены у компании *Masklin Biochemical Co., Ltd* и обладали высокой чистотой (>98,9%), при этом дополнительные стадии очистки не проводились. Для приготовления растворов использовалась бидистиллированная вода.

Динамическое светорассеяние (DLS) применялось для изучения распределения частиц по размеру в растворах с помощью анализатора Photocor Compact-Z (Россия), оснащенного стабилизированным полупроводниковым лазером: длина волны 635 нм, мощность 25 мВт, угол наблюдения 90°. Образцы сохранялись при постоянной температуре $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Концентрация образцов удерживалась на уровне 0,05 мг/мл для минимизации эффекта агрегации. Каждое измерение проводилось в течение 3 минут и выполнялось не менее трех раз для обеспечения достоверности результатов.

Сорбционные исследования проводились на образцах нанокомпозитов на основе слоистых двойных гидроксидов (СДГ) и хитозана. Анализы структурных характеристик осуществлялись при низком давлении азота (N_2) в условиях 77 К с использованием автоматического анализатора серии BSD-660 A3 (Пекин, Китай) и сопоставительной системы. Для определения площади поверхности применялся метод БЕТ (Брунауэр-Эмметта-Теллера). Распределение пор по размеру получалось по изотермам адсорбции азота и моделям Барретта-Йонера-Халенда (ВЖН), основанным на десорбционной кривой.

Результаты и их обсуждения

Слоистые двойные гидроксиды на основе $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ получены согласно [14]. Синтез композитов осуществлен при соотношении $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}=1:3$ моль, при варьировании массовых соотношений $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ и ХЗ. Среда раствора $\text{pH} = 11$ поддержана с помощью 2 М NaOH . Реакционная смесь обработана ультразвуком с частотой 40 кГц в течение 15 мин. Конечный продукт выделен центрифугированием при 3000 об/мин и высушен лиофильно при температуре -50°C до постоянной массы. Изучено влияние соотношений компонентов на выход и гидродинамический размер их частиц (табл.1).

Таблица 1. Влияние условий получения композитов СДГ:ХЗ на выход реакций и гидродинамический диаметр их частиц. $\text{pH}=11$; время обработки ультразвуком - 15 мин

№	$\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, масс.	ХЗ, масс.	УЗ частота, кГц	Выход реакции, %	d	
					нм	мкм
1	1	0,05	40	89	231,6 (66,3%); 0,116(14,2%); 7,31(3,6%)	1,0 (11,8%)
2	1	0,125	40	90	30,64(6,2%); 250 (71,8%)	1,9 (22,0 %)
3	1	0,5	40	94	14,452 (0,5%); 145,94(46,4%); 149(45,8 %)	2,3 (8,2%)

4	1	10	40	50	239 (85,5%); 16,4(4,6%)	2,5 (9,9%)
---	---	----	----	----	----------------------------	------------

Согласно данным табл.1, при низких содержаниях ХЗ, выход целевого продукта выше, чем при высоких концентрациях полимера в реакционной системе. При соотношениях $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ$ 1:0,05 и 1:0,125; 1:0,5 масс. выход реакции достигал $91 \pm 2 \%$. Однако при увеличении соотношения $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ$ до 1:10 выход реакции снижался почти в два раза.

Полученные результаты показывают, что по сравнению с другими соотношениями, гидродинамические диаметры частиц суспензий, полученной при мольном соотношении $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ=1:10$, сместились в наномасштаб, то есть размер частиц составили 239 нм (85,5%), 16,4 нм (4,6%), и 2,5 мкм (9,9%). Это свидетельствует о том, что благодаря поликатионной природе ХЗ происходит контроль процесса ядро-роста, и обеспечивается коллоидная стабильность суспензии.

Проведены исследования по изучению сорбционных свойств полученных композитов (табл.2).

