

СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА

© 2018 г. И.П. Шидловский*, А.А. Шумилова*,
Е.И. Шишацкая* **, Т.Г. Волова* **

*Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, Свободный просп., 79

**Институт биофизики СО РАН (ФИЦ КНЦ СО РАН), 660036, Красноярск, Академгородок, 50/50

E-mail: shumilova.ann@mail.ru

Поступила в редакцию 21.09.17 г.

После доработки 09.04.18 г.

Композиты бактериальной целлюлозы, синтезированной в культуре штамма уксуснокислых бактерий *Komagataeibacter xulinus* VKPM В-12068, с наночастицами серебра получены гидротермальным методом при варьировании в реакционной среде концентрации AgNO_3 . Присутствие серебра в композитах подтверждено элементным анализом. Показано увеличение содержания наночастиц серебра в композите от 1,08 до 9,1 мас. % (от 0,044 до 0,370 мг/см²) при возрастании концентрации AgNO_3 в среде от 0,0001 до 0,01 М. С применением растровой электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, рентгеноструктурного анализа и системы измерения краевых углов смачивания водой исследованы структура, свойства поверхности и физико-химические свойства композитов в зависимости от содержания серебра. С использованием диско-диффузионного метода показано, что полученные композиты обладают выраженной антибактериальной активностью по отношению к патогенной микрофлоре *E. coli*, *Ps. eruginosa*, *St. aureus*.

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, наночастицы серебра, гидротермальный синтез, композиты, антибактериальная активность.

DOI: 10.1134/S0006302918040051

Бактериальная целлюлоза (БЦ) является перспективным материалом биомедицинского назначения. БЦ – это биополимер, синтезируемый микроорганизмами и аналогичный по химической структуре растительной целлюлозе. Он обладает уникальными свойствами, включая прочность, эластичность, газопроницаемость, высокую влагоудерживающую способность; характеризуется биосовместимостью, не проявляет цитотоксичности и не вызывает аллергических реакций [1,2]. Показано, что пленки бактериальной целлюлозы эффективны в качестве носителя клеток для технологий клеточной и тканевой инженерии, ранозаживляющего материала при реконструкции дефектов тканей с возможностью депонирования и доставки лекарственных препаратов [3–6].

Собственно БЦ не обладает антибактериальной активностью, но в сочетании с хитозаном и альгинатом, а также другими компонентами вызывает торможение роста патогенных

микроорганизмов [7–10]. Это позволяет рассматривать композитные пленки БЦ для лечения инфицированных кожных ран. Благодаря трехмерной пористой структуре возможно получение БЦ в композиции с металлическими частицами серебра в качестве антибактериального и ранозаживляющего средства. Металлическое серебро и его соединения обладают выраженным бактерицидным эффектом, ингибируя развитие многих патогенных микроорганизмов. Ионы серебра, связываясь с ДНК микроорганизмов, подавляют размножение клеток, взаимодействуют с тиоловыми группами белков клеточных стенок, нарушая их структуру, транспортировку веществ в клетку, бактериальное дыхание [11]. Описаны различные способы получения композитов БЦ с наночастицами серебра (БЦ/AgNps) – химическое восстановление боргидридом натрия, двухводным цитратом натрия, полидопамином, 2,2,6,6-тетраметилпиперидин-1-оксидом и т.д. – и показана их выраженная антибактериальная активность [12–15]. Однако наиболее оптимальным является гидротермальный синтез, реализованный авторами, при котором не используются дополнитель-

Сокращения: БЦ – бактериальная целлюлоза, БЦ/AgNps – композиты бактериальной целлюлозы с наночастицами серебра.

ные реагенты и восстановителем серебра служит собственно БЦ, что позволяет получить наночастицы серебра требуемого размера.

Цель работы – исследование физико-химических и антибактериальных свойств композитов бактериальной целлюлозы и наночастиц серебра.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования служили образцы пленок бактериальной целлюлозы, синтезированные в культуре уксуснокислых бактерий *Komagataeibacter xylinus* В-12068. Штамм выделен на кафедре биотехнологии Сибирского федерального университета из природной ассоциации *Medusomyces gisevii* J. Lindau (чайный гриб) селекционным путем; зарегистрирован во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (коллекционный номер В-12068). Оптимизированная ростовая среда и условия культивирования обеспечивают высокие выходы БЦ в поверхностной статической культуре [16]. Для получения очищенной БЦ пленки отделяли от культуральной жидкости и погружали в 0,5%-й раствор NaOH на 24 ч при 25–27°C. Далее пленки выдерживали в 0,5%-м растворе соляной кислоты для нейтрализации, после чего промывали дистиллированной водой до pH 7,0. Высушивание пленок до постоянной массы выполняли при комнатной температуре, а также лиофилизировали с использованием лабораторной установки ALPHA 1-2/LD (Martin Christ GmbH, Германия).

