

УДК 676.15

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ (ОБЗОР)

© *Е.А. Рогова^{1*}, Ю.Д. Алашкевич¹, В.А. Кожухов¹, И.Р. Лапин¹, Е.Г. Киселев^{2,3}*

¹ *Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. им. газеты Красноярский рабочий, 31, Красноярск, 660037, (Россия), e-mail: rogovaea@mail.sibsau.ru*

² *Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79/10, Красноярск, 660041 (Россия)*

³ *Институт биофизики СО РАН, Академгородок, 50/50, Красноярск, 660036 (Россия)*

Любой материал, который мы встречаем в окружающем нас мире, не имеет такого распространенного применения, как бактериальная целлюлоза. Этот своего рода уникальный материал получил свою популярность в XX веке и стал отличным источником для исследований. Его получение и практическое применение в различных областях нашей жизнедеятельности в настоящее время имеет достаточно большое значение. Помимо этого, благодаря широкому спектру исследований, направленных на основы его получения, было выявлено множество перспективных направлений использования побочных продуктов пищевой промышленности как источника энергии для роста, что делает данный материал более экологичным, чем его растительный аналог.

Несмотря на богатую историю изучения и получения бактериальной целлюлозы, она по настоящее время считается не до конца изученным материалом. Это дает возможность исследователям выявлять новые источники энергии для роста бактериальной целлюлозы, улучшать качества и увеличивать ее количество как в лабораторных, так и промышленных масштабах, а также искать все более новые области ее применения, там где, казалось бы, ей не место.

В современном научном мире бактериальная целлюлоза является одним из перспективных источников научных исследований и дальнейших технологических применений.

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, биореактор, инокулят, условия культивирования, применение бактериальной целлюлозы.

Введение

В век современных технологий и материалов все больше внимания уделяется экологичности и безопасности, где замкнутый цикл производства и его безотходность приравниваются к передовым технологиям. Целлюлоза растительного происхождения является наиболее распространенной на планете, ее получение из общей растительной биомассы составляет ~100–125 Гт в год [1]. Благодаря таким большим объемам целлюлоза растительного происхождения привлекает огромное внимание в качестве сырья для производства бумаги, биоразлагаемой упаковки, а также для биомедицинских применений [2]. Помимо растительного происхождения целлюлоза также может быть получена различными бактериальными штаммами, продуцирующими уксусную кислоту, принадлежащими к родам *Cetobacter*, *Gluconobacter*, *Gluconacetobacter* и

Рогова Екатерина Александровна – старший преподаватель, e-mail: kat-rogo@yandex.ru, rogovaea@mail.sibsau.ru

Алашкевич Юрий Давыдович – доктор технических наук, профессор, e-mail: alashkevichud@sibsau.ru

Кожухов Виктор Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: vkozhukhov@mail.ru

Лапин Илья Романович – магистрант, e-mail: ilya.lapin.99@list.ru

Киселев Евгений Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, e-mail: evgeniygek@gmail.com

* Автор, с которым следует вести переписку.

Komagateibacter. Это бактерии, обычно встречающиеся в ферментированных продуктах, таких как уксус, ната де коко, чайный гриб и гниющие фрукты, способные окислять спирты, альдегиды, сахар или сахарные спирты в присутствии кислорода до уксусной кислоты [3]. Известно, что виды родов *Glucanacetobacter* и *Komagateibacter* продуцируют влажный внеклеточный матрикс, изготовленный из кристаллической целлюлозы, в качестве защиты от высыхания и ультрафиолетового излучения, также называемый бактериальной целлюлозой (БЦ) [4].

Бактериальная целлюлоза – это уникальный биоматериал, который является по своей природе чистым материалом, в отличие от других биополимеров, которые требуют экстракции и очистки. Волокна бактериальной целлюлозы на порядок тоньше, чем волокна целлюлозы растительного происхождения. БЦ представляет собой высокопористые трехмерные сети. Кроме того, БЦ является биоразлагаемым, биосовместимым, нетоксичным и неаллергенным полимером. Высокая водопоглощающая способность и газопроницаемость гидрогеля БЦ обеспечивают обмен питательными веществами и материалами, необходимыми для выживания бактерий. БЦ способна удерживать влагу в соотношении 309 г воды на грамм сухого веса, выдерживает температуры до 150 °С, а подвергнутая химической обработке – до 275 °С [5], что позволяет высушивать ее без повреждения структуры. Несмотря на такие механические характеристики, бактериальная целлюлоза в то же время обладает хорошей упругостью, эластичностью, пластичностью.

С другой стороны, БЦ – это нанофибриллярный биоматериал. Микрофибриллы ВС расположены в четко определенной 3D-паутинной последовательности мономерных единиц, которые связаны регулярными β -1,4-гликозидными связями, обеспечивающими высокую механическую прочность, степень полимеризации, более высокий индекс кристалличности и прочность на разрыв по сравнению с растительной целлюлозой (рис. 1).

БЦ относится к целлюлозе I модификации. В настоящее время имеются сведения о шести модификациях целлюлозы: I, II, III_I, III_{II}, IV_I и IV_{II} [7]. Целлюлоза I, или нативная целлюлоза, – это форма, обнаруженная в природных материалах, которая имеет две модификации: I_α и I_β. Целлюлоза II, наиболее исследуемая форма, может быть получена из целлюлозы I двумя методами. Целлюлозы III_I и III_{II} образуются из целлюлозы I и II соответственно, при обработке в жидком аммонии или некоторых аминах и последующем выпаривании избытка аммония. Целлюлозы IV_I и IV_{II} могут быть получены путем отжига целлюлоз III_I и III_{II} соответственно при температуре порядка 200 °С [5].

БЦ является исключительно универсальным биоматериалом и представляет коммерческий интерес по причине ее природной чистоты, способности к разложению йода, биосовместимости и нецитотоксичности.

Благодаря нарастающей популярности к БЦ к 2022 году получено более 7500 патентов. Внушительная часть патентов была зарегистрирована во Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС) World Intellectual Property Organization (WIPO). Это связано с тем, что потенциал данного вида целлюлозы был рассмотрен именно зарубежными учеными. Впервые аналог бактериальной целлюлозы был получен А.Д. Брауном в 1886 году. Значительно позднее другой ученый из США С. Броун методом ферментации на основе сока сахарного тростника также получил прототип современной бактериальной целлюлозы. В 1931 году Тарром и Хиббертом была опубликована статья, в которой описывалась серия экспериментов по выращиванию бактерий рода *A. xylinum* на культуральных средах.

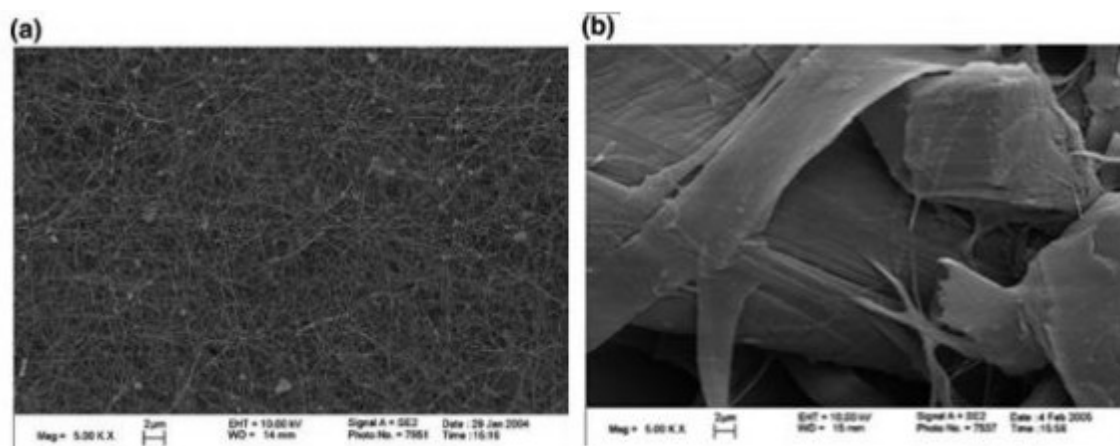


Рис. 1. Микроструктура БЦ (а) и растительной целлюлозы (б) при увеличении в 5000 раз [6]

При анализе литературы на сегодняшний момент рассматривают два способа получения композитного материала с применением БЦ: *in situ* и *ex situ* [8]. Для модификации *in situ* условия культивирования изменяются путем введения добавок или изменения источника углерода, что приводит к получению композитов на основе БЦ или БЦ с различными химическими, физическими, механическими или морфологическими характеристиками [8]. Модификация *ex situ*, с другой стороны, осуществляется непосредственно на очищенных пленках. Самый простой способ добиться этого – физическое поглощение активных веществ или механическое смешивание [8] (рис. 2).

Благодаря модификации БЦ по одному из типов, предложенных в [8], получают новые материалы, которые имеют свои уникальные свойства. Исходя из уникальности получаемых свойств, материалы находят свое применение в различных отраслях (рис. 3).

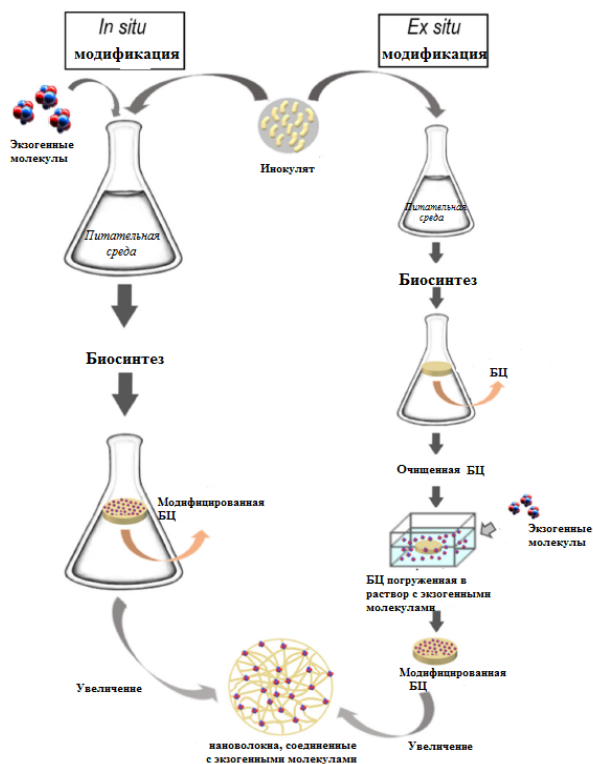


Рис. 2. Схема различия между модификациями *in situ* и *ex situ* при производстве БЦ [8]



Рис. 3. Применение бактериальной целлюлозы

Продукты

БЦ является полностью съедобным биополимером. Благодаря своей уникальной структуре волокна БЦ считаются низкокалорийными. Таким образом, в сочетании с другими пищевыми ингредиентами БЦ обладает высокой ценностью в пищевой промышленности [9]. В некоторых источниках [10] приведены доказательства, что БЦ является богатым источником клетчатки. Поэтому она становится перспективным продуктом для здоровья человека, включая снижение риска хронических заболеваний, таких как диабет, ожирение и сердечно-сосудистые заболевания. Высокие влагоудерживающие свойства БЦ совместно с ее железирующими, загущающими и стабилизирующими свойствами делают ее идеальным кандидатом для производства пищевых продуктов, таких как йогурт, выпечка, мороженое и колбасные изделия [11, 12]. Добавление БЦ в обработанные пищевые продукты может сохранить их сенсорные и первоначальные свойства в течение более длительного периода благодаря способности БЦ удерживать воду, не нарушая целостности своей формы. Необработанная БЦ имеет безвкусную и твердую текстуру, однако при обработке сахарными спиртами текстура становится мягче, напоминая виноград, тогда как обработка альгинатом и хлоридом кальция изменяет его текстуру, имитируя текстуру кальмара [3].

