

Абдул-Галил Ахмед Али, О. В. Кригер

ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Национальный исследовательский университет ИТМО,

Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 24.06.2024 г.

Принята к публикации 22.11.2024 г.

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6

82

Для цитирования: *Абдул-Галил Ахмед Али, Кригер О. В.* Получение и применение бактериальной целлюлозы // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2025. №1. С. 82–102. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6.

*Бактериальная целлюлоза (далее – БЦ) представляет собой биоматериал, вырабатываемый некоторыми бактериями и обладающий уникальными свойствами, который отличается от растительной целлюлозы чистотой, высокой степенью кристалличности, отличной биосовместимостью, высокой влагоудерживающей способностью. Благодаря этим преимуществам БЦ находит все большее применение в различных промышленных сферах. Получение БЦ в промышленных масштабах ограничено, в частности, высокой стоимостью питательной среды. В обзоре представлен анализ научных сведений и официальных данных о свойствах и способах повышения продуктивности БЦ для применения на пищевых производствах в качестве пищевой добавки и пищевой упаковки. Поиск научной литературы осуществлен на английском и русском языках по базам данных Scopus, ScienceDirect, PubMed и eLIBRARY.RU. Анализ научных сведений и официальных данных показал, что физические факторы (температура, pH, источник углерода, условия культивирования) питательной среды влияют на выход и свойства БЦ. Использование сельскохозяйственных и пищевых отходов в качестве питательной среды увеличивает продуктивность штаммов *Komagataeibacter xylinus*. Комбинирование БЦ с другими компонентами (биологически активными веществами, металлами, пробиотиками, полимерами, антибиотиками и т. д.) приведет к улучшению функциональных свойств БЦ и расширит области ее применения в пищевой промышленности в качестве заменителя жира, для получения искусственного мяса, иммобилизации ферментов, создания биоразлагаемых упаковочных материалов.*

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, биосинтез БЦ, субстраты для культивирования, применение БЦ

Введение

Целлюлоза является самым распространенным биополимером на земле, содержащимся в конопле, льне или хлопке сосудистых растений [12]. В ее состав входят мономеры глюкозы, соединенные между собой β



(1–4) гликозидными связями с образованием длинных цепей и высокой степенью полимеризации. В связи с повышенным спросом на растительную целлюлозу и увеличением потребления древесины в качестве ее источника, обезлесение происходит во всем мире и создает глобальные экологические проблемы [24].

Однако целлюлоза может быть получена из организмов (таких как, микроорганизмы, водоросли и грибы) или с помощью ферментативных синтезов *in vitro*, начинающихся с фторида целлобиозы или химического синтеза из глюкозы путем полимеризации бензилированных и пивалоилированных производных по замкнутому циклу. Наиболее примечательными продуцентами бактериальной целлюлозы (далее — БЦ) являются непатогенные бактерии рода *Komagateibacter*, такие как *K. xylinus* (ранее назывались *Acetobacter*).

K. xylinus синтезируют внеклеточную целлюлозу или бактериальную наноцеллюлозу, образующую биопленку различной толщины с целью поддержания вблизи поверхности высокой насыщенности колоний кислородом. Пленка служит защитным барьером от высыхания, естественных врагов и радиации [23]. По сравнению с растительной целлюлозой и другими ее формами БЦ обладает особыми и уникальными свойствами, зависящими от условий культивирования.

Она имеет высококристаллическую наноструктуру, высокую чистоту (отсутствие лигнина и гемицеллюлозы) и наибольшую степень полимеризации. Вышеупомянутые свойства БЦ делают ее перспективной альтернативой целлюлозе растительного происхождения для конкретных применений в биомедицине, косметике, высококачественных акустических диафрагмах, производстве бумаги, пищевой промышленности и других областях.

Модификация БЦ путем введения других компонентов, таких как полимеры, армирующие агенты и активные соединения, приводит к получению функциональных полимеров с новыми свойствами, расширяющими применение БЦ в промышленных областях.

Однако производство БЦ на синтетических средах с различными источниками углерода и факторами роста, которые обычно добавляются в виде дрожжевого экстракта и пептона, является дорогостоящим. Таким образом, поиск недорогого сырья, содержащего большое количество сахаров, в качестве субстратов для производства БЦ имеет большое значение.

Цель данной статьи — выявление факторов получения БЦ при разных условиях культивирования за счет увеличения выхода продукта для дальнейшего применения в технологических и промышленных областях.

Материалы и методы исследования

Поиск осуществлен по базам данных Scopus, Web of Science, SEMANTIC SCHOLAR и eLIBRARY.RU на русском и английском языках. Поиск был ограничен рецензируемыми статьями в академических журналах и включал исследовательские и обзорные статьи, соответствовавшие тематике исследования.



Результаты исследования и их обсуждение

Свойства БЦ зависят от ряда факторов, таких как условия культивирования, тип микроорганизмов и состав питательной среды. Эти факторы оказывают сильное влияние на свойства полимера, такие как размер, кристаллизация, степень полимеризации или гигроскопичность.

Благодаря ориентации гидроксильных групп целлюлоза обладает как гидрофобными, так и гидрофильными свойствами. Хотя бактериальная целлюлоза химически идентична растительной, она также имеет различие по некоторым критериям: длине, кристаллизации, степени полимеризации, пропорции алломорфов I_α и I_β , высокой чистоте (не содержит лигнин и гемицеллюлозу), модулю Юнга с высокой прочностью на разрыв (> 2 ГПа), хорошей биосовместимостью и т. д. (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики бактериальной и растительной целлюлозы

Критерии	Растительная целлюлоза	Бактериальная целлюлоза
Состав	Целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза	Чистая целлюлоза
Кристалличность, %	44 – 65	80
Степень полимеризации	300 – 10000	14000 – 16000
Общая площадь поверхности, м ² /г	< 10	> 150
Влагосвязывающая способность, %	25 – 35	> 95
Относительная гидрофильность	20 – 30	40 – 50

Сложность структурной организации БЦ делает ее нерастворимой во многих растворителях (как в воде, так и в обычных органических растворителях, а также устойчивой к ферментативному и химическому гидролизу) и способствует высокой степени кристалличности [12]. БЦ является высокогидрофильным полимером благодаря многочисленным гидроксильным группам в молекуле глюкозы, может впитывать и долго удерживать огромное количество воды, в 200 раз превышающее собственную массу. Эти свойства, вероятно, благоприятствуют синергетическим и последовательным стадиям набухания субстрата, доступности ферментов гидролиза, а также позволяют наносить жидкие лекарственные препараты и биологически активные соединения на раневой перевязочный материал на основе БЦ.

Структурное расположение волокон БЦ обуславливает механические свойства, отличающиеся от свойств целлюлозы растительного происхождения, в том числе более высокую степень кристалличности (84 – 89 %). БЦ производится в чистом виде, без лигнина, гемицеллюлозы, пектина или любых других соединений, присутствующих в растительной целлюлозе, и не содержит компонентов животного происхождения, поэто-



му процесс очистки очень простой и недорогой [12]. БЦ в виде пленки может быть синтезирована любой формы и размера в зависимости от типа культуры, условий культивирования и вида микроорганизмов.

