

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-181-190>

УДК 502.32

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ КРАСИТЕЛЕЙ

**Л. Н. Сеймуханова¹, У. Е. Жантукеев^{1*}, К. С. Бексейтова¹, М. С. Кунарбекова¹,
Б. У. Рахимова¹, Б. Д. Фазылов², А. М. Загитова³, К. К. Кудайбергенов¹, С. Азат¹**

¹⁾ *Satbayev University, Алматы, Казахстан*

²⁾ *Частная школа им. Шокана Уалиханова, Алматы, Казахстан*

³⁾ *Средняя школа им. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

* E-mail для контактов: nurlybekov_ulan@mail.ru

В условиях нарастающего промышленного загрязнения и недостаточной эффективности традиционных методов очистки сточных вод особенно остро встает вопрос поиска экологически чистых и эффективных сорбентов. Промышленные красители, попадая в водоемы, изменяют их цвет, токсичны и могут представлять серьезную угрозу для здоровья человека и экосистемы. Основная трудность заключается в том, что многие красители устойчивы к биологическому разложению, что усложняет их удаление стандартными методами очистки. Одним из перспективных материалов, способных решить эту проблему, является наноцеллюлоза, которая обладает уникальными свойствами: высокой удельной поверхностью, биосовместимостью и биоразлагаемостью. Полученная из возобновляемых источников, наноцеллюлоза может стать основой для экологически безопасных систем очистки воды. Это исследование направлено на изучение адсорбционных характеристик наноцеллюлозы, синтезированной из микрокристаллической целлюлозы, в отношении двух устойчивых водорастворимых красителей – метиленового синего и бенгальской розы. Результаты показали, что наноцеллюлоза эффективно адсорбирует метиленовый синий, достигая сорбционной емкости 35,87 мг/г, тогда как для бенгальской розы адсорбционная способность составила 26,11 мг/г, что объясняется различием в типах взаимодействий: химической и физической адсорбцией. Методики ИК-спектроскопии и рентгеновской дифрактометрии подтвердили структурные изменения, произошедшие при синтезе наноцеллюлозы, что положительно сказалось на ее сорбционных характеристиках. Морфологические исследования на оптическом и сканирующем электронном микроскопе также продемонстрировали высокую степень дисперсности и развитую пористую структуру наноцеллюлозы, что является важным для улучшения ее адсорбционных свойств.

Ключевые слова: наноцеллюлоза, адсорбция, очистка воды, промышленные красители, метиленовый синий, бенгальская роза, биоразлагаемые сорбенты, экологическая безопасность, водоочистка.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях усиливающегося антропогенного воздействия на окружающую среду, вопрос очистки воды от различных загрязнителей, особенно промышленных красителей, становится крайне актуальным [1]. Попадание этих веществ в водоемы вследствие деятельности текстильной, кожевенной, бумажной и других отраслей промышленности приводит к серьезным экологическим проблемам [2]. Красители не только изменяют цвет воды, но и обладают токсическими, мутагенными и канцерогенными свойствами, что представляет угрозу для здоровья людей и экосистем в целом [3]. Проблема усложняется тем, что многие красители обладают устойчивостью к биологическому разложению, что делает их трудными для удаления с помощью традиционных методов водоочистки [4].

Поиск эффективных, экологически безопасных и доступных адсорбентов для удаления красителей из воды является важной задачей современной химии и материаловедения. В последние годы в этой области активно изучаются биологические сорбенты, в том числе наноцеллюлоза, получаемая из возобновляемого сырья, такого как древесные отходы и сельскохозяйственные субстраты [5]. Наноцеллюлоза – это

биополимер, обладающий рядом уникальных свойств, таких как высокая прочность, развитая удельная поверхность, биосовместимость и биоразлагаемость. Эти характеристики делают её актуальным материалом для использования в экологически безопасных методах очистки воды [6].

Основным преимуществом наноцеллюлозы является ее способность к эффективной адсорбции как катионных, так и анионных красителей, что объясняется наличием гидроксильных и других функциональных групп на поверхности частиц. Эти группы способны взаимодействовать с молекулами красителей через химическую и физическую адсорбцию, что расширяет потенциальные области применения наноцеллюлозы в водоочистке [7]. Благодаря своей природной возобновляемости и биоразлагаемости, наноцеллюлоза способствует созданию экологически безопасных систем водоочистки, эффективно удаляя красители из сточных вод [8].

Существует несколько методов получения наноцеллюлозы, включая механохимические процессы, кислотный гидролиз и ферментативные методы [9]. Выбор конкретного метода влияет на физико-химические свойства полученного материала, чтобы оптимизировать его для адсорбции определенных загряз-

нителей [10]. Наноцеллюлоза в чистом виде показывает высокую сорбционную способность, не требуя дополнительной модификации или использования композитов. По желанию наноцеллюлоза может быть модифицирована для повышения её сорбционной способности, что позволяет целенаправленно улучшать её свойства в зависимости от типов загрязнителей, которые требуется удалить из воды [11].

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1.1. Исходные материалы

Для синтеза использовали рисовую шелуху, собранную в Кызылординской области, которая предварительно очищалась и сушилась. В качестве реагентов применяли пероксосукусную кислоту (Sigma-Aldrich, США) для получения микрокристаллической целлюлозы (МКЦ), серную кислоту (Merck, Германия) для синтеза наноцеллюлозы, гидроксид калия (Sigma-Aldrich, США) для дополнительной очистки материала и дистиллированную воду, подготовленную в лабораторных условиях с использованием системы дистилляции GFL (Германия).