Медицина

В настоящее время БЦ используется в основном как медицинский материал. В чистом виде БЦ в медицине не применяется, используется только модифицированная БЦ для конкретных применений. Такие характеристики БЦ, как внутренняя биосовместимость, структурная изменчивость, надежная механическая прочность, трехмерная волокнистая структура, пористость, удержание воды и прозрачность, делает ее выдающимся биоматериалом, представляющим интерес для многих биомедицинских применений [12], в том числе в областях заживления ран, доставки лекарств, тканевой инженерии и искусственных кровеносных сосудов [13].

Пленки из БЦ – это идеальная повязка при пересадке кожи, лечении ран, послеоперационных швов и язв, а также гнойных воспалений, потертостей и пролежней. Они поддерживают оптимальный баланс влажности, стимулирующий заживление; отлично пропускают жидкости и газы; безболезненно наносятся и также безболезненно удаляются; активно насыщаются лекарственными препаратами и свободно отдают их в поврежденную зону; хорошо поглощают продукты распада тканей; служат почти непреодолимым физическим барьером для инфекции [14].

Активная роль БЦ заключается в стимулировании регенерационных процессов.

Трубчатые гель-пленки БЦ применяются в микрохирургии при протезировании кровеносных сосудов внутренним диаметром до 1 мм. Очень важно, что такие сосуды не закупориваются тромбами.

Разработки ученых [15] в области новых альтернатив для лечения локализованного рака позволили создать гидрогель на основе БЦ с липидными наночастицами. Он используется в качестве имплантата для местной доставки лекарств. В результате эксперимента против рака молочной железы гидрогель показал низкие уровни местной и системной токсичности, а также высокую эффективность в снижении опухолей, частоты метастазирования и нежелательных побочных эффектов, продемонстрировав, таким образом, высокий потенциал в его применении в качестве имплантируемой матрицы для местной химиотерапии [15].

Еще одним инновационным применением БЦ является его использование для профилактики инфекций при лечении зубов, таких как удаление зубов или трансплантация слизистой оболочки [16].

Косметика

БЦ обладает огромным потенциалом в области косметики и ухода за кожей, вследствие превосходных свойств материала, таких как биосовместимость, способность удерживать воду, способность поглощать и выделять вещества, а также отличные свойства адгезии к коже, обеспечивая при этом устойчивый вариант, который может заменить многие небiodeградируемые косметические компоненты [16].

В области косметики такие бренды, как Mary Kay™, Bio Enzymes™ и Leaders™, производят биоцеллюлозные маски для лица. Большое разнообразие этих продуктов можно отнести к вторичным соединениям, которые вводятся во время производства, таким как экстракты растений, богатые биологически активными соединениями, которые действуют на кожу и оказывают эффекты увлажнения и антиоксидантного действия, что помогает в оживлении тканей лица [8].

Биобетон

Бетон считается одним из прочных и долговечных материалов для строительства с момента его изобретения. Постоянная его модификация в сторону улучшения его механических характеристик в настоящее время привела к модификации бетона бактериальной целлюлозой и другими материалами микробиологического происхождения [17–20]. Вследствие такой модификации бетон начал стремиться в сторону экологически эффективных строительных материалов. БЦ позволяет получить биобетон за счет своих уникальных свойств [20]. Благодаря полученной модификации характеристики бетона и вновь разрабатываемые композиты на основе цемента получают уникальные механические, тепловые и электрические свойства. При добавлении волокон БЦ в бетон его с легкостью можно отнести к новому классу нетоксичных и экологически чистых материалов [21]. Отлично развитая пористая структура волокон бактериальной целлюлозы позволит ей быть в качестве агента, модифицирующего вязкость в самоуплотняющемся бетоне [22].

Нанесение покрытия из бактериальной целлюлозы на натуральные волокна стало эффективным способом изменения взаимодействия волокна и матрицы [23]. Похожий способ был использован при внесении БЦ в трещины бетонных конструкций. Близкое расстояние между волокнами БЦ, их максимальное присутствие на концах трещин, а также высокое соотношение сторон делают их эффективными в стабилизации и подавлении трещины [24]. Помимо этого, цементные композиты, имеющие в своем составе волокна БЦ, обладают более высокой вязкостью при разрушении, что позволяет бетонному материалу с трещинами дольше противостоять разрушению. Пониженная минерализация волокон, обеспечиваемая защитным слоем БЦ, ограничивает проникновение ионов щелочи из цементного раствора в поры между волокнами, тем самым стабилизируя трещины [24]. Покрытие БЦ ускоряет гидратацию на границе раздела фиброцемента, улучшив механическую блокировку внутренних структур.

Биоремедиация

Промышленные отходы часто выбрасываются в окружающую среду без какой-либо надлежащей обработки. Биоремедиация направлена на то, чтобы предложить постоянное решение этих проблем, преобразуя загрязняющие вещества в более мелкие молекулы, такие как CO_2 и H_2O , путем использования микроорганизмов или превращения их в полезные продукты. Для этих целей была разработана ультрафильтрационная мембрана с использованием БЦ, полученная из чайного гриба [25]. БЦ широко используется в биоремедиации в форме функционализированной БЦ, использующей для адсорбции специфических загрязняющих веществ [25].

Авторы [26] получили адсорбирующий материал, который использовался для удаления тяжелых металлов из сточных вод. Более конкретно, экстракт пандана добавляли во время бактериальной ферментации, что приводило к получению композитов БЦ-Пандан. Пандан – это тропическое растение, листья которого богаты 2-ацетил-1-пирролином, соединением, широко известным в пищевой промышленности, которое также продемонстрировало способность улавливать тяжелые металлы благодаря наличию двух функциональных групп, то есть циклического азота и кетона.

Способность полученного материала к удалению загрязнений была протестирована на сточных водах, содержащих хром (VI). Анализ показал пропорциональную зависимость между эффективностью удаления и содержанием 2AP, с максимальной эффективностью удаления более 80% для композита, биосинтезированного в неразбавленном экстракте пандана [26].

Упаковка

Оборот товаров и услуг растет по мере увеличения человеческой деятельности из-за быстрого роста населения. Это привело к экологической катастрофе, связанной с использованием пластиковой упаковки. Большинство стран приняли законы по сокращению нежелательных последствий использования нефтехимических или синтетических пластмасс. Воздействие неразлагаемых твердых отходов на окружающую среду, например, океаны и свалки, побудило к тщательному поиску устойчивых и экологически чистых решений в области упаковки. В России считается, что пластмассы на нефтяной основе занимают третье место из всех муниципальных отходов, из которых только 2,2% перерабатываются безопасно [27]. По сути, токсическое воздействие накопления или сжигания этих отходов и требования безопасности к пищевым материалам переключили внимание на биоразлагаемые ресурсы или биопластики для упаковочных решений. Экономичная и экологичная упаковка может сократить количество пищевых отходов [28] и снизить выбросы углекислого газа [29]. Каждый год около 50% фруктов и овощей выращиваются впустую.

Пленки и покрытия на биологической основе представляют собой мембраны, состоящие в основном из макромолекулярной матрицы и пластификатора или других компонентов, которые обычно применяются для уменьшения присущей некоторым биопластикам хрупкости и улучшения их механических и барьерных свойств [11, 30]

Авторами [31] было получено съедобное и моющее покрытие толщиной в микрометр, состоящее из яичного альбумина (54%) и нанокристаллов целлюлозы растительного происхождения, которые могут увеличить срок годности фруктов. Покрытие папайи, авокадо, бананов и клубники позволило увеличить срок годности фруктов при сохранении их вкусовых качеств. Таким образом, белковое покрытие служило кислородным барьером и сохраняло свежесть фруктов. Для обеспечения механического усиления были включены нанокристаллы целлюлозы, что еще больше снизило водо- и газопроницаемость материала покрытия. Пленка сохраняла гибкость, позволяя многократно сгибать и складывать ее без разрыва. Добавление небольшой доли яичного желтка в смесь уменьшило восприимчивость к влаге. Кроме того, включение куркумина в процесс нанесения покрытия придавало покрытой поверхности антибактериальные, противогрибковые и антибиопленочные свойства [11, 31]. Нанокристаллы целлюлозы, использованные в исследовании, были получены из БЦ. Упаковка для пищевых продуктов служит контейнером для защиты от риска попадания загрязняющих веществ, микроорганизмов и посторонних запахов, что способствует продлению срока годности. В последнее время все чаще исследуется пригодность модификаций БЦ или чистой БЦ в качестве материалов для упаковки пищевых продуктов с дополнительными преимуществами, такими как антимикробные свойства для предотвращения порчи. Многие исследования подтвердили, что присутствие антимикробных агентов природного происхождения в системах упаковки пищевых продуктов продлевает сроки годности и поддерживает качество пищевых продуктов [32]. Авторы [33] получили антимикробные пищевые прокладки, изготовленные из суперабсорбирующих материалов, таких как бактериальная целлюлоза и ее модификаций, и доказали, что они способны сохранять вкусовые свойства упакованных пищевых продуктов, таких как фрукты, овощи и мясные продукты [11, 33]. Будучи съедобной, БЦ также может обеспечить съедобную упаковку с уникальными питательными и подходящими физико-механическими характеристиками [34]. Одним из препятствий по коммерческому внедрению упаковок пищевых продуктов на биологической основе является то, что биополимеры не обладают универсальностью синтетических полимеров [33]. Таким образом, текущее исследование было направлено на решение этой проблемы путем формирования различных композиций и полимерных композитов, которые могли бы имитировать универсальность синтетических пластмасс в зависимости от требований интересующей области применения. Важно отметить, что в соответствии с гигиеническими требованиями для некоторых пищевых пленок и покрытий может потребоваться дополнительная внешняя упаковка.

Получение упаковочных материалов для пищевых продуктов с сохранением их первоначальных свойств побудило авторов [35] к разработке нового материала на основе термопластичного кукурузного крахмала и волокон бактериальной целлюлозы. В своей работе авторы получают композит с оптимальным составом, в котором максимальная доля волокон бактериальной целлюлозы составляет не более 15% от общего объема. Свойства полученного материала были исследованы и показали, что при добавлении волокон бактериальной целлюлозы барьерные свойства улучшаются, жесткость увеличивается, что приводит к увеличению модуля упругости материала.

В своей статье [36] авторы рассматривают получение композитных материалов с применением волокон бактериальной целлюлозы. Особый интерес у авторов возник к материалу, полученному авторами М. Salagi и др. [37]. Данная разработка представляет собой нанокompозит, содержащий хитозан, нанокристаллы бактериальной целлюлозы и наночастицы серебра. Нанокристаллы БЦ были получены с помощью кислотного гидролиза. Результаты показали, что вводимые модифицирующие вещества значительно влияют на цвет и прозрачность пленок хитозана. Кроме того, значительно улучшаются механические свойства нанокompозита, а также его паропроницаемость и чувствительность к воде. Также было выявлено, что нанокompозитная пленка проявляет значительную антибактериальную активность в отношении пищевых патогенов, что позволяет предположить, что модифицированные серебром и нановолокнами БЦ, нанокompозитные пленки могут быть применены в активной упаковке пищевых продуктов для увеличения срока годности пищевых продуктов [36].

