



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 577.114

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.035



ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Анастасия Александровна Зенкова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия
zenkova_nastasya080401@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0868-5444>

Аннотация. Бактериальная наноцеллюлоза является биополимером, её уникальность заключается в том, что она имеет очень тонкую трёхмерную структуру, отличную газопроницаемость, высокую прочность, биосовместимость. Бактериальная наноцеллюлоза не содержит пектина, гемицеллюлоз и лигнина. Применяется бактериальная наноцеллюлоза в пищевой, фармацевтической, текстильной, промышленности в биомедицине и биоэлектронике. Производство бактериальной наноцеллюлозы является дорогостоящим, замена классических питательных сред на ферментативные гидролизаты из целлюлозосодержащего сырья может способствовать снижению цены конечного продукта. В данной работе было использовано легковозобновляемое целлюлозосодержащее сырьё: тростник, суданская трава (выращивают в агропромышленном масштабе), мискантус (техническая культура), шелуха овса (отходы производства геркулеса), водяной гиацинт (выращивают для очистки воды в закрытых водоемах), лён, конопля. В ходе работы был проанализирован химический состав целлюлозосодержащего сырья без химической предварительной обработки, и полученных субстратов после щелочной делигнификации. Затем все полученные образцы подвергали ферментативному гидролизу. Полученные данные показали, что химическая предварительная обработка повышает содержание целлюлозы в 2-3 раза, за счёт чего повышается реакционная способность субстратов к ферментативному гидролизу в 1,6-23,0 раза. Выход бактериальной наноцеллюлозы из ферментативных гидролизатов на основе субстратов: тростника - 5,7 %, суданской травы - 3,1 %, мискантуса сорта Сорановский - 9,7 %, мискантуса сорта КАМИС - 3,0 %, шелухи овса - 4,9 %, водяного гиацинта - 10,7 %, костры конопли - 5,3 %.

Ключевые слова: бактериальная наноцеллюлоза, целлюлозосодержащие сырьё, тростник, суданская трава, мискантус, шелуха овса, водяной гиацинт, лён, конопля, ферментативный гидролиз, биосинтез.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках госзадания ИПХЭТ СО РАН (код научной темы FUFЕ-2024-0008, регистрационный номер 124021200031-4).

Для цитирования: Зенкова, А. А. Получение бактериальной наноцеллюлозы из различного целлюлозосодержащего сырья // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 224–230. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.035. EDN: <https://elibrary.ru/DHYXML>.

Original article

PRODUCTION OF BACTERIAL NANOCELLULOSE FROM VARIOUS CELLULOSE-CONTAINING RAW MATERIALS

Anastasia A. Zenkova

Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IP-CET SB RAS), Biysk, Russia
zenkova_nastasya080401@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0868-5444>

Abstract. Bacterial nanocellulose is a biopolymer and is unique due to its very fine 3D structure, excellent gas permeability, high strength, and biocompatibility. Bacterial nanocellulose contains no pectin, hemicelluloses, and lignin. Bacterial nanocellulose is used in the food, pharmaceutical and textile industries, biomedicine, and bioelectronics. The production of bacterial nanocellulose is high-cost; therefore, replacing classical nutrient media by enzymatic hydrolyzates from cellulosic raw materials may reduce the price of the end product. This study utilized easily renewable cellulosic feedstocks, such as reed, Sudan grass (cultivated on an agro-industrial scale), miscanthus (industrial crop), oat hulls (Hercules oats production residues), water hyacinth (cultivated for phytoremediation of enclosed water bodies), flax, and hemp. Chemical compositions of the cellulosic feedstocks without chemical pretreatment and of substrates obtained after alkaline delignification were analyzed in the course of the study. All resultant samples were then subjected to enzymatic hydrolysis. The obtained data demonstrated that the chemical pretreatment enhanced the cellulose content by 2-3 times, thereby increasing the reactivity of the substrates to enzymatic hydrolysis by 1.6-23.0 times. The yields of bacterial nanocellulose from the substrate-based enzymatic hydrolyzates were 5.7 % for reed, 3.1 % for Sudan grass, 9.7 % for miscanthus var. Soranovskii, 3.0 % for miscanthus var. KAMIS, 4.9 % for oat hulls, 10.7% for water hyacinth, and 5.3 % for hemp shiv.

© Зенкова А. А., 2025

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Keywords: bacterial nanocellulose, cellulosic raw materials, reed, Sudan grass, miscanthus, oat hulls, water hyacinth, flax, hemp, enzymatic hydrolysis, biosynthesis.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under project no. FUFЕ-2024-0008 (Theme Registration ID: 124021200031-4).

For citation: Zenkova, A. A. Production of bacterial nanocellulose from various cellulose-containing raw materials. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 224-230. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.035. EDN: <https://elibrary.ru/DHYXML>.

ВВЕДЕНИЕ

Бактериальная наноцеллюлоза – это один из разновидностей наноцеллюлозы [1], натуральный биополимер, имеющий большое значение в различных технологических областях благодаря своим невероятным физико-химическим и биологическим свойствам [2].