Таблица 2. Параметры пористой структуры композитов $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ$, полученных при различных соотношениях; частота УЗ обработки 40 кГц

№	$Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ$, масс.	$V_{общ}$, см ³ /г	$V_{микро}$, см ³ /г	Микро (0,3–2 нм), %	Мезо (2–50 нм), %	Макро (>50нм), %
1	1:0,05	0,0434	0,0071	16,41	83,59	0,00
2	1:0,125	0,0440	0,0094	21,41	70,45	8,14
3	1:0,5	0,0273	0,0045	16,56	65,70	17,74
4	1:10	0,0063	0,0008	12,45	47,27	40,28

Как видно, наиболее развитая структура наблюдалась у композита $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ=1:0,125$ моль, у которого объем микропор составлял 0,0094 см³/г, а доля мелких пор достигала максимума. В этом образце доля микропор в диапазоне 0,3–5 нм была высокой, что обеспечивало формирование высокой сорбционной поверхности. При увеличении ХЗ с 0,05 до 10 моль общий объем пор, в частности, объем микропор резко сокращаются, что у образца $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ=1:0,125$ масс. объем микропор уменьшается практически в 15 раз. Это объясняется избыточной агрегацией гидроксидной фазы и блокировкой пор. В то же время, при высоком содержании СДГ доля макропор увеличивается до 40%, что указывает на преобладание транспортных свободных пространств между крупными частицами, а внутренняя сорбционная пористость уменьшается. Молекула ХЗ, выступая в роли разделяющего пространства для наноструктур Mg^{2+}/Fe^{3+} , сохраняет микро- и мезопор при низком содержании СДГ. Результаты *NLDFT* подтверждают, что при масс. соотношении $Mg^{2+}/Fe^{3+}:XZ$ примерно 1:0,05 и 1:0,125 доля микропор достигает максимума, а межпластинчатые пустоты сохраняются.

