

УДК 577.114:547.455/458:547.992.3:547.995.12

В. С. Безбородов

Белорусский государственный технологический университет

**НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА
В СОВРЕМЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

Проведен анализ основных областей практического использования нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) и создания нового поколения материалов с уникальными свойствами. Показано, что исследования анизотропных природных биополимеров, самоорганизации в физико-химических системах, использование моделей биоэволюции являются одним из перспективных направлений развития современного материаловедения.

Ключевые слова: нанокристаллическая целлюлоза, анизотропные биополимеры, новые материалы, современное материаловедение.

V. S. Bezborodov

Belarusian State Technological University

NANOCRYSTALLINE CELLULOSE IN MODERN MATERIAL SCIENCE

The main areas of practical application of nanocrystalline cellulose (NCC) and creation of a new generation of materials with unique properties were analyzed. It is shown that studies of anisotropic natural biopolymers, self-organization in physical and chemical systems, use of bioevolution models are one of the promising directions of modern material science development

Key words: nanocrystalline cellulose, anisotropic biopolymers, new materials, modern materials science.

Введение. Биополимеры находят все более широкое применение, занимая устойчивое положение во многих отраслях промышленного производства. Комплекс свойств, характерный для них, позволяет создавать модифицированные материалы с уникальными параметрами и более широким спектром практического использования. К таким свойствам относится анизотропия, присущая большинству биополимеров, характеризующихся высокой упорядоченностью молекул друг относительно друга и способностью образовывать в определенных условиях жидкокристаллические фазы [1].

Методология создания новых материалов базируется на двух подходах, основанных на варьировании составов систем, используемых в качестве прекурсоров (исходного сырья), или варьировании процессов, включая синтез и условия последующей обработки полученных продуктов.

Сложные системы при определенных условиях способны реализовать согласованное поведение и конкретный путь развития. Спонтанное формирование новых типов систем и структур, переходы от хаотических (беспорядочных) режимов функционирования к порядку и организованной структуре в неравновесных системах, возникновение новых динамических состояний материи были детально изучены И. Пригожиным – лауреатом Нобелевской премии по химии (1977 г.) «за работы по термодинамике необратимых процессов, особенно

за теорию диссипативных структур» [2]. Было показано, что неравновесные термодинамические системы (*диссипативные структуры*) при определенных условиях, поглощая вещество и энергию из окружающего пространства, могут совершать качественный скачок к упорядочению и самоорганизации [3].

Управление процессами самоорганизации является актуальной задачей на пути к созданию новых функциональных материалов с заданными физико-химическими свойствами и разработке разнообразных устройств на их основе.

Основная часть. В данной публикации на примерах использования нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) рассмотрены перспективные направления развития современного материаловедения.

Очевидным подходом к контролю структуры самоорганизующихся систем является управление градиентными полями, определяющими силы притяжения и отталкивания ее элементов, а также, по нашему мнению, использование анизотропных материалов, которые будут способствовать созданию наведенной анизотропии, самоорганизации и упорядочиванию системы.

Учитывая, что большинство природных соединений и биополимеров – полисахариды, липиды и мембраны клеток, гликопротеины и полипептиды, РНК и ДНК характеризуются анизотропными свойствами; что возникновение

жизни на Земле может являться результатом химической эволюции (теории В. И. Вернадского, А. И. Опарины, Дж. Холдейна); что самоорганизация динамических структур (диссипативных), химических систем и органических молекул (теории И. Р. Пригожина, П. Ж. де Жена, ячейки К. А. Бенара) также является одним из возможных путей эволюции [3–5], мы предлагаем при разработке новых материалов и структур одновременно с условиями их получения рассматривать и учитывать *фактор (роль) анизотропии* – анизотропную форму надмолекулярной структуры и анизотропные свойства; способность к самоорганизации химических систем и органических молекул, обуславливающих региоселективность протекания реакций и образования комплементарных структур (супрамолекулярная химия).