Для получения композитов БЦ с наночастицами серебра использовали AgNO₃ (ЗАО НПП «Уралхиминвест», Россия) и гидротермальный метод, позволяющий без применения каких-либо химических реагентов получать наночастицы серебра, используя БЦ в качестве восстанавливающего и стабилизирующего агента [12]. Очищенные сырые пленки БЦ нарезали в форме дисков диаметром 1 см, помещали в колбы с раствором AgNO₃ и выдерживали течение 60 мин при 90°C; использовали три различные концентрации AgNO₃ – 0,0001, 0,001 и 0,01 М. Средний диаметр, размерное распределение и ширину его распределения (индекс полидисперсности) микрочастиц измеряли с помощью анализатора частиц Zetasizer Nano ZS (Malvern, Великобритания) методом динамического рассеивания света. Вычисление параметров проводили с помощью программного обеспечения в соответствии с Международным Стандартом ISO 13321:1996.

Микроструктуру поверхности высушенных пленок БЦ и элементный состав композитов и

содержание в них серебра определяли с использованием сканирующего электронного микроскопа TM-3000 (Hitachi, Япония) с системой микроанализа BRUKER XFlash 430 H и с помощью рентгеноспектрального анализа. Образцы размером 5 × 5 мм помещали на предметный столик и напыляли золотом с помощью установки Emitech K575X (Quorum Technologies Ltd, Великобритания) при токе 10 мА, время – 2 × 40 с).

Для изучения физико-химических свойств были использованы образцы в виде высушенных пленок и/или порошка. Термический анализ проводили с использованием дифференциально-сканирующего калориметра DSC-1 (Mettler Toledo, Швейцария). Образцы массой 4,0 ± 0,2 мг помещали в алюминиевые тигли, нагревали со скоростью 5°C/мин до 200°C; далее охлаждали до –20°C, выдерживали в течение 20 мин и повторно нагревали до 320°C. Температуру термической деградации определяли по пикам на термограммах с использованием программного обеспечения StarE. Рентгеновские эксперименты для определения степени кристалличности образцов выполнены на порошковом дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker, Германия) с линейным детектором VANTEC. Для этого в непрерывном режиме сняты рентгенограммы с пошаговым запоминанием накопленной за 114 с интенсивностью (шаг 0,016° по 2θ), режим работы прибора – 40 кВ × 40 мкА, интервал сканирования от 5° до 60° по 2θ. В промежутке от 48° до 60° наблюдали только равномерно понижающийся фон. В процессе измерений образцы вращались вокруг перпендикуляра к поверхности. Степень кристалличности определяли как величину отношения площади под рентгенограммой с вычтенным фоном к площади без вычитания аморфного фона. Для вычислений использована программа Eva из программного приложения к дифрактометру.

Свойства поверхности пленок БЦ изучали с помощью прибора DSA-25E (Krüss, Германия) для измерения контактных краевых углов капель воды методом Оунса–Вендта–Рабеля–Кьельбле [17,18] измерением свободной поверхностной энергии, ее дисперсной и полярной составляющей с последующей обработкой данных с помощью программы DSA-4.

Выход наночастиц из стерильных образцов композитов БЦ/AgNps исследован *in vitro* при экспонировании в фосфатно-солевом буфере. Образцы диаметром 1 см с соблюдением стерильности помещали во флаконы, заполненные 50 мл буфера с pH 6,0, флаконы размещали в

термостате при 37°C в течение 72 ч. Для регистрации выхода периодически отбирали пробы и определяли концентрацию наносеребра с помощью атомно-адсорбционной спектофотометрии.