БЦ имеет уникальные физические и механические свойства, которых нет у других биоматериалов, о чем упоминалось ранее. Она также обладает ультратонкими волоконными сетями с порами переменной геометрии, способностью формироваться в различные структуры и может подвергаться физическим и химическим модификациям.

Макроструктура целлюлозы зависит от условий культивирования. В статической культуре она образуется на границе раздела воздуха / жидкости и среды, а встряхивание культуры приводит к диспергированию целлюлозных клубочков в жидкости. В статических условиях формируются трехмерные структуры БЦ в полупрозрачной, желатиновой, переплетенной и нановолокнистой сети линейных полисахаридных полимеров.

Подобно растительной целлюлозе, в структуре БЦ также имеются как кристаллические, так и некристаллические участки. Поскольку БЦ обладает высокой кристаллическостью, кристаллические участки являются основным компонентом ее структуры с короткими неупорядоченными участками в виде интервалов, что, вероятно, объясняется как высокой механической прочностью, так и гибкостью БЦ. Кроме того, ее значительная механическая прочность обусловлена линейными цепочками целлюлозы и сильной сплоченностью между макромолекулами.

Продуценты БЦ. Выбор штаммов бактерий, используемых для синтеза целлюлозы, является основным фактором, связанным с увеличением выхода БЦ и получением продукта со специфическими свойствами.

Целлюлозопродуцирующая бактерия была впервые описана в 1886 г. А. Дж. Брауном, который идентифицировал ее, изучая ферментацию, и назвал *Bacterium xylinum*. Однако как бактерия, продуцирующая уксусную кислоту, этот микроорганизм позже был переименован в *Acetobacter xylinum*. В настоящее время эта бактерия называется *Gluconacetobacter xylinus* или *Komagataibacter xylinus* и классифицируется как род *Gluconacetobacter*, один из 29 родов семейства *Acetobacteraceae*.

Недавние исследования показали, что целлюлоза может быть синтезирована различными бактериями, включая грамотрицательные виды, такие как *Acetobacter*, *Azotobacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Salmonella*, *Alcaligenes*, а также грамположительные виды, такие как *Sarcina ventriculi*.

K. xylinus представляет собой грамотрицательную палочковидную бактерию без жгутиков, поэтому она неподвижна. По отношению к потреблению кислорода является строго аэробом, и поэтому во многих случаях она присутствует на границе раздела воздух-среда, где ее присутствие можно легко обнаружить благодаря образованию целлюлозной пленки или пелликулы [19].

K. xylinus не единственный вид среди уксуснокислых бактерий, обладающий огромным потенциалом для производства целлюлозы, поскольку другие виды, такие как *Komagataibacter hansenii*, *Komagataibacter medellinensis*, *Komagataibacter nataicola*, *Komagataibacter oboediens*, *Komagataibacter rhaeticus*, *Komagataibacter saccharivorans* и *Komagataibacter pomaceti*, были охарактери-

зованы как сильные продуценты целлюлозы и обычно встречаются в природе на гниющих фруктах и в различных нишах, где зафиксирован углерод в виде сахаров или алкоголя [26].

В настоящее время выделено большое количество продуцентов БЦ рода *Komagataeibacter*, в том числе из симбиотической культуры дрожжевых и уксуснокислых бактерий, еще называемой «чайный гриб», или ферментированный напиток, или комбуча, которая является источником продуцентов БЦ например культур *Komagataeibacter rhaeticus* P 1463, *Komagataeibacter sucrofermentans* H-110, *Komagataeibacter hansenii* C-110 (B-12950), обладающих высокой продуктивностью и способных синтезировать пленку бактериальной целлюлозы на синтетических средах до 8,2–9,5 г/л [4]. Штамм *Komagataeibacter* JF2, синтезирующий пленки с высокой степенью кристалличности, выделен из винного уксуса. Еще многие штаммы выделены из фруктового сока, сока цитрусовых [17]. Г. Нагметова и А. Курманбаев выделели 17 целлюлозопродуцирующих бактерий, используя плоды винограда разных сортов и комбучу [21].

K. xylinus характеризуется наивысшей эффективностью синтеза целлюлозы, способностью потреблять различные источники углерода и является непатогенным для человека. В течение одного часа эта бактерия преобразует 108 молекул глюкозы в цепочку целлюлозы.

Производство БЦ обычно протекает на среде Hestrin-Schramm, состоящий из глюкозы (2%), дрожжевого экстракта (0,5%), пептона (0,5%), Na_2HPO_4 (0,27%), лимонной кислоты (0,115%). При этом глюкоза служит источником углерода, пептон и дрожжевой экстракт действуют как источники азота [22].

БЦ может быть получена двумя способами культивирования: статической ферментацией и ферментацией с перемешиванием, что приводит к разнице в морфологии и механических свойствах [22] (рис. 1.).

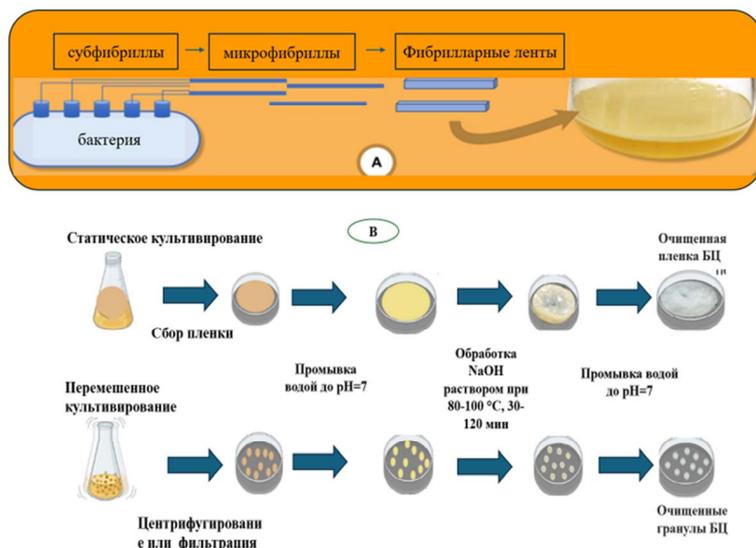


Рис. 1. А – биосинтез; В – процессы получения конечного продукта (чистая бактериальная целлюлоза)



При статической ферментации БЦ образуется в виде пленки на границе раздела воздуха / жидкости и питательной среды. Такой вид БЦ предпочтительнее использовать для производства продуктов, требующих фиксированной структуры, такого как ната-де-коко. В процессе ферментации с перемешиванием БЦ образуется в питательной среде в виде гранул, что способствует образованию устойчивых суспензий.