Фундаментальный фактор анизотропии представляется определяющим в развитии современного материаловедения и создании новых поколений материалов с заданными физико-химическими свойствами.

Предлагаемые подходы получения новых материалов и анизотропных веществ, моделирования различных процессов базируются на закономерностях эволюционного развития природных органических соединений; многочисленных данных, полученных в последние десятилетия при изучении жидких кристаллов и упорядоченных сред; на использовании анизотропии молекул полифункциональных соединений для дизайна новых молекулярных структур (инженерия молекул), пленок, жидких кристаллов, мембран, мицелл и т. д. для создания анизотропных ансамблей и биологических систем.

Наиболее распространенными анизотропными биополимерами на планете являются структурные аналоги – целлюлоза и хитин, которые представляют линейные и довольно жесткие гомополимеры, имеющие между собой β -(1 $\rightarrow$ 4)-гликозидные связи, обуславливающие попарное расположение в полимерной цепи развернутых друг относительно друга β -D-

глюкопиранозных или 2-ацетамидо-2-дезоксиглюкопиранозных циклов (рис. 1) [1].

Высокая механическая прочность целлюлозы обусловлена образованием супрамолекулярных структур из полидисперсных линейных полимерных цепей, закрепленных сильными межмолекулярными водородными связями, которые позволяют создавать на основе целлюлозы уникальные легкие и сверхпрочные материалы, сравнимые по свойствам с металлами [6].

Элементами надмолекулярной структуры целлюлозы являются длинные наноразмерные нити – фибриллы, сформированные чередующимися кристаллическими и аморфными фрагментами, доля и размеры которых зависят от происхождения целлюлозы. Поперечный размер фибрилл целлюлозы в зависимости от ее происхождения может меняться от 3 до 50 нм [7].

Обработка целлюлозы кислотой (серной, соляной, фосфорной и др.) приводит к селективному гидролизу аморфных фрагментов и образованию индивидуальных нанокристаллических стержнеобразных частиц – нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) (рис. 2) [1].

Частицы НКЦ характеризуются анизотропной формой, размеры которых в зависимости от происхождения целлюлозы, условий гидролиза и последующей обработки варьируются от 10 до 1000 нм в длину и от 3 до 30 нм в диаметре [8].

Анизотропные свойства и хорошее упорядочение молекул целлюлозы дают возможность получать оригинальные высокоупорядоченные композиты с широким спектром практического использования путем включения биополимера в различные матрицы. Использование углеводных строительных блоков НКЦ в структуре матрицы позволяет не только улучшать мезоморфное поведение и свойства, но и контролировать упорядоченность структуры, биологическую функциональность (рис. 3).