Применение различных модифицирующих веществ в составе БЦ одним из способов модификации приводит к получению новых материалов с особыми свойствами. Авторы статьи [38] добавили лауриновую кислоту в пленки из бактериальной целлюлозы и успешно разработали биоразлагаемый и антимикробный

материал, который может найти применение в пищевой, медицинской и фармацевтической областях. Исследование показало, что добавление лауриновой кислоты улучшило функциональность пленок БЦ за счет эффективного ингибирования роста *Bacillus subtilis*. Эта модель пленки БЦ оказалась хорошим кандидатом на замену синтетических пластмасс в упаковочной деятельности [38]. Применяя в модификации БЦ веществ имеющих антимикробные или иные свойства, можно получать упаковочные материалы различного назначения. В настоящее время это самая перспективная область применения БЦ в мире.

Суперабсорбирующие полимеры

Основные потребности человека в абсорбирующих материалах за прошедшие годы не изменились, но значительно изменились требования предъявляемые к ним. Рыночная стоимость суперабсорбирующих полимеров в 2016 г. составляла 120 млрд долл. США, которая, как ожидается, будет ежегодно расти со скоростью 6% и достигнет примерно 203 млрд к 2025 г. [3, 39]. Существует высокий спрос на подгузники, средства женской гигиены, средства от недержания мочи у взрослых, а также на применение в сельском хозяйстве для контролируемого высвобождения удобрений [3, 40] и абсорбирующих систем для носимых искусственных почек [3, 41].

Чтобы квалифицироваться как суперабсорбент, сухой материал должен самопроизвольно впитывать примерно в двадцать раз больше собственной массы жидкости. Как указывалось выше, 1 г сухого вещества БЦ способен удержать 309 г воды [5], что делает БЦ суперсорбентом.

В настоящее время наиболее часто используемые суперсорбенты производятся из невозобновляемых и не поддающихся биологическому разложению полимеров, поэтому повышенный интерес к биоразлагаемым и натуральным полимерам для разработки суперсорбентам привлекает внимание [42].

Бумага

Основным сырьем для производства бумаги считается растительное сырье, а именно хвойные и лиственные деревья. Хотя это сырье и считается возобновляемым, с каждым годом все острее становится вопрос экологической катастрофы, связанной с неограниченной вырубкой лесов. Для решения этого вопроса все чаще стали обращаться к альтернативным источникам сырья. К альтернативным источникам сырья можно отнести переработанную бумагу и не древесные волокна.

В 2014 г. говорилось, что 58% бумаги, произведенной во всем мире, было переработано [43], однако самой большой проблемой для переработанной бумаги является сохранение первоначальных физических и механических свойств. В настоящее время основными недревесными источниками бумаги являются багасса сахарного тростника, тростник, бамбук, солома злаков и тростник, на долю которых приходится всего 6.5% всей целлюлозы, производимой ежегодно [43], однако физические свойства этих бумаг уступают традиционно производимой бумаге. Для улучшения качества бумаги из переработанного сырья все чаще применяют композиции из различного рода сырья. Как говорилось ранее, БЦ обладает способностью улучшать механические свойства материалов, с которыми она сочетается, и, следовательно, является подходящим кандидатом для производства высококачественной бумаги [44].

Авторами в работе [45] было доказано, что БЦ является сверхпрочной добавкой в производстве бумаги благодаря своим хорошо фибрированным волокнам [45]. Уникальная молекулярная структура БЦ, обусловленная водородными связями, обеспечивает модуль упругости порядка 15 МПа. БЦ активно начала использоваться в производстве бумаги с конца 80-х годов прошлого века. Она применяется либо в чистом виде, либо в композиции с традиционным и нетрадиционным сырьем для получения высококачественной, прочной бумаги [11]. Модифицированная БЦ также продемонстрировала потенциал в производстве специализированной и огнестойкой бумаги [43]. БЦ обладает необходимыми характеристиками для упрочнения разрушенной бумаги благодаря своей высокой кристалличности, высокому модулю упругости, низкой внутренней пористости и долговременной стабильности, что делает БЦ идеальным материалом-кандидатом в производстве бумаги [3].

Исследование, проведенное авторами [46], оценило БЦ при восстановлении поврежденной бумаги. Исследование проводилось при сравнении изменений внешнего вида печатных бумаг, покрытых БЦ и японской бумагой (патент JP 63295793). Всего рассматривалось четыре различных типа коммерческой бумаги с покрытием и без покрытия, включая глянцевую бумагу, матовую бумагу, бумагу без покрытия и бумагу с суперкаландрированием. Ожидалось, что армирующий материал закрепит свойства бумаги без изменения ее внешнего вида. Бумага, усиленная японским аналогом, показала снижение плотности печати до >0.5

пунктов плотности, в то время как у бумаги с нанесением из БЦ это значение лишь незначительно уменьшилось до <0.05 . Подвергая образцы процессу старения, бумага с БЦ продемонстрировала значительное преимущество перед бумагой с японским покрытием для восстановления бумаги с незначительными изменениями цвета и внешнего вида [46].

Также применение БЦ было использовано при разработке магнитной бумаги или магнитных мембран для защиты от подделки. Авторы работы [47] изготовили белую магнитную бумагу из композитной многослойной структуры, состоящей из магнитной БЦ, которая была получена путем включения наночастиц CoFe_2O_4 в структуру БЦ, легированной ZnO , с помощью процедуры горячего прессования и нанокompозита. Бумага имела белизну 75–85%, что соответствовало высокой отражательной способности в видимом спектральном диапазоне. Кроме того, белая магнитная бумага обладала физическими и механическими свойствами, такими как гибкость, складываемость и свертываемость, аналогичными традиционной бумаге [47].

Россия также не отстает от своих зарубежных коллег в плане получения композитной бумаги с вводом в ее состав волокон БЦ. Авторами работы [48] была получена оптимальная композиция между БЦ и хвойной целлюлозой. В своей работе они получают бумагу с различным % составом между БЦ и хвойной целлюлозой, исследуют все физико-механические свойства полученных бумаг. Приходят к выводу, что оптимальное соотношение между БЦ и хвойной целлюлозой должно быть следующее: 20% БЦ и 80 ХЦ. Данная бумага имеет самые оптимальные свойства в сравнении со 100% составом ХЦ: сопротивление раздиранию – больше на 37% (1090 против 795 мН), сопротивление продавливанию – больше на 17% (440 против 375 кПа), и деформационных показателей: жесткость при растяжении – больше на 66% (736 против 443 кН/м), работа разрушения – на 8% (135.9 против 125.7 Дж/м²), разрывная длина – больше на 4% (7870 против 7530 м) [48].

Однако в настоящее время недостатком использования БЦ для этих применений является высокая стоимость, связанная с производством БЦ, и поэтому в настоящее время основное внимание уделяется более эффективному производству БЦ. Хорошей отправной точкой для этого являются ранее упомянутые биореакторы, а также использование отходов в качестве субстратов для процесса ферментации.

Электропроводящие био пленки

После осаждения на БЦ металлов она может использоваться в качестве электродов для водородных топливных элементов. Применяют структурно-однородные мембраны на основе БЦ, а также изотропных поливинилспиртовых пленок, что позволяет существенно уменьшить ошибку измерения осмотического давления, а, следовательно, и молекулярной массы.

Бактерии естественным образом формируют био пленки на электродах. Именно благодаря этому свойству начались поиски способов превратить бактериальную пленку в электропроводящий интерфейс.

Био пленки БЦ, обладающие электропроводящими свойствами, самопроизвольно «подключаются» к электродам и образуют белковые связи, по которым электроны могут свободно переходить из бактериальной клетки в электрод и обратно, а также переходить между клетками. Такие био пленки, как и рассмотренные выше, обеспечивают регенерацию и репликацию, а значит и стабильность подобных покрытий. Эти свойства уже используются в конструировании микробных топливных элементов (МТЭ). Некоторые бактерии, в частности, *Geobacter sulfurreducens*, могут катализировать химические реакции, например, окисление ацетатов. Наконец, теоретически возможно создание бактериальных сенсоров, которые позволяли бы отличать друг от друга конкретные окислительно-восстановительные реакции в зависимости от свойств электрохимических реакций, улавливаемых био пленкой [3].

Электроника и датчики

Еще одной ключевой областью применения БЦ является ее использование в электронных приложениях, что непреднамеренно означает, что компоненты становятся более устойчивыми и пригодными для вторичной переработки. Авторы работы [49] использовали восстановленный оксид графена для улучшения электропроводности БЦ, а также его механических характеристик. Было обнаружено, что листы восстановленного оксида графена однородно включены в сеть БЦ также благодаря восстанавливающей способности гидроксильных групп на ее поверхности, что улучшает их дисперсию, а также взаимосвязь между двумя системами. Нанокompозиты показали значительное увеличение предела прочности при растяжении, модуля упругости и значений ударной вязкости по сравнению с чистой БЦ для всех концентраций восстановленного оксида графена. В дополнение к этому была получена электропроводность около 140–150 $\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ для пленки, содержащей 3% восстановленного оксида графена. Это подтверждает, что материал обладает подходящими

характеристиками для разработки гибких электронных устройств, включая отдельно стоящие пленки и электронику на бумажной основе [3, 49].

Современные маркетинговые стратегии направлены на разработку устройств, которые являются устойчивыми, а также гибкими для использования в устройствах человеко-машинного интерфейса, системах медицинского мониторинга и других носимых устройствах.

К ним относятся электронная бумага, гибкие дисплеи на органических светодиодах, бесчисленное множество других электронных компонентов, а также гибкие устройства хранения энергии [3, 50]. Ключевым материалом для изготовления этих устройств является целлюлоза, которая считается превосходным природным биополимером с хорошей способностью к биологическому разложению, механическими характеристиками, пьезоэлектричеством и диэлектричеством. Как упоминалось ранее, по сравнению с целлюлозой на растительной основе, БЦ обладает явными преимуществами, из которых ключевым преимуществом для электронных приложений является более высокая стойкость к изоляционным / ионным жидкостям [51]. Одним из важных технологических приемов использования БЦ для электронных приложений является карбонизация БЦ, при этом вся структура БЦ преобразуется в высокопроводящую углеродную сетку в соответствии со структурой 3D нановолокнистой сети БЦ образца [52]. Это часто называют карбонизированной бактериальной целлюлозой. Было показано, что структуры являются отличным электродным материалом для гибких запоминающих устройств, таких как конденсаторы с достаточным пространством для электролитов, и, как сообщается, обладают превосходной механической стабильностью при изгибе и растяжении [52].

Следует отметить, что БЦ обладает многими физическими преимуществами для использования при изготовлении электронных устройств по сравнению с целлюлозой на растительной основе и, следовательно, имеет большие перспективы для будущих применений в этой области, которая нуждается в расширении. Кроме того, большинство, если не все применения целлюлозы на растительной основе должны быть перенесены на БЦ, и благодаря улучшенным характеристикам, которые она имеет по сравнению с растительной целлюлозой, существует большой потенциал для производства устройств более высокого качества.

