

5. Trache D., Khimeche K., Mouloud A. Synthesis and Characterization of Nitrocellulose Microcrystalline from Esparto Grass / 43rd Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, June 26-29, 2012. – P. 90.
6. Dong-Ping Sun, Bo Ma, Chun-Lin Zhu, Chang-Sheng Liu and Jia-Zhi Yang. Novel nitrocellulose made from bacterial cellulose // Journal of Energetic Materials. – 2010. – Vol. 28. – P. 85-97.
7. Будаева В.В., Митрофанов Р.Ю., Золотухин В.Н., Сакович Г.В. Новые сырьевые источники целлюлозы для технической химии // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 7. – С. 205-212.
8. Земнухова Л.А., Полякова Н.В., Федорищева Г.А., Цой Е.А. Элементный состав образцов аморфного кремнезема биогенного происхождения // Химия растительного сырья. – 2013. – № 1. – С. 209-214.
9. Геньш К.В., Колосов П.В., Базарнова Н.Г. Количественный анализ нитратов целлюлозы методом ИК-Фурье-спектроскопии // Химия растительного сырья. – 2010. – № 1. – С. 63-66.
10. Петров А.И., Баранова Н.В., Никитина Н.Н. Получение и анализ нитратов целлюлозы: лабораторный практикум / Казан. гос. технол. ун-т. – Казань, 2003. – 144 с.
11. Вдовина Н.П., Будаева В.В., Якушева А.А. Определение химической стойкости нитроцеллюлозы ампульно-хроматографическим методом // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3. – С. 220-224.
12. Гиндич В.И. Технология пироксилиновых порохов. Т. I. Производство нитратов целлюлоз и регенерация кислот: монография. – Казань, 1995. – С. 73-74.
13. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. – Ч.П.-СПб.: НПО «Профессионал», 2006. – С. 600.
14. Михайлов Ю.М., Романько Н.А., Гатина Р.Ф., Климович О.В., Альмашев Р.О. Спектральное исследование целлюлозы и нитратов целлюлозы // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. – 2010. – № 1. – С. 52-62.

УДК 577.114

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНОГО СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕД НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗОСИНТЕЗИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ (ОБЗОР)

Гладышева Е.К., Скиба Е.А.

*В обзоре рассмотрены основные продуценты бактериальной целлюлозы (БЦ). Рассмотрены биохимические пути преобразования углеродных источников в клетках целлюлозосинтезирующих микроорганизмов. Показано, что важнейшим фактором, влияющим на выход бактериальной целлюлозы, является источник углерода. Приводится сравнение продуктивности микроорганизмов по БЦ на различных углеродных источниках. Рассмотрено явление ингибирования синтеза БЦ избытком глюкозы, так как избыток глюкозы трансформируется в глюконовую кислоту. Анализ литературы позволяет сделать вывод, что источник углерода значительно влияет на выход БЦ, а данные о влиянии источника углерода на степень кристалличности, размеры кристаллитов и содержание I α целлюлозы неоднозначны.*

*Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, биосинтез, целлюлозосинтезирующие бактерии, источник углерода, продуктивность по БЦ, степень кристалличности*

Нановолокна бактериальной целлюлозы (БЦ) – это уникальный природный органический материал, одновременно прочный и эластичный. БЦ представляет собой химически чистую целлюлозу, без примеси гемицеллюлоз и лигнина, которые обычно частично сохраняются после очистки растительной целлюлозы [1]. Первая характеристика бактериальной целлюлозы была дана Брауном [2] после открытия им организма *Mycodema acetii*, выращенного на среде с фруктозой.

К настоящему времени установлено, что к синтезу бактериальной целлюлозы способны микроорганизмы родов *Agrobacterium* [3], *Achromobacter* [4] *Aerobacter* [5], *Enterobacter* [6], *Sarcina* [5], *Rhizobium* [4], *Pseudomonas* [3], *Salmonella* [7], *Alcaligenes* [8], но наиболее представительным является род *Gluconoacetobacter* (ранее *Acetobacter*). Главным критерием отбора штамма для промышленного получения БЦ является способность микроорганизмов к её синтезу, а этот показатель

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНОГО СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕД НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗОСИНТЕЗИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ

сильно отличается даже внутри одного рода и вида (таблица 1).