Очистка БЦ. По сравнению с растительной целлюлозой, очистка БЦ проста и недорога, поскольку в ней не содержатся лигнин и другие молекулы. Процесс очистки БЦ от бактериальных клеток и остатков питательных и метаболитических веществ питательной среды включает три этапа: (1) промывание пленки или гранул БЦ дистиллированной водой до нейтральной реакции; (2) обработку пленки БЦ щелочным раствором (0,1M NaOH) при 100 °С в течение 15 – 20 мин с целью отбеливания бактериальной целлюлозы от бактериальных клеток и красящих компонентов питательной среды; (3) промывание БЦ дистиллированной водой до pH=7. Процесс повторится 3 раза для получения очищенной БЦ.

Ученые разработали новый способ очистки БЦ, позволяющий сократить продолжительность данного процесса и уменьшить энергозатраты. В этом методе удаление клеток бактерий и компонентов питательной среды осуществляется путем обработки раствором перманганата калия с концентрацией 0,1 – 10,0 % [2].

Влияние факторов внешней среды на биосинтез и свойства БЦ. Основными параметрами окружающей среды, влияющими на рост бактерий, продуцирующих целлюлозу, и биосинтез БЦ, являются состав питательной среды, pH, температура и содержание растворенного кислорода. Микроорганизмы быстро реагируют на эти факторы с точки зрения индукции и подавления синтеза белка и изменений в морфологии клеток [18] (рис. 2).



Рис. 2. Факторы, оказывающие влияние на производство БЦ

Состав питательной среды – один из ключевых факторов, влияющих на рост микроорганизмов и выход БЦ. Двумя основными компонентами среды, жизненно важными для роста, являются источники углерода и азота. Для увеличения производства БЦ были предложены различные источники углерода, включая моносахариды, олигосахариды, органические кислоты и спирты.

При производстве БЦ образуются другие побочные продукты, такие как глюконовая кислота и др. Они могут снизить выход БЦ. Например, глюконовая кислота уменьшает pH питательной среды [1].



В большинстве случаев глюкоза оказалась лучшим источником энергии для бактерий. Кроме того, она может быть непосредственно использована в качестве прекурсора для сборки глюкозных звеньев в целлюлозу, но при повышении начальной концентрации глюкозы выход БЦ в питательной среде уменьшался, так как глюкоза метаболизируется в галогеновую кислоту [1].

С.-С. Ван и соавторы недавно доказали, что использование фруктозы дает более высокий выход целлюлозы по сравнению с другими источниками углерода, в том числе с глюкозой [29].

Производство целлюлозы происходит в присутствии различных типов прекурсоров, включая гексаноат, гексозы, трехуглеродистые соединения пируват, дигидроксиацетон, пируват и глицерин, наряду с четырехуглеродистыми соединениями, такими как дикарбоновая кислота, которая связана с цитратным циклом [16].

Выход БЦ также может быть улучшен включением в питательную среду таких добавок, как глицерин, агар, ксантин, альгинат натрия, этанол, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), аскорбиновая кислота [18].

Этанол выполняет различные функции, поскольку он действует как источник энергии для выработки АТФ и стимулирует скорость роста бактерий, одновременно повышая продуктивность из-за окислительного стресса, когда используется в качестве основного источника углерода для производства БЦ. В противном случае при концентрации, превышающей 1 %, было отмечено ингибирование производства целлюлозы [1].

Уксусная кислота вмешивается в процесс биосинтеза, поскольку она реагирует как мономерный субстрат во время реакции полимеризации глюкозы в целлюлозу. Однако более высокие уровни уксусной кислоты могут подавлять рост клеток и становиться неэффективными в сочетании с избыточными концентрациями этанола. Источник углерода, используемый для культивирования продуцентов БЦ, влияет на следующие ее свойства: водоудерживающую способность, площадь поверхности, пористость, степень полимеризации, молекулярную массу, показатель кристалличности, средний размер кристаллитов, собственная вязкость, механических свойств и т. д. [26].

Существует много молекул, влияющих на кристаллический полиморф, индекс кристалличности, I_a целлюлозы и размер БЦ, синтезируемой штаммами *G. xylinus*, такие как лигносульфонат, карбоксиметилцеллюлоза, ксилоглюкан, 2,6-дихлор нитробензонитрил [16].

Температура. Одним из наиболее важных параметров является температура, так как она может регулировать характер адаптации организма для выживания, влияя на нормальную гомеостатическую физиологию. Высокие температуры вызывают денатурацию компонентов питательной среды, тогда как низкие замедляют клеточный метаболизм, обеспечивая небольшое количество энергии для развития клеток.

Бактерии, продуцирующие целлюлозу, могут расти при температуре от 25 до 30 °С, тогда как 28 °С — оптимальная температура для биосинтеза БЦ бактериями *Acetobacter xylinum* [33]. Для *Acetobacter senegalensis* MA1 требовалась более высокая температура по сравнению с другими бактериями — 33,5 °С.



Температура высушивания полимера на этапе очистки оказывает значительное влияние на его прочность. Многие авторы сравнивали качество полимера, высушенного при 25 и 105 °С, и обнаружили, что предел прочности при растяжении целлюлозы, высушенной при 25 °С, составлял 17,5 МПа и был в 15 раз выше, чем прочность целлюлозы, высушенной при более высокой температуре [18].

Водородный показатель (рН) является еще одним важным фактором в контроле окислительной ферментации при производстве БЦ. Оптимальный уровень рН питательной среды для роста бактерий и производства БЦ зависит от конкретного используемого штамма бактерий, но обычно находится в диапазоне 4 – 7 [18].

Экспериментальные наблюдения показали, что требуемый рН для роста продуцента бактериальной целлюлозы составляет 5,5 для *Acetobacter xylinum* [14] и 6,0 для *Komagataeibacter spp.* [31].

Два продукта из БЦ (**Biofilm[®]** и **Gengiflex[®]**) получены при кислотных условиях примерно между 4 и 4,5, что позволило избежать загрязнения среды во время культивирования БЦ [16].

Было отмечено, что показатель рН питательной среды может со временем снижаться из-за накопления вторичных метаболитов, таких как глюконовые, уксусные или молочные кислоты, образующиеся в результате потребления сахаров и источников азота продуцентами БЦ [1].

Аэрирование среды. Поскольку *Komagataeibacter xylinus* (продуценты БЦ) являются облигатными аэробами, содержание растворенного кислорода в питательной среде играет важную роль в метаболизме клетки, так же как выход и качество БЦ зависит от содержания растворенного кислорода.

Авторы определили, что высокий уровень растворенного кислорода в питательной среде приведет к увеличению концентрации глюконовой кислоты. Однако с другой стороны, низкое содержание кислорода препятствует росту бактерий и образованию БЦ. Максимальный выход БЦ получен при 10 %-ной концентрации растворенного кислорода.

Концентрацию растворенного кислорода в питательной среде можно опосредованно изменять с помощью скорости перемешивания, поэтому при культивировании в статических условиях выход БЦ меньше, чем при перемешивании, которое улучшает доставку кислорода к бактериям [1].