Антибактериальный эффект композитов БЦ/AgNps тестировали в культурах референтных штаммов: *Escherichia coli* ATCC 25922, *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 27853, *Klebsiella pneumoniae* ATCC 204 и *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, используя общепринятый диско-диффузионный метод. В чашки Петри разливали по 20 мл агара, после его застывания производили посев на поверхность тестируемых культур «газоном», используя инокулюм, соответствующий по плотности 0,5 по стандарту Мак Фарланда и содержащий примерно $1,5 \cdot 10^8$ КОЕ/мл. В центр чашки помещали образец композита БЦ с наносеребром диаметром 10 мм. Чашки Петри помещали в термостат сверху дном и инкубировали при температуре 35°C в течение 18–24 ч (в зависимости от вида тестируемого микроорганизма), после этого фотографировали. Диаметр зон ингибирования измеряли с использованием программы Image J.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием стандартных пакетов программ Microsoft Excel и STATISTICA 8. Оценивали средние значения и ошибки среднего в зависимости от величины выборки по *U*-критерию Манна–Уитни и *t*-критерию Стьюдента (уровни значимости 0,05 и 0,01). Результаты приведены в виде $X \pm m$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С использованием режима гидротермально-го синтеза наночастиц серебра при варьировании концентрации AgNO_3 в реакционном растворе (0,0001, 0,001 и 0,01 М) получена серия композитных пленок бактериальной целлюлозы и наночастиц серебра, нагруженных серебром в различной степени (рис. 1). Средний размер частиц составил соответственно 13, 23 и 12 нм (рис. 1б).

На снимках, полученных методом растровой электронной микроскопии (рис. 2), видно, что с увеличением концентрации раствора AgNO_3 происходило увеличение количества наночастиц серебра, адгезированных на фибриллах БЦ и между ними. При этом показано, что способ высушивания пленок БЦ (лиофильно или при комнатной температуре) влиял на способность наночастиц Ag к агломерации. При высушивании пленок при комнатной температуре размер частиц Ag составил 25–60 нм, агломератов – 85–350 нм, а их количество соста-

вило до 15 на 1 $\mu\text{м}^2$. На лиофильно высушенных пленках размер агломератов был больше, до 350–780 нм, количество достигало 19 на 1 $\mu\text{м}^2$.

Количество серебра в пленках БЦ определено элементным анализом, выполненным на растровом электронном микроскопе, оснащенной системой рентгеноспектрального анализа (табл. 1). Среднее атомное число Ag в образцах с увеличением концентрации AgNO_3 в среде сопровождалось закономерным увеличением его содержания в композите – от 0,044 до 0,370 мг/см² с ростом концентрации соли соответственно от 0,0001 до 0,01 М

Для выявления появления возможных структурных изменений в композите были использованы рентгеноструктурный анализ и дифференциальная сканирующая калориметрия. Снижение степени кристалличности до 61% зарегистрировано для образцов композита, полученного в реакционном растворе при самой низкой концентрации AgNO_3 , при среднем размере наночастиц, равном 13 нм, и самом низком содержании серебра (0,044 мг/см²) (рис. 3).

С ростом содержания наночастиц серебра в композите до 4,1 и 9,1 мас. %, степень кристалличности возрастала до 83,68 и 86,21% соответственно. Это выше показателя у исходных пленок БЦ, не содержащих серебра. Следует отметить вариabельность этого параметра. Ранее было зафиксировано, что на степень кристалличности БЦ значительное влияние оказывают условия биосинтеза и тип углеродного субстрата, что сказывается на степени кристалличности, величина которой может составлять от 45 до 90% [11]. По литературным данным известно следующее: при рентгеноструктурном анализе лиофилизированных пленок БЦ идентифицированы три характерных пика в области 14,60°, 16,82° и 22,78°, соответствующие кристаллическим плоскостям целлюлозы (110), (110) и (200) [19,20]; это согласуется с данными рентгеноструктурного анализа в настоящем исследовании: 14,10°, 16,50° и 20,5° (рис. 3, кривая 2).

Результаты, полученные с помощью дифференциальной сканирующей калориметрии, показали, что образцы собственно целлюлозы не имели четко выраженных пиков в области термической деградации. Поэтому важным параметром для этого природного полимера является температура начала деструктивных процессов. Термограммы композитов представлены на рис. 4.