В производстве используются различные виды *Gluconoacetobacter*, при этом типичным модельным микроорганизмом является *Gluconoacetobacter xylinum*. Это грамм-отрицательные, аэробные бактерии, имеющие форму слегка изогнутых палочек или эллипса, размером 0,6–4 мкм, способные использовать в качестве субстрата различные источники углерода и азота [10].

В зависимости от физиологического состояния клеток, биохимические процессы в бактериях *Gluconoacetobacter xylinum* могут быть направлены на образование БЦ, на синтез побочного продукта – глюконовой кислоты (через 2, 5 - кетоглюконат), либо протекать по пути гликолиза, по циклу Кребса либо по пентозо-фосфатному циклу [11]. При гликолизе происходит ферментативное превращение глюкозы в пируват. Пируват является ключевым метаболитом, из которого образуется ацетил-Ко-А и начинается цикл Кребса. Пентозо-фосфатный цикл обеспечивает синтез из глюкозы пентоз (например, рибозо-5-фосфат), которые используются для синтеза ДНК, РНК и (НАДФН<sup>+</sup>+Н<sup>+</sup>). (НАДФН<sup>+</sup>+Н<sup>+</sup>) требуется для всех видов окислительно-восстановительных реакций в клетке. *Gluconoacetobacter xylinum* не в состоянии метаболизировать глюкозу анаэробно, потому что клеткам не хватает фосфофруктозокиназы, необходимой для гликолиза [12].

Биосинтез целлюлозы включает промежуточные реакции, для осуществления которых требуются индивидуальные ферменты, каталитические комплексы и регуляторные белки.

При использовании в качестве источника углерода глюкозы биосинтез БЦ включает

четыре стадии: 1) фосфорилирование глюкозы под действием глюкозогексокиназы; 2) изомеризация глюкозы-6-фосфат в глюкозу-1-фосфат ферментом фосфоглюко-мутазой; 3) синтез уридиндифосфатглюкозы под действием уридиндифосфатглюкозопирофосфорилазы; 4) реакции синтеза целлюлозы при участии целлюлозосинтазного комплекса. Во многих организмах уридиндифосфатглюкоза является прямым предшественником целлюлозы. Уридин-дифосфатглюкозопирофосфорилаза играет важную роль в синтезе целлюлозы. Отмечено, что этот фермент приблизительно в 100 раз активнее в продуцентах целлюлозы, чем в штаммах, не производящих этот полимер. Если в качестве источника углерода для целлюлозосинтезирующих бактерий используются дисахариды, такие как сахароза и мальтоза, то биосинтез БЦ начинается с гидролиза дисахаридов до соответствующих моносахаридов. Хотя пути синтеза уридиндифосфатглюкозы относительно хорошо изучены, молекулярный механизм полимеризации глюкозы в длинные и неразветвленные целлюлозные цепочки учеными по-прежнему не выяснен [13-15].

Производство БЦ и продуктивность бактерий, главным образом, зависят от таких условий культивирования, как состав питательной среды, содержание растворенного кислорода и условия культивирования (статические или динамические). Оптимальный выбор питательных сред и условий для культивирования важен и для роста бактерий, образующих целлюлозу, поскольку рост бактерий влияет на стимулирование продуцирования БЦ.

Таблица 1 – Выход БЦ при использовании различных штаммов [9]

Бактерия	Источник углерода	Добавки	Время культивирования, ч	Выход, г/л
<i>A. xylinum</i> BRC 5	Глюкоза	Этанол + кислород	50	15,30
<i>G. hansenii</i>	Глюкоза	Кислород	48	1,72
<i>G. hansenii</i>	Глюкоза	Этанол	72	2,50
<i>Acetobacter</i> sp. V6	Глюкоза	Этанол	192	4,16
<i>Acetobacter</i> sp. A9	Глюкоза	Этанол	192	15,20
<i>A. xylinum</i> BPR2001	Меласса	-	72	7,82
<i>A. xylinum</i> BPR2001	Фруктоза	Агар + кислород	72	14,10
<i>A. xylinum</i> BPR2001	Фруктоза	Агар	56	12,00
<i>A. xylinum</i> ssp. <i>sucrofermentans</i> BPR2001	Фруктоза	Кислород	52	10,40
<i>A. xylinum</i> E25	Фруктоза	-	168	3,50
<i>G. xylinus</i> K3	Маннитол	Зеленый чай	168	3,34
<i>G. xylinus</i> IFO 13773	Глюкоза	Лигносультфонат	168	10,10
<i>A. xylinum</i> NUST4.1	Глюкоза	Альгинат натрия	120	6,00
<i>G. xylinus</i> IFO 13773	Маннитол	-	168	5,76
<i>Gluconoacetobacter</i> sp. RKY5	Меласса	-	144	5,63