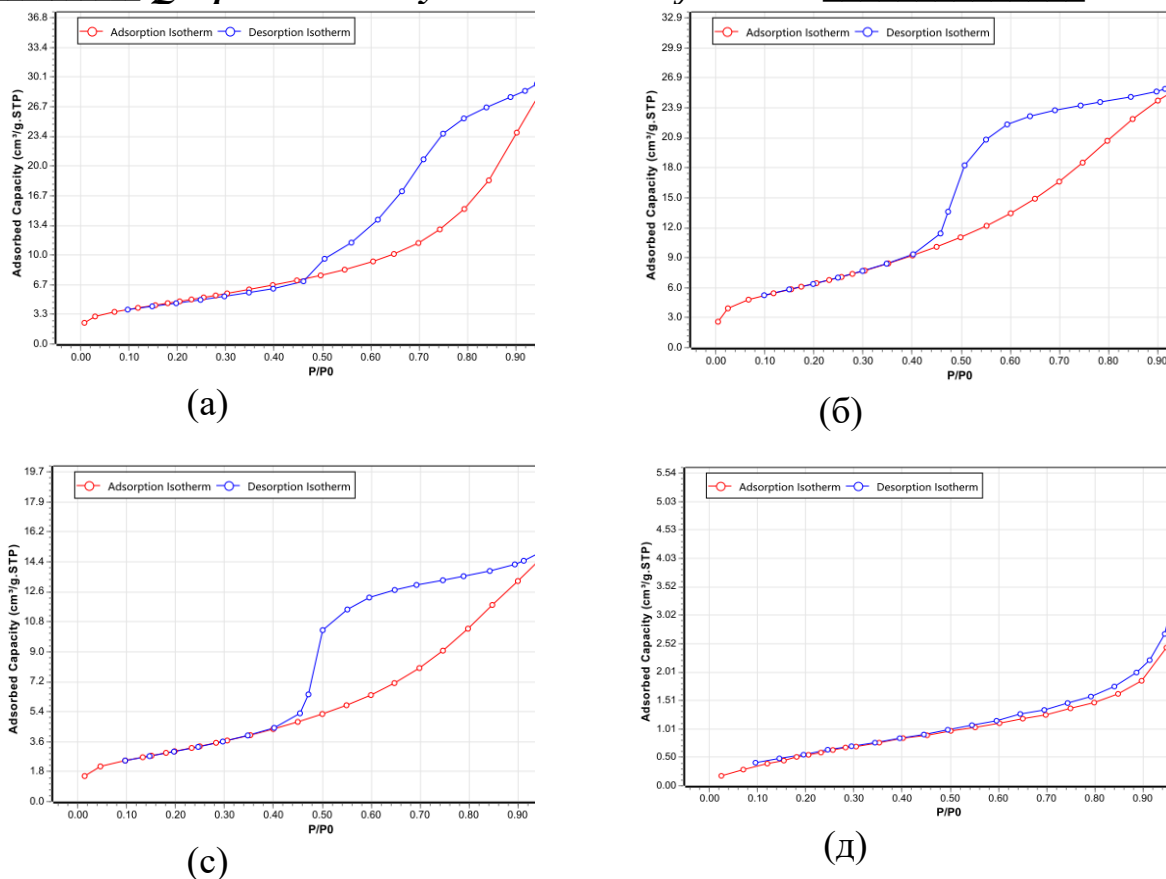


Рис.1. Влияние пористости на изотермы адсорбции композитов СДГ:ХЗ - (а) СДГ:ХЗ=1:0,05 масс.; (б) СДГ:ХЗ=1:0,125 масс.; (с) СДГ:ХЗ=1:0,5 масс.; (д) СДГ:ХЗ=1:10 масс.

Как видно, изучение влияния пористости композитов СДГ:ХЗ на их адсорбционный объем показывает, что при переходе соотношений компонентов от СДГ:ХЗ=1:0,05 масс. до СДГ:ХЗ=1:0,125 масс. площадь поверхности увеличивается от 18,06 м²/г до 24,28 м²/г, и соответственно достигает максимума, что объясняется оптимальным распределением фаз и сохранением транспортных пор. При дальнейшем увеличении количества СДГ (до 1:0,5 и 1:10) значение $S_{\text{ВЕТ}}$ резко снижается до 11,47 м²/г и 2,61 м²/г, что вероятно, связано с заполнением пор и уплотнением структуры. В целом, обнаружено, что наиболее развитая поверхность и мезопористая структура наблюдаются у образца с соотношением СДГ:ХЗ=1:0,125 масс.

Капиллярно-пористая структура образцов определялась методом БЭТ (Брунауэр-Эмметта-Теллера) на основе изотерм сорбции (табл. 3).

Таблица 3. Результаты испытаний многоточечным методом БЭТ

№	Mg ²⁺ /Fe ³⁺ :X ₃ , масс.	Коэффициент наклона(а)	Пересечение (b)	R	P/P ₀ диапазон	C	V _m , см³/г	SBET, м²/г
1	1:0,05	0,23599	0,00494	0,9999	0,0699– 0,3484	48,8	4,1506	18,059
2	1:0,125	0,17533	0,00385	0,9997	0,0667– 0,3035	46,6	5,5812	24,284

3	1:0,5	0,37157	0,00762	0,9996	0,0463– 0,3055	49,8	2,6372	11,475
4	1:10	1,49966	0,16588	0,9981	0,0704– 0,3045	10,0	0,6004	2,6124

Согласно классификации IUPAC все исследованные образцы принадлежат к типу IV(a), что характерно для мезопористых структур. Гистерезисный цикл относится к типам НЗ/Н4, что свидетельствует о наличии слоистых агрегатов пластинчатых гидроксидов и пор с bottleneck. Различия между адсорбцией и десорбцией особенно заметны у образцов 1-0,05 и 1-0,5, что указывает на эффект bottleneck, то есть крупные поры связаны через узкие горловины. Значения константы $S_{\text{ВЕТ}}$ колеблются в диапазоне 7,3–49,8, что подтверждает умеренное взаимодействие адсорбента с адсорбатом и характерно для органо-неорганических матриц с модифицирующими компонентами.