БЦ, полученная в перемешиваемой культуре, имеет более низкую степень полимеризации, меньшую кристалличность, высокое содержание целлюлозы I_{β} , низкий модуль Юнга, более высокую влагоудерживающую способность и вязкость суспензии по сравнению с БЦ, полученным в статической культуре.

Обработка целлюлозы раствором гидроксида натрия (NaOH) и раствором гипохлорита натрия (NaClO) увеличивает модуль упругости даже до 30 Гпа.

Производство БЦ на ферментативных средах из сельскохозяйственных и промышленных отходов. Из-за высокой себестоимости питательной среды HS, получение БЦ в промышленных масштабах ограни-



чено. В последние годы поиск экономически эффективных источников питательных веществ остается основой для снижения затрат на производство БЦ в промышленных целях.

Множество сельскохозяйственных и пищевых отходов, усваивающихся бактериями в качестве различных источников углерода и азота, такие как свекловичная меласса, апельсиновый, ананасовый, томатный соки и гидролизат пшеничной соломы, увеличивают выход БЦ, снижают издержки производства и улучшают экологическую обстановку [3].

Разработка питательной среды из сельскохозяйственных и промышленных отходов осуществляется при помощи химических и биотехнологических процессов: **предварительной обработки и гидролиза**.

Предварительная обработка различных видов отходов является важным шагом производства БЦ. Для нее были разработаны различные физические (измельчение и гидропиролиз) и химические (воздействие кислотой, щелочью, озоном) методы, обеспечивающие изменение размера, химического состава биомасс, оптимизируя условия для второго этапа – гидролиза. Эти методы должны отвечать следующим требованиям: увеличивать выход сахара или способность к последующему образованию сахаров путем ферментативного гидролиза, а также быть экономически эффективными.

Гидролиз – основной этап производства БЦ из сред на основе сельскохозяйственных и промышленных отходов, который позволяет конверсию обработанных отходов до сахаров, образующихся при получении БЦ с помощью штаммов-продуцентов до БЦ. Эффективность процесса гидролиза зависит от двух факторов: предварительной обработки и вида гидролиза (кислотного или ферментативного). При ферментативном гидролизе ферментам требуются определенные условия (рН и температура) для превращения комплексных молекул в простые, которые в противном случае могут быть усвоены микроорганизмом для производства БЦ. Наиболее распространенной кислотой для засахаривания отходов в производстве БЦ является разбавленная серная кислота.

В ряде исследований, представленных в таблице 2, акцентируется внимание на применении недорогих питательных сред, основанных на сельскохозяйственных и пищевых отходах, для синтеза бактериальной целлюлозы.

Таблица 2

Сравнительный анализ выхода БЦ, полученной на синтетической среде Hestrin-Schramm и на средах из различных сельскохозяйственных и промышленных отходов

Сельскохозяйственные отходы	Предобработка	Гидролиз	Выход (г/л)		Источник
			HS	CO	
Карагана коршинский	Гидротермальная, NaOH и этилендиамин	Ферментативный (15 FPU) Cellic CTec2 и (9 U) Cellic HTec2	3,0	4,6	[10]



Сельскохозяйственные отходы	Предобработка	Гидролиз	Выход (г/л)		Источник
			НС	СО	
Пшеничная солома	Ионная жидкость 1-аллил-3-метилимидазолий	Целлюлаза	3,7	8,3	[19]
Табачный экстракт	Путем кипячения в воде и паровой дистилляции (рН=9)	—	0,52	5,2	[31]
Листья сладкого сорго	Обработка фосфорной кислотной и перекисью водорода	Ферментативный (20 FPU) Cellic® CTec2	0,98	2,54	[28]
Рисовая лапша	Фильтрация	—	2,67	11,76	[27]
Цитрусовая мякоть, вода	—	Целлюлазы 50 U и 150 U	1,6	8,77	[9]
Кокосовая вода	—	Пектиназа	1,6	9,91	[9]
Меласса	—	—	1,6	2,9	[24]
Мякоть сладкого лайма	Извлечение при высокой температуре	Серная кислота	9,98	26,2	[11]
Кожура ананаса	Извлечение водой	—	2,57	11,44	[16]
Растительное масло	—	—	1	7,5	[32]
Грушевая кожура и выжимки	Измельчение	—	5,1	10,9	[20]
Мангифера, экстракт индики	Извлечение водой	—	1,61	25,43	[8]
Муцилаж какао, эксудат	Автоклавирование	—	4,2	13,13	[25]

Применение БЦ в разных областях. Благодаря всем описанным выше свойствам БЦ может быть применена в любой области в качестве альтернативы растительной целлюлозе. В настоящее время БЦ используется в различных сферах, таких как пищевая, бумажная промышленность, медицина и фармакология (рис. 3).

Применение БЦ в пищевой промышленности. Физические и механические свойства БЦ, включая ее нерастворимость, быструю био-разлагаемость, прочность на растяжение, эластичность, долговечность, а также нетоксичность и неаллергенность, позволяют использовать ее для производства ряда продуктов с высокой добавленной стоимостью (рис. 3).