Один из наиболее важных факторов, влияющих на выход, продуктивность и скорость синтеза БЦ – источник углерода, используемый для культивирования целлюлозосинтезирующих бактерий. Изучены многочисленные моно-, ди- и полисахариды, спирты (этанол, глицерин, этиленгликоль), органические кислоты (лимонная, глюконовая) и другие соединения (глюконо-лактон и *о*-метил-глюкоза) [16-24].

Изучены условия культивирования для производства БЦ штаммом *Acetobacter sp. 4B-2* на многоатомных спиртах. Выявлено, что наиболее предпочтительными источниками углерода для производства БЦ являются D-арабит и D-маннит, которые показали в 6,2- и 3,8- кратное увеличение выхода БЦ, по сравнению с глюкозой. Выявлено, что по выходу БЦ сахара можно расположить в следующий ряд: сахароза > глюкоза > ксилоза > лактоза [25].

Приведено сравнительное изучение влияния на биосинтез БЦ шести различных источников углерода, таких как глюкоза, глицерин, маннит, фруктоза, сахароза, галактоза [21]. Выход БЦ определялся через каждые 12 ч в течение 96 ч проведения эксперимента. Наиболее высокий выход БЦ (3,83 г/л в конце опыта) обеспечивает сахароза, затем в порядке убывания следуют глицерин, маннит, глюкоза и фруктоза. Галактоза определена как наименее подходящий источник углерода. Полученные результаты авторы объяснили способностью бактерий образовывать глюкозу из разных источников углерода, так как любой субстрат первоначально должен быть конверсирован в глюкозу и только после этого глюкоза превращена в целлюлозу.

Маннит, фруктоза или глюкоза показали постоянные скорости образования целлюлозы в результате эффективного транспорта через клеточную мембрану (маннит преобразуется сначала во фруктозу). Транспорт галактозы через клеточную мембрану проходил неэффективно, поэтому и превращение галактозы в целлюлозу проходило с низким выходом.

Отмечается, что через 84 ч из 96 - часового эксперимента на сахарозе получен низкий выход целлюлозы. Низкий выход объясняется тем, что сахароза не может быть утилизирована напрямую, она должна быть гидролизована в глюкозу и фруктозу, этот процесс происходит в периплазме (пространстве между цитоплазматической мембраной и клеточной стенкой бактерии). Микроскопические характеристики и макромолекулярные свойства полученных из названных источни-

ков углерода образцов БЦ очень похожи. Все образцы имели близкую степень кристалличности (от 80 % до 90 %), а отношение фракций двух модификаций целлюлозы  $\alpha/\beta$  во всех случаях было идентично [21].

Несмотря на то, что глюкоза служит мономером в образовании БЦ и наиболее широко применяется в качестве источника углерода для культивирования целлюлозосинтезирующих штаммов, её использование достаточно проблематично, так как параллельно с БЦ может накапливаться вторичный продукт – глюконовая кислота. Глюконовая кислота снижает уровень pH питательной среды, вследствие чего уменьшается выход целевого продукта. Из этого следует, что концентрация глюкозы – очень важный параметр.

Изучена зависимость выхода БЦ от различных концентраций глюкозы: 6, 12, 24 и 48 г/л. Было установлено, что выход БЦ уменьшается с увеличением начальной концентрации глюкозы в питательной среде, что объясняется увеличением концентрации глюконовой кислоты в процессе культивирования. Таким образом, при высоких концентрациях глюкоза не используется для синтеза целлюлозы, а метаболизируется в глюконовую кислоту. Авторы приходят к выводу, что высокая концентрация глюкозы в среде снижает выход БЦ, низкая концентрация глюкозы предпочтительнее для культивирования [17].