Бактериальная наноцеллюлоза биосинтезируется внеклеточно бактериями, принадлежащими родам *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* или *Sarcina* состоит из целлюлозы в виде цепочки нановолокон шириной менее 100 нм [3]. Она имеет очень тонкую трёхмерную структуру, отличную газопроницаемость, высокую прочность во влажном состоянии, биосовместимость и впитывающую способность [4]. Бактериальная наноцеллюлоза в отличие от растительной целлюлозы не содержит пектина, гемицеллюлоз и лигнина, поэтому может применяться в чистом виде [5]. В ходе микробного синтеза возможно регулировать физико-химические и функциональные свойства бактериальной наноцеллюлозы (кристалличность, пористость, размер нановолокон и механические свойства) путём изменения биосинтеза: штамма бактерий, состава питательной среды и условий культивирования [6]. Бактериальную наноцеллюлозу можно получать на синтетических, полусинтетических средах, а также на химических и ферментативных гидролизатах предварительного обработанного целлюлозосодержащего сырья [1,7,8]. Технология производства напрямую влияет на физические и химические характеристики бактериальной наноцеллюлозы, а также на её надмолекулярную структуру [1,9].

Диапазон областей применения бактериальной наноцеллюлозы включает пищевую промышленность, фармацевтическую промышленность, тканевую инженерию, биомедицину [9], её также используют для производства мембран [10], применяется в биоэлектронике для создания автономных электродов [11].

В данной работе для получения бактериальной наноцеллюлозы было использовано легковозобновляемое целлюлозосодержащее сырьё. Выбор сырья варьируется от технических культур, которые выращивают в промышленных масштабах, такие как конопля, лён, мискантус, используемые в кормопроизводстве суданская трава и тростник, используемый для очистки закрытых водоемов водяной гиацинт, а также отходы производства геркулеса – шелуха овса.

МЕТОДЫ

Целлюлозосодержащее сырьё: тростник, суданская трава, мискантус сахароцветный сорта Сорановский, мискантус гигантский сорта КАМИС, шелуха овса, водяной гиацинт, продукты переработки льна и конопля: волокно льна (пенька короткая), костра льна предоставило АО «Бийская Льяная Компания» (г. Бийск, Россия), волокно конопля, костра конопля предоставило ООО «Мордовские пенькозаводы» (г. Инсар, Республика Мордовия, Россия), подвергали предварительной химической обработке, 4%-ным гидроксидом натрия при атмосферном давлении (щелочной делигнификацией) по методике [12] с получением

субстратов. Химический состав сырья и полученных субстратов определяли по методике [13].

Сырьё и субстраты подвергали ферментативному гидролизу по методике [7] гидролиз проводили при постоянном перемешивании на шейкере лабораторном «ПЭ-6410» (Россия), скорость перемешивания 150 об/мин, температура 40-45 °С, продолжительность гидролиза 72 ч, использованы ферментные препараты «Целлюлюкс-А» (грибного происхождения, ООО ПО «Сиббиофарм», Россия), и «Ультрафлю-Коре» (производитель Trichoderma reesei, «Novozymes A/S», Дания). Выбор концентрации ацетатного буферного раствора 0,05 М обоснован в [14]. Для приготовления питательной среды из гидролизатов после определения концентрации редуцирующих веществ в пересчёте на глюкозу по методике [15] гидролизаты кипятили, затем вносили чёрный чай в концентрации 10 г/л.

Биосинтез бактериальной наноцеллюлозы проводили по методике [16], в суховоздушном термостате «ТС-1/20» (Россия), в статических условиях при температуре 27 °С, в течение 10 суток, с применением симбиотической культуры *Medusomyces gisevii* Sa-12 [8] для высокой производительности гель-плёнок. В качестве контроля использовали полусинтетическую питательную среду.

Завершающей стадией биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы является сьем гель-плёнок и их промывка. Сушку жемчужно-белых гель-плёнок проводили в лиофильной сублимационной сушилке «HR 7000 M» (Россия) до постоянной массы по методике [17], для расчёта выхода и последующего анализа основных свойств бактериальной наноцеллюлозы. Выход сухой бактериальной наноцеллюлозы рассчитывали по формуле (1):

$$W = \frac{m}{c \cdot V \cdot 0,9} \cdot 100 \% \quad (1),$$

где W – выход бактериальной наноцеллюлозы, %;

m – масса образца бактериальной наноцеллюлозы в пересчёте на абсолютно сухое вещество, г;

c – концентрация редуцирующих веществ в среде в пересчёте на глюкозу, г/л;

V – начальный объём среды, л;

0,9 – коэффициент пересчёта, обусловленный отщеплением молекулы воды при полимеризации глюкозы в целлюлозу.

Степень полимеризации образцов бактериальной наноцеллюлозы определяли вискозиметрическим методом [18] с использованием в качестве растворителя кадоксен (ethylenediamine, АО LenReaktiv, CAS No. 107-15-3, Russia; cadmium oxide, АО LenReaktiv, CAS No. 1306-19-0 Russia).