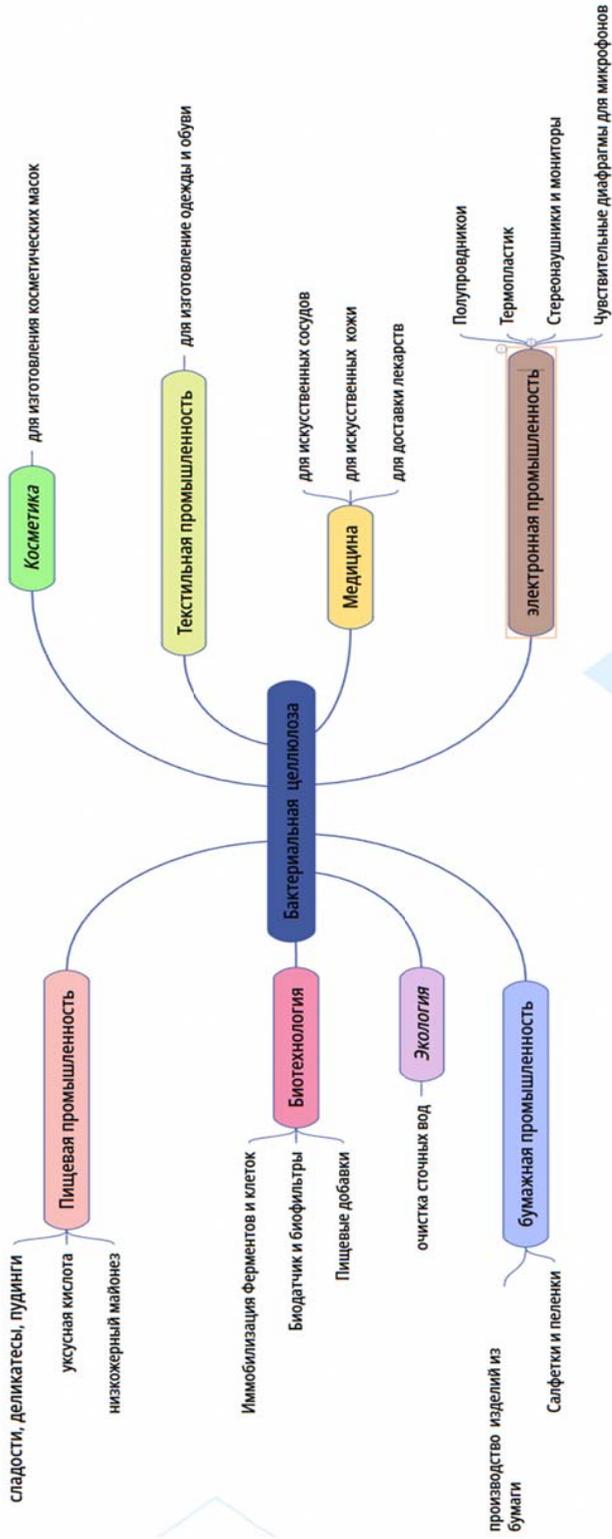


Рис. 3. Применение БЦ



БЦ применяется в пищевой промышленности в качестве загустителя, стабилизатора и желирующего агента, улучшающих качество продуктов. Благодаря своей влагоудерживающей способности она используется для приготовления крема (рис. 4).



ОСНОВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ПИЦЕ

Рис. 4. Основное применение БЦ на пищевых производствах [7]

БЦ употребляется в качестве заменителя жира в различных пищевых продуктах, снижая при этом калорийность и/или способствуя избеганию проблем со здоровьем, связанных с жирами. Замена жира была проведена при помощи гидроколлоидов в различных продуктах, таких как фрикадельки, жмыхи [24], эмульгированные мясные продукты и сыры [6].

Смесь БЦ и изолята соевого белка (далее – ИСБ) применяется в качестве заменителя насыщенных жирных кислот в сливках для снижения риска ожирения и сердечно-сосудистых заболеваний. По сравнению с чистым ИСБ смесь БЦ и ИСБ в мороженом обладает высокими текстурными, реологическими и эмульгирующими свойствами и термической стабильностью.

БЦ с экстрактом монаскуса в качестве пищевых волокон образует аналоги мяса, снижающие уровень холестерина. Исследования показали, что благодаря высокой плотности гидроксильных групп на поверхности БЦ обладает лучшей способностью к стабилизации эмульсий Пикеринга (масло в воде) по сравнению с производными целлюлозы. В другом исследовании получены эмульсии «масло в воде», содержащие 5 % оливкового масла, с использованием изолята сывороточного белка в качестве



сурфактанта (2–5 % масс.) и БЦ в качестве стабилизатора (0–1 % масс.). Эмульсия была нестабильной при более низких концентрациях БЦ (0,5–0,7 % масс.), но добавление 1 % БЦ приводило к стабильным эмульсиям, предотвращая коалесценцию.

БЦ используется в иммобилизации пробиотических штаммов для защиты пробиотика от воздействия желудочных соков и сохранения полезных свойств для обеспечения здоровья потребителей. Ученые разработали композит на основе пектина (20 %) и БЦ (80 %), способного защищать *Vacillus coagulans* от высушивания и желудочно-кишечного сока. Бионанокompозит может быть использован для длительного хранения пробиотиков при различных температурах.

Было проведено множество исследований по иммобилизации ферментов, которые могут быть полезны в пищевой промышленности, в том числе лактаз, лизоцима, бета-галактазы, пероксидазы хрена.

Иммобилизация антоцианов из цветков *Echium amoenum* в БЦ применяется для контроля свежести креветок путем колориметрической индикации pH.

Важным аспектом для создания антимикробного упаковочного материала являются благоприятные условия высвобождения активного ингредиента, чтобы он мог взаимодействовать с пищевым продуктом, минимизируя или препятствуя размножению микроорганизмов. Ученые разработали состав из БЦ и поли(3-гидроксibuтирата) с эфирным маслом как перспективную антимикробную упаковку. Эта смесь также обладает благоприятными механическими и термическими характеристиками для использования в пищевой упаковке.

БЦ, пропитанная лиофилизированными бактериями *Lactobacillus plantarum*, служит антибактериальной упаковкой для мясного фарша и предотвращает рост *Listeria monocytogenes*.

Упаковка пищевых продуктов пленкой из БЦ и картофельной кожуры, содержащей фенольные соединения куркумина, показала улучшение прочности на разрыв и заметное снижение проницаемости водяного пара и кислорода. Куркумин используется в качестве индикатора pH и борной кислоты, которые могут влиять на качество пищевых продуктов [30].

Пленки из БЦ могут применяться в качестве закусок или оберток для суши и нетрадиционных сэндвичей при добавлении в них вкусовых фруктовых шпоре.

Медицина. БЦ обладает большим потенциалом в различных областях биомедицины, включая перевязку ран, искусственную кожу, зубные имплантаты, доставку лекарств, кровоостанавливающие материалы, сосудистые трансплантаты, каркасы для тканевой инженерии, биосенсоры и диагностику (рис. 5).

Высокая механическая прочность во влажном состоянии, значительная проницаемость для жидкостей и газов и низкое раздражение кожи указывают на то, что желатиновую мембрану из БЦ, например **Biofilm**[®] и **Gengiflex**[®] может использоваться как искусственная кожа в хирургии и зубной имплантации, в случае ожогов второй и третьей степени, язв и других заболеваний.

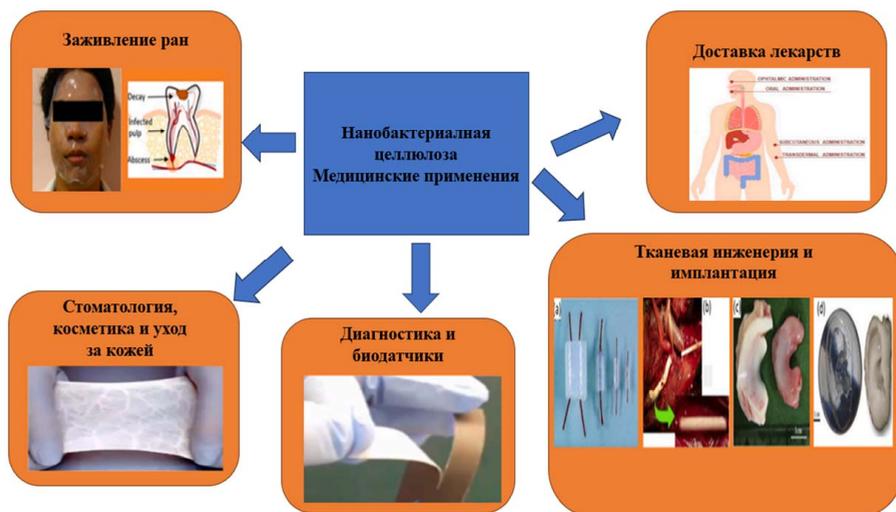


Рис. 5. Основное применение БЦ в медицине

БЦ изначально использовалась в качестве раневой повязки благодаря высокой механической прочности во влажном состоянии, проницаемости, гибкости, полупрозрачности и отличной биосовместимости.