1.2. Получение микрокристаллической целлюлозы из рисовой шелухи

Для получения микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) из рисовой шелухи (рисунок 1) сырьё предварительно промывают раствором гексана для удаления примесей и жирорастворимых компонентов. После сушки промытое сырьё в количестве 10 г смешивают с пероксосукусной кислотой в соотношении 1:14. Процесс получения МКЦ осуществляется путем кипячения смеси сырья и пероксосукусной кислоты в круглодонной колбе с обратным холодильником при температуре 90 °C в течение 120 минут при постоянном интенсивном перемешивании для обеспечения равномерного протекания реакции. По завершении реакции смесь охлаждают до температуры 25 °C, фильтруют через фильтровальную бумагу

и промывают дистиллированной водой до нейтрального значения pH ($pH = 7$) для удаления остатков кислоты. Затем полученный материал дополнительно промывают 1 М раствором гидроксида калия (KOH), чтобы устранить возможные остаточные продукты реакции и улучшить чистоту материала. После промывки материал снова обрабатывают дистиллированной водой до нейтрального pH. Завершающим этапом является сушка нейтрализованного МКЦ в лиофильной сушке до достижения постоянной массы. Высушенный материал сохраняют в эксикаторе для защиты от влаги воздуха.

1.3. Синтез наноцеллюлозы

Для синтеза наноцеллюлозы методом кислотного гидролиза (рисунок 2) берут 1 г микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) и смешивают с 60% раствором серной кислоты в соотношении МКЦ к H_2SO_4 как 1:10 г/мл. При низкой температуре (0–5 °C) серную кислоту медленно вливают в МКЦ при постоянном перемешивании, чтобы обеспечить равномерное взаимодействие и предотвратить перегрев. Когда образуется гелеобразная масса, в смесь добавляют 25 мл деионизированной воды. Далее реакционную смесь нагревают на водяной бане при 40 °C в течение 1 часа, не прекращая интенсивного перемешивания. После завершения гидролиза наноцеллюлозу отделяют путем центрифугирования при 8000 об/мин в течение 15 минут. Полученный осадок промывают дистиллированной водой до тех пор, пока pH раствора не достигнет нейтрального значения 6–7, что свидетельствует об удалении остаточной кислоты. Очищенную наноцеллюлозу подвергают лиофильной сушке для удаления влаги, сохраняя структурные свойства материала. Высушенный продукт хранят в эксикаторе, защищенном от воздействия влаги, чтобы предотвратить его гидратацию.



Рисунок 1. Схема получения микрокристаллической целлюлозы из рисовой шелухи

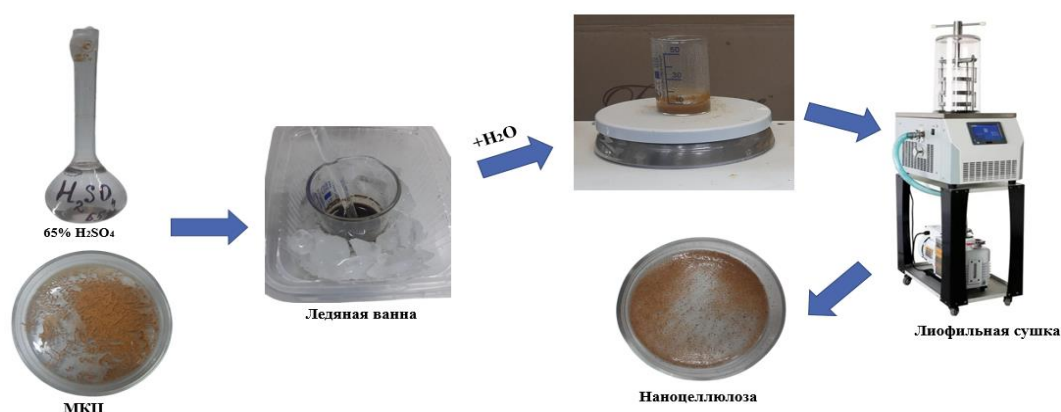


Рисунок 2. Схема получения наноцеллюлозы из микрокристаллической целлюлозы

1.4. БЭТ анализ

В работе было использовано полностью автоматизированный, высокопроизводительный анализатор удельной поверхности и размера пор «BSD-660» (Китай). Работа на данном устройстве включала предварительную дегазацию образцов при температуре 200 °С в течение 4 часов для удаления адсорбированных газов и влаги. Анализ проводился с использованием азота в качестве адсорбата при температуре жидкого азота, что позволило определить удельную поверхность и размеры пор методом БЭТ с высокой точностью.

1.5. Оптическая микроскопия

Для получения увеличенных изображений поверхности целлюлозы и наноцеллюлозы был использован оптический микроскоп DM 6000 M (производства Leica, Германия). Съемка проводилась в режимах светлого и темного поля с применением проходящего и отраженного света.

1.6. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

Для исследования структуры активированного угля была использована сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией (СЭМ) на микроскопе Zeiss Evo 50 (Oxford Instruments, Кембридж, Великобритания). Изображения получены при ускоряющем напряжении в 20 кВ.

1.7. Рентгеновский дифракционный анализ (XRD)

Для анализа фазовой структуры целлюлозы и наноцеллюлозы применялся рентгеновский дифрактометр PANalytical X'PertPro с медным анодом, оснащенный герметичной рентгеновской трубкой мощностью 1,8 кВт и вертикальным тета-тета гониометром радиусом 240 мм. Данная установка обеспечивает горизонтальное положение образца во время сбора данных и позволяет использовать различные конфигурации и держатели для образцов.

1.8. Метод инфракрасной спектроскопии (ИК)

Для определения химического состава активиро-

ванного угля применяли метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR). Спектры регистрировались с использованием спектрометра (JSM-6490LA, Япония). Образцы активированного угля готовили для анализа, прессуя смесь активированного угля и KBr в соотношении 99,5% к 0,5% по массе в диск под давлением 10 т/см². Анализ проводился при 32 сканах с разрешением 1 см⁻¹.

