

Научная статья
УДК 541.35
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.064

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ АДсорбЕНТЫ ИЗ НАНОЦелЛЮЛОЗЫ

Елена Михайловна Сучилина

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, Москва, Россия
suchilinalena@mail.ru

Аннотация

Получен композит на основе нанокристаллической целлюлозы из гречихи, характеризующийся высокими сорбционными свойствами, экологической безопасностью и дешевизной изготовления. Модификация целлюлозы проводилась молочной кислотой. Синтезировано девять групп образцов нанокристаллической целлюлозы с различным временем вымачивания в кислоте, определено оптимальное время, необходимое для наиболее полной «прививки» кислоты к целлюлозе. Рассчитана площадь удельной поверхности композиционного материала методом адсорбции красителя конго красного. Выявлено, что площадь удельной поверхности модифицированного композита не уступает такому показателю многих синтетических адсорбентов, а по экологическим и экономическим показателям даже превосходит их.

Ключевые слова:

наноцеллюлоза, адсорбенты, площадь удельной поверхности

Для цитирования:

Сучилина Е. М. Высокоэффективные адсорбенты из наноцеллюлозы // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 386–394. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.064.

Original article

HIGHLY EFFECTIVE NANOCELLULOSE ADSORBENTS

Elena Mikhailovna Suchilina

Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia
suchilinalena@mail.ru

Abstract

A composite based on nanocrystalline cellulose from buckwheat was obtained, characterized by high sorption properties, environmental safety and low cost of manufacture. Cellulose modification was carried out with lactic acid. 9 groups of nanocrystalline cellulose samples with different soaking times in acid were synthesized, and the optimal time required for the most complete "grafting" of acid to cellulose was determined. The specific surface area of the composite material is calculated by adsorption of the Congo red dye. It was revealed that the specific surface area of the modified composite is not inferior to this indicator of many synthetic adsorbents, and even surpasses them in terms of environmental and economic indicators.

Keywords:

nanocellulose, adsorbents, specific surface area

For citation:

Suchilina E. M. Highly effective nanocellulose adsorbents // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 386–394. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.064.

Введение

Крайне актуальной задачей в настоящее время считается адаптация использования наноцеллюлозы в качестве сорбента, потому что синтетические аналоги, хотя и хорошо справляются со своими функциями, но зачастую являются токсичными и неспособными к биodeградации, а их производство довольно затратно. Наноцеллюлоза является одним из лучших экологически чистых композиционных материалов современности. Материалы из наноцеллюлозы вызывают растущий интерес благодаря их привлекательным характеристикам, таким как распространённость, большая площадь поверхности, хорошие механические свойства, возобновляемость и биосовместимость, способность к биodeградации. В связи с этим производство и модифицирование наноцеллюлозы с целью увеличения их поглотительной способности особенно своевременно. Функциональные гидроксильные группы позволяют осуществлять широкий спектр функционализаций посредством

химических реакций, что приводит к разработке различных материалов с регулируемыми характеристиками. Сейчас активно разрабатываются методики для новых применений наноцеллюлозы в развивающихся биомедицинских технологиях в качестве бактерицидной основы для пластырей и различных защитных плёнок. Кроме того, был представлен ряд новых применений наноцеллюлозы в нанокompозитах, эмульсиях Пикеринга, клеях для древесины, в очистке сточных вод. Её также можно использовать как основу биоразлагаемой упаковки, что позволит решить проблему с загрязнением окружающей среды отходами от различной упаковки и пищевой тары.

Методы

К методам получения нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) относят ультразвуковое диспергирование, метод гомогенизации, кислотный гидролиз (в серной, азотной, соляной кислотах).

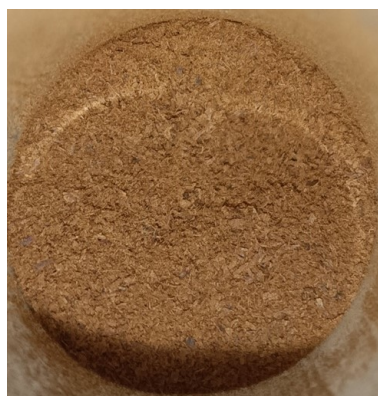


Рис. 1. Сорбент НКЦ из гречихи

Для получения микрокристаллической целлюлозы из гречихи в данной работе использовались солома и шелуха гречихи, которые были обработаны 18 %-м раствором перуксусной кислоты в течение 30 мин. Для проведения реакции использовалась коническая колба, которую поместили в прямоугольный резонатор объёмом 13,6 дм³ и соединили с обратным холодильником. Реакционную смесь подвергали прерывистому воздействию микроволнового излучения (МВИ) частотой 2450 МГц, используя магнетрон максимальной выходной мощностью 700 Вт. Под воздействием МВИ реакционная смесь была нагрета до температуры, при которой жидкие компоненты начинают кипеть.