После практического применения было обнаружено, что БЦ обладает рядом дополнительных преимуществ, включая устранение экссудата, способствование потоотделению и газообмену, уменьшение боли и потери электролитов и белка, предотвращение инфекции и ускорение заживления ран.

Целлюлоза, вырабатываемая бактериями, может быть использована для изготовления искусственных кровеносных сосудов, поскольку она несет меньший риск образования тромбов, чем синтетические материалы, используемые в настоящее время для операций шунтирования.

Включение БЦ в функциональные биомедицинские приложения, такие как биоанализ, биосенсоры, терапия стволовыми клетками, ферментативная обработка и иммобилизация клеток, требует значительного контроля его структуры и свойств.

В последнее время натуральные полимеры, такие как целлюлоза и хитозан имеют широкое применение в качестве фармацевтических носителей. Они обладают такими преимуществами, как низкая стоимость, биосовместимость, биоразлагаемость, нетоксичность и поверхностная функциональность, которые важны в механизме адсорбции лекарств под действием электростатической силы.

БЦ является высокопористым наноматериалом, способными переносить молекулы, такие как функциональные агенты (антибактериальные, антиоксидантные, противовоспалительные и т. д.) или полезные микроорганизмы (например, пробиотики, постбиотики), и затем доставлять их к определенной цели (например, пище, ране, сосудам и т. д.).



Широко распространенным примером выступает загрузка антибиотиков на поверхность БЦ путем погружения, например, как в случае с тетрациклином — ингибитором роста бактерий путем ингибирования трансляции.

Недавно ученые оплодотворили мезенхиманские стволовые клетки в матрице БЦ для интеграции в ткань хозяина и содействия регенерации поврежденной ткани.

Косметика. Стремление к эстетике привело к росту рынка косметики и появлению широкого ассортимента продуктов. Косметические активные вещества — это вещества, помогающие поддерживать красоту. Они входят в состав транспортных средств, доставляющих их к коже и способствующих проникновению в нее. Натуральные полимеры, такие как целлюлоза, гидрогели и целлюлозные нановолокна, были использованы в качестве основных материалов для производства этих косметических средств.

Благодаря эффективности БЦ для быстрого высвобождения гидрофобных и гидрофильных лекарств, а также высокой степени влагоудержания, она хорошо подходит для использования в качестве увлажняющей и противовоспалительной листовой маски для кожи, склонной к акне и воспалениям [5].

Ученые доказали, что применение БЦ, соединенной с 1,3-дигидрокси-2-пропаном в концентрации 50 г/л в течение 30 мин гарантированно изменяет цвет кожи на тот, который считается наиболее близким к эффекту естественного загара, не вызывая аллергии на коже.

Текстильная промышленность. БЦ была исследована в качестве связующего в бумаге. Она состоит из чрезвычайно маленьких скоплений целлюлозных микрофибрилл, и при встраивании в бумагу это свойство значительно повышает прочность и долговечность целлюлозы. Исследователи смогли доказать, что добавление 5 % БЦ к древесной массе при формировании бумажного листа значительно улучшает удержание каллина, прочность и огнестойкость по сравнению с бумажными листами, полученными из БЦ.

БЦ также используется вместо химических волокон на основе нефти, таких как нейлона, акрилона, терилена и полипропилена, для улучшения качества тканей, например, для большей мягкости и удобства при ношении одежды. БЦ также легко очищается, что снижает воздействие на окружающую среду

Защита экосистемы. Загрязнение воды, почвы и воздуха является огромной проблемой для многих стран мира. Тяжелые металлы, полициклические ароматические углеводороды, остатки антибиотиков, твердые частицы, взвешенные в воздухе, могут способствовать не только многочисленным проблемам со здоровьем у людей, но и прежде всего нарушать экосистему и приводить к прогрессирующим и заметным изменениям климата. В связи с этим была предпринята попытка использовать БЦ в качестве мембраны в технологии очистки сточных вод.

Исследователи показали, что биокомпозит на основе целлюлозы и хитозана характеризуется высокой эффективностью в удалении ионов меди из воды. При оценке возможности многократного использования



мембрана получила хорошие результаты, свидетельствующие о незначительных изменениях эффективности удаления меди во втором цикле фильтрации.

Электронная промышленность. БЦ и получаемые на ее основе композиты также могут найти потенциальное применение в электронной промышленности.

Ученые разработали сепаратор для литий-ионных аккумуляторов, мембрана которых изготовлена из БЦ, характеризующейся термостойкостью до 200 °С и высокой ионной проводимостью.

Другой композит целлюлозы (галлуазитцеллюлоза) входит в состав мембраны сепаратора, обладает высокой прочностью на разрыв (84,4 МПа), более высокой ионной проводимостью и хорошими циклическими свойствами [14].

Новый гелевый электролит, полученный с использованием БЦ, покрытой слоями хитозана и альгината, содержащей 1-этил-3-метилимидазолий тетрафуроборат, был оптимизирован для использования в двухслойных электрических конденсаторах без растворителей.

Модификация БЦ для получения функциональных биополимеров. Хотя полимер БЦ обладает уникальными физико-химическими характеристиками, наличие единственной функциональной группы приводит к его плохой растворимости и технологичности, что ограничивает области ее применения.

БЦ обладает большим количеством гидроксильных групп на поверхности, которые легко поддаются изменениям. Ее можно модифицировать для получения альтернативных функциональных групп и схем функционирования, используя методы модификации *in situ* и *ex situ* [26] (рис. 6).

В ряде исследований модификация *in situ* рассматривается как простой подход к изменению функциональных свойств БЦ путем добавления армирующего материала (хитозана, желатина, поли-3-гидроксibuтирата, наноматериалов, глины, кремнезема) в питательную среду. Большим преимуществом такого процесса является инкапсуляция материалов, которые становятся частью фибрилл, тем самым улучшая БЦ за счет изменения главным образом ее физико-механических свойств. Кроме того, в БЦ можно привнести новые функциональные свойства [26].

Композит хитозан / БЦ обладает превосходной механической прочностью на разрыв и деформацию благодаря новым сильным водородным связям между полимерами, делающими его более термостабильным, устойчивым к воде и воздухопроницаемым.

Модификации *ex situ* бывают либо химическими (например, окисление или реакции сшивания), либо физическими (физическое поглощение из растворов или суспензий частиц, гомогенизация или растворение БЦ при смешивании с добавками).

Путем пропитки пленки БЦ в растворе AgNO_3 образуется композит БЦ-Ag, проявляющий чрезвычайно мощную антибактериальную активность против грамположительных и грамотрицательных бактерий [27]. Таким образом, исследование показало, что включение металлов и оксидов металлов (ZnO , CaCl_2 , TiO_2) в композиты БЦ придает электропроводность и антимикробные свойства [15].