Способы получения БЦ

Вследствие того, что БЦ нашла широкое применение в различных областях, все больше внимание уделяется эффективным способам ее получения с помощью различных штаммов бактерий при различных условиях культивирования.

Условия производства БЦ полностью зависят от ее дальнейшего назначения. Существует множество способов выращивания БЦ. Все эти способы можно объединить в два основных: стационарное и глубинное культивирование (статическое и динамическое).

При стационарном способе получают пленки БЦ. Основным недостатком такого способа культивирования является высокая стоимость производства из-за использования ручного труда.

В условиях глубинного культивирования бактериальная целлюлоза синтезируется в виде сфер с различным диаметром, либо в виде волокон. Такой способ культивирования является более подходящим для промышленного производства, так как может осуществляться в ферментерах, может быть максимально автоматизирован и, соответственно, исключает ручной труд [53].

В настоящее время к бактериям, продуцирующим целлюлозу, относятся роды *Acetobacter*, *Gluconobacter*, *Komagataeibacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium* и *Sarcina*. Наиболее широко известной бактерией для производства БЦ является *Komagataeibacter* (ранее *Gluconacetobacter*) *xylinus*, аэробная бактерия, которая может эффективно метаболизировать широкий спектр источников углерода и азота для получения БЦ [54]. Традиционной питательной средой, используемой для производства БЦ, является среда Хестрина и Шрамма (ХШ), содержащая глюкозу, пептон и дрожжевой экстракт в качестве источников углерода и азота [55].

Исследования показали, что наилучший выход БЦ получается путем добавления метанола в среду ХШ [56] и добавления небольшого количества эндоглюканазы в инокулят. Для сокращения расходов и увеличения выхода БЦ было исследовано использование сельскохозяйственных отходов и промышленных побочных продуктов в качестве недорогой среды для производства БК [57, 58]. В настоящее время самое масштабное исследование было проведено авторами [59]. БЦ была получена из шелухи овса, сельскохозяйственного остатка с использованием симбиотической культуры *Medusomycesisevii*. Авторы предварительно обработали овсяную шелуху 2–6% растворами HNO_3 , которую подвергли ферментативному гидролизу с получением раствора, богатого сахаром, который использовали в качестве субстрата для производства БЦ.

Опытно-промышленное производство из овсяной шелухи привело к получению 80.5 тонн гидрогеля с 98% влажностью на 100 тонн овсяной шелухи [59].

За последнее время модификация среды ХШ очень разнообразна. Главная задача такой модификации – получить наибольший выход готового продукта при минимальных затратах. В таблице представлены различные субстраты для производства БЦ с указанием максимального выхода по каждому.

Помимо источника глюкозы на процесс образования БЦ так же влияет значения рН среды. Оптимальное значение рН среды зависит от штамма продуцента и обычно находится в пределах от 4.0 до 7.0. Начальное значение рН 4.0 и 5.0 способствует высокому уровню образования БЦ [60, 61]. В процессе жизнедеятельности бактерий образуются органические кислоты, в частности глюконовая кислота, снижающая рН, поэтому поддержка уровня рН жизненно необходима [62]. Однако в этом же исследовании авторы получили подтверждение, что бактерии могут самостоятельно регулировать значение рН, но не в тех пределах, которые необходимы. Другие авторы [63] в своем исследовании получили выход БЦ 5.89 г/л, что в 1.5 раза выше, чем выход БЦ при доведении значения рН до постоянного 5.0.

При проведении ряда исследований по влиянию температуры на выход БЦ было подтверждено, что температура является важным параметром. Она влияет и на рост микроорганизмов, и на синтез БЦ. В большинстве экспериментов максимальный выход целлюлозы достигается при температуре 28–30 °С. В одном из экспериментов исследовалось образование БЦ при различных температурах, в пределах от 20 до 40 °С в динамических условиях. Оптимальной оказалась температура 30 °С [64, 65].

Многочисленные исследования показали, что кислород является важным фактором для роста клеток и синтеза БЦ различными продуцентами, так как в основной своей массе они являются аэробами [66]. Если подобрать среды с различным начальным количеством растворенного кислорода, то можно определить условия индукции биосинтеза полимера. Результаты исследований показали: в течение первых часов культивирования количество растворенного кислорода во всех питательных средах потребляется активно и появление пленок бактериальной целлюлозы инициируется уже через 24 ч на тех питательных средах, в которых начальное количество кислорода было более 2.5 мг/л [60, 66]. Высокая концентрация растворенного кислорода в среде повышает концентрацию глюконовой кислоты, которая снижает выход БЦ [64]. Авторы работы [67] исследовали влияние концентрации растворенного кислорода от 2 до 15% от насыщения в культуре с подпиткой и показали, что 10% насыщение среды растворенным кислородом вызвало наибольший выход БЦ – 15.3 г/л по сравнению с 10.2 г/л с концентрацией растворенного кислорода 2%. В другом исследовании концентрация растворенного кислорода в 10-литровом ферментере с двумя турбинами для автоматического изменения скорости перемешивания варьировалось от 20 до 40% от концентрации насыщения. Оптимальная концентрация растворенного кислорода для производства БЦ составила 30% [68].

При проведении исследований по получению оптимальных условий культивирования и выявления лучшей модификации среды ХШ в лабораторных исследованиях применялся общий процесс получения БЦ от культивирования организма до конечного продукта применения. Весь процесс схематично представлен на рисунке 4.

Общий процесс включает в себя следующие этапы: отбор и выращивание чистой бактериальной культуры в лабораторных условиях; составление композиции инокулята; производство БЦ одним из известных способов; очистка. Очищенная БЦ может применяться как в чистом виде, так и подвергаться функционализации, в зависимости от дальнейшего ее применения.

Основным оборудованием при культивировании БЦ являются лабораторные биореакторы, которые представляют собой стеклянные ванны различной формы и размеров. Такое оборудование применяется для статического культивирования и получения БЦ в виде пленок. Пример таких биореакторов представлен на рисунке 5. Для ускорения процесса культивирования и получения большего выхода БЦ авторами статьи [69] был предложен способ усовершенствования данного типа биореактора путем добавления воздушных потоков между крышкой биореактора и инокулятом. Такая модификация, казалось бы, обычного лабораторного оборудования позволила авторам увеличить его производительность на 65% [69].

Однако этот метод статического культивирования требует больших площадей поверхности и длительных периодов культивирования, что может препятствовать массовому производству. За последнее время было разработано несколько других биореакторов, которые могут производить пленки БЦ с более высокими выходами в статических условиях. Примером такого оборудования является горизонтальный биореактор, показанный на рисунке 6.

Различные субстраты, используемые для производства БЦ [60]

Субстрат	Выход БЦ (сухого вещества на объем среды)
Среда ХШ	2.73 г/л
Свекловичная меласса	Увеличение на 31% по сравнению со средой ХШ
Меласса	1.6 г/л
Тростниковая меласса	Увеличивается на 190–225% по сравнению со средой ХШ
Апельсиновый и ананасовый сок	Увеличивается на 31 % по сравнению со средой ХШ
Ананасовый сок и кожура	Сопоставимы по продуктивности со средой ХШ
Кислотный гидролизат кукурузных початков	4 г/л
Сырой глицерин и гидролизат жмыха подсолнечника	13.3 г/л
Финиковый сироп	В 3 раза выше, чем на среде ХШ
Мучные гидролизаты (из отходов кондитерской промышленности)	13 г/л
Мука из луковицы растения аморфофаллус коньяк	В 3 раза выше, чем на среде ХШ
Лигноцеллюлоза биопереработки сточных вод	20 г/л
Кленовый сироп	Сопоставимо со средой ХШ
Гидролизат пшеничной соломы	8.31 г/л

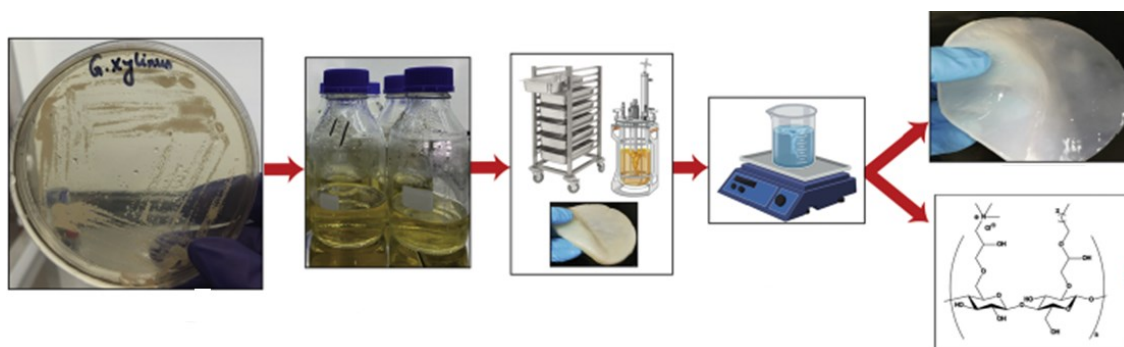


Рис. 4. Схема общего процесса получения БЦ [3]

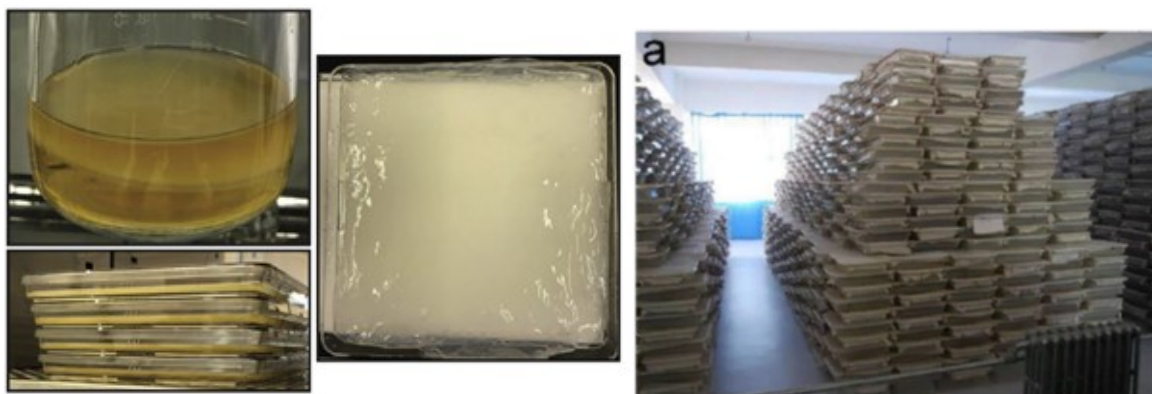


Рис. 5. Лабораторные биореакторы [3]



Рис. 6. Горизонтальный биореактор [3]

Применение авторами [70] горизонтального биореактора при производстве БЦ полунепрерывным способом позволило увеличить производительность в 7.5 раза по сравнению с периодическим действием, что позволило в дальнейшем получать пленки БЦ в промышленных масштабах. Данный тип биореактора также применяется только для статического культивирования и получения БЦ в виде пленки.