Далее полученный остаток был отделён на стеклянном пористом фильтре, промыт дистиллированной водой, нагретой до 70–80 °С и высушен до полного осушения при комнатной температуре, а затем до достижения постоянной массы при 103 °С.

Далее механическим способом средний размер частиц образца был доведён до 40–50 нм. Готовый к эксперименту сорбент изображён на рис. 1, на котором отчётливо видно шероховатую, остроконечную и несколько вытянутую структуру частиц композита.

Для изменения свойств целлюлозного сорбента применяли 80 %-й раствор молочной кислоты ($\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$), создав условия для реакции между кислотой и НКЦ из гречихи.

Процесс включал три этапа: подготовку реагентов, химическую модификацию и очистку модифицированной целлюлозы от непрореагировавших реагентов. Модификация была проведена с учётом методик, описанных в литературе [5–7], с изменением времени вымачивания адсорбента в кислоте.

Так, первые 9 образцов вымачивали в кислоте 3 ч, взвешивали, после чего отправили на сушку, следующие 9 образцов вымачивали 24 ч, далее 36 ч и, наконец, 7 сут. Такое количество необходимо для точного построения кривых зависимости величины удельной адсорбции от концентрации конго красного после адсорбции и графика зависимости линеализированного уравнения адсорбции Ленгмюра, что позволит наблюдать изменение сорбционной способности модифицированного композита относительно времени вымачивания целлюлозы в кислоте.

Далее мы высушиваем каждую группу образцов в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение суток, взвешиваем, с помощью электронных весов численно, с точностью до десятичных, определяем, сколько кислотных групп осело на целлюлозных образцах.

Существует несколько методов измерения удельной поверхности твёрдых тел: метод, основанный на вычислении изотерм адсорбции по растянутой границе хроматограммы с использованием дифференциального уравнения баланса «равновесной хроматографии»; фронтальный метод, при котором величина адсорбции определяется по площади, заключённой между концентрированными фронтами адсорбата и неадсорбирующего газа; метод тепловой десорбции, при котором количество адсорбированного вещества определяется по количеству адсорбата, поступившего в поток газ-носителя с поверхности адсорбата при его нагревании; метод измерения удерживаемых объёмов,

позволяющий определить удельную поверхность непосредственно по величине удерживаемого объёма путём сравнения его с величиной абсолютного удерживаемого объёма (отнесённого к единице поверхности, а также метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) на сканирующем электронном микроскопе; метод рентгеноструктурного анализа; метод, основанный на адсорбции красителей на поверхности твёрдых материалов путём сравнения значений оптической плотности растворов с различной концентрацией красителя и одинаковой массой навески целлюлозы [8–12].

Удельную поверхность НКЦ определяли методом адсорбции красителя конго красного с помощью рефрактометра. Именно этот метод был выбран потому, что он достаточно нагляден, не сложен в исполнении и обработка экспериментальных данных позволяет определить изменение оптической плотности с достаточной точностью, необходимой для оценки и анализа результатов.

Для определения удельной поверхности композита НКЦ был применён метод, основанный на адсорбции красителей на поверхности твёрдых материалов. Использовали краситель конго красный [10]. Колориметрический метод применяли для определения адсорбционной ёмкости по отношению к красителям. Адсорбционную ёмкость проб находим по формуле

$$\Gamma = \frac{(C - C_{\text{адс}})V}{m}, \quad (1)$$

где Γ — количество красителя, поглощённого препаратом при равновесии, моль/г; C — концентрация красителя в исходном растворе, моль/л; $C_{\text{адс}}$ — равновесная концентрация красителя в растворе, моль/л; V — объём раствора красителя, взятого для контактирования с образцом, л; m — масса образца, г.