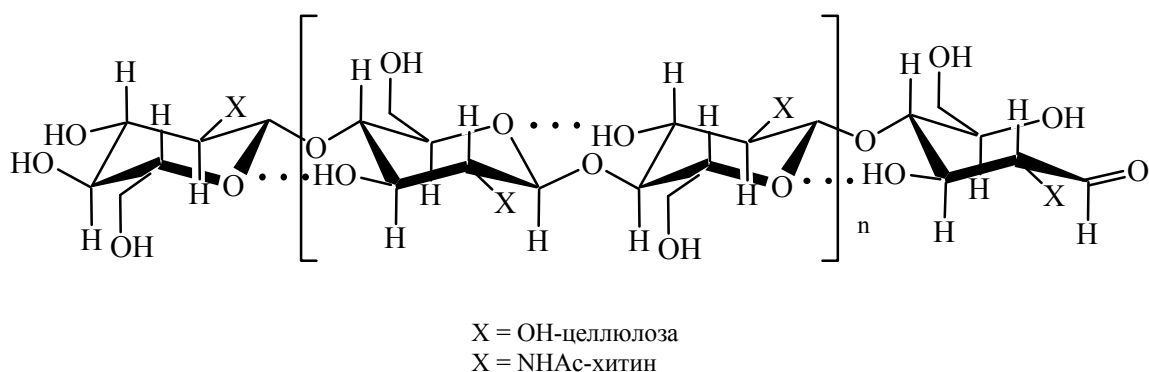


Рис. 1. Структурные формулы целлюлозы и хитина

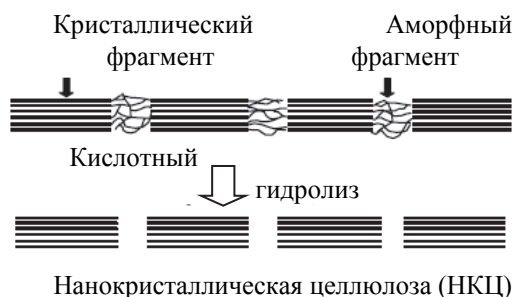


Рис. 2. Получение нанокристаллической целлюлозы (НКЦ)

Одним из явных потенциальных применений нанокристаллов целлюлозы является использование их в качестве армирующих добавок при производстве бумаги, картона, лакокрасочных материалов, различных пленок. Они улучшают не только механические свойства бумаги и картона, но и, способствуя равномерному распределению и стабилизации других добавок, например красителей, повышают эффективность их действия. Аналогичное поведение наблюдается и при добавлении нанокристаллической целлюлозы к лакокрасочным материалам. Увеличивается время их эксплуатации, возрастает устойчивость к внешним воздействиям, включая ультрафиолет, значительно улучшается качество покрытий и другие эксплуатационные параметры [9, 10].

Несомненный интерес представляет использование НКЦ для получения различных видов упаковки пищевых продуктов. Интерес связан не только с улучшением механических свойств классических видов упаковки – бумаги и картона, но и с возможностью создания качественно новых типов упаковки, включая пластиковые материалы и прозрачные пленки, позволяющих увеличить продолжительность хранения продуктов в различных условиях без изменения их качества.

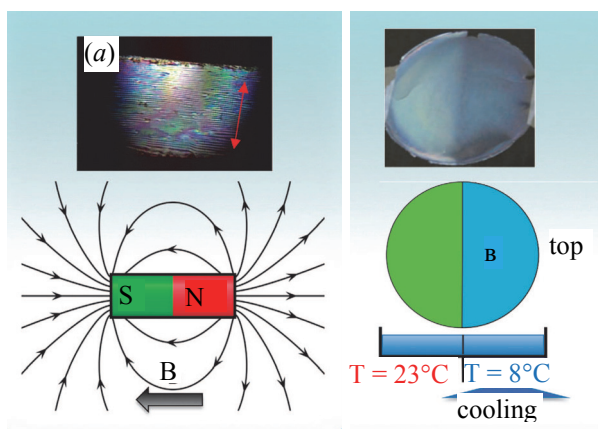


Рис. 3. Упорядочение НКЦ под действием магнитного поля и в результате контролируемой сушки

Кроме этого, биоразлагаемость, прозрачность и возможность создания материалов, обладающих влагоустойчивостью, антиоксидантными, противомикробными, другими полезными свойствами, несомненно, являются дополнительными стимулами активного роста исследований и производства упаковки продуктов питания и напитков с использованием НКЦ [11].

Хорошие адгезионные свойства, химическая устойчивость клеев с добавками НКЦ и значительное снижение при этом выбросов летучих органических веществ способствуют все более широкому использованию их в производстве древесноволокнистых плит, ламинатных панелей. А добавление нанокристаллической целлюлозы в цемент и бетонные смеси ускоряет процессы их гидратации и отверждения, позволяет улучшить механические свойства изделий, повысить прочность на изгиб в результате предотвращения роста микротрещин, образующихся в процессе отверждения [1].