Растровая электронная микроскопия лиофилизированных образцов бактериальной наноцеллюлозы выполнялась с помощью микроскопа JSM-840 (JEOL Ltd., Токио, Япония) с рентгеновским микроанализатором Link-860 серии II с целью установления структуры и определения ширины нановолокна.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Компонентный состав необработанных видов сырья представлен в таблице 1. Анализ полученных данных позволяет выделить лидеров по содержанию целлюлозы: волокно конопли – 76,0 %, волокно льна –

66,0 %. Наименьшее количество целлюлозы содержалось в водяном гиацинте – 26,0 %.

Результаты ферментативного гидролиза необработанных видов сырья приведены на рисунке 1.

Таблица 1 – Компонентный состав целлюлозосодержащего сырья без предварительной химической обработки
Table 1 – Component composition of cellulose-containing raw materials without preliminary chemical treatment

Сырьё	Массовая доля, %				
	целлюлозы по Кюршнеру	лигнина	пентозанов	золы	ЖВФ
Тростник	43,00	24,00	18,50	6,69	1,05
Суданская трава	43,00	16,00	19,00	6,42	1,29
Мискантус сахароцветный сорт Сорановский	49,00	17,00	24,00	3,73	0,98
Мискантус гигантский сорт КАМИС	50,00	19,00	21,00	1,63	0,48
Шелуха овса	36,50	19,00	29,00	6,45	0,51
Водяной гиацинт	26,00	12,00	11,00	25,43	1,20
Волокно льна	66,00	11,00	5,00	3,21	1,67
Костра льна	42,00	26,00	18,50	2,80	1,76
Волокно конопли	76,50	5,50	2,50	2,50	2,40
Костра конопли	47,00	23,00	18,00	2,30	0,46

Примечание: ЖВФ – жировосковая фракция.

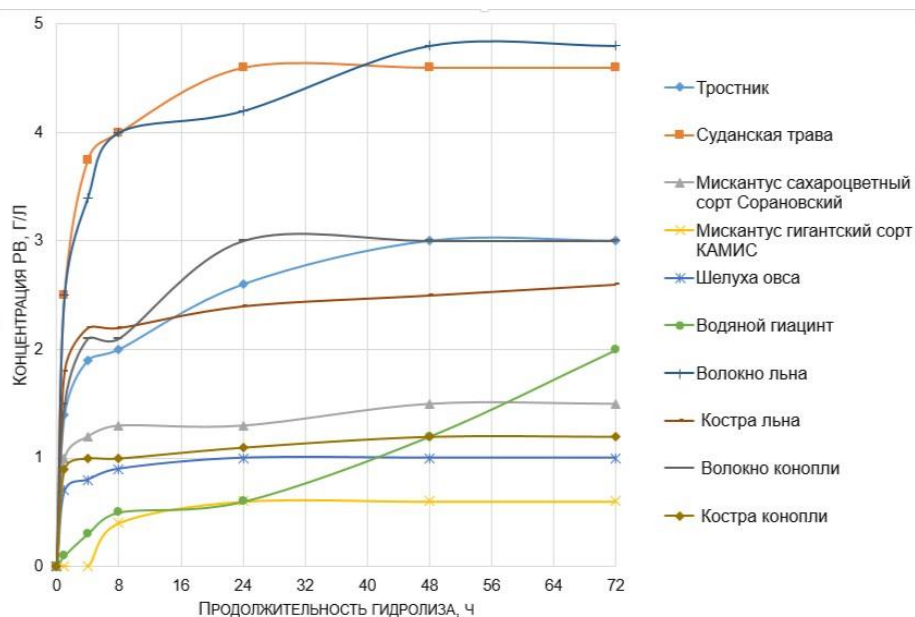


Рисунок 1 – Зависимость концентрации редуцирующих веществ от времени ферментативного гидролиза (сырья без химической предварительной обработки)

Figure 1 – Dependence of the concentration of reducing substances on the time of enzymatic hydrolysis (raw materials without chemical pre-treatment)

В результате гидролиза и анализа рисунка 1, для всех видов сырья была выявлена низкая реакционная способность к ферментативному гидролизу, так как конечная концентрация редуцирующих веществ составила у тростника – 3,0 г/л, суданской травы – 4,6 г/л, мискантуса сахароцветного сорта Сорановский – 1,5 г/л, мискантуса гигантского сорта КАМИС – 1,6 г/л, шелухи овса – 1,0 г/л, водяного гиацинта – 2,0 г/л, волокна льна – 4,8 г/л, костры льна – 2,6 г/л, волокна конопли – 3,0 г/л, костры конопли – 3,0 г/л. Для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы конечная концентрация редуцирующих веществ рекомендована в пределах 10-20 г/л [7].