Согласно модели ВЖН у всех образцов доля микропор составляет 0,00%, что указывает на преобладание мезопористой структуры (табл. 4).

Таблица 4. Результаты определения размера пор и объема ВЖН (на основе адсорбции и десорбции)

№	Mg2+/Fe3+/X3, масс.	Процесс	Микро (0,35-2 нм), %	Мезо (2- 10 нм), %	Мезо (10- 50 нм), %	Макро (50-200 нм), %
1	1:0,05	Адсорбция	0,00	37,77	62,23	0,00
		Десорбция	0,00	76,63	17,26	6,11
2	1:0,125	Адсорбция	0,00	66,61	29,42	3,97
		Десорбция	0,00	85,67	7,57	6,76
3	1:0,5	Адсорбция	0,00	54,56	39,56	5,88
		Десорбция	0,00	80,46	9,81	9,73
4	1:10	Адсорбция	0,00	30,56	54,93	14,51
		Десорбция	0,00	29,97	47,44	22,59

В то же время, NLDTF анализ позволяет выявить ультрамикропор, однако классическая модель ВЖН относит их к диапазону мезопор. Значительная разница между кривыми адсорбции и десорбции наблюдается у образцов с низким и средним содержанием СДГ (1:0,05; 1:0,125; 1:0,5). На стадии адсорбции в диапазоне 10–50 нм наблюдается высокий удельный вес крупных мезопор в структуре, а на стадии десорбции доля мелких мезопор в диапазоне 2–10 нм резко возрастает до 76–85%, что свидетельствует о морфологии пор типа *ink-bottle*, то есть поры связаны через узкие "горловины". Увеличение количества СДГ заметно влияет на изменения в структуре. Образец с соотношением СДГ:X3=1:0,125 масс. обладает максимальной долей мелких мезопор, что соответствует высокой сорбционной поверхности и свидетельствует о наиболее развитой мезопористой системе. При увеличении массового соотношения

СДГ/ХЗ до 1:10 существенно возрастает доля макропор: в адсорбционной части она достигает до 14-18%, а в десорбционной - 22-40 %, что свидетельствует о формировании транспортных пор между агрегатами. Таким образом, установлено, что с повышением количества ХЗ увеличиваются доля макропор, что соответственно приводит к уменьшению их сорбционных свойств.

Резюмируя можно отметить, что нами получены композиты хитозана со слоистыми двойными гидроксидами и выявлено, что оптимальное соотношение составляет Mg^{2+}/Fe^{3+} : ХЗ=1:0,125 масс. Обнаружено, что эти композиты обладают мезопористой структурой и высокой сорбционной активностью, что делает их перспективными для создания полимерных сорбентов для очистки промышленных вод.

Данное исследование проведено при финансировании Узбекско-Белорусского фундаментального проекта FL-8824063254-“Ультразвуковой синтез композиционных сорбентов на основе хитозана и слоистых двойных гидроксидов для удаления экологических поллютантов”.