Уникальные механические свойства, а также возможность создания легких, гибких, прочных материалов с низким коэффициентом теплового расширения лежат в основе создания различных конструкционных и изоляционных материалов для зданий и, особенно, материалов нового поколения для электронной промышленности. Из них в первую очередь следует отметить стекла для гибких панелей и экранов электронных устройств, например мобильных телефонов, компьютеров, телевизоров, сенсорных датчиков, солнечных элементов и др. Электропроводящая нанобумага, прозрачные и гибкие микроэлектроды, необходимые для производства небольших портативных электронных устройств, материалы для высокоскоростной печати (roll to roll), используемой в электронном производстве, также могут быть получены на основе НКЦ в комбинации с проводящими наночастицами и волокнами, такими как наночастицы золота, серебряные нанопроволоки и т. д. [12, 13].

Микро- и нанокристаллическая целлюлоза была успешно использована для замены различных элементов конструкций, связующих и активных материалов (электролитов) источников тока, устройств накопления и сохранения энергии: конденсаторов, литий-ионных батарей, солнечных панелей и т. д. Ожидается, что использование нанокристаллической целлюлозы в качестве функциональных составляющих и компонентов современных энергетических устройств и систем, дисплеев и устройств отображения информации приведет к новой парадигме развития инновационных материалов с широким спектром практического использования [14]. Данное предположение и перспектива более широкого использования целлюлозных

наноматериалов в различных областях науки и техники основаны:

- на новых подходах к их функционализации, модификации, упорядочению и самоорганизации;
- синтезе разнообразных функциональных производных НКЦ, представляющих практический интерес.

Следует добавить, что многие из (био) датчиков скоро будут созданы из целлюлозных наноматериалов и это поколение (био) сенсорных платформ может революционизировать обычные технологии зондирования.

Более широкое использование нанокристаллической целлюлозы в разработке и создании новых поколений материалов и устройств приведет к появлению эффективных и универсальных технологий создания простых, экономичных оптических/электрических аналитических устройств (датчиков), предназначенных для здравоохранения, клинической и медицинской диагностики, мониторинга окружающей среды, контроля качества пищевых продуктов, криминалистического анализа, физического и механического зондирования, маркировки и создания биоизображений.

Растущее число применений нанокристаллической целлюлозы в медицине и биомедицине также обусловлено превосходными физическими и биологическими свойствами (высокая удельная поверхность, адсорбционная способность, биосовместимость, биоразлагаемость и низкая токсичность). Они могут быть использованы в качестве вспомогательных материалов (экспципиентов) в фармацевтических композициях, ферментах; в средствах доставки лекарств, иммобилизации и распознавании белка; при изготовлении различных биоматериалов (заменителей кровеносных сосудов и мягких тканей, хрящей и костей), при восстановлении и заживлении кожи, в качестве антимикробных материалов. При этом биомедицинское применение целлюлозных наноматериалов может быть значительно расширено, как это было показано ранее, путем дополнительной их функционализации [15].

Нанокристаллическая целлюлоза является ценным косметическим ингредиентом, который улучшает свойства и качество кремов и мазей, способствует улучшению их восприятия на коже лица и тела. Благодаря высокой влагоудерживающей способности другим свойствам она позволяет стабилизировать дисперсию иных ингредиентов косметики в воде и повышает эффективность их действия [16].

Несомненный интерес представляет возможность использования нанокристаллической целлюлозы в качестве адсорбентов и эффективных фильтров (мембран) для очистки воды, воздуха и удаления различных загрязнений. Это

обусловлено большой удельной поверхностью, высокой поверхностной активностью (адсорбционной способностью) и экологичностью. В дополнение к вышеупомянутым свойствам наличие реакционноспособных центров позволяет вводить химические группы, повышающие адсорбционные свойства и эффективность связывания с загрязнителями. Эти качества дают возможность использовать НКЦ для производства фильтров, способных очищать все виды жидкостей, для опреснения морской воды, для удаления опасных химических веществ в газах [17].