В связи с полученными результатами было принято решение произвести предварительную химическую

обработку целлюлозосодержащего сырья щелочной делигнификацией, которая применяется для растительных материалов, содержащих целлюлозу, чтобы повысить реакционную способность при последующем гидролизе. Это достигается за счет уменьшения размера частиц, разрушения кристаллической структуры целлюлозы и удаления лигнина [19,20,21]. После чего целлюлоза под действием ферментного комплекса превращается в целлобиозу, а затем в глюкозу [22]. Компонентный состав полученных субстратов после (предварительной химической обработки сырья) представлен в таблице 2. Полученные результаты показали эффективность предварительной химической обработки, это подтверждается изменением в компонентном составе, а именно повышением содержания целлюлозы в субстратах в 1,7-3,2 раза,

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

за исключением субстратов из волокна льна и волокна конопли – полученные данные обусловлены особенностью лубяных культур, их морфологией, так, у костры льна после щелочной делигнификации наблюдается увеличение лигнина с 26 % до 37 %, что препятствует ферментативному гидролизу [23, 24].

Наиболее ярко химическая делигнификация проявилась на водяном гиацинте: содержание целлюлозы возросло с 26,0 % до 83,0 %.

Результаты ферментативного гидролиза субстратов приведены на рисунке 2. Очевидно, что щелочная де-

лигнификация повышает реакционную способность целлюлозосодержащего сырья, поскольку конечная концентрация редуцирующих веществ у субстратов, выше, чем у сырья: 4,0-28,0 г/л против 1,0-4,8 г/л. Субстраты разделяются на 2 группы: высокореакционноспособные (тростник – 22,8 г/л, суданская трава – 20,2 г/л, мискантус сахароцветный сорта Сорановский – 25,0 г/л, мискантус гигантский сорта КАМИС – 18,5 г/л, шелуха овса – 23,0 г/л, водяной гиацинт – 22,6 г/л, костра конопли – 28,0 г/л) и низкореакционноспособные (волокно льна – 8,0 г/л, костра льна – 4,0 г/л, волокно конопли – 6,0 г/л).

Таблица 2 – Компонентный состав целлюлозосодержащего сырья, предварительно химически обработанного щелочной делигнификацией

Table 2 – Component composition of cellulose-containing raw materials, pre-chemically treated by alkaline delignification

Сырьё, обработанное щелочной делигнификацией	Массовая доля, %				
	целлюлозы по Кюршнеру	лигнина	пентозанов	зола	ЖВФ
Тростник	88,00	7,00	3,50	0,97	1,16
Суданская трава	85,00	5,50	7,00	2,09	2,37
Мискантус сахароцветный сорт Сорановский	93,00	5,00	4,00	0,50	1,86
Мискантус гигантский сорт КАМИС	85,00	8,00	2,00	3,95	0,28
Шелуха овса	87,00	5,00	7,00	0,11	0,60
Водяной гиацинт	83,00	19,00	1,40	7,50	2,29
Волокно льна	89,00	10,00	1,00	0,19	1,25
Костра льна	59,00	37,00	3,00	0,7	1,40
Волокно конопли	92,00	6,00	0,40	0,75	0,80
Костра конопли	87,00	8,00	5,00	1,82	0,36

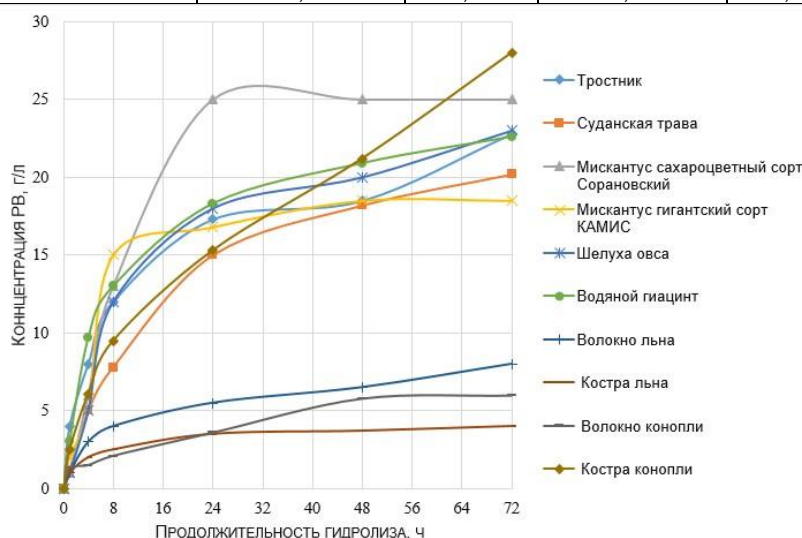


Рисунок 2 – Зависимость концентрации редуцирующих веществ от времени ферментативного гидролиза (сырья, обработанного щелочной делигнификацией)

Figure 2 – Dependence of the concentration of reducing substances on the time of enzymatic hydrolysis (raw materials treated with alkaline delignification)

Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности щелочной делигнификации для большинства рассмотренных источников, кроме волокна льна, костры льна, волокна конопли. Это может быть обусловлено специфичностью строения лубяной культуры, их прочностью и высокой устойчивостью к истиранию и воздействию гидролизующих ферментов [25, 26].