Аэрозольный биореактор, показанный на рисунке 7, был разработан авторами [71] в 2007 г. и имел ряд преимуществ по сравнению со своими предшественниками. Данный тип биореактора позволяет получать БЦ в виде пленки полустатическим способом. Преимущества данного биореактора заключается в том, что глюкоза, необходимая для жизнедеятельности бактерий, подается в виде аэрозоля непосредственно в зону контакта между средой и воздушным пространством. Это позволяет по максимуму сконцентрировать бактерии у поверхности среды, где непосредственно и происходит рост БЦ. Следующим преимуществом такого биореактора заключается в порционной подаче глюкозы в зону роста БЦ. Это позволяет в первую очередь контролировать необходимый уровень глюкозы, а также уровень pH. Применяя данный биореактор в процессе получения БЦ, авторы получили ежедневный прирост биомассы в 2 мм, что в сухом остатке составляет примерно 9 г в день. Недостатком такого биореактора является то, что максимальная толщина слоя БЦ составляет около 10 мм, дальнейший рост слоя нецелесообразен, так как слой БЦ начинает расслаиваться, что приводит к ухудшению качества пленки БЦ.

Одним из типов биореакторов для производства БЦ является вращающийся дисковый биореактор (рис. 8). Благодаря своей конструкции он имеет значительное преимущество по сравнению со своими предшественниками. Диски, расположенные на вращающемся стержне, позволяют увеличить полезную площадь, на которой может расти БЦ в несколько раз, что приводит к увеличению выхода готового продукта. Из-за постоянного вращения дисков происходит перемешивание среды, что способствует росту как числа бактерий, так и БЦ. Несмотря на значительные преимущества, конструкция такого типа биореакторов имеет и ряд недостатков. Основные недостатки связаны с обслуживанием такого оборудования. В зависимости от конструкции дисков возникают затруднения с получением БЦ именно пленочного типа, так как по всему периметру диска имеется перфорация. Из-за отсутствия перфорации на дисках волокна БЦ не за что зацепиться и основной рост в таком случае происходит на поверхности среды с перемешиванием. В процессах культивирования с перемешиванием образуются три формы целлюлозы: волокнистые суспензии, сферы и гранулы. По сравнению с целлюлозой, полученной статическим культивированием, БЦ, полученная методами культивирования с перемешиванием, обладает более низкой механической прочностью [74]. С помощью метода культивирования перемешиванием БЦ образуется меньше, по сравнению с методами статического культивирования из-за появления мутантов.

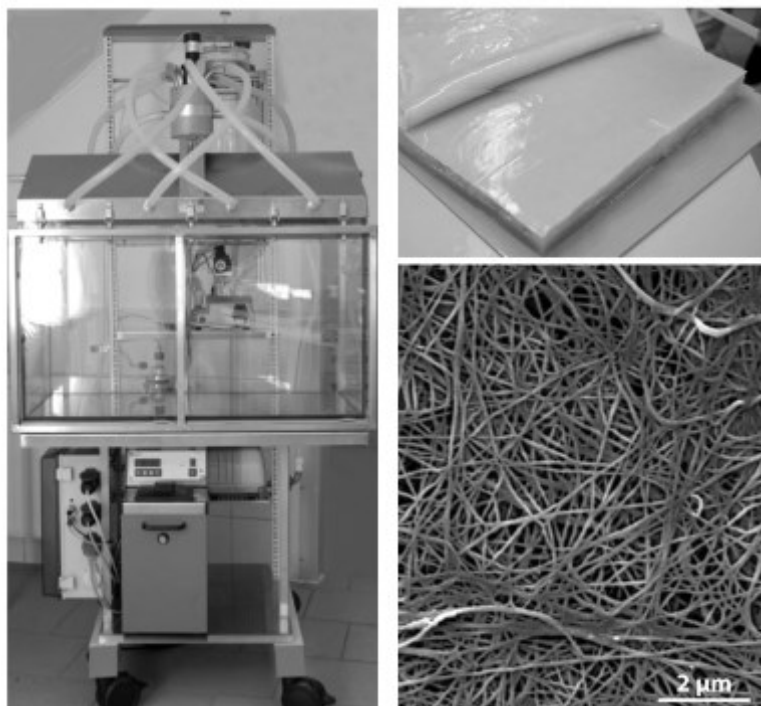


Рис. 7. Аэрозольный биореактор

Вращающийся дисковый биореактор

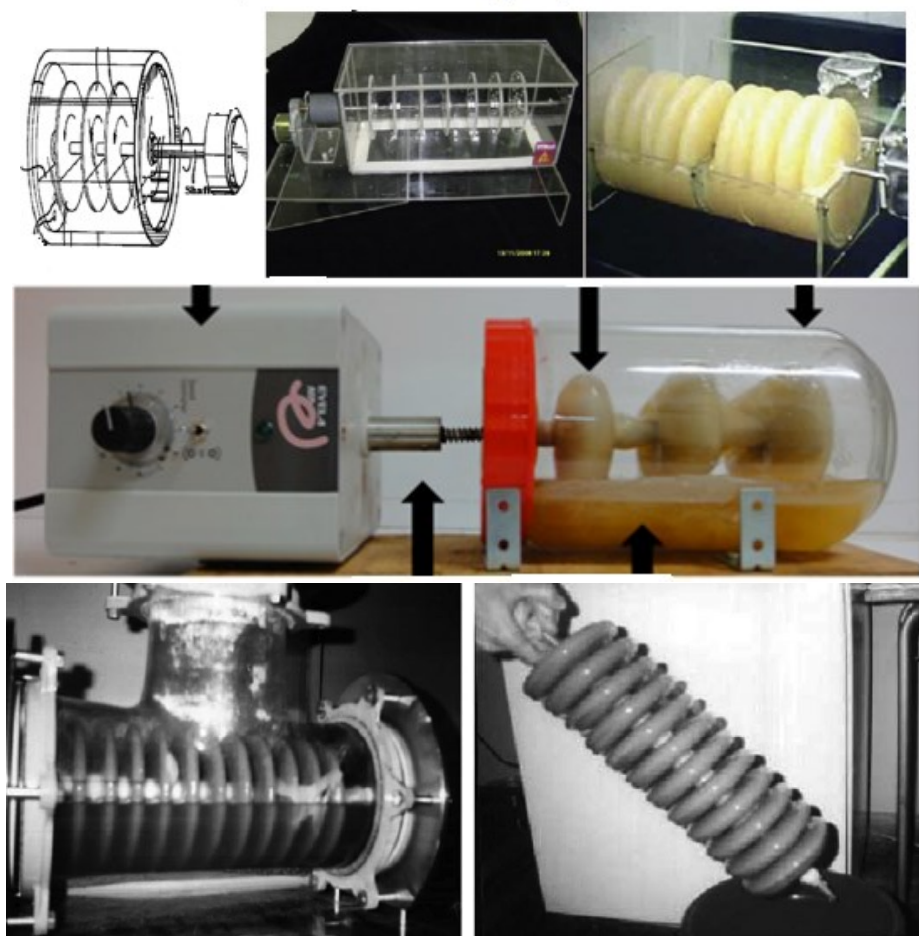


Рис. 8. Вращающийся дисковый биореактор [11, 72, 73]

Но несмотря на это, БЦ, полученная методом перемешивания, также широко используется, и существует множество видов биореакторов с мешалками (рис. 9–10) для ее производства.

Аэролифтные биореакторы (рис. 11) широко используются в биохимических процессах благодаря своей простой конструкции и простоте обслуживания. Однако эти реакторы не подходят для вязкой ферментации. В статье [78] автор рассказывает об использовании такого реактора с воздушным лифтом с внутренним контуром для получения БЦ. Выход БЦ при таком способе культивирования составил всего 2.3 г/л при 80 ч культивирования. Такое низкое производство ВС было связано с ограниченным содержанием растворенного кислорода в культуральной среде. При подключении кислорода к процессу культивирования выход БЦ увеличился до 5.63 г/л, а время сократилось до 28 ч.

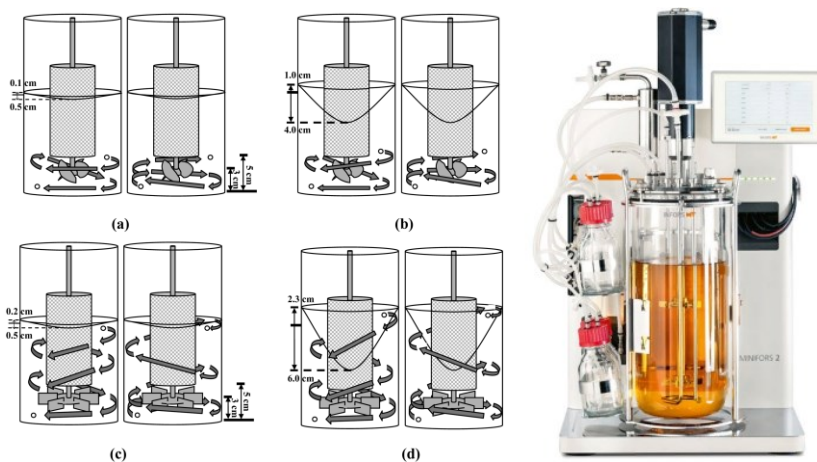


Рис. 9. Биореакторы для культивирования БЦ с мешалкой [75, 76]

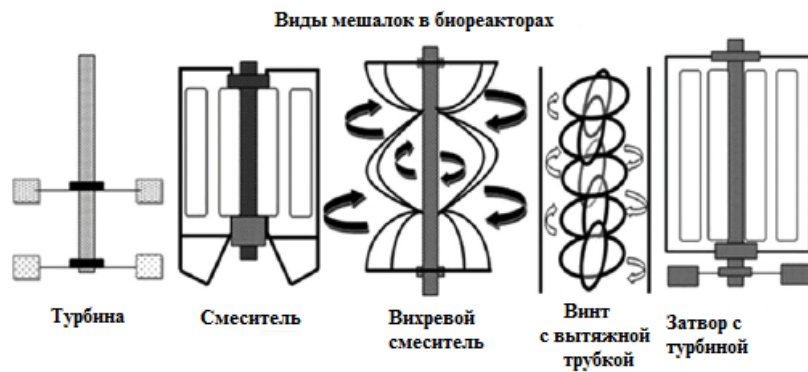


Рис. 10. Виды мешалок в биореакторах [3]

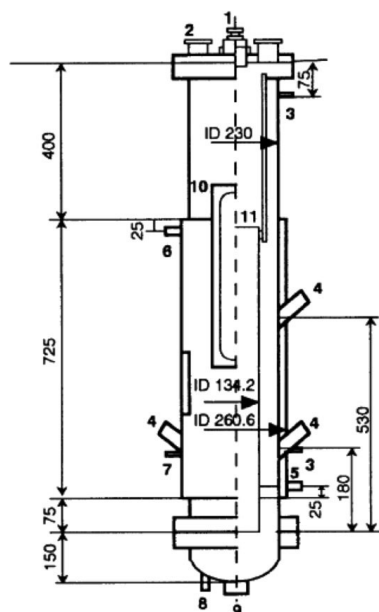


Рис. 11. Принципиальная схема аэролифтного реактора с внутренним контуром

Заключение

В результате анализа литературных источников были рассмотрены следующие вопросы: история получения БЦ, области применения БЦ в России и в мире. Несмотря на то, что БЦ была получена почти столетие назад, свое широкое применение она получила в настоящее время. Свойства БЦ определяют широкую область ее применения: в качестве сорбентов, бумаги, ткани, добавки в продукты, а также в качестве фильтрующих и упаковочных материалов. Самое распространенное применение БЦ имеет в медицине и при производстве косметических средств.