У всех композитных образцов области начала термической деградации сдвинуты вправо относительно исходной БЦ, для них характерно

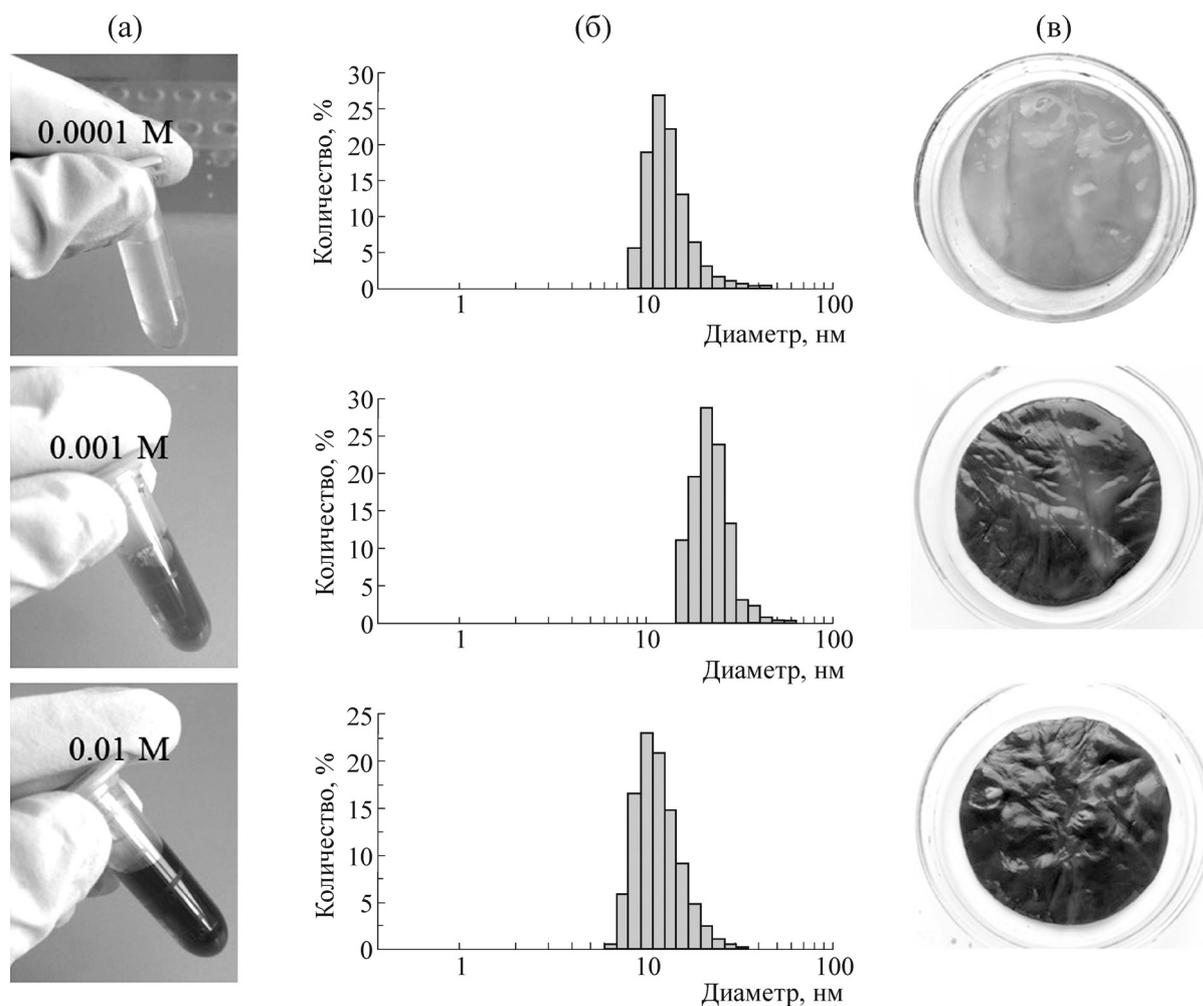


Рис. 1. Вид реакционной среды при различной концентрации AgNO_3 в процессе получения композитов БЦ и наночастиц серебра (а), распределение наночастиц серебра по размерам (б), фотографии лиофильно высушенных композитных пленок БЦ/ AgNps (в).

наличие двух пиков в этой области с разрывом между пиками от 40 до 120°C (рис. 4, кривые 2–4). В целом наполнение пленок целлюлозы наночастицами серебра повышало термостабильность БЦ.