Из данных гидролизатов были приготовлены питательные среды для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы. Выход бактериальной наноцеллюлозы на контрольной питательной среде и гидролизатах, а также степень полимеризации и ширина нановолокон представлены в таблице 3. Гидролизаты, полученные

из волокна льна, костры льна, волокна конопли, не применялись для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы в связи с низкой концентрацией редуцирующих веществ.

Лидером по выходу бактериальной наноцеллюлозы и степени полимеризации является водяной гиацинт, а именно 10,7 % и 2200 соответственно. Данные значения являются максимально близки к контрольному образцу: 12,8 % и 3000. Ширина нановолокон 90 нм, полученных на гидролизате водяного гиацинта, близка к 100 нм контроля (на полусинтетической питательной среде). Позитивные полученные данные впервые демонстрируют возможность биосинтеза бактериальной

наноцеллюлозы из водяного гиацинта [27].

Для гидролиза использовали сочетание двух ферментов, так как известно, что ферментативный гидролиз целлюлозы происходит в результате последовательно-параллельного действия нескольких ферментов, входящих в состав так называемого целлюлазного комплекса [28]. Гидролиз целлюлозосодержащего сырья без предварительной химической обработки является не эффективным, и это было доказано в данной работе, так как конечная концентрация редуцирующих веществ составила не более 5 г/л.

Таблица 3 – Характеристики образцов бактериальной наноцеллюлозы

Субстрат для получения БНЦ	Выход, %	СП	Ширина нановолокон, нм
Контроль	12,8	3000	100
Тростник	5,7	1150	70
Суданская трава	3,1	1300	50
Мискантус сахароцветный	9,7	700	35
Мискантус гигантский	3,0	1050	40
Шелуха овса	4,9	900	46
Водяной гиацинт	10,7	2200	90
Костра конопли	5,3	1100	80
Примечание: БНЦ – бактериальная наноцеллюлоза; СП – степень полимеризации; Контроль – бактериальная наноцеллюлоза, полученная на полусинтетической питательной среде.			

Степень полимеризации опытных образцов бактериальной наноцеллюлозы в среднем составила 850, что в 3,5 раза ниже степени полимеризации бактериальной наноцеллюлозы, полученной на полусинтетической питательной среде.

С помощью растровой электронной микроскопии была обнаружена сетчатая наноразмерная структура для всех экспериментальных образцов, являющаяся отличительной характерной особенностью бактериальной наноцеллюлозы. При этом, для контрольного образца ширина нановолокон составила 100 нм, а для образцов, полученных на гидролизатах, 60 нм. Полученные данные совпадают с литературными [29]. Таким образом, нами было показано, что симбиоз *Medusomyces gisevii* Sa-12 может адаптироваться к разным условиям биосинтеза и питательным средам, сохраняя свою уникальную наноструктуру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что целлюлозосодержащее сырьё необходимо подвергать предварительной химической обработке для повышения реакционной активности субстратов к ферментативному гидролизу для обеспечения необходимой концентрации редуцирующих веществ в питательной среде. Щелочная делигнификация повысила конечную концентрацию редуцирующих веществ для тростника в 5,0 раз, суданской травы – 4,5 раза, мискантуса сахароцветного сорта Сорановский – 16,0 раз, мискантуса гигантского сорта КАМИС – 11,5

раз, шелухи овса – 23,0 раза, водяного гиацинта – 11,3 раза, волокна льна – 1,6 раз, костры льна – 1,5 раза, волокна конопли – 2,0 раза, костры конопли – 9,3 раза. Эти результаты показывают, что щелочная делигнификация неэффективна только для трёх источников (волокна льна, костры льна, волокна конопли). Эти явления обусловлены специфичностью строения лубяной культуры, их прочностью и высокой устойчивостью к воздействию гидролизующих ферментов.