Широкая область применения говорит о перспективности использования данного материала. Вместе с тем в работах исследователей отмечается и низкая производительность и эффективность существующих способов выращивания БЦ. Попытки интенсифицировать этот процесс в биореакторах с принудительным перемешиванием рабочей среды не дало особого эффекта, что объясняется особенностями процесса культивирования и получением БЦ низкого качества. В связи с этим считаем перспективными способами синтеза БЦ в подвижном слое при одновременном обеспечении питательными веществами и другими условиями для роста бактерий.

Список литературы

1. Алешина Л.А., Глазкова С.В., Луговская Л.А., Подойникова М.В., Фофанов А.Д., Силина Е.В. Современные представления о строении целлюлоз (обзор) // Химия растительного сырья. 2001. №1. С. 5–36.
2. Mautner A. Nanocellulose water treatment membranes and filters: a review // Polymer International. 2020. Vol. 69. Pp. 741–751.

3. Gregory D.A., Tripathi L., Fricker A.T.R., Asare E., Orlando I., Raghavendran V., Roy I. Bacterial cellulose: A smart biomaterial with diverse applications // *Materials Science and Engineering R*. 2021. Vol. 145. Pp. 159–186.
4. Florea M., Hagemann H., Santosa G. et al. Engineering control of bacterial cellulose production using a genetic toolkit and a new cellulose-producing strain // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2016. Vol. 113 (24). Pp. E3431–E3440. DOI: 10.1073/pnas.1522985113.
5. Tanpichai S., Witayakran S., Woothikanokkhan J., Srimarut Y., Woraprayote W., Malila Y. Mechanical and antibacterial properties of the chitosan coated cellulose paper for packaging applications: Effects of molecular weight types and concentrations of chitosan // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 155. Pp. 1510–1519.
6. Грунин Л.Ю., Грунин Ю.Б., Никольская Е.А., Таланцев В.И. Микроструктура целлюлозы и ее изучение методом релаксации ЯМР // *Высокомолекулярные соединения. Серия А*, 2012. Т. 54. №3. С. 397–405.
7. Ioelovich M. Correlation Method for Estimating the Distortion Degree of Crystalline Structure of Cellulose // *Journal Scientific Israel- Technological Advantages*. 2017. Vol. 19. N4. Pp. 37–44.
8. Fernandes I.A.A., Pedro A.C., Ribeiro V.R., Bortolini D.G., Ozaki M.S.C., Maciel G.M., Haminiuk C.W.I. Bacterial cellulose: From production optimization to new applications // *Biological Macromolecules*. 2020. Vol. 164. Pp. 2598–2611.
9. Gallegos A.M.A., Carrera S.H., Parra R., Keshavarz T., Iqbal H.M.N. Bacterial Cellulose: A Sustainable Source to Develop Value-Added Products – A Review // *BioResources*. 2016. Vol. 11. Pp. 5641–5655.
10. Sukara E., Meliawati R. Potential Values of Bacterial Cellulose for industrial applications // *Jurnal Selulosa*. 2014. Vol. 4. N1. Pp. 7–16.
11. Okiyama A., Motoki M., Yamanaka S. Bacterial cellulose II. Processing of the gelatinous cellulose for food materials // *Food Hydrocoll*. 1992. Vol. 6. Pp. 479–487.
12. Фан Ми Хань. Биотехнология бактериальной целлюлозы с использованием штамма – продуцента *gluconacetobacter hansenii* GH-1/2008: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2013. 25 с.
13. Ul-Islam M., Khan T., Khattak W.A., Park J.K. Bacterial cellulose-MMTs nanoreinforced composite films: novel wound dressing material with antibacterial properties // *Cellulose*. 2013. Vol. 20. Pp. 589–596.
14. Zhong C. Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. 605374. DOI: 10.3389/fbioe.2020.605374.
15. Cacicedo M., Islan G.A., Leon I., Alvarez V.A. Bacterial Cellulose Hydrogel Loaded with Lipid Nanoparticles for Localized Cancer Treatment // *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*. 2018. Vol. 170. Pp. 596–608 DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.06.056.
16. Weyell P., Beekmann U., Kuepper C., Dederichs M., Thamm J., Fischer D., Kralisch D. Tailor-made material characteristics of bacterial cellulose for drug delivery applications in dentistry // *Carbohydrate Polymers*. 2018. Vol. 207. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.11.061.
17. Bianchet R.T., Vieira Cubas A.L., Machado M.M., Siegel E.H. Applicability of bacterial cellulose in cosmetics – bibliometric // *Biotechnology Reports*. 2020. Vol. 27.
18. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2019. 28 с.
19. Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В.Ф. Бактерии для получения самовосстанавливающих бетонов // *Транспортные сооружения*. 2018. Т. 5. №4. С. 1–13.
20. Sanchez F., Sobolev K. Nanotechnology in concrete – A review // *Construction and Building Materials*. 2010. Vol. 24. Pp. 2060–2071.
21. Balea A., Fuente E., Blanco A., Negro C. Nanocelluloses: Natural-Based Materials for Fiber-Reinforced Cement Composites. A Critical Review // *Polymers*, 2019. Vol. 11. Pp. 518–550.
22. Mohammadkazemia F., Doosthoseinib K., Ganjianc E., Azind M. Manufacturing of bacterial nano-cellulose reinforced fiber-cement composites // *Construction and Building Materials*. 2015. Pp. 958–964
23. Lee K.-Y., Ho K.K.C., Schlufte K., Bismarck A. Nano-fibrillated cellulose vs bacterial cellulose: Reinforcing ability of nanocellulose obtained topdown or bottom-up // *Composites Science and Technology*. 2012. Vol. 72. Pp. 1479–1486.
24. Peters S.J., Rushing T.S., Landis E.N., Cummins T.K. Nanocellulose and Microcellulose Fibers for Concrete // *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. 2010. Pp. 25–28.
25. Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов // *Русский инженер*. 2018. №4. С. 46–48.
26. Muhamad I.I., Muhamad S.N.H., Salehudin M.H., Zahan K.A., Tong W.Y., Pa'e N. Effect of pandan extract concentration to chromium (IV) removal using bacterial cellulose-pandan composites prepared by in-situ modification technique // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 3. Pp. 89–95.
27. В поисках пластика: как Greenpeace в России и люди по всей стране изучали пластиковый мусор на берегах морей, рек и озер. М., 2020. 43 с.
28. Schmidt-Traub G., Obersteiner M., Mosnier A. The urgency of Agriculture Green Development // *Nature*. 2019. Pp. 181–183.
29. Zheng J., Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics // *Nature climate change*. 2019. Vol. 9. Pp. 374–378.
30. Глазков С.В., Копцев С.В., Лесникова Н.А., Богданова В.В., Володарская Т.К. Современные инновационные технологии хранения свежих фруктов и овощей и продуктов их переработки (обзор) // *Овощи России*. 2018. №5. С. 84–89.

31. Jung S., Cui Y., Barnes M., Satam C. et al. Multifunctional Bio-Nanocomposite Coatings for Perishable Fruits // *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32. 1908291.
32. Jafarzadeh S., Nafchi A.M., Salehabadi A., Oladad-abbasabadi N. Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2021. Vol. 291. 102405. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102405.
33. Stroescu M., Isopencu G., Busuioc C., Stoica-Guzun A. Antimicrobial Food Pads Containing Bacterial Cellulose and Polysaccharides // *Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels*. 2019. Pp. 1303–1338.
34. Zahan K.A., Azizul N.M., Mustapha M., Tong W.Y., Abdul Rahman M.S., Sahuri I.S. Application of bacterial cellulose film as a biodegradable and antimicrobial packaging material // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 31. Pp. 83–88.
35. Fabra M.J., López-Rubio A., Ambrosio-Martín J., Lagaron J.M. Improving the barrier properties of thermoplastic corn starch-based films containing bacterial cellulose nanowhiskers by means of PHA electrospun coatings of interest in food packaging // *Food Hydrocolloids Volume*. 2016. Vol. 61. Pp. 261–268.
36. Azeredo H., Barud H., Farinas C., Vasconcellos V., Claro A. Bacterial Cellulose as a Raw Material for Food and Food Packaging Applications // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2019. Vol. 3. DOI: 10.3389/fsufs.2019.00007.
37. Salaria M., Khiabania M.S., Mokarrama R.R., Ghanbarzadehab B., Kaflic H.S. Development and evaluation of chitosan based active nanocomposite films containing bacterial cellulose nanocrystals and silver nanoparticles // *Food Hydrocolloids Volume*. 2018. Vol. 84. Pp. 414–423.
38. Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass // *Carbohydrate Polymers*. 2021. Vol. 252. 117178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117178.
39. Biodegradable Superabsorbent Materials Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product, 2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/biodegradable-superabsorbent-materials-market>.
40. Ramli R.A. Slow release fertilizer hydrogels: a review // *Polymer Chemistry*. 2019. Vol. 10. N45. Pp. 6073–6090.
41. Doelker E. Swelling Behavior of Water-Soluble Cellulose Derivatives // *Studies in Polymer Science*. 1990. Vol. 8. Pp. 125–145.
42. Атыкян Н.А., Ревин В.В., Сафонов А.В., Карасева Я.Ю., Прошин И.М., Шутова В.В. Сорбенты на основе бактериальной целлюлозы для выделения Sr, U, Pu и Am из растворов // *Радиохимия*. 2021. Т. 63. №5. С. 476–483.
43. Skočaj M. Bacterial nanocellulose in papermaking // *Cellulose*. 2019. Vol. 26. Pp. 6477–6488.
44. Lavric G., Medvescek D., Skočaj M. Papermaking properties of bacterial nanocellulose produced from mother of vinegar, a waste product after classical vinegar production // *TAPPI Journal*. 2020. Vol. 19. Pp. 197–203. DOI: 10.32964/TJ19.4.197.
45. Vandamme E.J., De Baets S., Vanbaelen A., Joris K., De Wulf P. Improved production of bacterial cellulose and its application potential // *Polymer Degradation and Stability*. 1998. Vol. 59. Pp. 93–99.
46. Gomez N., Santos S.M., Carbajo J.M., Villar J.C. Modification of Bacterial Cellulose Biofilms with Xylan Polyelectrolytes // *Bioengineering*, 2017. Vol. 4(4). 93. DOI: 10.3390/bioengineering4040093.
47. Sriplai N., Sirima P., Palaporn D., Mongkolthananaruk W., Eichhorn S.J., Pinitsoontorn S., Mater J. White magnetic paper based on a bacterial cellulose nanocomposite // *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. Vol. 6. Pp. 11427–11435.
48. Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Ситникова А.Е., Бычин Н.В., Гладышева Е.К., Шавыркина Н.А., Миронова Г.Ф., Севастьянова Ю.В. Композиционная бумага из бактериальной наноцеллюлозы и хвойной целлюлозы // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021. Т. 11. №3. С. 460–471.
49. Dhar P., Pratto B., Gonçalves Cruz A.J., Bankar S. Valorization of sugarcane straw to produce highly conductive bacterial cellulose / graphene nanocomposite films through in situ fermentation: Kinetic analysis and property evaluation // *Journal of Cleaner Production*. 2019. 117859.
50. Yang Y., Liu W., Huang Q., Li X., Ling H., Ren J., Sun R., Zou J., Wang X. Full Solution-Processed Fabrication of Conductive Hybrid Paper Electrodes for Organic Optoelectronics // *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020. Vol. 8. Pp. 3392–3400.
51. Zhuravleva N., Reznik A., Kiesewetter D., Stolpner A., Khripunov A. Possible applications of bacterial cellulose in the manufacture of electrical insulating paper // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1124. N3. 031008. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/3/031008.
52. Islam N., Li S., Ren G., Zuo Y., Warzywoda J., Wang S., Zhaoyang F. Edge-Oriented Graphene on Carbon Nanofiber for High-Frequency Supercapacitors // *Nano-Micro Letters*. 2018. Vol. 10. 9. DOI: 10.1007/s40820-017-0162-4.
53. Бахман М., Петрухин И.Ю., Бутенко И.Е., Дутка К.В., Громовых П.С. Биосинтез бактериальной целлюлозы продуцентом *Glucanacetobacter hansenii* в глубоководной культуре // *Евразийское научное объединение*. 2018. №6-2 (40). С. 61–65.
54. Chawla P., Bajaj I., Survase S., Rekha S. Singhal Microbial Cellulose: Fermentative Production and Applications // *Food Technology and Biotechnology*. 2009. Vol. 47(2). Pp. 107–124.
55. Schramm M., Hestrin S. Factors affecting Production of Cellulose at the Air/ Liquid Interface of a Culture of *Acetobacter xylinum* // *Microbiology*. 1954. Vol. 11. Pp. 123–129.
56. Lu Z., Zhang Y., Chi Y., Xu N., Yao W., Sun B. Effects of alcohols on bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* 186 // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2011. Vol. 27. Pp. 2281–2285.