Список литературы

1. Dutta G., et al. Facile synthesis of Mg/Fe-layered double hydroxides (LDHs) for adsorptive removal of malachite green dye from water // *Surfaces and Interfaces*. - 2025. - Т. 72. - С. 106930. - DOI: 10.1016/j.surfin.2025.106930.
2. Ewuzie U., Saliu O.D., Dulta K., Ogunniyi S., Bajeh A.O., Iwuzor K.O., Ighalo J.O. A review on treatment technologies for printing and dyeing wastewater (PDW) // *J. Water Process Eng.* - 2022. - Т. 50. - С. 103273. - DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103273.
3. Chen Y., Jing C., Zhang X., Jiang D., Liu X., Dong B., Feng L., Li S., Zhang Y. Acid-salt treated CoAl layered double hydroxide nanosheets with enhanced adsorption capacity of methyl orange dye // *J. Colloid Interface Sci.* - 2019. - Т. 548. - С. 100-109. - DOI: 10.1016/j.jcis.2019.03.107.
4. Wang Y., Dai X., Zhou Q., Li K., Feng L., Liao W., Yu Y., Yu H., Zong X., Lu G., Zhang Y. Insights into the role of metal cation substitution on the anionic dye removal performance of CoAl-LDH // *Colloids Surf., A*. - 2022. - Т. 636. - С. 128139. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.128139.
5. Dai X., Yi W., Yin C., Li K., Feng L., Zhou Q., Yi Z., Zhang X., Wang Y., Yu Y., Han X., Zhang Y. 2D/3D magnetic NiFe layered double hydroxide decorated diatomite as multi-function material for anionic, cationic dyes, arsenate, and arsenite adsorption // *Appl. Clay Sci.* - 2022. - Т. 229. - С. 106664. - DOI: 10.1016/j.clay.2022.106664.
6. Bukhtiyarova M.V. A review on effect of synthesis conditions on the formation of layered double hydroxides // *J. Solid State Chem.* - 2019. - Т. 269. - С. 494-506. - DOI: 10.1016/j.jssc.2018.10.018.
7. Xie Y., Yuan X., Wu Z., Zeng G., Jiang L., Peng X., Li H. Adsorption behavior and mechanism of Mg/Fe layered double hydroxide with Fe_3O_4 -carbon spheres on the removal of Pb(II) and Cu(II) // *J. Colloid Interface Sci.* - 2019. - Т. 536. - С. 440-455. - DOI: 10.1016/j.jcis.2018.10.066.

8. Tang L., Xie X., Li C., Xu Y., Zhu W., Wang L. Regulation of structure and anion-exchange performance of layered double hydroxide: function of the metal cation composition of a brucite-like layer // *Materials*. - 2022. - T. 15. - DOI: 10.3390/ma15227983.

9. Ay A.N., Zumreoglu-Karan B., Kalinichev A.G. et al. Layered double hydroxide–borate composites supported on magnetic nanoparticles: preparation, characterization and molecular dynamics simulations // *J Porous Mater.* - 2020. - T. 27. - C. 735-743. - DOI: 10.1007/s10934-019-00853-4.

10. Mohadi R., Siregar P. M. S. B. N., Palapa N. R., Taher T., Lesbani A. Layered double hydroxide/chitosan composite (Mg-Al/CT) as a selective adsorbent in Congo red adsorption from aqueous solution // *Ecological Engineering & Environmental Technology*. - 2022. - T. 23, № 2. - C. 144-152. - DOI: 10.12912/27197050/145753.

11. Sankaran Meenakshi. Synthesis and characterization of chitosan/Mg-Al layered double hydroxide composite for the removal of oil particles from oil-in-water emulsion // *International Journal of Biological Macromolecules*. - 2017. - T. 104. - C. 1586-1595. - DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2017.01.095.

12. Bercea M., Bibire E. L., Morariu S., Carja G. Chitosan/poly(Vinyl Alcohol)/LDH biocomposites with pH-sensitive properties // *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. - 2015. - T. 64, № 12. - C. 628–636. - DOI: 10.1080/00914037.2014.996712.

13. Mohadi R., Siregar P. M. S. B. N., Palapa N. R., Taher T., Lesbani A. Preparation of Zn/Al-chitosan composite for the selective adsorption of methylene blue dye in water // *Makara Journal of Science*. 2022. T. 26, № 2. C. 7. DOI:10.7454/mss.v26i2.1313.

14. Голубев Р.А., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Критченков И.С., Критченков А.С. Сорбционные свойства слоистых двойных гидроксидов, полученных при ультразвуковом воздействии // *Frontier Materials & Technologies*. 2023. № 4. С. 19-30. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-4-66-2.