Самый высокий выход бактериальной наноцеллюлозы, а именно 10,7 %, был получен на питательной среде из гидролизата продукта щелочной делигнификации водяного гиацинта. Данная обработка позволила повысить содержание целлюлозы в субстрате в 3,2 раза, затем повысить конечную концентрацию при ферментативном гидролизе в 11,3 раза по сравнению с не обработанным сырьём. Степень полимеризации бактериальной наноцеллюлозы из водяного гиацинта максимальная из всех источников и составила 2200. Ширина нановолокон так же наиболее близка к контролю и составила 90 нм. Таким образом, в данной статье впервые описано получение бактериальной наноцеллюлозы из водяного гиацинта, причём с выходом и качественными характеристиками, близкими к контролю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cañas-Gutiérrez A. et al. Health and toxicological effects of nanocellulose when used as a food ingredient: A review //Carbohydrate Polymers. 2024. Vol. 323. P. 121382. doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121382.
2. Sharma C., Bhardwaj N. K. Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives //Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 104. P. 109963. doi: 10.1016/j.msec.2019.109963.
3. de Paiva G. M. et al. Bacterial nanocellulose produced as a by-product of the brewing industry and used as an adsorbent for synthetic solutions of Co (II), Cu (II), Ni (II) AND Fe (III) //Journal of Polymers and the Environment. 2024. Vol. 32. № 12. P. 6803-6819. doi: 10.1007/s10924-024-03389-0.
4. Pasaribu K. M. et al. A review: Current trends and future perspectives of bacterial nanocellulose-based wound dressings //International Journal of Biological Macromolecules. 2024. P. 135602. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135602.
5. Katyal M. et al. Bacterial cellulose: Nature's greener tool for industries //Biotechnology and Applied Biochemistry. 2023. Vol. 70. № 5. P. 1629-1640. doi: 10.1002/bab.2460.
6. Núñez D. et al. Toward biomanufacturing of next-generation bacterial nanocellulose (BNC)-based materials with tailored properties: A review on genetic engineering approaches //Biotechnology Advances. 2024. P. 108390. doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108390.
7. Скиба Е.А. и др. Ферментативный гидролиз высококонцентрированных субстратов, полученных из мискантуса гигантского/ Е.А. Скиба и др. // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. № 3. С. 394-405. doi: 10.21285/achb.933.
8. Skiba E. A. et al. Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer. International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24. № 18. P. 14401. doi: 10.3390/ijms241814401.
9. Alimardani Y. et al. Prospective and applications of bacterial nanocellulose in dentistry. Cellulose. 2024. Vol. 31. № 13. P. 7819-7839. doi: 10.1007/s10570-024-06098-y.
10. Hou Y. et al. Functional bacterial cellulose membranes with 3D porous architectures: Conventional drying, tunable wettability and water/oil separation. Journal of membrane science. 2019. Vol. 591. P. 117312. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117312.
11. Luo H. et al. Uniformly dispersed freestanding carbon nanofiber/graphene electrodes made by a scalable biological method for high-performance flexible supercapacitors.

ПОЛУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОЙ НАНОЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЛЮЛОЗОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Advanced Functional Materials. 2018. Vol. 28. № 48. P. 1803075. doi: 10.1002/adfm.201803075.

12. Скиба Е.А. Материальный баланс процессов получения биотехнологических продуктов из биомассы мискантуса гигантского/ Скиба Е.А. // Актуальная биотехнология. 2024. № 3, P. 39-41. doi: 10.20914/2304-4691-2024-3-39-41.

13. Ovchinnikova E.V. et al. Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃- or NaOH-pretreatment on process efficiency and sustainability. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2021. Vol. 9. № 49. P. 16588-16596. doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.

14. Зенкова А.А., Гладышева Е.К., Шавыркина Н.А. Обоснование выбора концентрации ацетатного буфера при ферментативном гидролизе шелухи овса для биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Бийск. – 18–20 мая 2022 года. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, им. И.И. Ползунова, 2022. С. 297-300. doi: 10.25699/tohbipp.2022.6 0.85. 032.

15. Кашеева Е. И., Будаева В.В. Определение реакционной способности к ферментативному гидролизу целлюлозосодержащих субстратов. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т.84. № 10. С. 5-11. doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-5-11.

16. Гладышева Е.К., Кашеева Е.И. Биотехнологическая трансформация мискантуса сорта Камис в высокоценную бактериальную наноцеллюлозу // Материалы IV Международного биотехнологического форума BIOAsia–Altai (23-28 сентября 2024 г., – Барнаул. Изд-во Алтайского государственного университета, 2024. BIOAsia–Altai. Т. 4. № 1. С. 412-416.

17. Павлов И. Н., Кузнецов П. С., Шилов А. И. Исследование процесса сублимационной сушки бактериальной наноцеллюлозы // Ползуновский вестник. 2020. № 4. С. 88-94. doi: 10.25712/astu.2072-8921.2020.04.017.

18. Bogolitsyn K., Parshina A., Aleshina, L. Structural features of brown algae cellulose. Cellulose. 2020. Vol. 27. № 17. P. 1-14. doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.

19. Osipov D.O. et al. Comparative Study of the Convertibility of Pretreated Miscanthus Straw Using Enzyme Preparations Produced by Different Recombinant Strains of Penicillium verrucosum. Agronomy. 2024. Vol. 14. № 3. P. 499. doi: 10.3390/agronomy14030499.

20. Fansuri H. et al. A Review of the Technological Aspects and Process Optimization of Bioethanol Production From Corn Stover Biomass: Pretreatment Process, Hydrolysis, Fermentation, Purification Process, and Future Perspective //Environmental Quality Management. 2024. Vol. 34. № 2. P. e22336. doi: 10.1002/tqem.22336.

21. Riseh R. S. et al. Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries //Industrial Crops and Products. 2024. Vol. 208. P. 117904. doi: 10.1016/j.indcrop. 2023.117904.

22. Chauhan A. S. et al. Strategies for Overcoming the Inhibition of Cellulose Hydrolysis //Handbook of Biorefinery Research and Technology: Biomass Logistics to Saccharification. Dordrecht : Springer Netherlands. 2024. P.1001-1021. doi: 10.1007/978-94-007-6308-1_70.

23. Кокшаров С.А., Алеева С.В., Калинин Е.Н. Сопоставление строения лигнина в лубяной и древесной частях льняного стебля и его превращений в присутствии серосодержащих восстановителей // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 9. С. 90-102. doi: 10.6060/ivkkt.2 0246709.7037.