57. Carreira P., Mendes J.A., Trovatti E., Serafim L.S., Freire C.S., Silvestre A.J., Neto C.P. Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102. N15. Pp. 7354–7360.
58. Vazquez A., Foresti M.L., Cerrutti P., Galvagno M. Bacterial Cellulose from Simple and Low Cost Production Media by *Gluconacetobacter xylinus* // *Journal of Polymers and the Environment*. 2013. Vol. 21. Pp. 545–554.
59. Skiba E.A., Budaeva V.V., Ovchinnikova E.V., Gladysheva E.K., Kashcheyeva E.I., Pavlov I.N., Sakovich G.V. A technology for pilot production of bacterial cellulose from oat hulls // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 383. 123128. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123128.
60. Богатырева А.О. Оптимизация условий биосинтеза бактериальной целлюлозы и получение на ее основе биокомпозиционных материалов с антибактериальными свойствами: дисс. ... канд. биол. наук. Саранск, 2021. 220 с.
61. Yassine F., Bassil N., Flouty R., Chokr A., Samrani A.E., Boiteux G., Tahchi M.E. Culture medium pH influence on *Gluconacetobacter* physiology: Cellulose production rate and yield enhancement in presence of multiple carbon sources // *Carbohydrate Polymers*. 2016. Vol. 146. Pp. 282–291.
62. Coban E.P., Biyik H. Evaluation of different pH and temperatures for bacterial cellulose production in HS medium and beet molasses medium // *African Journal of microbiology research*. 2011. Vol. 5. N9. Pp. 1037–1045.
63. Lee K.Y., Buldum G., Mantalaris A., Bismarck A. More than meets the eye in bacterial cellulose: biosynthesis, bio-processing, and applications in advanced fiber composites // *Macromolecular bioscience*. 2014. Vol. 14. Pp. 10–32.
64. Reiniati I., Hrymak A.N., Margaritis A. Recent developments in the production and applications of bacterial cellulose fibers and nanocrystals // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2016. Vol. 36. Pp. 1–12.
65. Son H.J., Heo M.S., Kim Y.G., Lee S.J. Optimization of fermentation conditions for the production of bacterial cellulose by a newly isolated *Acetobacter* sp. A9 in shaking cultures // *Biotechnol Appl Biochem*. 2001. Vol. 33. Pp. 1–5.
66. Фан Ми Хань, Громовых Т.И. Оптимизация условий глубинного культивирования штамма *Gluconacetobacter hansenii* GH-1/2008 методом полного факторного эксперимента // *Живые системы и биологическая безопасность населения: материалы IX Международной научной конференции студентов и молодых ученых*. 2011. С. 24–26.
67. Hwang J.W., Yang Y.K., Hwang J.K., Pyun Y.R., Kim Y.S. Effects of pH and dissolved oxygen on cellulose production by *Acetobacter xylinum* BRC5 in agitated culture // *J. Biosci. Bioeng*. 1999. Vol. 88. Pp. 183–188.
68. Bae S., Shoda M. Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production using Box-Behnken design // *Biotechnol Bioeng*. 2005. Vol. 90. Pp. 20–28.
69. Cielecka I., Ryngajło M., Bielecki S. BNC Biosynthesis with Increased Productivity in a Newly Designed Surface Air-Flow Bioreactor // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(11). 3850. DOI: 10.3390/app10113850.
70. Bayrakdar T., Demirbağ D., Üstün-Aytekin Ö. Effect of semi-continuous operation mode parameters on bacterial cellulose and biomass production // *Cellulose Chemistry and Technology*. 2017. Vol. 51(7-8). Pp. 737–743.
71. Hornung M., Ludwig M., Schmauder H.P. Optimizing the Production of Bacterial Cellulose in Surface Culture: A Novel Aerosol Bioreactor Working on a Fed Batch Principle (Part 3) // *Engineering in Life Sciences*. 2007. Vol. 7. N1. Pp. 35–41.
72. Kim Y.-J., Kim J.-N., Wee Y.-J., Park D.-H., Ryu H.-W. Bacterial Cellulose Production by *Gluconacetobacter* sp. RKY5 in a Rotary Biofilm Contactor // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2007. Vol. 136–140. Pp. 529–537.
73. Shi Z., Zhang Y., Phillips G.O., Yang G. Utilization of bacterial cellulose in food // *Food Hydrocolloids*. 2014. Vol. 35. Pp. 539–545.
74. Ситникова А.Е., Шавыркина Н.А., Будаева В.В., Корчагина А.А., Бычин Н.В. Физико-механические свойства бактериальной наноцеллюлозы, полученной продленным культивированием // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2021. №2(36). С. 132–138.
75. Jung J.Y., Khan T., Park J.K., Chang H.N. Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* using a novel bioreactor equipped with a spin filter // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2007. Vol. 24(2). Pp. 265–271.
76. Gea S., Pasaribu K.M., Sebayang K., Julianti E., Aisyah Amaturahim S., Rahayu S.U., Hutapea Y.A. Enhancing The Quality of Nata De Coco Starter By Channeling The Oxygen into The Bioreactor through Agitation Method // *AIP Conference Proceedings*. 2018. 020064. DOI: 10.1063/1.5082469.

Поступила в редакцию 17 мая 2022 г.

После переработки 16 ноября 2022 г.

Принята к публикации 17 ноября 2022 г.

Для цитирования: Рогова Е.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А., Лапин И.Р., Киселев Е.Г. Состояние и перспективы совершенствования способов получения и использования бактериальной целлюлозы (обзор) // *Химия растительного сырья*. 2022. №4. С. 27–46. DOI: 10.14258/jcrpm.20220411373.

Rogova E.A.^{1*}, Alashkevich Yu.D.¹, Kozhukhov V.A.¹, Lapin I.R.¹, Kiselyov E.G.^{2,3} THE STATE AND PROSPECTS OF IMPROVING THE METHODS OF OBTAINING AND USING BACTERIAL CELLULOSE (REVIEW)

¹ Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev, pr. Krasnoyarsky Rabochiy, 31, Krasnoyarsk, 660037, (Russia), e-mail: rogovaea@mail.sibsau.ru

² Siberian Federal University, pr. Svobodny, 79/10, Krasnoyarsk, 660041 (Russia)

³ Institute of Biophysics SB RAS, Akademgorodok, 50/50, Krasnoyarsk, 660036 (Russia)

Any material that we encounter in the world around us does not have such a widespread use as bacterial cellulose. This kind of unique material gained its popularity in the 20th century and became an excellent source for research. Its acquisition and practical application in various areas of our life activity is currently quite important. In addition, thanks to a wide range of studies aimed at the basics of its production, many promising areas of using by-products of the food industry as a source of energy for growth have been identified, which makes this material more environmentally friendly than its plant counterpart.

Despite its rich history of studying and obtaining bacterial cellulose, it is still considered to be not fully studied material. This makes it possible for researchers to identify new sources of energy for the growth of bacterial cellulose, to improve the quality and increase its quantity, both in the laboratory and on an industrial scale, as well as to look for more and more new areas of its application, where it would seem it has no place.

In the modern scientific world, bacterial cellulose is one of the promising sources of scientific research and further technological applications.

Keywords: bacterial cellulose, bioreactor, inoculate, cultivation conditions, application of bacterial cellulose.