Готовим растворы конго красного в воде с концентрацией от $0,5 \cdot 10^{-5}$ до $7,5 \cdot 10^{-5}$ моль/л. По данным оптической плотности девяти растворов с различной концентрацией красителя (0,5; 1; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 7,5) на длине волны 690 нм строим калибровочную кривую. В девять колб добавляем аликвоту раствора конго красного объёмом 50 мл с различной концентрацией красителя и навеску композита МКЦ массой 0,1 г. После установления значения оптической плотности на постоянном значении измеряем оптическую плотность растворов после прохождения адсорбции 3 раза для установления средних значений.

На рис. 2 изображены колбы, содержащие раствор конго красного в различных концентрациях до адсорбции. Конго красный в растворе находится в анионной форме, поэтому его сорбция даёт информацию о заряде исследуемой поверхности, в водном растворе краситель разнозаряженный, а потому сорбция даёт информацию о заряде поверхности исследуемой структуры.



Рис. 2. Растворы конго красного различной концентрации

Далее мы готовим эппендорфы на 2 мл, помещаем туда образцы массой 0,1 г, состоящие из нанокристаллической гречишной целлюлозы, и сшиваем с 0,2 г 80 %-й молочной кислоты. Соотношение целлюлозы и кислоты выбрали 1:2, потому что иначе кислота не смачивала весь объём целлюлозы, в связи с чем могла возникнуть погрешность.

Полученные образцы ещё раз взвешиваем, плотно закрываем эппендорфы, чтобы избежать испарения кислоты, и оставляем на 3 ч в тёмном месте.

По истечении 3 ч переставляем эппендорфы с получившимся композитом в сушильный шкаф и выдерживаем в нём сутки при температуре 60 °С. После этого достаём получившиеся образцы, проверяем, чтобы они не содержали видимой влаги, и снова их взвешиваем с точностью до десяти тысячных. По полученной разнице масс, сведения о которой представлены ниже (см. «Результаты и обсуждение»), была определена масса кислоты, которая «сшилась» с целлюлозным образцом.

В каждую из 9 колб с растворами конго красного различной концентрации добавляем навеску модифицированного композита, тщательно перемешивая, чтобы слипшиеся частички образца разъединились и более качественно и показательно произошла адсорбция на поверхности этих частиц, после этого плотно закроем колбы с помощью фольги, чтобы избежать испарения и попадания внутрь посторонних веществ, и уберём колбы с нашим экспериментом в тёмное место на 3–4 дня.

После адсорбции нам необходимо измерить оптическую плотность растворов и по спектрам определить, при какой длине волны будет наблюдаться самый интенсивный спектральный пик, и сравнить его с пиком начального раствора красителя. Полученные данные нужно вывести и преобразовать с помощью программного обеспечения, а затем в полученных значениях найти пиковые значения параметра для каждого образца.

Далее строим график зависимости линеализованного уравнения адсорбции Ленгмюра:

$$\frac{C_{\text{адс}}}{\Gamma} = \frac{1}{(\Gamma_{\infty} \cdot K)} + \frac{C}{\Gamma_{\infty}}, \quad (2)$$

где K — константа адсорбционного равновесия, Γ_{∞} — величина адсорбции при полном насыщении поверхности, которая была определена по графику зависимости через котангенс угла наклона прямой.

Величина Γ_{∞} — это предельное значение числа красителя, сорбирувавшегося на 1 г композита НКЦ. По этой величине и посадочной площади молекулы красителя A рассчитывается площадь всей поверхности 1 г композита НКЦ по формуле

$$S = \Gamma_{\infty} \cdot N_A \cdot A, \quad (3)$$

где N_A — число Авогадро, равное $6,02 \cdot 10^{23}$; A — посадочная площадь молекулы конго красного $A_{\text{кр}}$, равная $2,06 \cdot 10^{-22}$ м².

После этого готовим точно такие же образцы с соотношением целлюлозы к кислоте 1:2 и вымачиваем их в течение 12 ч. Это вторая группа образцов. Третью группу образцов вымачиваем в течение 24 ч, четвёртую — 36 ч и последнюю, седьмую экспериментальную, группу — в течение 7 сут. Все дальнейшие преобразования и вычисления выполняем последовательно для каждой группы образцов. Параллельно с этим ведём дневник практики, фиксируем все даты и результаты измерений и взвешиваний.