24. Лаврентьева Е.П., Санина О.К., Белоусов Р.О. Глубокая переработка лубяных волокон – путь к возрождению национальных традиций России. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. Vol.3. P. 130-139. doi: 10.47367/0021-

3497_2022_3_130.

25. Свиридов А. С., Чаплыгин М. Е., Попов Р. А. Исследование стойкости стеблей лубяных культур к абразивному истиранию //Агроинженерия. 2024. Т. 26. №. 6. С. 4-10. doi: 10.26897/2687-1149-2024-6-4-10.

26. Макарова Е. И., Денисова М. Н. Ферментолиз недревесного сырья и образцов гидротропной целлюлозы, полученных из него //Ползуновский вестник. 2014. № 3. С. 123-126.

27. Smriti S. A. et al. Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: A review //Cellulose. 2023. Vol. 30. № 14. С. 8617-8641. doi: 10.1007/s10570-023-05374-7.

28. Шубаков А.А., Михайлова Е.А., Мартынов В.В.. Био-конверсия целлюлозосодержащего сырья. Ферментативный гидролиз целлюлозы (обзор). Труды Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2022. № 4. С. 27-38. doi: 10.19110/1994-5655-2022-4-27-38.

29. Sakovich G.V. et al. Chemical aspects of bacterial nanocellulose. Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2018. Vol. 11. № 4. P. 531-542. doi: 10.17516/1998-2836-0097.

Информация об авторах

А. А. Зенкова, инженер лаборатории био-конверсии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук.

REFERENCES

1. Cañas-Gutiérrez, A. & et al. (2024). Health and toxicological effects of nanocellulose when used as a food ingredient: A review. Carbohydrate Polymers, (323), 121382. (In the UK). doi: 10.1016/j.carbpol.2023.121382.

2. Sharma, C., & Bhardwaj, N.K. (2019). Bacterial nanocellulose: Present status, biomedical applications and future perspectives. Materials Science and Engineering, (104), 109963. (In Netherlands). doi: 10.1016/j.msec.2019.109963.

3. Paiva, G.M. & et al. (2024). Bacterial nanocellulose produced as a by-product of the brewing industry and used as an adsorbent for synthetic solutions of Co (II), Cu (II), Ni (II) AND Fe (III). Journal of Polymers and the Environment, (32), № 12, 6803-6819. (In USA). doi: 10.1007/s10924-024-03389-0.

4. Pasaribu, K.M. & et al. (2024). A review: Current trends and future perspectives of bacterial nanocellulose-based wound dressings. International Journal of Biological Macromolecules, 135602. (In Japan). doi: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135602.

5. Katyal, M. & et al. (2023). Bacterial cellulose: Nature's greener tool for industries. Biotechnology and Applied Biochemistry, (70), № 5, 1629-1640. (In USA). doi: 10.1002/bab.2460.

6. Núñez, D. & et al. (2024). Toward biomanufacturing of next-generation bacterial nanocellulose (BNC)-based materials with tailored properties: A review on genetic engineering approaches. Biotechnology Advances, 108390. (In Holland). doi: 10.1016/j.biotechadv.2024.108390.

7. Skiba, E.A. et al. (2024). Enzymatic hydrolysis of highly concentrated substrates obtained from giant miscanthus. Izvestiya vuzov. Applied Chemistry and Biotechnology, 14 (3), 394-405. (In Russ.). doi: 10.21285/achb.933.

8. Skiba, E.A. & et al. (2023). Biosynthesis of Bacterial Nanocellulose from Low-Cost Cellulosic Feedstocks: Effect of Microbial Producer. International Journal of Molecular Sciences, (24), № 18, 14401. (In Switzerland). doi: 10.3390/ijms241814401.

9. Alimardani, Y. & et al. (2024). Prospective and applications of bacterial nanocellulose in dentistry. Cellulose, (31), № 13, 7819-7839. (In Netherlands). doi: 10.1007/s10570-024-06098-y.

10. Hou, Y. & et al. (2019). Functional bacterial cellulose membranes with 3D porous architectures: Conventional

drying, tunable wettability and water/oil separation. Journal of membrane science, (591), 117312. (In Netherlands). doi: 10.1016/j.memsci.2019.117312.

11. Luo, H. & et al. (2018). Uniformly dispersed free-standing carbon nanofiber/graphene electrodes made by a scalable biological method for high-performance flexible supercapacitors. Advanced Functional Materials, (28), № 48, 1803075. (In Germany). doi: 10.1002/adfm.201803075.

12. Skiba, E.A. (2024). The material balance of the processes of obtaining biotechnological products from the biomass of giant miscanthus. Actual Biotechnology, (3), 39-41. (In Russ.). doi: 10.20914/2304-4691-2024-3-39-41.

13. Ovchinnikova, E.V. & et al. (2021). Bioprocessing of oat hulls to ethylene: Impact of dilute HNO₃- or NaOH-pre-treatment on process efficiency and sustainability. ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2021; 9(49), 16588-16596. (In USA). doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05112.