1.9. Метод ультрафиолетового облучения (УФ) и исследования сорбционных свойств наноцеллюлозы по отношению к водорастворимым красителям

Измерение УФ-спектра поглощения проводили с помощью спектрофотометра модели PI-C-7000UV (Китай). Высокая точность определения эффективности удаления красителей (до второго знака после запятой) обусловлена применением чувствительного оборудования и тщательной стандартизации измерений. Каждый эксперимент проводился трижды для повышения точности результатов, а полученные значения усреднялись. В ходе экспериментов были построены калибровочные графики, что позволило минимизировать погрешности и обеспечить высокую воспроизводимость результатов. Для создания калибровочной зависимости использовали раствор йодида калия с концентрациями в диапазоне от 5 до 20 мг/л. Сорбционную емкость определяли по формуле:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)v}{m}, \quad (1)$$

где C_0 и C_t – начальная и конечная концентрации ионов йода в растворе (г/л); v – объем раствора (л); m – масса использованного сорбента (г).

Для исследования сорбционных свойств наноцеллюлозы по отношению к красителям в водной среде был применен ультрафиолетовый спектрофотометр. Вначале были приготовлены растворы метиленового синего и Бенгальской розы. Калибровочный график строился на основе растворов красителей в диапазоне концентраций от 1 до 25 мг/л. Для эксперимента использовали концентрации метиленового синего и бенгальской розы в 1 мг/г, 2,5 мг/г, 5 мг/г, 10 мг/г и

25 мг/г. В колбы объемом 150 мл вносили по 50 мл каждого раствора и добавляли 0,1 г наноцеллюлозы. Колбы помещали на шейкер для эффективного перемешивания. В результате были построены кривые адсорбции, отражающие кинетику и изотермы процесса.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Измерение удельной поверхности

Для подтверждения увеличения удельной поверхности при переходе от МКЦ к наноцеллюлозе применяли метод БЭТ-анализа. Активированный уголь, несмотря на его большую удельную поверхность, не использовался в данном исследовании, так как целью работы было изучение материалов на основе целлюлозы. Микрокристаллическая целлюлоза также не использовалась в сорбционных экспериментах из-за её низкой удельной поверхности ($15 \text{ м}^2/\text{г}$), которая существенно ограничивает её эффективность. В переходе от МКЦ к НКЦ происходит значительное увеличение удельной поверхности до $120 \text{ м}^2/\text{г}$ (таблица 1), что обусловлено дроблением структуры и увеличением количества доступных активных центров, что положительно сказывается на её сорбционных свойствах.

Таблица 1. Удельные поверхности образцов МКЦ и НКЦ

Образец	Удельная поверхность ($\text{м}^2/\text{г}$)
МКЦ	15
НКЦ	120

2.2. Результаты оптического микроскопа

На фото, полученных с использованием оптического микроскопа (рисунок 3), представлены структуры целлюлозы и наноцеллюлозы. Изображения (а) и (б) демонстрируют целлюлозные волокна, отличающиеся крупной и неоднородной морфологией. Фрагменты волокон имеют разнообразные размеры и формы, а их относительно грубая текстура указывает на низкую степень дисперсии, характерную для более крупной целлюлозы. В отличие от них, на изображениях (в) и (г) показаны частицы наноцеллюлозы, которые выглядят более мелкими и однородными. Частицы наноцеллюлозы более дисперсные, с гладкими краями и меньшими размерами, что позволяет предположить их пригодность в качестве наноструктурированного материала с увеличенной площадью поверхности по сравнению с обычной целлюлозой.

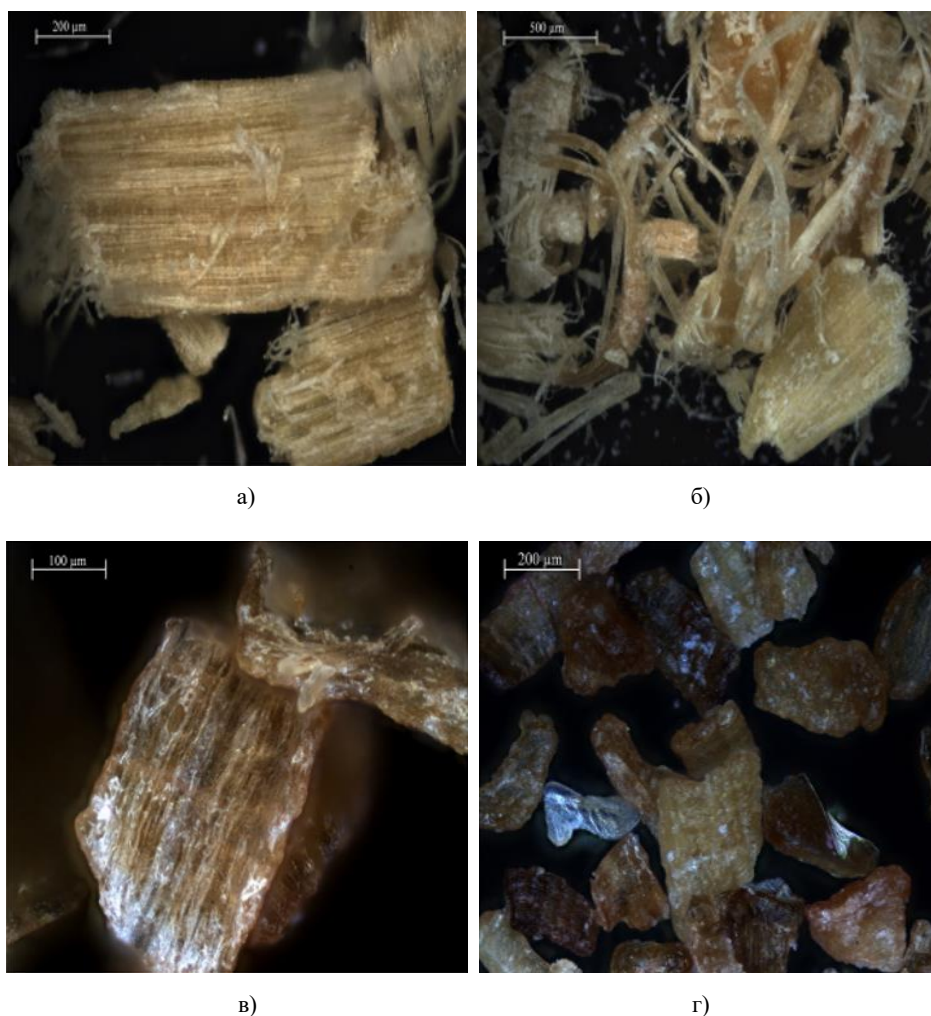


Рисунок 3. Снимки оптического микроскопа (а, б – целлюлоза, в, г – наноцеллюлоза)