References

1. Aleshina L.A., Glazkova S.V., Lugovskaya L.A., Podoynikova M.V., Fofanov A.D., Silina Ye.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2001, no. 1, pp. 5–36. (in Russ.).
2. Mautner A. *Polymer International*, 2020, vol. 69, pp. 741–751.
3. Gregory D.A., Tripathi L., Fricker A.T.R., Asare E., Orlando I., Raghavendran V., Roy I. *Materials Science and Engineering R*, 2021, vol. 145, pp. 159–186.
4. Florea M., Hagemann H., Santosa G. et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113 (24), pp. E3431–E3440. DOI: 10.1073/pnas.1522985113.
5. Tanpichai S., Witayakran S., Wootthikanokkhan J., Srimarut Y., Woraprayote W., Malila Y. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 155, pp. 1510–1519.
6. Grunin L.Yu., Grunin Yu.B., Nikol'skaya Ye.A., Talantsev V.I. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya. Seriya A*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 397–405. (in Russ.).
7. Ioelovich M. *Journal Scientific Israel- Technological Advantages*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 37–44.
8. Fernandes I.A.A., Pedro A.C., Ribeiro V.R., Bortolini D.G., Ozaki M.S.C., Maciel G.M., Haminiuk C.W.I. *Biological Macromolecules*, 2020, vol. 164, pp. 2598–2611.
9. Gallegos A.M.A., Carrera S.H., Parra R., Keshavarz T., Iqbal H.M.N. *BioResources*, 2016, vol. 11, pp. 5641–5655.
10. Sukara E., Meliawati R. *Jurnal Selulosa*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 7–16.
11. Okiyama A., Motoki M., Yamanaka S. *Food Hydrocoll.*, 1992, vol. 6, pp. 479–487.
12. Fan Mi Khan'. *Biotehnologiya bakterial'noy tsellyulozy s ispol'zovaniyem shtamma - produksenta gluconaceto-bacter hansenii GH-1/2008: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk.* [Biotechnology of bacterial cellulose using the producer strain of gluconaceto-bacter hansenii GH-1/2008: author. diss. ... cand. biol. Sciences]. Moscow, 2013, 25 p. (in Russ.).
13. Ul-Islam M., Khan T., Khattak W.A., Park J.K. *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 589–596.
14. Zhong C. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2020, vol. 8, 605374. DOI: 10.3389/fbioe.2020.605374.
15. Cacicedo M., Islan G.A., Leon I., Alvarez V.A. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*, 2018, vol. 170, pp. 596–608 DOI: 10.1016/j.colsurfb.2018.06.056.
16. Weyell P., Beekmann U., Kuepper C., Dederichs M., Thamm J., Fischer D., Kralisch D. *Carbohydrate Polymers*, 2018, vol. 207, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.carbpol.2018.11.061.
17. Bianchet R.T., Vieira Cubas A.L., Machado M.M., Siegel E.H. *Biotechnology Reports*, 2020, vol. 27.
18. Al' Dulaymi Salman Davud Salman. *Samovosstanavlivayushchiesya betony, modifitsirovannyye mikrobiologicheskoy dobavkoy: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Self-healing concretes modified with a microbiological additive: Ph.D. diss. ... cand. tech. Sciences]. Moscow, 2019, 28 p. (in Russ.).
19. Yerofeyev V.T., Al' Dulaymi Salman Davud Salman, Smirnov V.F. *Transportnyye sooruzheniya*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 1–13. (in Russ.).
20. Sancheza F., Sobolevb K. *Construction and Building Materials*, 2010, vol. 24, pp. 2060–2071.
21. Balea A., Fuente E., Blanco A., Negro C. *Polymers*, 2019, vol. 11, pp. 518–550.
22. Mohammadkazemia F., Doosthoseinib K., Ganjanc E., Azind M. *Construction and Building Materials*, 2015, pp. 958–964.
23. Lee K.-Y., Ho K.K.C., Schluffter K., Bismarck A. *Composites Science and Technology*, 2012, vol. 72, pp. 1479–1486.
24. Peters S.J., Rushing T.S., Landis E.N., Cummins T.K. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2010, pp. 25–28.
25. Bazhenov Yu.M., Yerofeyev V.T., Al' Dulaymi Salman Davud Salman. *Russkiy inzhener*, 2018, no. 4, pp. 46–48. (in Russ.).

* Corresponding author.

26. Muhamad I.I., Muhamad S.N.H., Salehudin M.H., Zahan K.A., Tong W.Y., Pa'e N. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 3, pp. 89–95.
27. *V poiskakh plastika: kak Greenpeace v Rossii i lyudi po vsey strane izuchali plastikovyy musor na beregakh mo-rey, rek i ozor.* [In search of plastic: how Greenpeace in Russia and people across the country studied plastic waste on the shores of seas, rivers and lakes]. Moscow, 2020, 43 p. (in Russ.).
28. Schmidt-Traub G., Obersteiner M., Mosnier A. *Nature*, 2019, pp. 181–183.
29. Zheng J., Suh S. *Nature climate change*, 2019, vol. 9, pp. 374–378.
30. Glazkov S.V., Koptsev S.V., Lesnikova N.A., Bogdanova V.V., Volodarskaya T.K. *Ovoshchi Rossii*, 2018, no. 5, pp. 84–89. (in Russ.).
31. Jung S., Cui Y., Barnes M., Satam C. et al. *Advanced Materials*, 2020, vol. 32, 1908291.
32. Jafarzadeh S., Nafchi A.M., Salehabadi A., Oladzaad-abbasabadi N. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021, vol. 291, 102405. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102405.
33. Stroescu M., Isopencu G., Busuioc C., Stoica-Guzun A. *Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels*, 2019, pp. 1303–1338.
34. Zahan K.A., Azizul N.M., Mustapha M., Tong W.Y., Abdul Rahman M.S., Sahuri I.S. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 31, pp. 83–88.
35. Fabra M.J., López-Rubio A., Ambrosio-Martín J., Lagaron J.M. *Food Hydrocolloids Volume*, 2016, vol. 61, pp. 261–268.
36. Azeredo H., Barud H., Farinas C., Vasconcellos V., Claro A. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2019, vol. 3. DOI: 10.3389/fsufs.2019.00007.
37. Salaria M., Khiabania M.S., Mokarrama R.R., Ghanbarzadehab B., Kafic H.S. *Food Hydrocolloids Volume*, 2018, vol. 84, pp. 414–423.
38. Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V. *Carbohydrate Polymers*, 2021, vol. 252, 117178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117178.
39. *Biodegradable Superabsorbent Materials Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product, 2016.* URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/biodegradable-superabsorbent-materials-market>.
40. Ramli R.A. *Polymer Chemistry*, 2019, vol. 10, no. 45, pp. 6073–6090.
41. Doelker E. *Studies in Polymer Science*, 1990, vol. 8, pp. 125–145.
42. Atykhan N.A., Revin V.V., Safonov A.V., Karaseva Ya.Yu., Proshin I.M., Shutova V.V. *Radiokhimiya*, 2021, vol. 63, no. 5, pp. 476–483. (in Russ.).
43. Skočaj M. *Cellulose*, 2019, vol. 26, pp. 6477–6488.
44. Lavric G., Medvescek D., Skocaj M. *TAPPI Journal*, 2020, vol. 19, pp. 197–203. DOI: 10.32964/TJ19.4.197.
45. Vandamme E.J., De Baets S., Vanbaelen A., Joris K., De Wulf P. *Polymer Degradation and Stability*, 1998, vol. 59, pp. 93–99.
46. Gomez N., Santos S.M., Carbajo J.M., Villar J.C. *Bioengineering*, 2017, vol. 4(4), 93. DOI: 10.3390/bioengineering4040093.
47. Sriplai N., Sirima P., Palaporn D., Mongkolthanaruk W., Eichhorn S.J., Pinitsoontorn S., Mater J. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, vol. 6, pp. 11427–11435.
48. Gismatulina Yu.A., Budayeva V.V., Sitnikova A.Ye., Bychin N.V., Gladysheva Ye.K., Shavyrkina N.A., Mironova G.F., Sevast'yanova Yu.V. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 460–471. (in Russ.).
49. Dhar P., Pratto B., Gonçalves Cruz A.J., Bankar S. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 117859.
50. Yang Y., Liu W., Huang Q., Li X., Ling H., Ren J., Sun R., Zou J., Wang X. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 2020, vol. 8, pp. 3392–3400.
51. Zhuravleva N., Reznik A., Kiesewetter D., Stolpner A., Khripunov A. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1124, no. 3, 031008. DOI: 10.1088/1742-6596/1124/3/031008.
52. Islam N., Li S., Ren G., Zuo Y., Warzywoda J., Wang S., Zhaoyang F. *Nano-Micro Letters*, 2018, vol. 10, 9. DOI: 10.1007/s40820-017-0162-4.
53. Bakhman M., Petrukhin I.Yu., Butenko I.Ye., Dutka K.V., Gromovykh P.S. *Yevraziyskoye nauchnoye ob'yedineniye*, 2018, no. 6-2 (40), pp. 61–65. (in Russ.).
54. Chawla P., Bajaj I., Survase S., Rekha S. *Food Technology and Biotechnology*, 2009, vol. 47(2), pp. 107–124.
55. Schramm M., Hestrin S. *Microbiology*, 1954, vol. 11, pp. 123–129.
56. Lu Z., Zhang Y., Chi Y., Xu N., Yao W., Sun B. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2011, vol. 27, pp. 2281–2285.
57. Carreira P., Mendes J.A., Trovatti E., Serafim L.S., Freire C.S., Silvestre A.J., Neto C.P. *Bioresource Technology*, 2011, vol. 102, no. 15, pp. 7354–7360.
58. Vazquez A., Foresti M.L., Cerrutti P., Galvagno M. *Journal of Polymers and the Environment*, 2013, vol. 21, pp. 545–554.
59. Skiba E.A., Budaeva V.V., Ovchinnikova E.V., Gladysheva E.K., Kashcheyeva E.I., Pavlov I.N., Sakovich G.V. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 383, 123128. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123128.
60. Bogatyreva A.O. *Optimizatsiya usloviy biosinteza bakterial'noy tsellyulozy i polucheniye na yeye osnove bio-kompozitsionnykh materialov s antibakterial'nymi svoystvami: diss. ... kand. biol. nauk.* [Optimization of the conditions for the biosynthesis of bacterial cellulose and the production of bio-composite materials with antibacterial properties on its basis: diss. ... cand. biologist. Sciences]. Saransk, 2021, 220 p. (in Russ.).
61. Yassine F., Bassil N., Flouty R., Chokr A., Samrani A.E., Boiteux G., Tahchi M.E. *Carbohydrate Polymers*, 2016, vol. 146, pp. 282–291.
62. Coban E.P., Biyik H. *African Journal of microbiology research*, 2011, vol. 5, no. 9, pp. 1037–1045.

63. Lee K.Y., Buldum G., Mantalaris A., Bismarck A. *Macromolecular bioscience*, 2014, vol. 14, pp. 10–32.
64. Reiniati I., Hrymak A.N., Margaritis A. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2016, vol. 36, pp. 1–12.
65. Son H.J., Heo M.S., Kim Y.G., Lee S.J. *Biotechnol Appl Biochem*, 2001, vol. 33, pp. 1–5.
66. Fan Mi Khan', Gromovykh T.I. *Zhivyye sistemy i biologicheskaya bezopas-nost' naseleniya: Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Living systems and biological safety of the population: Proceedings of the IX International scientific conference of students and young scientists], 2011, pp. 24–26. (in Russ.).
67. Hwang J.W., Yang Y.K., Hwang J.K., Pyun Y.R., Kim Y.S. *J. Biosci. Bioeng.*, 1999, vol. 88, pp. 183–188.
68. Bae S., Shoda M. *Biotechnol Bioeng.*, 2005, vol. 90, pp. 20–28.
69. Cielecka I., Ryngajło M., Bielecki S. *Applied Sciences*, 2020, vol. 10(11), 3850. DOI: 10.3390/app10113850.
70. Bayrakdar T., Demirbağ D., Üstün-Aytekin Ö. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2017, vol. 51(7-8), pp. 737–743.
71. Hornung M., Ludwig M., Schmauder H.P. *Engineering in Life Sciences*, 2007, vol. 7, no. 1, pp. 35–41.
72. Kim Y.-J., Kim J.-N., Wee Y.-J., Park D.-H., Ryu H.-W. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2007, vol. 136–140, pp. 529–537.
73. Shi Z., Zhang Y., Phillips G.O., Yang G. *Food Hydrocolloids*, 2014, vol. 35, pp. 539–545.
74. Sitnikova A.Ye., Shavyrkina N.A., Budayeva V.V., Korchagina A.A., Bychin N.V. *Yuzhno-sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2021, no. 2(36), pp. 132–138. (in Russ.).
75. Jung J.Y., Khan T., Park J.K., Chang H.N. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2007, vol. 24(2), pp. 265–271.
76. Gea S., Pasaribu K.M., Sebayang K., Julianti E., Aisyah Amaturahim S., Rahayu S.U., Hutapea Y.A. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 020064. DOI: 10.1063/1.5082469.

Received May 17, 2022

Revised November 16, 2022

Accepted November 17, 2022

For citing: Rogova E.A., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A., Lapin I.R., Kiselyov E.G. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 4, pp. 27–46. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220411373.