14. Zenkova, A.A., Gladysheva, E.K., Shavyrkina, N.A. (2022). Substantiation of the choice of acetate buffer concentration during enzymatic hydrolysis of oat husks for bacterial nanocellulose biosynthesis // Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industries. Proceedings of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and Young scientists with international participation. Biysk. – May 18-20, 2022. – Biysk: Publishing House of Alt. State Technical University. I.I. Polzunov University, 297-300. (In Russ.). doi:10.25699/tohbipp.2022.6.0.85.032.

15. Kashcheeva, E.I., Budaeva, V.V. (2018). Determination of reactivity to enzymatic hydrolysis of cellulose-containing substrates. Factory laboratory. Diagnostics of materials, 84 (10), 5-11. (In Russ.).doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-5-11.

16. Gladysheva, E.K., Kashcheeva, E.I. (2024). Biotechnological transformation of miscanthus of the Kamis variety into highly valuable bacterial nanocellulose // Proceedings of the IV International Biotechnological Forum BIOAsia–Altai (September 23-28, 2024, Barnaul. Publishing House of Altai State University, 2024. BIOAsia–Altai, 4 (1), 412-416. (In Russ.).

17. Pavlov, I. N., Kuznetsov, P. S., Shilov, A. I. (2020). Investigation of the freeze-drying process of bacterial nanocellulose //Polzunovsky bulletin. (4). 88-94. (In Russ.). doi: 10.25712/astu.2072-8921.2020.04.017.

18. Bogolitsyn, K., & Parshina, A., Aleshina, L. (2020). Structural features of brown algae cellulose. Cellulose, 27(17), 1-14. (In Netherlands). doi: 10.1007/s10570-020-03485-z.

19. Osipov, D.O. & et al. (2024). Comparative Study of the Convertibility of Pretreated Miscanthus Straw Using Enzyme Preparations Produced by Different Recombinant Strains of *Penicillium verruculosum*. Agronomy. (14), №. 3, 499. (In Switzerland). doi: 10.3390/agronomy14030499.

20. Fansuri, H. & et al. (2024) A Review of the Technological Aspects and Process Optimization of Bioethanol Production From Corn Stover Biomass: Pretreatment Process,

Hydrolysis, Fermentation, Purification Process, and Future Perspective //Environmental Quality Management. (34), №. 2, e22336. (In USA). doi: 10.1002/tqem.22336.

21. Riseh, R.S. & et al. (2024). Agricultural wastes: a practical and potential source for the isolation and preparation of cellulose and application in agriculture and different industries //Industrial Crops and Products. (208), 117904. (In Netherlands). doi: 10.1016/j.indcrop. 2023.117904.

22. Chauhan, A.S. & et al. (2024). Strategies for Overcoming the Inhibition of Cellulose Hydrolysis //Handbook of Biorefinery Research and Technology: Biomass Logistics to Saccharification. Dordrecht : Springer Netherlands. 1001-1021. (In Germany). doi: 10.1007/978-94-007-6308-1_70.

23. Koksharov, S.A., Aleeva, S.V., Kalinin, E.N. (2024). Comparison of the structure of lignin in the bast and woody parts of the flax stem and its transformations in the presence of sulfur-containing reducing agents // News of higher educational institutions. Chemistry and Chemical Technology series. 67 (9). 90-102. (In Russ.). doi :10.6060/ivkkt.2.0246709.7037.

24. Lavrentieva, E.P., Sanina, O.K., Belousov, R.O. (2022). Deep processing of bast fibers is the way to revive Russia's national traditions. News of higher educational institutions. Textile Industry Technology, (3), 130-139. (In Russ.). doi: 10.47367/0021-3497_2022_3_130.

25. Sviridov, A.S., Chaplygin, M.E., Popov, R.A. (2024). Investigation of the resistance of stems of bast crops to abrasive abrasion //Agroengineering. 26 (6), 4-10. (In Russ.). doi: 10.26897/2687-1149-2024-6-4-10.

26. Makarova, E.I., Denisova, M.N. (2014). Fermentolysis of non-wood raw materials and samples of hydrotropic cellulose obtained from it. Polzunovsky vestnik, (3), 123-126. (In Russ.).

27. Smriti, S.A. & et al. (2023). Recent developments of the nanocellulose extraction from water hyacinth: A review //Cellulose. 30 (14), 8617-8641. (In Netherlands). doi: 10.1007/s10570-023-05374-7.

28. Shubakov, A.A., Mikhailova, E.A., Martynov, V.V. (2022). Bioconversion of cellulose-containing raw materials. Enzymatic hydrolysis of cellulose (review). Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 4, 27-38. (In Russ.). doi: 10.19110/1994-5655-2022-4-27-38.

29. Sakovich, G.V. & et al. (2018). Chemical aspects of bacterial nanocellulose. Journal of Siberian Federal University. Chemistry, 11 (4), 531-542. (In Germany). doi: 10.17516/1998-2836-0097.

Information about the authors

A. A. Zenkova, Engineer of the Bioconversion Laboratory, Institute for Problems of Chemical and Energy Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 12 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 12 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.