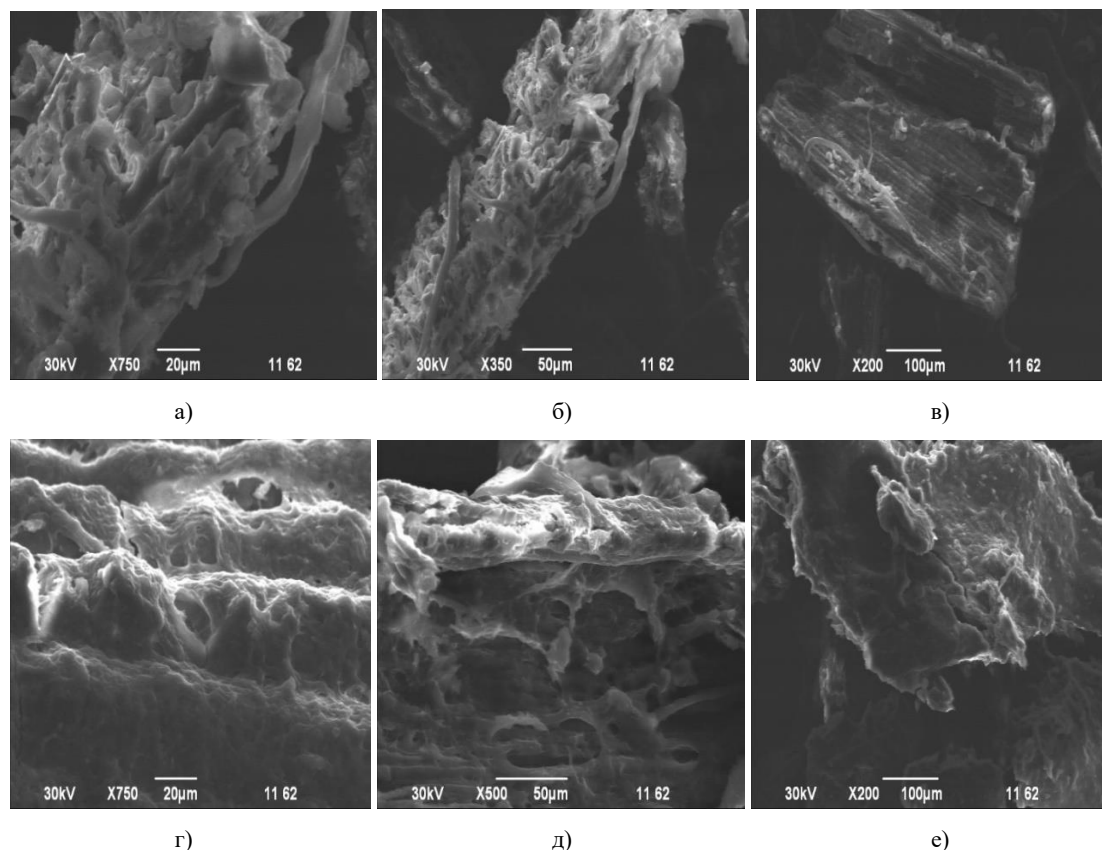


Рисунок 4. Снимки СЭМ (а, б, в – целлюлоза; г, д, е – наноцеллюлоза)

2.3. Результаты СЭМ

Сканирующая электронная микроскопия позволила детально рассмотреть морфологические особенности целлюлозы и наноцеллюлозы (рисунок 4). Снимки (а), (б) и (в) показывают структуру целлюлозы, характеризующуюся крупными волокнистыми элементами с заметной пористостью и рыхлой текстурой. Волокна целлюлозы различаются по размеру и форме, образуя переплетения и пустоты, что обеспечивает значительную площадь поверхности, хотя и ограничивает уровень дисперсности.

На снимках (г), (д) и (е) представлена наноцеллюлоза, отличающаяся более мелкими и однородными структурами. В наноцеллюлозе видны небольшие поры и гладкие поверхности, что указывает на высокую степень дисперсии и более равномерное распределение частиц. Компактная и мелкодисперсная структура наноцеллюлозы обеспечивает значительно большую площадь поверхности, что позволяет использовать в сорбционных и каталитических процессах. Эти результаты подчеркивают морфологические отличия между целлюлозой и наноцеллюлозой и их возможные области применения.

2.4. Результаты рентгеновского дифракционного анализа

Результаты рентгеновского дифракционного анализа целлюлозы и наноцеллюлозы, представленные на дифрактограмме (рисунок 5), показывают разли-

чия в интенсивности и позициях основных пиков, что позволяет оценить изменения в их структурных характеристиках. Основной пик для наноцеллюлозы расположен при $2\theta \approx 22,2^\circ$, тогда как для целлюлозы он наблюдается при $2\theta \approx 21,9^\circ$. Это свидетельствует о возможных деформационных искажениях в структуре, вызванных процессом получения.