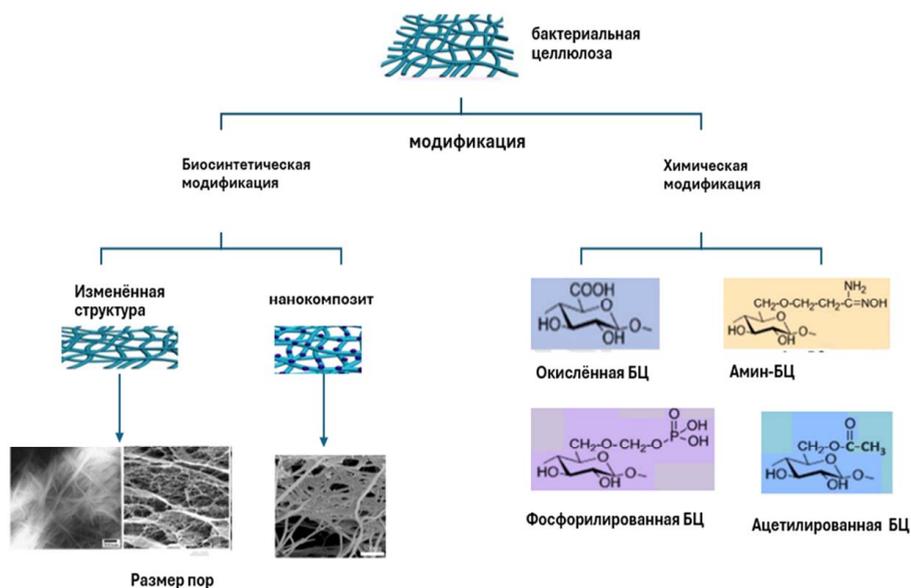


Рис. 6. Способы получения модифицированных БЦ наноматериалов

Пропитка агарного полимера бактериальной целлюлозой улучшает его свойства за счет повышения термостабильности и механических свойств, необходимых для применения в пищевой упаковке.

Другие исследования показали, что сочетание БЦ с альгинатом [13], желатином, арабиногалактаном, ксиланом, трипептидом, пектином, графеном, обеспечивают устойчивость к деформации и разрыву, уменьшению пористости.

Вывод

Благодаря своим физическим и механическим свойствам БЦ является материалом, становящимся потенциальной альтернативой пластиковым полимерам для применения в разных областях, например в качестве упаковки пищевых продуктов, а также находит все большее применение для создания искусственных тканей на основе БЦ путем модификаций *in situ* и *ex-situ*. БЦ может быть синтезирована многими бактериями, но процесс ее получения для промышленности и научных исследований затруднен из-за высокой себестоимости питательной среды. Необходимы дальнейшие интенсивные исследования, направленные на создание новых штаммов, генетически модифицированных на разработку питательной среды на основе сельскохозяйственных и промышленных отходов и на оптимизацию условий культивирования продуцентов БЦ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-24-00169.



Список литературы

1. Гадыева Е. К. Влияние условий культивирования на биосинтез бактериальной целлюлозы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8, №3. С. 33–40. doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-3-33-40.
2. Коньшин В. В., Крахмалев В. А., Коршунов Л. А. и др. Способ очистки бактериальной целлюлозы : патент на изобретение №2754368 от 01.09.2021 г.
3. Милютин М. А. Питательные среды для биосинтеза бактериальной целлюлозы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XV Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием. Бийск, 2022. С. 321–324.
4. Ревин В. В., Лияськина Е. В. Штамм *Gluconacetobacter sucrofermentans* – продуцент бактериальной целлюлозы : патент на изобретение №2523606 от 20.07.2014 г.
5. Amorim J. D. P., Galdino C. J. S., Costa A. F. S. et al. BioMask, a polymer blend for treatment and healing of skin prone to acne // Chemical Engineering Transactions. 2020. Vol. 79. P. 1–6. doi: 10.3303/CET2079035.
6. Aydınol P., Özcan T. Production of reduced fat Labneh cheese with inulin and β -glucan fibre based fat replacer // International Journal of Dairy Technology. 2018. Vol. 71, №2. P. 362–371. doi: 10.1111/1471-0307.12456.
7. Azredo H. M. C., Barud H., Farinas C. S., Vasconcellos V. M. Bacterial Cellulose as a Raw Material for Food and Food Packaging Applications // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2019. Vol. 3. P. 45–57. doi: 10.3389/fsufs.2019.00007.
8. Calderón S., Horue M., Alvarez V. A. et al. Isolation and partial characterization of *Komagataeibacter* sp. SU12 and optimization of bacterial cellulose production using *Mangifera indica* extracts // Journal of Chemical Technology & Biotechnology. 2021. Vol. 97, №6. P. 1–12. doi: 10.1002/jctb.6839.
9. Cao Y., Lu S., Yang Y. Production of bacterial cellulose from byproduct of citrus juice processing (citrus pulp) by *Gluconacetobacter hansenii* // Cellulose. 2018. Vol. 25. P. 6977–6988. doi: 10.1007/s10570-018-2056-0.
10. Chen L., Hong F., Yang X., Han S. Biotransformation of wheat straw to bacterial cellulose and its mechanism // Bioresource Technology. 2013. Vol. 135. P. 464–468. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.029.
11. Dubey S., Singh J., Singh R. Biotransformation of sweet lime pulp waste into high-quality nanocellulose with an excellent productivity using *Komagataeibacter europaeus* SGP37 under static intermittent fed-batch cultivation // Bioresource Technology. 2018. Vol. 247. P. 73–80. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.089.
12. Fontana J. D., Fontana J. D., Koop H. S., Tiboni M. New insights on bacterial cellulose // Food Biosynthesis. 2017. Vol. 7. P. 213–249. doi: 10.1038/ijo.2015.179.
13. Gutierrez E., Burdiles P. A., Quero F. et al. 3D printing of antimicrobial alginate/bacterial-cellulose composite hydrogels by incorporating copper nanostructures // ACS Biomaterials Science & Engineering. 2019. Vol. 5, №11. P. 6290–6299. doi: 10.1021/acsbomaterials.9b01048.
14. Huang Ch., Ji H., Guo B. et al. Composite nanofiber membranes of bacterial cellulose / halloysite nanotubes as lithium-ion battery separators // Cellulose. 2019. Vol. 26, №11. P. 6669–6681. doi: 10.1007/s10570-019-02558-y.
15. Jebel F. S., Almasi H. Morphological, physical, antimicrobial and release properties of ZnO nanoparticles-loaded bacterial cellulose films // Carbohydrate Polymers. 2016. Vol. 149. P. 8–19. doi: 10.1016/j.carbpol.2016.04.089.