Результаты и обсуждение

Удельную поверхность определяли методом сорбции красителя (краситель — конго красный), после чего выполнялось сравнение площади удельной поверхности у нанофибриллярной и микрокристаллической целлюлозы из гречихи. В таблице приведены данные по оптической плотности микрокристаллической целлюлозы из гречихи.

Как видим, что произошли существенные изменения до и после адсорбции, в особенности изменения оптической плотности. На рис. 3 изображена градуировочная кривая, иллюстрирующая зависимость коэффициента оптической плотности от концентрации раствора.

Оптические данные по НКЦ

Концентрация $C \cdot 10^{-5}$, моль/л	Оптическая плотность D		Равновесная концентрация $C_{\text{адс}} \cdot 10^{-5}$, моль/л
	до адсорбции	адсорбции	
0	0	0	0,000
0,5	0,207151666	0,1585781	0,412
1	0,398442745	0,3625841	0,943
1,5	0,60539043	0,5256057	1,367
2,5	0,908287585	0,8084775	2,103
3,5	1,380745888	1,2185672	3,169
4,5	1,780777335	1,6316283	4,244
5,5	2,073493242	1,9921828	5,181
6,5	2,466208696	2,3025217	5,988
7,5	2,904511452	2,67230892	6,950

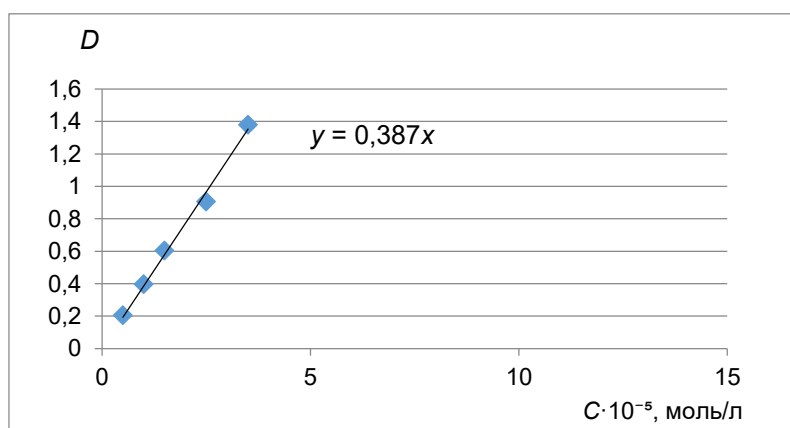


Рис. 3. Градуировочная кривая

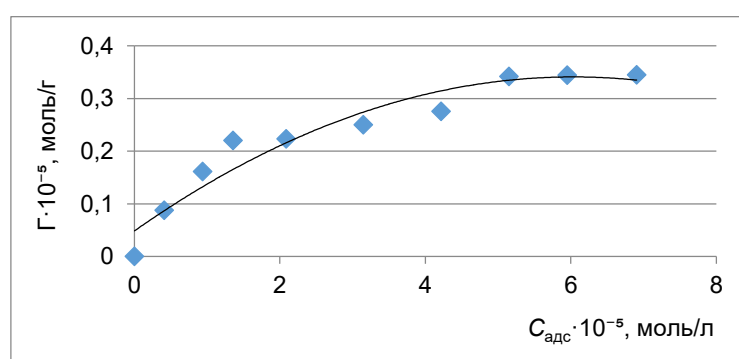


Рис. 4. Зависимость величины удельной адсорбции от концентрации конго красного после адсорбции

По формуле (1) рассчитывали величину удельной адсорбции Γ , а на основе полученных данных построили зависимость величины удельной адсорбции к концентрации красителя после адсорбции для композита, состоящего из нанокристаллической целлюлозы (рис. 4). Наблюдается резкий рост, что

характеризует мономолекулярную сорбцию красителя на поверхности композита, а далее выход на плато, что может говорить о значении предельной адсорбции.

На рис. 5 построен график зависимости линеализованного уравнения адсорбции Ленгмюра (3). По данным графика определяем предельное значение числа молей красителя Γ_{∞} , которые адсорбировались на 1 г полученного композита, $\Gamma_{\infty} = 2,9359$.