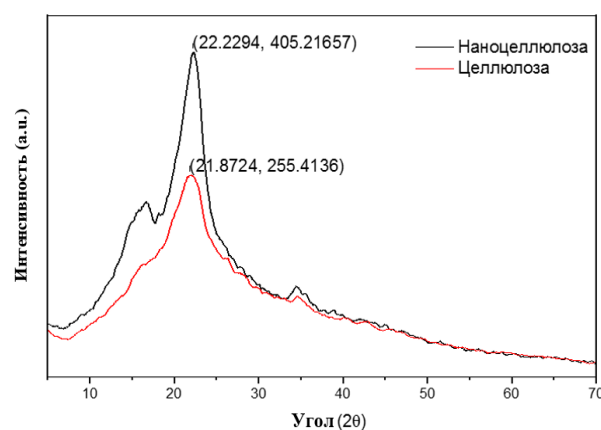


Рисунок 5. Дифрактограмма XRD

Усиление интенсивности пика наноцеллюлозы (405,21657 против 255,4136 для целлюлозы) может быть связано с изменением размеров кристаллитов или перераспределением аморфных и кристаллических областей в процессе обработки. Однако для точ-

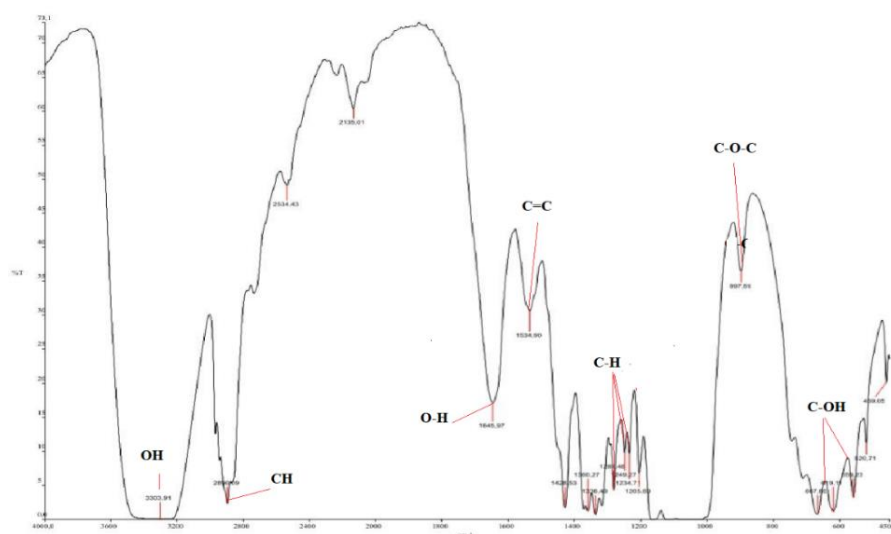
ной оценки степени кристалличности был проведён расчёт на основе соотношения площадей кристаллических и аморфных областей, с учётом фонового излучения. Полученные результаты показывают, что степень кристалличности наноцеллюлозы составляет около 61,34%, что подтверждает её более упорядоченную структуру по сравнению с исходной целлюлозой.

Наблюдаемый сдвиг пиков указывает на деформационные изменения в структуре, которые могут быть вызваны изменением межплоскостных расстояний при механической и химической обработке цел-

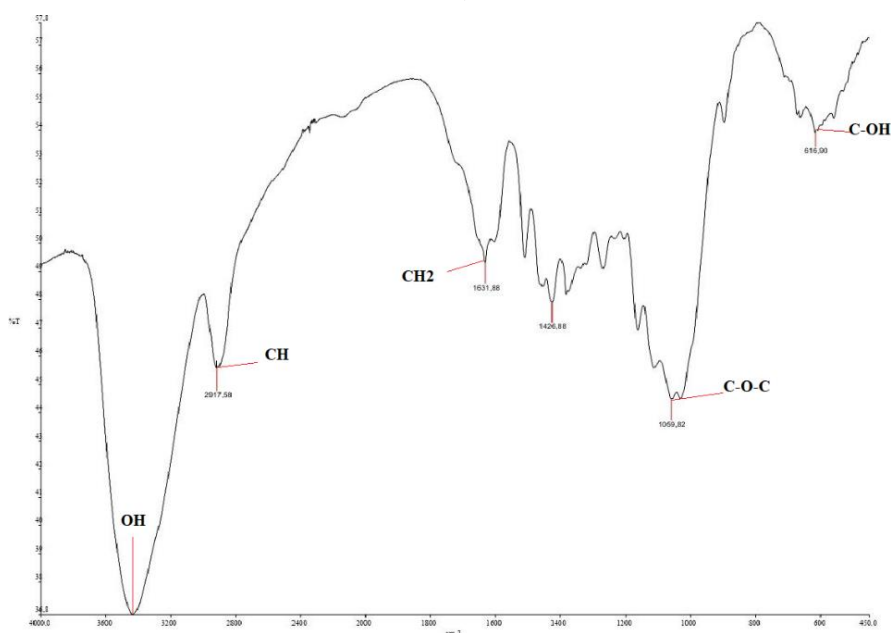
люлозы. Эти изменения подтверждают, что процесс преобразования целлюлозы в наноцеллюлозу сопровождается структурными модификациями.

2.5. Результаты ИК-спектроскопии

Инфракрасные (ИК) спектры образцов целлюлозы и наноцеллюлозы (рисунок 6) показывают характерные пики, соответствующие различным функциональным группам, и позволяют оценить изменения в химической структуре материала при его преобразовании.



a)



б)

Рисунок 6. ИК спектры целлюлозы и наноцеллюлозы

На спектре целлюлозы (рисунок 6а) присутствуют интенсивные полосы поглощения в области 3330 см^{-1} , которые указывают на валентные колебания гидроксильных групп (О–Н). Пик в области 2890 см^{-1} связан с валентными колебаниями С–Н, а пики около 1635 см^{-1} и 1370 см^{-1} свидетельствуют о присутствии С=С и О–Н соответственно. Также наблюдаются полосы поглощения в области 1155 см^{-1} и 897 см^{-1} , которые соответствуют колебаниям связей С–О–С и С–ОН, указывая на наличие гликозидных связей в структуре целлюлозы.