Другие авторы [20] также исследовали проблему зависимости выхода БЦ от концентрации глюкозы. По полученным данным, максимальный выход БЦ – при концентрации глюкозы 1 %, минимальный выход – при концентрации 2 % и 3 %. Также изучено влияние концентрации глюкозы на образование БЦ в динамических условиях культивирования. Выход БЦ повышался с увеличением концентрации глюкозы до 1,5 %, но снижался при достижении 2 % [19].

В ряде работ [17, 20, 21, 26] для производства БЦ в качестве источника углерода использовался глицерин. При статическом культивировании выход БЦ на глицериновых средах ниже, чем на глюкозных [17, 20, 21]. Однако, есть и противоположные данные: выход БЦ на глицериновой среде повышается до 2,16 г/л, что выше, чем на глюкозной среде [26]. При этом культивирование происходило в динамических условиях.

Использование мальтозы в качестве субстрата для культивирования БЦ приводит к снижению выхода БЦ в 10 раз по сравнению с глюкозой [17].

Установлено, что присутствие в питательной среде лактата в динамических усло-

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНОГО СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕД НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗОСИНТЕЗИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ

виях культивирования позволяет повысить выход БЦ приблизительно в 4-5 раз. Это объясняется тем, что молочная кислота ускоряет цикл Кребса, а также является хорошим энергетическим источником, в результате чего ускоряется рост клеток и повышается выход БЦ [27].

Группой авторов [23] изучены некоторые типы сред, ранее описанные как среды для роста *G. xylinus*. Ими предложено добавлять 2 % кукурузный экстракт [19].

Образцы БЦ, полученные на различных питательных средах, имели близкие размеры кристаллов и содержание I α целлюлозы. Однако, степень кристалличности образцов БЦ значительно отличалась при использовании различных питательных сред, но причины этого явления не установлены.

В работе [28, 29] описаны среды, характеризующиеся высокой концентрацией источника углерода. Описанная среда более эффективна, чем кукурузный экстракт, хотя их макрохимический состав очень похож.

Эффективная среда, рекомендованная для производственного синтеза БЦ [19]. Концентрация источника углерода в ней даже ниже, чем в среде Хестрима – Шреммана [12], что делает использование данной среды экономически обоснованным.

Авторы [30] оптимизировали состав сред для синтеза БЦ. Согласно их данным выход БЦ на уровне 14 г/л может быть достигнут после 72 часов ферментации при использовании питательной среды, содержащей 4,99 % фруктозы, 2,85 % кукурузного экстракта, 28,33 % растворенного кислорода и 0,38 % агара.

В качестве питательной среды может быть также использована обработанная серной кислотой меласса [31].

Есть данные, что положительную роль для производства БЦ играет добавление в питательную среду этанола [32, 33]. Этанол подавляет спонтанные мутации целлюлозосинтезирующих бактерий, снижающие их продуктивность. Такие мутации могут появляться в динамических условиях культивирования. Кроме того, этанол может использоваться как дополнительный источник углерода. Так, для *G. hansenii* выход БЦ увеличивается от 1,30 до 2,31 г/л при добавлении 1 % этанола [32]. Для *Acetobacter sp. A 9 strain* добавление 1,4 % этанола в питательную среду увеличивает выход БЦ на 400 % (до 15,2 г/л) по сравнению с питательной средой, которая не содержит этанола [33]. Как уже выше отмечалось, кроме выхода БЦ, важной производственной характеристикой является

кристалличность, определяющая механические свойства БЦ.

Добавление дрожжевого экстракта к глюкозной среде (среда Хестрима – Шреммана [12]) позволяет увеличить выход БЦ на 0,04 г/л [34].

Картины рентгеновской дифракции свидетельствуют, что углеродный источник незначительно влияет на степень кристалличности БЦ. Так, при использовании глюкозы получена степень кристалличности 88 %, а при использовании мелассы – 84 % [35]. Существенные изменения в значении степени кристалличности получены при использовании в качестве источника углерода осажаренных с помощью ферментов пищевых отходов. Степень кристалличности БЦ, выделенной *A. xylinum* KJ1 в среде Хестрима – Шреммана [12] при статических условиях культивирования, составила 89,7 %, в то время как степень кристалличности образцов БЦ, полученных на жидкой питательной среде на основе осажаренных пищевых отходов, составила 84,1 % [36].