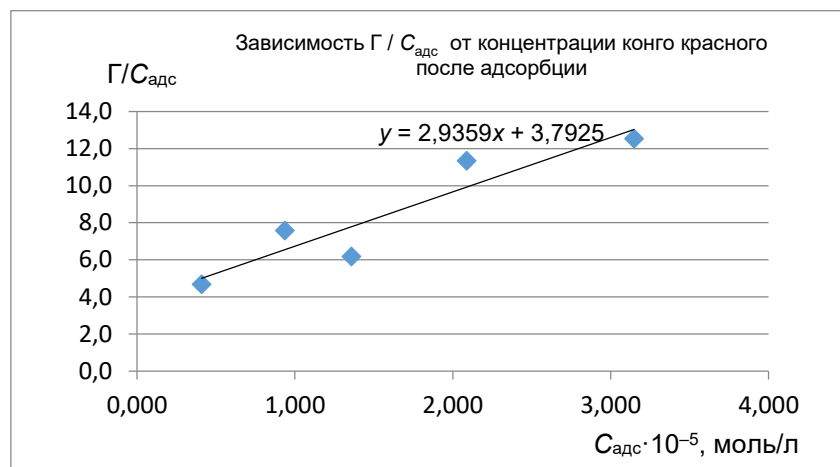


Рис. 5. График зависимости линеализованного уравнения адсорбции Ленгмюра

По уравнению (3) рассчитываем удельную поверхность полученного композита, которая составила 275,72 м²/г, что указывает на сильно развитую поверхность НКЦ.

Аналогично приведённым выше расчётам определяем площадь удельной поверхности для последующих образцов. Так, для композита, сшитого с молочной кислотой (в течение 3 ч), площадь удельной поверхности составила 278,9 м²/г, для композита, сшитого с молочной кислотой (в течение 12 ч), — 320,7 м²/г; аналогично, в течение 24 ч — 350,35 м²/г, 36 ч — 374,089 м²/г, 72 ч — 400,4 и 7 сут. (что равняется 168 ч) — 402,6 м²/г соответственно.

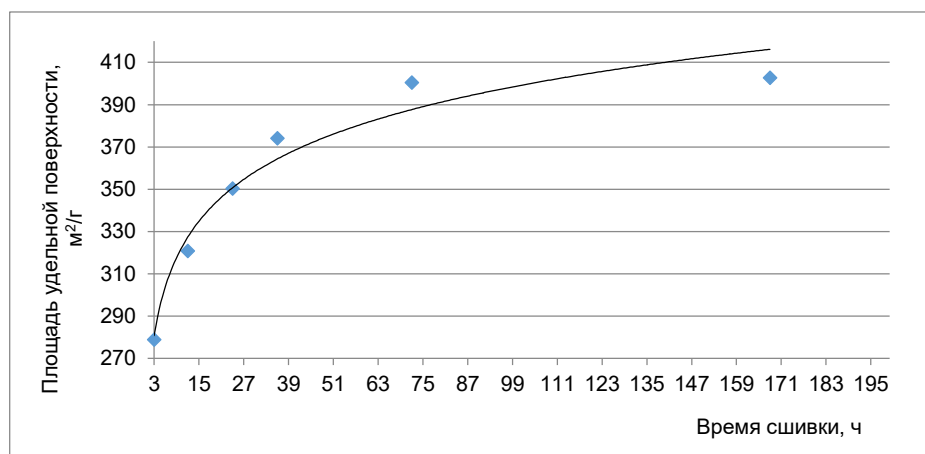


Рис. 6. Зависимость площади удельной поверхности модифицированного композита от времени «прививки» кислоты к целлюлозе

График зависимости площади удельной поверхности модифицированного композита от времени «прививки» кислоты к целлюлозе представлен на рис. 6. Отсюда следует, что модифицирование нанокристаллической целлюлозы из гречихи молочной кислотой значительно улучшает площадь

удельной поверхности композита. Так, модифицированная природная целлюлоза из гречихи теперь может конкурировать с синтетическими сорбентами. Площадь удельной поверхности цеолитов (тип А) составляет в среднем 90–400 м²/г [13].

По данным на 2023 г., стоимость адсорбента из целлюлозы — 170 руб. за 1 кг [14, 15]. Стоимость молочной кислоты 80 %-й — 95 руб. за 1 кг [16]. Таким образом, адсорбенты из наноцеллюлозы не уступают многим синтетическим сорбентам в поглотительной способности, но при этом имеют гораздо более низкую стоимость, а если учесть их биоразлагаемость и экологическую безопасность, то их можно считать перспективными адсорбентами и активно внедрять в промышленность новые технологии по их модернизации.