Следует отметить, что большая удельная поверхность, высокая адсорбционная способность НКЦ находят применение и в создании высокоэффективных влагопоглощающих пористых пен и аэрогелей, способных удерживать более 10 000-кратное количество воды по отношению к исходному весу материала. В комбинации с суперадсорбирующими полимерами НКЦ используется для производства перевязочных материалов, подгузников, гигиенических салфеток или прокладок.

В последнее время интенсивно проводятся исследования, посвященные разработке методов минерализации целлюлозы, а также изучению характеристик, функциональности и сферам применения полученных из целлюлозы биокомпозитов и бионанокompозитов – материалов с добавлением микро- и наночастиц соответственно. В результате проведенных исследований было установлено, что минерализованная частицами кремнезема и серебра целлюлоза может стать водонепроницаемой (гидрофобной), пропускать нефть и полимеры и при этом самоочищаться. Если целлюлозу обработать наночастицами серебра, она приобретает антибактериальные свойства. Кроме этого, она становится проводником электричества, при том, что изначально целлюлоза – диэлектрик, т. е. происходит обращение ее электропроводящих свойств и характеристик. Минерализованная наночастицами целлюлоза также может защищать от ультрафиолета [18].

Благодаря специальной обработке кремнеземом она перестает впитывать влагу из атмосферы, что позволяет применить целлюлозу в электроприборах. Особенно актуально использовать минерализованную целлюлозу в текстильной, бумажной и пищевой индустрии, в электротехнике и электронике, биоинженерии, биотехнологиях и экологии. Ее можно использовать в области производства проводников, накопителей энергии и суперконденсаторов, для изготовления транзисторов и сенсоров.

Наиболее перспективной технологией получения минерализованной целлюлозы является золь-гель технология, позволяющая получать

соответствующие гели при погружении целлюлозы в водные растворы, содержащие микро- или наночастицы. При этом минерализация проводится при низких температурах без использования токсичных органических растворителей, кислот и щелочей. Технология не требует специального оборудования, а негативное воздействие на окружающую среду и человека минимально.

Основной интерес представляет бактериальная целлюлоза, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с ее растительными аналогами. Продуцируемые бактериями нановолокна являются более длинными и прочными, чем волокна растительной целлюлозы. Полученные на ее основе материалы отличаются повышенной эластичностью и отсутствием примесей гемицеллюлоз и лигнина, которые всегда сохраняются даже после самой тщательной очистки материала растительного происхождения. Бактериальная целлюлоза образует достаточно прочную гелевую пленку с определенной архитектурой из кристаллических микрофибрилл. Такая архитектура позволяет удерживать недоступное для растительной целлюлозы количество воды. Если в ходе биосинтеза добавить желатин, то образуется плотная и однородная пленка с улучшенной оптической прозрачностью и повышенной гигроскопичностью [19].

Бактериальную целлюлозу широко используют в медицине для производства искусственной кожи, поскольку она играет активную роль в стимулировании регенеративных процессов, помогая восстановлению базальной мембраны и ускоряя эпителизацию и рубцевание ран. Если такую пленку смочить физиологическим раствором, она приобретает прозрачность, эластичность и плотность – свойства, схожие с человеческой кожей. Кроме того, она обладает селективной проницаемостью для газов и пара, оставаясь барьером для воды и бактерий. Благодаря таким свойствам, гель-пленка микробной целлюлозы может служить матрицей-носителем практически для любых лекарств. Из нее создаются биофильтры, иммобилизующие микроорганизмы и ферменты для наружного и внутреннего применения в медицине. Такая пленка может быть использована в качестве искусственного хряща, прекурсора костной ткани и как универсальное покрытие при разных видах травм. Если в волокна бактериальной целлюлозы добавить крахмал, то получится продукт, похожий по структуре на пену. Полученные коллагеновые каркасы биологически активны и подходят для клеточной адгезии, поэтому они могут быть использованы для раневой повязки или в качестве искусственной ткани [20].

В текстильной промышленности бактериальную целлюлозу рассматривают как материал

для создания новых тканей, поскольку ее можно вырастить практически любой формы и толщины, используя для этого различные подложки.