На ИК спектре наноцеллюлозы (рисунок 6б) отмечаются сходные полосы поглощения, однако их интенсивность и положение несколько отличаются, что свидетельствует о структурных изменениях в процессе превращения целлюлозы в наноцеллюлозу. Гидроксильные группы (О–Н) также показывают характерный пик в области 3330 см^{-1} , хотя его интенсивность может указывать на более высокую степень водородного связывания. В области 2900 см^{-1} присутствует пик, соответствующий С–Н, а пики при 1600 см^{-1} и 1408 см^{-1} свидетельствуют о колебаниях CH_2 и С–О–С. Пик в районе 1025 см^{-1} указывает на присутствие связей С–О–С, что характерно для структуры наноцеллюлозы.

Эти различия в ИК спектрах целлюлозы и наноцеллюлозы указывают на изменения в химическом окружении функциональных групп, происходящие при её преобразовании в наноструктурированную форму.

2.6. Сорбция красителей

Адсорбционные свойства наноцеллюлозы (НКЦ) при удалении метиленового синего из водных растворов демонстрируют высокую эффективность и быстроту процесса. На рисунке 7 показана кинетика адсорбции при разных начальных концентрациях красителя (1, 2,5, 5, 10 и 25 ppm), подтверждая, что основная часть адсорбции происходит в первые часы.

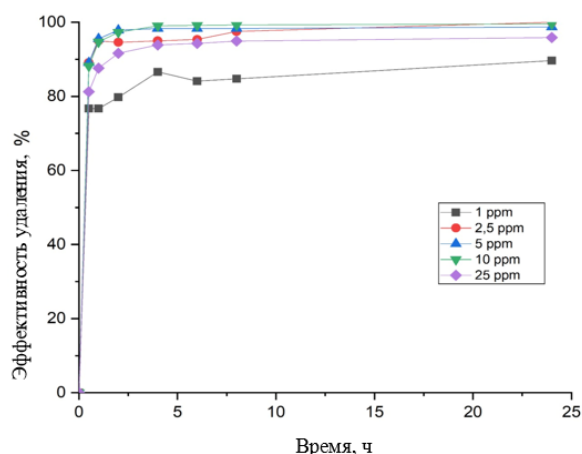


Рисунок 7. Кинетика адсорбции метиленового синего на НКЦ

На графике видно, что при всех концентрациях эффективность удаления красителя стремительно увеличивается в начальные моменты времени, а затем стабилизируется, достигая почти 100% в течение 24 часов. При концентрации 1 ppm, например, адсорбция достигает 80,66% уже через 2 часа и полностью завершена к 24 часам. Более высокие концентрации, такие как 25 ppm, также показывают высокую эффективность, но для стабилизации требуется немного больше времени. Результаты адсорбции приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты адсорбции метиленового синего на НКЦ

t, ч	Метиленовый синий, эффективность удаления, %				
	1 ppm	2,5 ppm	5 ppm	10 ppm	25 ppm
0	0	0	0	0	0
0,5	76,685	89,115	89,092	88,175	81,234
1	76,685	94,978	95,555	94,719	87,598
2	79,777	94,587	97,842	97,317	91,640
4	86,580	94,978	98,339	99,066	93,882
6	84,106	95,368	98,339	99,166	94,282
8	84,725	97,518	98,339	99,266	94,923
24	89,672	100,000	98,737	99,565	95,883

На рисунке 8 представлены результаты кинетики адсорбции Бенгальской розы на наноцеллюлозу (НКЦ) при различных начальных концентрациях красителя (1, 2,5, 5, 10 и 25 ppm). В отличие от метиленового синего, адсорбция Бенгальской розы на НКЦ происходит менее эффективно, что видно по более низким значениям эффективности удаления красителя в течение 24 часов. На графике показано, что, хотя эффективность адсорбции увеличивается в первые несколько часов, она достигает стабильного уровня ниже 90% и больше не увеличивается, даже спустя 24 часа. Максимальная эффективность, достигнутая для Бенгальской розы, составляет примерно 86,88% при самых низких концентрациях. В таблице 3 более подробно показано как эффективность адсорбции изменяется со временем для каждой концентрации. В частности, при концентрации 1 ppm адсорбция достигает 59,41% через 0,5 часа и постепенно увеличивается до 86,88% через 24 часа. При концентрации 25 ppm эффективность адсорбции значительно ниже, достигая всего 56,83% за тот же временной период, что указывает на возможные ограничения НКЦ при более высоких концентрациях.

Исходя из результатов, можно сказать, что НКЦ имеет более низкую сорбционную способность по отношению к бенгальской розе по сравнению с метиленовым синим. Это может быть связано с различиями в физико-химических свойствах красителей и механизмами их взаимодействия с наноцеллюлозой.

Таблица 3. Результаты адсорбции Бенгальской розы наноцеллюлозой (НКЦ)

t, ч	Бенгальская роза, эффективность удаления, %				
	1 ppm	2,5 ppm	5 ppm	10 ppm	25 ppm
0	0	0	0	0	0
0,5	59,415	68,239	72,907	78,436	42,811
1	59,415	69,082	75,158	80,518	45,600
2	59,415	71,188	76,958	83,526	48,854
4	56,673	71,188	78,083	84,567	54,224
6	58,501	73,715	78,533	85,956	56,806
8	61,243	74,558	80,783	86,881	60,266
24	63,985	77,085	82,808	86,881	68,684