16. Keshk S.M. Bacterial Cellulose Production and its Industrial Applications // Journal of Bioprocessing & Biotechniques. 2014. Vol. 4, №2. P. 10. doi: 10.4172/2155-9821.1000150.

17. Kim S.S., Lee S.Y., Park K.J., Park S.M. Gluconacetobacter sp. gel_SEA623-2, bacterial cellulose producing bacterium isolated from citrus fruit juice // Saudi Journal of Biological Sciences. 2017. Vol. 24, №2. P. 314–319. doi: 10.1016/j.sjbs.2015.09.031.

18. Lee K.Y., Buldum G., Mantalaris A., Bismarck A. More than meets the eye in bacterial cellulose: Biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites // Macromolecular Bioscience. 2014. Vol. 14, №1. P. 10–32. doi: 10.1002/mabi.201300298.

19. Li W., Zhang S., Zhang T., Shen Y. et al. Bacterial cellulose production from ethylenediamine pretreated Caragana korshinskii Kom // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 164. P. 113340.

20. Ma X., Yuan H., Wang H., Yu H. Coproduction of bacterial cellulose and pear vinegar by fermentation of pear peel and pomace // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2021. Vol. 44. P. 1–14. doi: 10.1007/s00449-021-02599-3.

21. Nagmetova G., Kurmanbayev A. Isolation and identification of bacterial cellulose producers with potential for medicine and biotechnology // Eurasian Journal of Applied Biotechnology. 2019. Vol. 2. P. 114–120. doi: 10.11134/btp.2.2019.11.

22. Pang M., Huang Y., Meng F. et al. Application of Bacterial Cellulose in Skin and Bone Tissue Engineering // European Polymer Journal. 2019. Vol. 122. P. 9. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2019.109365.

23. Ramon D.F., Gámez-Meza N., Medina-Juárez L.Á. et al. Bacterial cellulose production by Gluconacetobacter entanii using pecan nutshell as carbon source and its chemical functionalization // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 1, №207. P. 91–99. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.11.067.

24. Revin V.V., Dolganov A.V., Liyaskina E.V. et al. Characterizing bacterial cellulose produced by Komagataeibacter sucrofermentans H-110 on molasses medium and obtaining a biocomposite based on it for the adsorption of fluoride // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 1422. doi: 10.3390/polym13091422.

25. Saavedra-Sanabria O.L., Durán D., Cabezas J. et al. Cellulose biosynthesis using simple sugars available in residual cacao mucilage exudate // Carbohydrate Polymers. 2021. Vol. 274. P. 118645. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118645.

26. Selestina G., Janja T. Bacterial Cellulose: Production, Modification and Perspectives in Biomedical Applications // Nanomaterials. 2019. Vol. 9, №10. P. 20. 1352. doi: 10.3390/nano9101352.

27. Sutthiphatkul T.S., Amornrat O.D. Optimization of bacterial cellulose production from wastewater of noodle processing by Komagataeibacter sp. PAP1 and bio-cellulose paper production // Walailak Journal of Science and Technology. 2020. Vol. 17, №11. P. 1241–1251. doi: 10.48048/wjst.2021.6508.

28. Wang Q., Nnanna P.C., Shen F. et al. Full utilization of sweet sorghum for bacterial cellulose production: a concept of material crop // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 162. P. 113256. doi: 10.1016/J.INDCROP.2021.113256.

29. Wang S.-S., Han Y.-H., Chen J.-L. et al. Insights into Bacterial Cellulose Biosynthesis from Different Carbon Sources and the Associated Biochemical Transformation Pathways in Komagataeibacter sp. W1 // Polymers. 2018. Vol. 10, №9. P. 20. 963. doi: 10.3390/polym10090963.



30. Xie Y., Niu X., Yang J. et al. Active biodegradable films based on the whole potato peel incorporated with bacterial cellulose and curcumin // International Journal of Biological Macromolecules. 2020. Vol. 150. P. 480–491. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.29.

31. Ye J., Zheng S., Zhang Z. et al. Bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* ATCC 23767 using tobacco waste extract as culture medium // Bioresource Technology. 2019. Vol. 274. P. 518–524. doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.028.

32. Zahan K. A.; Hedzir M. S. A.; Mustapha M. The potential use of papaya juice as fermentation medium for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* 0416 // Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science. 2017. Vol. 40, №3. P. 343–350.

33. Żywicka A., Junka A. F., Szymczyk P. et al. Bacterial cellulose yield increased over 500 % by supplementation of medium with vegetable oil // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 199. P. 294–303. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.06.126.

Об авторах

Абдул-Галил Ахмед Али — асп., Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия.

E-mail: abdoulgalil49@gmail.com

ORCID: 0009-0007-3982-2131

Ольга Владимировна Кригер — доц., д-р. техн. наук, проф., Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия.

E-mail: ovkriger@itmo.ru

ORCID: 0000-0002-1489-0716

SPIN-код: 4981-1381

Abdoul-Galil Ahmed Ali, O. V. Krieger

PRODUCTION AND APPLICATION OF BACTERIAL CELLULOSE

ITMO National Research University, St. Petersburg, Russia

Received 24 July 2024

Accepted 22 November 2024

doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6

To cite this article: Abdoul-Galil Ahmed Ali, Krieger O. V., 2025, Production and application of bacterial cellulose, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Natural and Medical Sciences*, №1. P. 82–102. doi: 10.5922/vestniknat-2025-1-6.

Bacterial cellulose (BC) is a biomaterial produced by certain bacteria that possesses unique properties, distinguishing it from plant-derived cellulose by its purity, high crystallinity, excellent biocompatibility, and superior water-holding capacity. Due to these advantages, BC is increasingly used in various industrial applications. However, large-scale production of BC is limited, particularly by the high cost of the culture medium. This review presents an analysis of scientific data and official reports on the properties of BC and methods to enhance its productivity for applications in the food industry, specifically as a food additive and packaging material. A literature search was conducted in both English and Russian using the Scopus,



ScienceDirect, PubMed, and eLIBRARY.RU databases. The analysis of scientific and official data demonstrated that physical factors of the culture medium, such as temperature, pH, carbon source, and cultivation conditions, influence the yield and properties of BC. The utilization of agricultural and food waste as a culture medium has been shown to enhance the productivity of *Komagataeibacter xylinus* strains. The combination of BC with other components, including biologically active substances, metals, probiotics, polymers, and antibiotics, can improve its functional properties and expand its applications in the food industry – for instance, as a fat replacer, in the production of artificial meat, enzyme immobilization, and the development of biodegradable packaging materials.

102

Keywords: bacterial cellulose, BC biosynthesis, substrates for cultivation, BC applications

The authors

Abdoul-Galil Ahmed Ali, graduate student, ITMO National Research University, Russia.

E-mail: abdoulgalil49@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3982-2131>

Prof. Olga Vladimirovna Kriger, National Research University ITMO, Russia.

E-mail: ovkriger@itmo.ru

ORCID: 0000-0002-1489-0716

S SPIN-code: 4981-1381