Результаты исследования свойств поверхности композитов БЦ представлены в табл. 2. По сравнению с исходными пленками БЦ ком-

позиты с наносеребром имели более гидрофобную поверхность, косвенным показателем которой служит повышение величины краевого угла смачивания водой. Собственно пленки БЦ являются достаточно гидрофильным материалом, величина краевого угла смачивания водой составляет менее 50° ($45,5 \pm 17,6^\circ$). У композитов БЦ/ AgNps краевой угол смачивания водой уве-

Таблица 1. Влияние концентрации AgNO_3 в реакционной среде на элементный состав композитных пленок БЦ/ AgNps

Образцы	Среднее атомное число			Содержание серебра, мг/см ²
	O	C	Ag	
Исходная БЦ	59,8	40,1	–	
БЦ/ AgNps (0,0001 М)	53,03	45,9	1,08	0,044
БЦ/ AgNps (0,001 М)	54,2	41,7	4,10	0,160
БЦ/ AgNps (0,01 М)	51,2	40,1	9,10	0,370

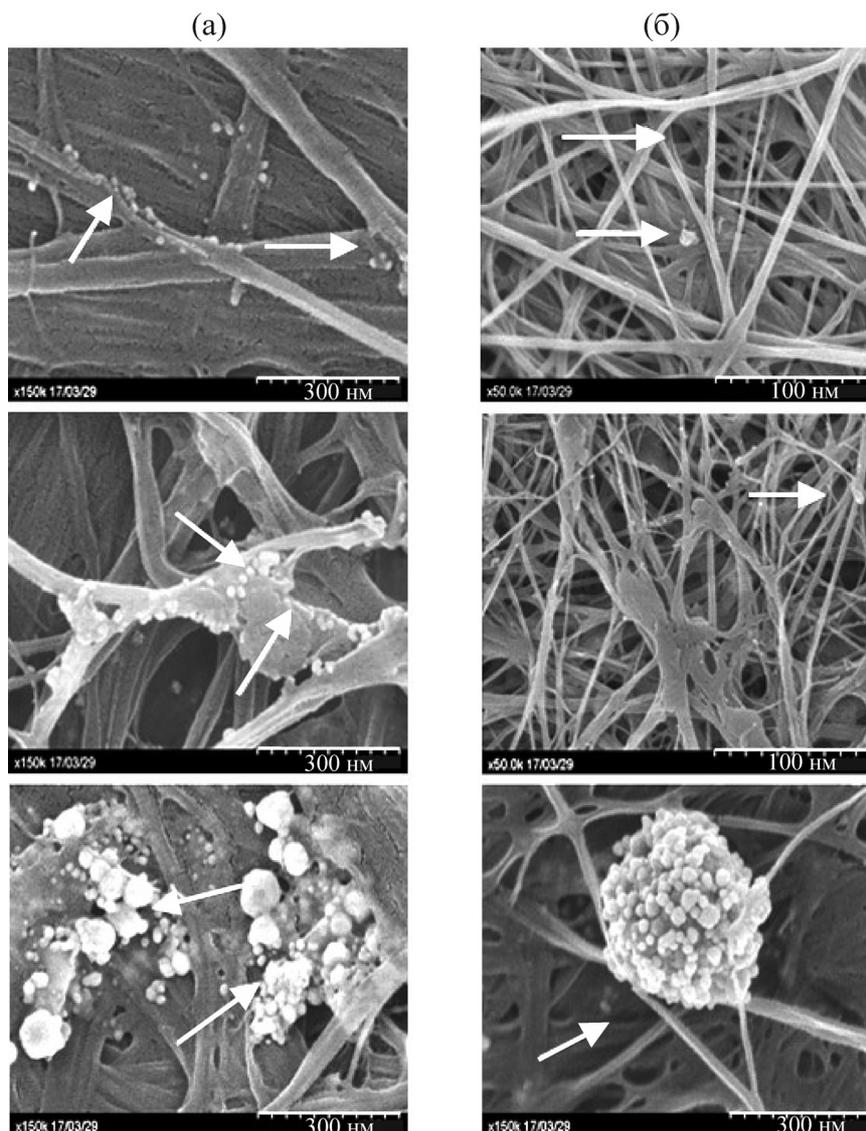


Рис. 2. Растровая электронная микроскопия композитных пленок БЦ/AgNps, полученных при различной концентрации AgNO_3 в среде, высушенных при комнатной температуре (а) и лиофильно (б). Стрелками обозначены скопления наночастиц серебра. Шкала 300 нм.