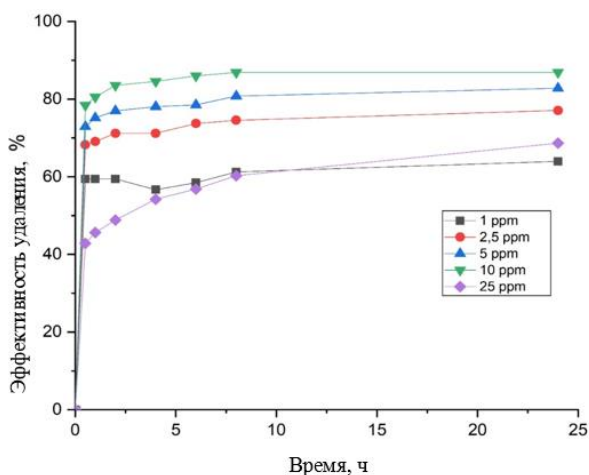


Рисунок 8. Кинетика адсорбции бенгальской розы на НКЦ

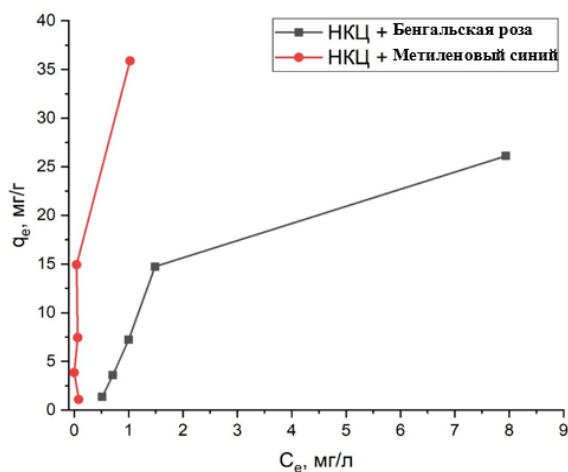


Рисунок 9. Изотермы адсорбции бенгальской розы и метиленового синего на НКЦ

Изотермы адсорбции позволяют оценить сорбционные свойства наноцеллюлозы (НКЦ) в отношении различных красителей, таких как метиленовый синий и бенгальская роза. На представленном графике (рисунок 9) адсорбции показывают, что наноцеллюлоза (НКЦ) более эффективно поглощает метиленовый синий, достигая сорбционной емкости 35,87 мг/г, что указывает на вероятную химическую природу взаимодействия.

В случае с бенгальской розой сорбционная емкость ниже – около 26,11 мг/г, что может объясняться физической адсорбцией. Эти результаты доказывают, что НКЦ хорошо справляется с удалением метиленового синего, но менее эффективен для бенгальской розы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье проведено комплексное исследование сорбционных свойств наноцеллюлозы (НКЦ), синтезированной из микрокристаллической целлюлозы, для удаления водорастворимых красителей, таких как метиленовый синий и бенгальская роза. Эксперименты показали, что НКЦ обладает высокой эффективностью адсорбции по отношению к метиленовому синему, что, вероятно, связано с химической природой взаимодействия. Изотермы адсорбции показали, что максимальная сорбционная емкость НКЦ для метиленового синего достигает 35,87 мг/г, что значительно выше, чем для бенгальской розы (26,11 мг/г), адсорбция которой, предположительно, обусловлена физическим взаимодействием.

ИК-спектроскопия и результаты рентгеновского дифракционного анализа подтвердили структурные изменения, происходящие в процессе синтеза НКЦ, обеспечивая материалу развитую площадь поверхности и наличие функциональных групп, способствующих эффективной адсорбции красителей. Данные оптической и сканирующей электронной микроскопии также показали отличия в морфологии и текстуре НКЦ, что подчеркивает высокую дисперсность и однородность частиц.

Таким образом, проведенные исследования показали, что наноцеллюлоза обладает потенциалом как эффективный сорбент для очистки водных растворов от органических красителей. В дальнейшем можно изучить модификацию НКЦ или разработку композитных материалов на его основе для расширения спектра удаляемых загрязнителей и повышения эффективности сорбции.

Благодарность

Исследование проведено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR27199301).

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Momina, M., Shahadat, M., & Isamil, S. (2018). Regeneration performance of clay-based adsorbents for the removal of industrial dyes: a review // RSC Advances. – 2018. – Vol. 8(43). – P. 24571–24587. <https://doi.org/10.1039/c8ra04290j>
- Periyasamy, A. P. (2024). Recent advances in the remediation of Textile-Dye-Containing wastewater: prioritizing human health and sustainable wastewater treatment // Sustainability. – 2024. – Vol. 16(2). – P. 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Alsukaibi, A. K. D. (2022). Various approaches for the detoxification of toxic dyes in wastewater // Processes. –

2022. – Vol. 10(10). – P. 1968.
<https://doi.org/10.3390/pr10101968>
4. Arora, S. Textile Dyes: It's Impact on Environment and its Treatment // Journal of Bioremediation & Biodegradation. – 2014. – Vol. 05(03). <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000e146>
 5. Varghese, A. G., Paul, S. A., & Latha, M. S. Cellulose Based Green Adsorbents for Pollutant Removal from Wastewater // Environmental chemistry for a sustainable world. – 2018. – P. 127–157. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92162-4_4
 6. Kolya, H., & Kang, C. Next-Generation water Treatment: Exploring the potential of Biopolymer-Based nanocomposites in adsorption and membrane filtration // Polymers. – 2023. – Vol. 15(16). – P. 3421. <https://doi.org/10.3390/polym15163421>
 7. Voisin, H., Bergström, L., Liu, P., & Mathew, A. Nanocellulose-Based materials for water purification // Nanomaterials. – 2017. – Vol. 7(3). – P. 57. <https://doi.org/10.3390/nano7030057>
 8. Salama, A., Abouzeid, R., Leong, W. S., Jeevanandam, J., Samyn, P., Dufresne, A., Bechelany, M., & Barhoum, A. Nanocellulose-Based materials for water treatment: adsorption, photocatalytic degradation, disinfection, antifouling, and nanofiltration // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11(11). – P. 3008. <https://doi.org/10.3390/nano11113008>
 9. Michelin, M., Gomes, D. G., Romani, A., De Lourdes T M Polizeli, M., & Teixeira, J. A. Nanocellulose production: Exploring the enzymatic route and residues of pulp and paper industry // Molecules. – 2020. – Vol. 25(15), – P. 3411. <https://doi.org/10.3390/molecules25153411>
 10. Thakur, V., Guleria, A., Kumar, S., Sharma, S., & Singh, K. Recent advances in nanocellulose processing, functionalization and applications: a review // Materials Advances. – 2021. – 2(6). – P. 1872–1895. <https://doi.org/10.1039/d1ma00049g>
 11. Norraahim, M. N. F., Kasim, N. a. M., Knight, V. F., Misenan, M. S. M., Janudin, N., Shah, N. a. A., Kasim, N., Yusoff, W. Y. W., Noor, S. a. M., Jamal, S. H., Ong, K. K., & Yunus, W. M. Z. W. Nanocellulose: a bioadsorbent for chemical contaminant remediation // RSC Advances. – 2021. – Vol. 11(13). – P. 7347–7368. <https://doi.org/10.1039/d0ra08005e>