Следует добавить, что в настоящее время бактериальную целлюлозу применяют в высокотехнической индустрии для производства новых материалов и нанокompозитов, в электронике. Микробная целлюлоза получила свое признание в бумажной промышленности и при изготовлении новых упаковочных материалов. Ей пророчат перспективное будущее в сфере охраны окружающей среды для очистки сточных вод. Биосинтез бактериальной целлюлозы экологически безупречен и может осуществляться с использованием дешевых источников углерода, например полуотходов разнообразных производств, содержащих углеводы и сахара.

Заключение. Таким образом, анизотропные свойства и хорошее упорядочение молекул природных биополимеров дают возможность получать оригинальные высокоупорядоченные композиты с широким спектром практического использования. Применение углеводных и пептидных строительных блоков в структуре сополимера позволяет не только улучшать мезоморфное поведение и свойства, но и контролировать упорядоченность структуры и его биологическую функциональность.

Анализ литературных данных и проведенные исследования показали [21], что среди потенциальных материалов, которые могут быть получены с использованием анизотропных свойств биополимеров, следует отметить:

- легкие и прочные композитные материалы (нити, пленки и т. д.);
- гибкие экраны;
- эффективные смазочные композиции, в основе которых лежит надмолекулярное структурирование и формирование мезофаз, в том числе эпитропных;
- эффективные фильтры;
- ультраабсорбирующие гели;
- лекарственные препараты нового поколения и эффективные материалы для медицины;
- биодатчики и биосенсоры.

Очевидно, что изучение анизотропных соединений, природных материалов, процессов самоорганизации в физико-химических системах, использование моделей биоэволюции являются основой развития современного материаловедения. В этой связи возникает необходимость перейти от химии индивидуальных молекул к супрамолекулярной химии анизотропных соединений, а именно, новому направлению исследований – *анизотропному материаловедению*, лежащих в основе создания природных материалов и жизни на Земле.

Предлагаемая методология является креативной, имеет целый ряд отличительных достоинств моделирования биологических систем, в сравнении с традиционными методами получения аналогичных структур, и с успехом может быть использована для создания новых поколений материалов, не уступающих по свойствам природным.

Можно констатировать, что биополимеры стали находить применение во всех сферах жизни

недеятельности человека: спорте, медицине, фармацевтике, косметологии, электронике. В наших силах можно лишь предугадывать весь потенциал природных анизотропных материалов, поскольку именно эта область будет ограничиваться только природой мышления человека и его фантазиями. Очевидно, что анизотропные природные материалы, способность их к самоорганизации выполняют огромную роль с момента мироздания всего живого на планете, а может и за ее пределами.