личивался с увеличением содержания наночастиц серебра, максимально до $69,0 \pm 2,71^\circ$, при этом отмечено увеличение как дисперсной, так и полярной составляющей. Подобные изменения были также описаны в работе [21], в которой краевой угол смачивания водой композитных пленок БЦ/CuNps увеличился до $110 \pm 0,4^\circ$, т.е. в два раза по сравнению с исходной БЦ ($50,1 \pm 1,8^\circ$).

Выход наночастиц серебра из мембран БЦ зависел от степени нагрузки (от $0,044$ до $0,220$ мкг/см^2) и к концу эксперимента (72 ч) составил для БЦ/AgNps ($0,0001$ М) – 10%; БЦ/AgNps ($0,001$ М) – 18%; БЦ/AgNps ($0,01$ М) – 28% от включенного (рис. 5). Сопоставимые

значение были получены в работе [12]: общий выход наночастиц серебра из БЦ-мембран, полученных при концентрации AgNO_3 в $0,01$ М, за трое суток составил 33%.

Для исследования антибактериальной активности полученных композитов БЦ с наночастицами серебра и антибиотиками были взяты четыре референтных штамма (три грамотрицательные: *E. coli*, *K. pneumoniae*, *P. aeruginosa*, и один грамположительный *St. aureus*), которые являются основными представителями патогенной госпитальной микрофлоры, в том числе инфицированных ран. Все образцы полученных композитов БЦ обладали бактерицидным действием по отношению к тестовым

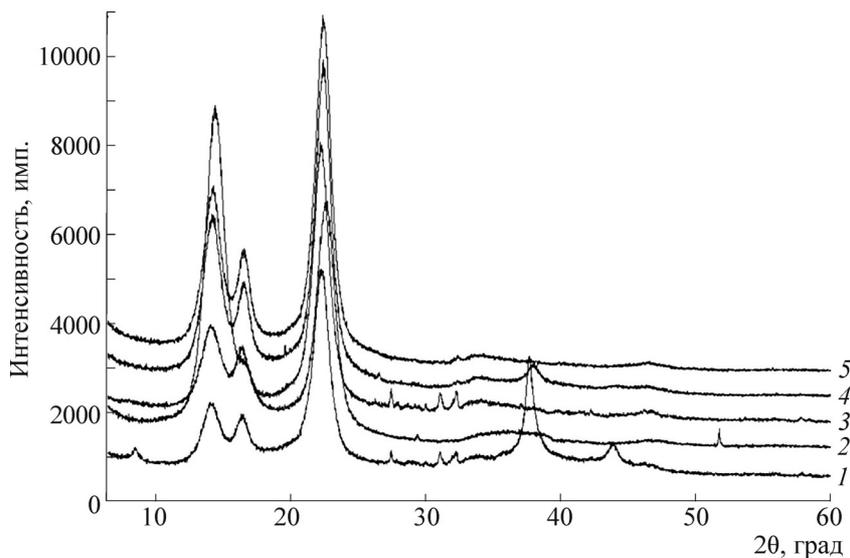


Рис. 3. Рентгенограммы композитных пленок БЦ/AgNps, полученных при различной концентрации AgNO_3 в реакционном растворе: 1 – 0,01 М; 4 – 0,001 М; 5 – 0,0001 М (степень кристалличности соответственно 61, 83 и 86%); 2 и 3 – исходная целлюлоза (без серебра), степень кристалличности 75 и 72%.

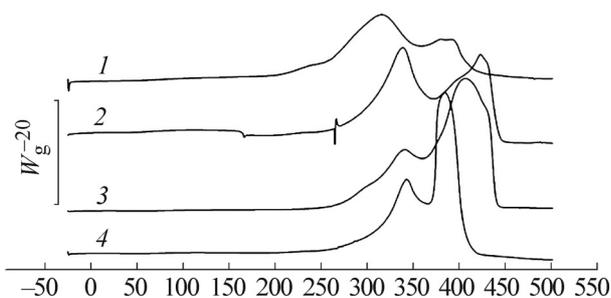


Рис. 4. Кривые, полученные методом дифференциальной сканирующей калориметрии: 1 – исходная целлюлоза, высушенная лиофильно; 2, 3 и 4 – композитные пленки БЦ/AgNps, полученные при 90°C и различной концентрации AgNO_3 (0,01, 0,001 и 0,0001 М соответственно).