В отличие от вышеизложенного, в исследовании авторов зарегистрировано значительное снижение степени кристалличности при замене питательной среды. В контроле использована глюкозная среда, в опыте – ферментативный гидролизат плодовых оболочек риса. Степень кристалличности полученных образцов БЦ снизилась с 56 % (в контроле) до 28 % (в опыте). Авторы затрудняются дать объяснение причинам этого явления [37].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koon-Yang Lee, Gizem Buldum, Anthanasios Mantalaris, Alexander Bismarck. More than Meets the Eye in Bacterial Cellulose: Boisynthesis, Bioprocessing, and Applications in Advanced Fiber Composites // *Macromolecular Bioscience*. – 2014. – № 6. – P. 10-32.
2. Brown A.J. XIX.—The chemical action of pure cultivations of bacterium acetii // *Journal of the Chemical Society, Transactions*. – 1886. – № 49. – P. 172-182.
3. Matthyse A.G. Role of bacterial cellulose fibrils in *Agrobacterium tumefaciens* infection // *Journal of bacteriology*. – 1983. – № 154 (2). – P. 906-915.
4. Deinema M.H., Zevenhuizen L.P. Formation of cellulose fibrils by gram-negative bacteria and their role in bacterial flocculation // *Archiv für Mikrobiologie*. – 1971. – № 78(1). – P. 42-51.
5. Cannon R.E., Anderson S.M. Biogenesis of bacterial cellulose // *Critical reviews in microbiology*. – 1991. – № 17(6). – P. 435-437.
6. Sunagawa N., Tajima K., Hosoda M., Kawano S., Kose R., Satoh Y., Yao M., Dairi T. Cellulose production by *Enterobacter sp. C/JF-002* and