Выводы

Рассмотрены особенности строения целлюлоз различных типов, описаны методы их получения и обработки, детально изучены процессы адсорбции на сорбентах из наноцеллюлозы. Было выявлено, что удельная площадь поверхности нанокристаллической целлюлозы из гречихи, модифицированной молочной кислотой, со временем вымачивания 7 сут доходит до 402,6 м²/г, что является впечатляющим результатом.

Нанокристаллическая целлюлоза — перспективный материал для борьбы с различными загрязнениями и вредными веществами, в том числе и находящимися в сточных водах. Проблема защиты окружающей среды становится острее и острее с каждым годом, поэтому исследования свойств наноцеллюлозы и сорбентов на ее основе актуальны как никогда из-за своей экологичности, хорошей возобновляемости и простоте применения.

Список источников

1. Химические аспекты бактериальной наноцеллюлозы / Г. В. Сакович [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2018. Т. 11, № 4. С. 531–542.
2. Zugenmaier P. Conformation and packing of various crystalline cellulose fibers // Progress in polymer science. 2001. Vol. 26, No. 9. P. 1341–1417.
3. Zugenmaier P. Crystalline cellulose and derivatives: characterization and structures. Berlin; Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008. 285 p.
4. Суров О. В., Воронова М. И., Захаров А. Г. Функциональные материалы на основе нанокристаллической целлюлозы // Успехи химии. 2017. Т. 86, № 10. С. 907–933.
5. Гайнуллина А., Никифорова Т. Е. Модифицирование хлопковой целлюлозы лимонной кислотой // NovaInfo.ru. 2015. Т. 1, № 31. С. 20–31.
6. Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: a nanotechnology perspective / B. L. Peng [et al.] // Canadian J. Chemical Engineering. 2011. Vol. 89, No. 5. P. 1191–1206.
7. Ioelovich M. Optimal conditions for isolation of nanocrystalline cellulose particles // Nanoscience and Nanotechnology. 2012, Vol. 2, No. 2. P. 9–13.
8. Физико-химические методы исследования и анализа / Е. И. Короткова [и др.]. Томск, 2011. 177 с.
9. Завадский А. Е. Рентгенографический метод экспресс анализа изменения удельной поверхности целлюлозных волокон // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 12. С. 18–22.
10. Леньшин А. С., Мараева Е. В. Исследование удельной поверхности перспективных пористых материалов и наноструктур методом тепловой десорбции азота // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2011. № 6. С. 9–16.
11. Исследование целлюлозы из альтернативных источников сырья методом растровой электронной микроскопии / А. А. Корчагина [и др.] // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья. Барнаул, 2020. С. 54.
12. Василенко Т. А., Мальцева А. К. Сорбция метиленового голубого и конго красного на основе минерального и растительного отхода // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования. 2021. С. 159–163.

13. Влияние механической обработки на структуру и свойства природного цеолита / А. Ю. Бузимов [и др.] // Перспективные материалы. 2018. № 4. С. 31–39.
14. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор / А. Н. Зарубина [и др.] // Лесной вестник/Forestry bulletin. 2019. Т. 23, № 5. С. 116–125.
15. Иванов А. Н., Малышев А. Н. Сравнение экономической эффективности природных и синтетических сорбентов // Актуальные проблемы экономики и управления. 2022. С. 151–155.
16. Коршунова Н. А. Биотехнологическое производство пищевых органических кислот // Сборник трудов IX Конгресса молодых учёных. СПб., 2021. С. 46–48.

