

Научная статья
УДК 577.114
EDN: PZKEDW
DOI: 10.21285/achb.947



Биотехнологическая трансформация биомассы мискантуса гигантского в бактериальную наноцеллюлозу

Н.А. Шавыркина***, Е.К. Гладышева*, А.А. Зенкова***, Е.А. Скиба*✉

*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Российская Федерация

**Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Российская Федерация

Аннотация. Биотехнологическая трансформация растительного сырья является одним из наиболее перспективных промышленных процессов получения высокоценных продуктов из недорогого растительного сырья. Целью проведенной работы являлся анализ биотрансформации мискантуса гигантского в высокоценную бактериальную наноцеллюлозу от исходного сырья до конечного продукта, то есть представление полного цикла переработки растительного сырья. Изначально был определен химический состав биомассы мискантуса гигантского, содержание целлюлозы в ней составило 54%. Далее осуществляли биотрансформацию в три этапа: на первом этапе биомассу мискантуса гигантского подвергали предварительной обработке четырьмя способами; далее полученные субстраты подвергали ферментативному гидролизу в одинаковых условиях и получали углеводные питательные среды; на завершающем этапе проводили биосинтез бактериальной наноцеллюлозы на полученных питательных средах посредством симбиотической культуры *Medusomyces gisevii* Sa-12. В результате было выявлено, что химическая предобработка с помощью разбавленных растворов азотной кислоты и гидроксида натрия является чрезвычайно эффективной и позволяет повысить реакционную способность к ферментативному гидролизу в 28–31 раз по сравнению с нативным мискантусом. Однозначно показано, что в технологии получения бактериальной наноцеллюлозы из мискантуса гигантского предварительную обработку биомассы необходимо проводить в одну стадию разбавленным раствором азотной кислоты. В этом случае выход субстрата из исходного сырья для последующего гидролиза составляет 50%, извлечение редуцирующих сахаров из биомассы мискантуса максимально (65,2%) и выход бактериальной наноцеллюлозы в 1,1–1,3 раза выше, чем при трех других способах предобработки биомассы.

Ключевые слова: мискантус гигантский, биотрансформация, бактериальная наноцеллюлоза, химическая предварительная обработка

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-00107, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>.

Для цитирования: Шавыркина Н.А., Гладышева Е.К., Зенкова А.А., Скиба Е.А. Биотехнологическая трансформация биомассы мискантуса гигантского в бактериальную наноцеллюлозу // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 4. С. 504–513. DOI: 10.21285/achb.947. EDN: PZKEDW.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Biotechnological transformation of giant miscanthus biomass into bacterial nanocellulose

Nadezhda A. Shavyrkin***, Evgeniya K. Gladysheva*,
Anastasia A. Zenkova***, Ekaterina A. Skiba*✉

*Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS, Biysk, Russian Federation

**Biysk Technological Institute, Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation

Abstract. Biotechnological transformation of plant materials constitutes one of the most promising industrial processes for obtaining high-value products from inexpensive plant materials. The article analyzes the biotransformation

© Шавыркина Н.А., Гладышева Е.К., Зенкова А.А., Скиба Е.А., 2024

of giant miscanthus (*Miscanthus × giganteus*) into high-value bacterial nanocellulose from the feedstock to the final product, i.e., presents the complete cycle of plant material processing. First, the chemical composition of giant miscanthus biomass was determined, and the content of cellulose was found to be 54%. After that, biotransformation was performed in three stages: in the first stage, the giant miscanthus biomass was pretreated using four methods; then, the obtained substrates were subjected to enzymatic hydrolysis under the same conditions, and carbohydrate growth media were obtained; in the final stage, bacterial nanocellulose was biosynthesized in the obtained growth media using *Medusomyces gisevii* Sa-12 symbiotic culture. The chemical pretreatment with dilute solutions of nitric acid and sodium hydroxide was found to be extremely effective and increase the reactivity to enzymatic hydrolysis by 28–31 times as compared to native miscanthus. It is shown that for the production of bacterial nanocellulose from giant miscanthus, biomass should undergo one-stage pretreatment with a dilute nitric acid solution. In this case, the substrate yield from the feedstock (for subsequent hydrolysis) amounts to 50%, the extraction of reducing sugars from miscanthus biomass is maximum (65.2%), and the yield of bacterial nanocellulose is 1.1–1.3 times higher than for the other three biomass pretreatment methods.

Keywords: *Miscanthus × giganteus*, biotransformation, bacterial nanocellulose, chemical pretreatment

Funding. Russian Science Foundation supported this research (grant no. 22-13-00107, <https://rscf.ru/project/22-13-00107/>).