Список литературы

1. Habibi Y., Lucia L. A., Rojas O. J. Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications // *Chem. Rev.* 2010. Vol. 110. P. 3479–3500.
2. Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Charles C Thomas Publisher; Springfield; Illinois, 1955. 114 p.
3. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. J. Wiley & Sons; New York; London; Sydney; Toronto, 1977. 491 p.
4. Koschmieder E. L. Benard Cells and Taylor Vortices. Cambridge University Press, 1993. 337 p.
5. Pierre-Gilles de Gennes, Badoz, J. Fragile objects : soft matter, hard science, and the thrill of discovery. New York: Copernicus, 1996. 189 p.
6. Klemm D., Kramer F., Moritz S., Lindstrom T., Ankerfors M., Gray D., Dorris A. Nanocelluloses: a new family of nature-based materials // *Angew. Chem. Int. Edit.* 2011. Vol. 50. P. 5438–5466.
7. Moon R. J., Martini A., Nairn J., Simonsen J., Youngblood J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites // *Chem. Soc. Rev.* 2011. Vol. 40. P. 3941–3994.
8. Eichhorn S. J., Dufresne A., Aranguren M., Marcovich N. E., Capadona J. R., Rowan S. J., Weder C., Thielemans W., Roman M., Renneckar S., Gindl W., Veigel S., Keckes J., Yano H., Abe K., Nogi M., Nakagaito A. N., Mangalam A., Simonsen J., Benight A. S., Bismarck A., Berglund L. A., Peijs T. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites // *J. Mater. Sci.* 2010. Vol. 45. P. 1–33.
9. Desmaisons J., Gustafsson E., Dufresne A., Bras J. Hybrid nanopaper of cellulose nanofibrils and PET microfibers with high tear and crumpling resistance // *Cellulose*. 2018. Vol. 25. P. 7127–7142.
10. Kaboorani A., Auclair N., Riedl B., Landry V. Physical and morphological properties of UV-cured cellulose nanocrystal (CNC) based nanocomposite coatings for wood furniture // *Prog Org Coat.* 2016. Vol. 93. P. 17–22.
11. Li F., Mascheroni E., Piergiovanni L. The potential of nanocellulose in the packaging field: a review // *Packag Technol Sci.* 2015. Vol. 28. P. 475–508.
12. Kim D., Ko Y., Kwon G., Kim U.-J., You J. Micropatterning silver nanowire networks on cellulose nanopaper for transparent paper electronics // *ACS Appl Mater Interfaces.* 2018. Vol. 10. P. 38517–38525.
13. Lagerwall J. P. F., Scalia G. A new era for liquid crystal research: applications of liquid crystals in soft matter nano-, bio- and microtechnology // *Curr. Appl. Phys.* 2012. Vol. 12. P. 1387–1412.
14. Golmohammadi H., Morales-Narváez E., Naghdi T., Merkoçi A. Nanocellulose in sensing and biosensing // *Chem Mater.* 2017. Vol. 29. P. 5426–5446.
15. Fujisawa S., Togawa E., Kuroda K. Nanocellulose-stabilized Pickering emulsions and their applications // *Sci Technol Adv Mater.* 2017. Vol. 18. P. 959–971.
16. Abouzeid R.E., Khiari R., El-Wakil N., Dufresne A. Current state and new trends in the use of cellulose nanomaterials for waste water treatment // *Biomacromolecules.* 2019. Vol. 20. P. 573–597.
17. Sun X., Zhang Y., Chen G., Gai Z. Application of nanoparticles in enhanced oil recovery: a critical review of recent progress // *Energies.* 2017. Vol. 10. P. 345.
18. Kevin J., De France K. J., Hoare T., Cranston E. D. Review of hydrogels and aerogels containing nanocellulose // *Chem Mater.* 2017. Vol. 29. P. 4609–4631.
19. Lin N., Dufresne A. Nanocellulose in biomedicine: current status and future prospect // *Eur Polym J.* 2014. Vol. 59. P. 302–325.
20. Thomas S. A review of the physical, biological and clinical properties of a bacterial cellulose wound dressing // *J. Wound Care.* 2008. Vol. 17. P. 349–352.
21. Panchal P., Ogunsona E., Mekonnen T. Trends in Advanced Functional Material Applications of Nanocellulose // *Processes.* 2019. Vol. 7. P. 1–27.