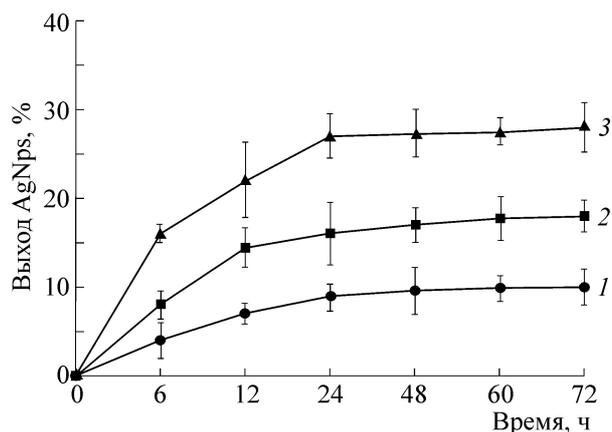


Рис. 5. Выход AgNps в фосфатно-солевой буфер из мембран БЦ, полученных при различных концентрациях растворов AgNO_3 : 1 – БЦ/AgNps (0,0001 М); 2 – БЦ/AgNps (0,001 М); 3 – БЦ/AgNps (0,01 М).

микробным культурам (табл. 3). При использовании исходной БЦ в качестве контроля зоны ингибирования микроорганизмов не наблюдали ни в одном случае, что в очередной раз свидетельствует о том, что БЦ не обладает антибактериальными свойствами.

По чувствительности к действию композитов БЦ/AgNps микроорганизмы различались между собой. Максимальную зону ингибирования ($15,00 \pm 1,58$ мм) наблюдали для *St. aureus*

Таблица 2. Свойства поверхности композитов БЦ/AgNps

Образец	Краевой угол смачивания водой, град	Дисперсная составляющая, мН/м	Полярная составляющая, мН/м
Исходная БЦ	$45,5 \pm 17,6$	$28 \pm 9,24$	$17,5 \pm 8,37$
БЦ/AgNps (0,0001 М)	$50,3 \pm 4,61$	$42,6 \pm 1,01$	$27,7 \pm 3,6$
БЦ/AgNps (0,001 М)	$68,8 \pm 1,76$	$46,2 \pm 0,99$	$22,6 \pm 0,77$
БЦ/AgNps (0,01 М)	$69 \pm 2,71$	$44,9 \pm 1,85$	$25,1 \pm 0,86$

Таблица 3. Ингибирование патогенных бактерий на плотной среде композитами БЦ/AgNps (диско-диффузионный тест)

Образцы	Диаметр зон ингибирования, мм		
	<i>P. aeruginosa</i>	<i>E. coli</i>	<i>St. aureus</i>
Исходная БЦ	–	–	–
БЦ/AgNps (0,0001 М)	12,0 ± 0,44	11,0 ± 0,20	15,2 ± 0,73
БЦ/AgNps (0,001 М)	1,13 ± 1,15	13,2 ± 0,50	14,2 ± 0,28
БЦ/AgNps (0,01 М)	14,3 ± 2,11	14,1 ± 0,61	15,1 ± 1,58

с ВС/AgNps (0,01 М); минимальную зону ингибирования ($11,00 \pm 0,20$ мм) – для *E. coli* с ВС/AgNps (0,0001 М) (табл. 3). Имеющие место различия в диаметре зон ингибирования связаны с различной реакцией и восприимчивостью микроорганизмов к ионам серебра, их клеточной структурой и физиологией. Как правило, грамположительные бактерии более чувствительны к бактерицидному эффекту наночастиц серебра [22]. Аналогичные данные были получены в работе [20], в которой зона ингибирования роста для *E. coli* и *St. aureus* с ВС/AgNps (0,01 М), составила $11,7 \pm 0,1$ и $11,6 \pm 0,1$ мм соответственно. Известно, что активность наночастиц серебра зависит от их размера и количества в композите, при этом считается, что минимальная ингибирующая концентрация наночастиц серебра находится в диапазоне от 0,05 до 0,1 мг/мл [11]. В представленной работе показано, что использование реакционного раствора с концентрацией AgNO_3 , равной 0,001 М, количество включенного серебра после термической обработки в БЦ-пленках незначительно варьирует (4,1 мас. %), однако композиты, полученные при более высокой температуре, проявляли более выраженное ингибирующее действие на микробные культуры. В представленной работе наибольшие зоны ингибирования наблюдали при тестировании образцов БЦ/AgNps, полученных при концентрации соли серебра в реакционном растворе 0,01 М, в которых фактическое содержание Ag было максимальным (9,1 мас. %) что составляет $0,37 \text{ мг/см}^2$, это согласуется с опубликованными результатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные композиты пленок бактериальной целлюлозы с наночастицами серебра все-сторонне исследованы, включая микроструктуру и свойства поверхности, температурные свойства и степень кристалличности, антибактериальную активность по отношению к патогенной и условно патогенной микрофлоре. Вы-