СУДЫ БОЯГЫШТАРДАН ТАЗАРТУ ҮШІН НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА АЛУ

**Д. Н. Сеймұханова¹, Ү. Е. Жантiekеев^{1*}, К. С. Бексейтова¹, М. С. Кунарбекова¹,
Б. У. Рахимова¹, Б. Д. Фазылов², А. М. Загитова³, К. К. Кудайбергенов¹, С. Азат¹**

¹⁾ *Satbayev University, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *Шоқан Уәлиханов атындағы жеке мектеп, Алматы, Қазақстан*

³⁾ *Қ. И. Сәтбаев атындағы орта мектеп, Алматы, Қазақстан*

* Байланыс үшін E-mail: nurlybekov_ulan@mail.ru

Өнеркәсіптік ластанудың жоғарылауы және ағынды суларды тазартудың дәстүрлі әдістерінің тиімділігінің жеткіліксіздігі жағдайында экологиялық таза және тиімді сорбенттерді іздеу мәселесі ерекше өткір болып отыр. Өнеркәсіптік бояғыштар су объектілеріне түсіп, олардың түсін өзгертеді, улы болып табылады және адам денсаулығы мен экожүйеге үлкен қауіп төндіруі мүмкін. Негізгі қиындық – көптеген бояғыштар биологиялық ыдырауға төзімді, бұл оларды стандартты тазалау әдістерімен жоюды қиындатады. Бұл мәселені шешуге қабілетті перспективалы материалдардың бірі-бірегей қасиеттері бар наноцеллюлоза: жоғары меншікті беті, биоүйлесімділігі және биологиялық ыдырауы. Жаңартылатын көздерден алынған наноцеллюлоза экологиялық таза суды тазарту жүйелеріне негіз бола алады. Бұл зерттеу суда еритін екі бояғышқа – метилен көк және Бенгал раушанына қатысты микрокристалды целлюлозадан синтезделген наноцеллюлозаның адсорбциялық сипаттамаларын зерттеуге бағытталған. Нәтижелер наноцеллюлозаның метилен көкін тиімді адсорбциялайтынның көрсетті, сорбциялық сыйымдылығы 35,87 мг/г, ал Бенгал раушаны үшін адсорбция қабілеті 26,11 мг/г құрады, бұл өзара әрекеттесу түрлерінің айырмашылығымен түсіндіріледі: химиялық және физикалық адсорбция. ИК-спектроскопия және рентгендік дифрактометрия әдістері наноцеллюлоза синтезінде болған құрылымдық өзгерістерді растады, бұл оның сорбциялық сипаттамаларына оң әсер етті. Оптикалық және сканерлеуші электронды микроскоптағы морфологиялық зерттеулер сонымен қатар наноцеллюлозаның жоғары дисперсиялық дәрежесін және дамыған кеуекті құрылымын көрсетті, бұл оның адсорбциялық қасиеттерін жақсарту үшін маңызды.

Түйін сөздер: наноцеллюлоза, адсорбция, суды тазарту, өнеркәсіптік бояғыштар, метилен көк, Бенгал раушаны, биологиялық ыдырайтын сорбенттер, экологиялық қауіпсіздік, суды тазарту.

PRODUCTION OF NANOCELLULOSE FOR WATER PURIFICATION FROM DYES

L. N. Seimukhanova¹, U. Ye. Zhantikeev^{1*}, K. S. Bexeitova¹, M. S. Kunarbekova¹,
B. U. Rakhimova¹, B. D. Fazylov², A. M. Zagitova³, K. K. Kudaibergenov¹, S. Azat¹

¹⁾ *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Private school named after Shokan Ualikhanov, Almaty, Kazakhstan*

³⁾ *Secondary school named after K.I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan*

* E-mail for contacts: nurlybekov_ulan@mail.ru

In the context of increasing industrial pollution and insufficient efficiency of traditional wastewater treatment methods, the issue of finding environmentally friendly and effective sorbents is particularly acute. Industrial dyes entering reservoirs change their color, are toxic and can pose a serious threat to human health and the ecosystem. The main difficulty lies in the fact that many dyes are resistant to biodegradation, which complicates their removal by standard cleaning methods. One of the promising materials that can solve this problem is nanocellulose, which has unique properties: high specific surface area, biocompatibility and biodegradability. Obtained from renewable sources, nanocellulose can become the basis for environmentally friendly water treatment systems. This study is aimed at studying the adsorption characteristics of nanocellulose synthesized from microcrystalline cellulose in relation to two stable water – soluble dyes – methylene blue and bengal rose. The results showed that nanocellulose effectively adsorbs methylene blue, reaching a sorption capacity of 35.87 mg/g, whereas for Bengal rose the adsorption capacity was 26.11 mg/g, which is explained by the difference in the types of interactions: chemical and physical adsorption. The methods of IR spectroscopy and X-ray diffractometry confirmed the structural changes that occurred during the synthesis of nanocellulose, which had a positive effect on its sorption characteristics. Morphological studies using optical and scanning electron microscopes have also demonstrated a high degree of dispersion and a developed porous structure of nanocellulose, which is important for improving its adsorption properties.

Keywords: *nanocellulose, adsorption, water purification, industrial dyes, methylene blue, Bengal rose, biodegradable sorbents, environmental safety, water treatment.*