References

1. Sakovich G. V., Skiba E. A., Gladysheva E. K., Budaeva V. V., Aleshina L. A. Himicheskie aspekty bakterial'noj nanocellyulozy [Chemical aspects of bacterial nanocellulose]. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Himiya* [Journal of the Siberian Federal University. Chemistry], 2018. Vol. 11, No. 4, pp. 531–542. (In Russ.).
2. Zugenmaier P. Conformation and packing of various crystalline cellulose fibers. *Progress in polymer science*, 2001, Vol. 26, No. 9, pp. 1341–1417.
3. Zugenmaier P. Crystalline cellulose and derivatives: characterization and structures. Berlin, Heidelberg, Springer Science & Business Media, 2008, 285 p.
4. Surov O. V., Voronova M. I., Zaharov A. G. Funkcional'nye materialy na osnove nanokristallicheskoj cellyulozy [Functional materials based on nanocrystalline cellulose]. *Uspekhi himii* [Advances in Chemistry], 2017, Vol. 86, No. 10, pp. 907–933. (In Russ.).
5. Gajnullina A., Nikiforova T. E. Modificirovanie hlopkovoj cellyulozy limonnoj kislotoj [Modification of cotton pulp with citric acid] *NovInfo. ru.* [NovInfo. ru.], 2015. Vol. 1, No. 31, pp. 20–31. (In Russ.).
6. Peng B. L., Dhar N., Liu H. L., Tam K. C. Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: a nanotechnology perspective. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2011, Vol. 89, No. 5, pp. 1191–1206.
7. Ioelovich M. Optimal conditions for isolation of nanocrystalline cellulose particles. *Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, Vol. 2, No. 2, pp. 9–13.
8. Korotkova E. I., Gindullina T. M., Dubova N. M., Voronova O. A. *Fiziko-himicheskie metody issledovaniya i analiza* [Physico-chemical methods of research and analysis]. Tomsk, 2011, 177 p.
9. Zavadskij A. E. Rentgenograficheskij metod ekspress analiza izmeneniya udel'noj poverhnosti cellyuloznyh volokon [Radiographic method of express analysis of changes in the specific surface area of cellulose fibers]. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Himiya i himicheskaya tekhnologiya* [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chemistry and chemical technology], 2015, Vol. 58, No. 12, pp. 18–22. (In Russ.).
10. Len'shin A. S., Maraeva E. V. Issledovanie udel'noj poverhnosti perspektivnykh poristykh materialov i nanostruktur metodom teplovoj desorbicii azota [Investigation of the specific surface area of promising porous materials and nanostructures by thermal nitrogen desorption]. *Izvestiya SPbGETU LETI* [News of SPbGETU LETI], 2011, No. 6, pp. 9–16. (In Russ.).
11. Korchagina A. A., Gismatulina YU. A., Budaeva V. V., Zolotuhin V. N., Bychin N. V., Sakovich G. V. Issledovanie cellyulozy iz al'ternativnykh istochnikov syr'ya metodom rastrovoj elektronnoj mikroskopii [The study of cellulose from alternative sources of raw materials by scanning electron microscopy]. *Novye dostizheniya v himii i himicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya* [New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials]. Barnaul, 2020, pp. 54.
12. Vasilenko T. A., Mal'ceva A. K. Sorbciya metilenovogo golubogo i kongo krasnogo na osnove mineral'nogo i rastitel'nogo othoda [Sorption of methylene blue and congo red based on mineral and vegetable waste]. *Bezopasnost', zashchita i ohrana okruzhayushchej prirodnoy sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* [Safety, protection and protection of the natural environment: fundamental and applied research], 2021, pp. 159–163.

13. Buzinov A. Y., Kulkov S. N., Gömze L. A., Géber R., Kocserha I. Vliyanie mekhanicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva prirodnogo ceolita [The effect of mechanical processing on the structure and properties of natural zeolite]. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2018, No. 4, pp. 31–39. (In Russ.).
14. Zarubina A. N., Ivankin A. N., Kuleznev A. S., Kochetkov V. A. Cellyuloza i nanocellyuloza. Obzor [Cellulose and nanocellulose. Review]. *Lesnoj vestnik/Forestry bulletin* [Forest bulletin/Forestry bulletin], 2019, Vol. 23, No. 5, pp. 116–125. (In Russ.).
15. Ivanov A. N., Malyshev A. N. Sravnenie ekonomicheskoy effektivnosti prirodnih i sinteticheskikh sorbentov [Comparison of the economic efficiency of natural and synthetic sorbents]. *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya* [Actual problems of economics and management], 2022, pp. 151–155.
16. Korshunova N. A. Biotekhnologicheskoe proizvodstvo pishchevyh organicheskikh kislot [Biotechnological production of food organic acids]. *Sbornik trudov IX Kongressa molodyh uchenyh* [Proceedings of the IX Congress of Young Scientists]. Saint Petersburg, 2021, pp. 46–48.

Информация об авторе

Е. М. Сучилина — магистрант.

Information about the author

E. M. Suchilina — Master's Degree Student.

Статья поступила в редакцию 26.03.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 26.03.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.