явленные отличия структуры, физико-химических свойств и характеристики поверхности влияли на степень ингибирования патогенной микрофлоры. Все полученные композиты обладают выраженной антибактериальной активностью по отношению к тестируемому микроорганизму (*E. coli*, *Ps. aeruginosa*, *K. pneumoniae*, *St. aureus*).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта №16-43-242024.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Ullaha, F. Wahid, H. A. Santos, et al., Carbohydr. Polym. **150**, 330 (2016).
2. А. К. Хрипунов, Т. П. Степанова, А. А. Ткаченко и др., Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки **10** (2), 45 (2017).
3. X. Ma, R. M. Wang, et al., CN Patent ZL200710015537 (2010).
4. S. Saska, H. S. Barud, et al., Int. J. Biomater. **1** (2011).
5. В. В. Ревин, Н. А. Кленова, Н. А. Редькин и др., Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология **7** (1), 102 (2017).
6. Т. И. Громовых, В. С. Садыкова, С. В. Луценко и др., Прикл. биохимия и микробиология **53** (1), 69 (2017).
7. H. Kwak, et al., Carbohydr. Polym. **122**, 387 (2015).
8. W. S. Chang and H. N. Chen, Food Hydrocolloids **53**, 75 (2016).
9. А. Р. Таркова, С. В. Морозов, Н. И. Ткачева и др., Наука из первых рук **73** (1), 84 (2016).
10. Е. В. Зиновьев, М. С. Асадулаев, И. А. Комиссаров и др., Педиатрия **8** (3), 23 (2017)
11. M. Sureshkumar, et al., J. Mater. Chem. **20**, 6948 (2010).
12. G. Yang, et al., Carbohydr. Polym. **87**, 2482 (2012).
13. J. Cai, et al., Biomacromolecules **10**, 87 (2009).
14. J. Feng, et al., Cellulose **21**, 4557 (2014).
15. W. K. Czaja, et al., Biomacromolecules **8**, 1 (2007).

16. С. В. Прудникова и И. П. Шидловский, Журн. Сибирского федерального университета. Сер. Биология **10** (2), 246 (2017).
17. D. K. Owens, et al., J. Appl. Polym. Sci. **13**, 1741 (1969).
18. D. H. Kaelble, et al., J. Adhes. **2**, 66 (1970).
19. N. Shah, et al., Carbohydr. Polym. **98** (2), 1585 (2013).
20. S. Liu, et al., Int. J. Biol. Macromol. **76**, 209 (2015).
21. B. Jia, et al., Appl. Mater. Interfaces **4** (6), 2897 (2012).
22. J. P. Ruparelia, Acta Biomater. **4** (3), 707 (2008).

Properties of Composites of Bacterial Cellulose with Silver Nanoparticles

I.P. Shidlovskiy*, A.A. Shumilova*, E.I. Shishatskaya* **, and T.G. Volova* **

*Siberian Federal University, Svobodnyi prosp. 79, Krasnoyarsk, 660041 Russia

**Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Federal Research Center "Krasnoyarsk Science Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences",
Akademgorodok 50/50, Krasnoyarsk, 660036 Russia

Composites of bacterial cellulose, synthesized in the culture of the strain of *Komagataeibacter xylinus* VKPM B-12068, with silver nanoparticles, were produced hydrothermally by varying concentrations of AgNO₃ in the medium. The presence of silver in the composites was confirmed by elemental analysis. We found that as the AgNO₃ concentration in the medium raised from 0.0001 to 0.01 M, the number of silver nanoparticles in the composite increased from 1.08 to 9.1 wt % (0,044 to 0,370 mg/cm²). The structure and properties of the surface and the physicochemical properties of the composites were investigated using scanning electron microscopy, differential scanning calorimetry, X-ray diffraction, and a system for measuring water contact angles. The disk-diffusion method and the shake-flask culture method used in this study showed that all experimental composites had pronounced antibacterial activity against *E. coli*, *Ps. eruginosa*, and *St. aureus*.

Keywords: bacterial cellulose, silver nanoparticles, hydrothermal synthesis, composites, antibacterial activity