References

1. Habibi Y., Lucia L. A., Rojas O. J. Cellulose Nanocrystals: Chemistry, Self-Assembly, and Applications. *Chem. Rev.*, 2010, vol. 110, pp. 3479–3500.
2. Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Charles C Thomas Publisher; Springfield; Illinois, 1955. 114 p.
3. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. J. Wiley & Sons; New York; London; Sydney; Toronto, 1977. 491 p.
4. Koschmieder E. L. Benard Cells and Taylor Vortices. Cambridge University Press, 1993, 337 p.
5. Pierre-Gilles de. Gennes, Badoz, J. Fragile objects: soft matter, hard science, and the thrill of discovery. New York, Copernicus, 1996. 189 p.
6. Klemm D., Kramer F., Moritz S., Lindstrom T., Ankerfors M., Gray D., Dorris A. Nanocelluloses: a new family of nature-based materials. *Angew. Chem. Int. Edit.*, 2011, vol. 50, pp. 5438–5466.
7. Moon R. J., Martini A., Nairn J., Simonsen J., Youngblood J. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chem. Soc. Rev.*, 2011, vol. 40, pp. 3941–3994.
8. Eichhorn S. J., Dufresne A., Aranguren M., Marcovich N. E., Capadona J. R., Rowan S. J., Weder C., Thielemans W., Roman M., Renneckar S., Gindl W., Veigel S., Keckes J., Yano H., Abe K., Nogi M., Nakagaito A. N., Mangalam A., Simonsen J., Benight A. S., Bismarck A., Berglund L. A., Peijs T. Review: current international research into cellulose nanofibres and nanocomposites. *J. Mater. Sci.*, 2010, vol. 45, pp. 1–33.
9. Desmaisons J., Gustafsson E., Dufresne A., Bras J. Hybrid nanopaper of cellulose nanofibrils and PET microfibers with high tear and crumpling resistance. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 7127–7142.
10. Kaboorani A., Auclair N., Riedl B., Landry V. Physical and morphological properties of UV-cured cellulose nanocrystal (CNC) based nanocomposite coatings for wood furniture. *Prog Org Coat.*, 2016, vol. 93, pp. 17–22.
11. Li F., Mascheroni E., Piergiovanni L. The potential of nanocellulose in the packaging field: a review. *Packag Technol Sci.*, 2015, vol. 28, pp. 475–508.
12. Kim D., Ko Y., Kwon G., Kim U.-J., You J. Micropatterning silver nanowire networks on cellulose nanopaper for transparent paper electronics. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, vol. 10, pp. 38517–38525.
13. Lagerwall J. P. F., Scalia G. A new era for liquid crystal research: applications of liquid crystals in soft matter nano-, bio- and microtechnology. *Curr. Appl. Phys.*, 2012, vol. 12, pp. 1387–1412.
14. Golmohammadi H., Morales-Narváez E., Naghdi T., Merkoçi A. Nanocellulose in sensing and biosensing. *Chem Mater.*, 2017, vol. 29, pp. 5426–5446.
15. Fujisawa S., Togawa E., Kuroda K. Nanocellulose-stabilized Pickering emulsions and their applications. *Sci Technol Adv Mater.*, 2017, vol. 18, pp. 959–971.
16. Abouzeid R. E., Khiari R., El-Wakil N., Dufresne A. Current state and new trends in the use of cellulose nanomaterials for waste water treatment. *Biomacromolecules*, 2019, vol 20, pp. 573–597.
17. Sun X., Zhang Y., Chen G., Gai Z. Application of nanoparticles in enhanced oil recovery: a critical review of recent progress. *Energies*, 2017, vol. 10, p. 345.
18. Kevin J., De France K. J., Hoare T., Cranston E. D. Review of hydrogels and aerogels containing nanocellulose. *Chem Mater.*, 2017, vol. 29, pp. 4609–4631.
19. Lin N., Dufresne A. Nanocellulose in biomedicine: current status and future prospect. *Eur Polym J.*, 2014, vol. 59, pp. 302–325.
20. Thomas S. A review of the physical, biological and clinical properties of a bacterial cellulose wound dressing. *J. Wound Care*, 2008, vol. 17, pp 349–352.
21. Panchal P., Ogunsona E., Mekonnen T. Trends in Advanced Functional Material Applications of Nanocellulose. *Processes*, 2019, vol. 7, pp. 1–27.

Информация об авторе

Безбородов Владимир Степанович – доктор химических наук, профессор кафедры органической химии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v_bezborodov@yahoo.com

Information about the author

Bezborodov Vladimir Stepanovich – DSc (Chemistry), Professor, the Department of Organic Chemistry. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v_bezborodov@yahoo.com.

Поступила 06.05.2020