- identification of genes for cellulose biosynthesis // *Cellulose*. – 2012. – № 19 (6). – P. 1989-2001.
7. Garcia B., Latasa C., Solano C., Portillo F. G., Gamazo C., Lasa I. Role of the GGDEF protein family in *Salmonella* cellulose biosynthesis and biofilm formation // *Molecular Microbiology*. – 2004. – № 54. – P. 264-277.
8. Fiedler S., Fuessel M., Sattler K. Production and application of bacterial cellulose. I. A survey on state of research and investigations concerning fermentation kinetics // *Zentralblatt fuer Mikrobiologie*. – 1989. – № 144 (7). – P. 473-484.
9. Chawla, P.R., Bajaj I.B., Survase S.A., Singhal R.S. Microbial cellulose: fermentative production and applications // *Food Technology and Biotechnology*. – 2009. – № 47 (2). – P. 107-124
10. Klemm D., Heublein B., Fink H. P., Bohn A. Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2005. – № 44. – P. 3358-3393.
11. Ross P., Mayer R., Benziman M. Cellulose biosynthesis and function in bacteria // *Microbiological reviews*. – 1991. – № 55 (1). – P. 35-58.
12. Gromet Z., Schramm M., Hestrin S. Synthesis of cellulose by *Acetobacter Xylinum*. 4. Enzyme systems present in a crude extract of glucose-grown cells // *The Biochemical journal*. – 1957. – № 67 (4). – P. 679-689.
13. Valla S., Coucheron D.H., Fjaervik E., Kjosbakken J., Weinhouse H., Ross P., Amikam D., Benziman M. Cloning of a gene involved in cellulose biosynthesis in *Acetobacter xylinum*: complementation of cellulose-negative mutants by the UDPG pyrophosphorylase structural gene // *Molecular & general genetics: MGG*. – 1989. – № 217 (1). – P. 26-30.
14. Дебабов В.Г., Богуш В.Г. Природные волокна для будущего // *Природа*. – 1999. – № 2. – С. 5-15.
15. Prashant R. Chawla, Ishwar B. Bajaj, Shrikant A. Survase and Rekha S. Singhal. Microbial Cellulose: Fermentative Production and Applications // *Food Technology and Biotechnology*. – 2009. – № 47(2). – P. 107-124.
16. Barsha J., Hibbert H. Reactions relating to carbohydrates and polysaccharides. XLVI. Structure of the cellulose synthesized by the action of *Acetobacter xylinus* on fructose and glycerol // *Canadian Journal of Research*. – 1934. – № 10. – P. 170-179.
17. Masaoka S., Ohe T., Sakota N. Production of cellulose from glucose by *Acetobacter xylinum* // *Journal of Fermentation and Bioengineering*. – 1993. – № 75 (1). – P. 18-22.
18. Ishihara M., Matsunaga M., Hayashi N., Tisler V. Utilization of D-xylose as carbon source for production of bacterial cellulose // *Enzyme and Microbial Technology*. – 2002. – № 31 (7). – P. 986-991.
19. Son H.J., Kim H.G., Kim K.K., Kim H.S., Kim Y.G., Lee S.J. Increased production of bacterial cellulose by *Acetobacter sp. V6* in synthetic media under shaking culture conditions // *Bioresource technology*. – 2003. – № 86 (3). – P. 215-219.
20. Keshk S., Sameshima K. Evaluation of different carbon sources for bacterial cellulose production // *African Journal of Biotechnology*. – 2005. – № 4 (6). – P. 478-482.
21. Mikkelsen D., Flanagan B.M., Dykes G.A.,Gidley M.J. Influence of different carbon sources on bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* strain ATCC 53524 // *Journal of Applied Microbiology*. – 2009. – № 2009. – P. 576-583.
22. Jung H.-I., Jeong J.-H., Lee, O.M., Park G.-T., Kim K.-K., Park H.-C.; Lee S.-M., Kim Y.-G., Son H.-J. Influence of glycerol on production and structural-physical properties of cellulose from *Acetobacter sp. V6* cultured in shake flasks // *Bioresource Technology*. – 2010. – № 101 (10). – P. 3602-3608.
23. Ruka D.R., Simon G.P., Dean K.M. Altering the growth conditions of *Gluconacetobacter xylinus* to maximize the yield of bacterial cellulose // *Carbohydrate Polymers*. – 2012. – № 89 (2). – P. 613-622.
24. Jonas R., Farah L.F. Production and application of microbial cellulose // *Polymer Degradation and Stability*. – 1998. – № 59 (1-3). – P. 101-106.
25. Coban E. P., Biyik H. Effect of various carbon and nitrogen sources on cellulose synthesis by *Acetobacter lovaniensis* HBB5 // *African Journal of Biotechnology*. – 2011. – № 10 (27). – P. 5346-5354
26. Jung J.Y., Park J.K., Chang H.N. Bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter hansenii* in an agitated culture without living non-cellulose producing cells // *Enzyme and Microbial Technology*. – 2005. – № 37 (3). – P. 347-354.
27. Matsuoka M., Tsuchida T., Matsushita K., Adachi O., Yoshinaga F. A synthetic medium for bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum subsp. SuCrofermentans* // *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*. – 1996. – № 60 (4). – P. 575-579.
28. Yamanaka S., Watanabe K., Kitamura N., Iguchi M., Mitsuhashi S., Nishi Y., Uryu M. The structure and mechanical properties of sheets prepared from bacterial cellulose // *Journal of Materials Science*. – 1989. – № 24 (9). – P. 3141-3145.
29. Zhou L.L., Sun D.P., Hu L.Y., Li Y.W., Yang J.Z. Effect of addition of sodium alginate on bacterial cellulose production by *Acetobacter xylinum* // *Journal of industrial microbiology & biotechnology*. – 2007. – № 34 (7). – P. 483-489.
30. Bae S., Shoda M. Statistical optimization of culture conditions for bacterial cellulose production using Box-Behnken design // *Biotechnology and Bioengineering*. – 2005. – № 90. – P. 20-28.
31. Bae S., Shoda M. Bacterial Cellulose Production by Fed-Batch Fermentation in Molasses Medium // *Biotechnology Progress*. – 2004. – № 20. – P. 1366-1371.
32. Park J.K., Jung J.Y., Park Y.H. Cellulose production by *Gluconacetobacter hansenii* in a medium containing ethanol // *Biotechnology letters*. – 2003. – № 2003. – P. 2055-2059.
33. 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* // *Biotechnology and Applied Biochemistry*. – 2001. – Vol.33. – № 1. – P. 1-5.
34. Pourramezan G.Z., Roayaei A.M., Qezelbash Q.R. Optimization of culture conditions for bacterial

## ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНОГО СОСТАВА ПИТАТЕЛЬНЫХ СРЕД НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗОСИНТЕЗИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ

cellulose production by *Acetobacter sp. 4B-2* // Biotechnology. – 2009. – № 8 (1). – P. 150-154.  
35. Keshk S., Razek T. M. A., Sameshima K. Bacterial cellulose production from beet molasses // African Journal of Biotechnology. – 2006. – № 5 (17). – P. 1519-1523.  
36. Moon S.H., Park J.M., Chun H.Y., Kim S.J. Comparisons of physical properties of bacterial celluloses produced in different culture conditions using

saccharified food wastes // Biotechnology and Bioprocess Engineering. – 2006. – №11 (1). – P. 26-31.  
37. Goelzer F.D.E., Faria-Tischer P.C.S., Vitorino J.C., Sierakowski M.R., Tischer C. A. Production and characterization of nanospheres of bacterial cellulose from *Acetobacter xylinum* from processed rice bark // Materials Science & Engineering. – 2009. – № 29 (2). – P. 546-551.

УДК 547.8

## РЕЗУЛЬТАТЫ НИТРОВАНИЯ ГИДРОТРОПНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Денисова М.Н., Якушева А.А.

*Исследован процесс получения гидротропной целлюлозы мискантуса с низким содержанием нецеллюлозных компонентов на оборудовании автоклавного типа. Приведены основные характеристики образцов технической и беленой целлюлозы. Получены нитроэфиры гидротропной целлюлозы мискантуса обработкой серно-азотной смесью с 14 % H<sub>2</sub>O. Установлено, что свойства нитратов целлюлозы, синтезированных в одинаковых условиях, характеризуются близкими значениями и сопоставимы с промышленными коллоксилинами.*

*Ключевые слова: гидротропная варка, мискантус, целлюлоза, нитрование, нитраты целлюлозы, ИК-спектроскопия*

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на множество исследований, направленных на получение и изучение свойств нитратов целлюлозы, в литературе имеется ограниченное количество сведений о получении нитратов из недревесных видов сырья [1]. В связи с этим в ИПХЭТ СО РАН с 2010 г. проводятся исследования по получению нитроэфиров целлюлозы из таких видов недревесного сырья, как мискантус и плодовые оболочки овса [2, 3]. Для получения нитроэфиров из мискантуса и плодовых оболочек овса в основном используются целлюлозы, полученные азотнокислым и комбинированным способами [2-4]. С недавнего времени проводятся исследования по нитрованию гидротропной целлюлозы [5]. Синтезируемые эфиры в дальнейшем могут найти применение для изготовления продуктов спецназначения (порох, ракетное топливо) и для производства целлюлоида, нитролаков, краски и др. Данная работа является продолжением ранее проводимых исследований.

Целью данной работы является получение целлюлозы мискантуса с низким содержанием нецеллюлозных компонентов с дальнейшей ее этерификацией в коллоксилины.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходного сырья для получения целлюлозы взят мискантус китайский (Веерник китайский *Miscanthus sinensis* – Andersson) урожая 2008 г. (Институт цитологии и генетики СО РАН).

Химический состав сырья (в пересчете на абсолютно сухое сырье – а.с.с.) в массовых долях (м.д.): целлюлозы по Кюршнеру – 52,1 %, лигнина – 18,6 %, золы – 4,8 %, пентозанов – 21,3 %, экстрактивных веществ – 2,1 %.

Гидротропная делигнификация мискантуса проведена на качающемся автоклаве [6] объемом 4,2 л и на универсальной термобарической установке (УТБ) [7] объемом 2,3 л в одинаковых условиях, описанных ниже.

Варка мискантуса проведена в 35 %-ном растворе C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>COONa при температуре 180 °С в течение 5 ч, модуль 1:10. Проведена последующая промывка образца целлюлозы порцией гидротропного раствора (1:20) и водой (1:20). Образцы технической целлюлозы высушены при температуре 18-20 °С до влажности 7-10 %. Выход и химический состав образцов приведен в таблице 1.

Отбелку образцов проводили H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в 1 %-ном растворе NaOH (1:10) при 40 °С при перемешивании, pH 10-11 в течение 4 ч, про-