For citation: Shavyrkina N.A., Gladysheva E.K., Zenkova A.A., Skiba E.A. Biotechnological transformation of giant miscanthus biomass into bacterial nanocellulose. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(4):504-513. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.947. EDN: PZKEDW.

ВВЕДЕНИЕ

Бактериальная наноцеллюлоза (БНЦ) – уникальный микробный полимер, который благодаря наноразмерности и химической чистоте обладает свойствами, отличными от любых растительных целлюлоз, и имеет огромный спектр применений. В связи с особенностями метаболизма продуцентов БНЦ, ее выход невысок, а себестоимость значительна, поэтому одним из путей снижения себестоимости является использование дешевого сырья. В связи с этим во всем мире активно развивается концепция трансформации дешевого целлюлозосодержащего сырья в дорогую БНЦ [1–3].

Особенно значимым данное направление является для северных стран, в которых вегетационный период очень короткий, в течение него невозможно получить урожай сахаристого растительного сырья и даже получение урожая крахмалистого сырья под вопросом. В таких условиях с учетом глобальной повестки недопустима конкуренция за пищевое сырье между людьми и промышленными предприятиями, поэтому концепция трансформации дешевого целлюлозосодержащего сырья в высокомаржинальные продукты имеет не только значимость в рамках циркулярной экономики, но и острую социальную значимость [1–6].

Важным аспектом является адекватный выбор целлюлозосодержащего сырья. Мискантус гигантский – энергетическая культура, занимающая одну из ведущих мировых позиций среди целлюлозосодержащего сырья. Благодаря высокой скорости роста, содержанию целлюлозы, превышающему его содержание в древесине (50–55% против 35–50%), дешевизне возделывания объем посадок мискантуса ежегодно увеличивается во всем мире. Мискантус перерабатывается в бумагу, картон, биобетон, химические производные целлюлозы, продукты микробиологического синтеза [7–9].

Как и любой другой вид целлюлозосодержащего сырья, мискантус состоит из целлюлозы, гемицеллюлоз, лигнина, жировосковой фракции и минеральных компонентов, прочно соединенных между собой в композитную матрицу. По единодушному мнению мировых экспертов, предобработка целлюлозосодержащего сырья – это ключевая стадия, которая определяет

успех последующих стадий ферментативного гидролиза и микробиологического биосинтеза любых продуктов биотехнологической трансформации [10–12].

В данной работе впервые приводится расчет выхода полупродуктов и целевого продукта при использовании четырех способов химической предварительной обработки мискантуса и оценивается эффективность полного цикла биосинтеза БНЦ из мискантуса гигантского от сырья до целевого продукта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Мискантус гигантский сорта Камис российской селекции был выращен в деревне Марушкино Московской области в 2021 году, собран в феврале 2022 года и любезно предоставлен ООО «Мастер Брэнд», г. Москва.

В данной работе исследовано четыре способа предобработки мискантуса с помощью разбавленных 4 масс.% растворов HNO_3 и NaOH при атмосферном давлении, процессы проведены в лабораторных условиях. Подробно методики изложены в работах [11, 12]. Это авторские методики, многократно воспроизведенные в лабораторных и пилотных условиях на таких видах сырья, как шелуха овса и мискантус сахароцветный сорта Сорановский. Успех переработки мискантуса гигантского был достигнут только после осуществления тщательной пробоподготовки, которая заключалась в пятикратном измельчении с помощью кормоизмельчителя КР-02 (г. Миасс, Россия) до фракции размером не более 12 мм, при этом 50% сырья было измельчено до фракции размером не более 4 мм. Компонентный состав сырья и пальпов определен стандартными «мокрыми» методами и приведен в пересчете на сухое вещество, методы описаны в работе [13].

Полученные субстраты подвергнуты ферментативному гидролизу с помощью целлюлолитических ферментных препаратов Целлюлюкс-А («Сиббиофарм», Россия) и «Ультрафло Коре» (Novozymes A/S, Дания) согласно методике, описанной в работе [11]. Особенностью в данной работе стало использование 0,05 М ацетатного буфера, так как нами было установлено, что эта концентрация благоприятно влияет на ход ферментативного гидролиза и не вызывает ингибирования биосинтеза БНЦ.

Полученные ферментативные гидролизаты были стандартизованы по редуцирующим сахарам (РС) (20 г/л) и экстрактивным веществам черного чая (1,6 г/л) и использованы в качестве питательной среды для биосинтеза БНЦ с помощью симбиотической культуры *Medusomyces gisevii* Sa-12, приобретенной во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Посевной материал предварительно активировали в течение 7 суток в оптимальных условиях [14] и вносили в гидролизные среды в количестве 10 об.%, в инокуляте общее количество дрожжей – 12,9–13,2 млн клеток в 1 см³, общее количество уксуснокислых бактерий – 1,6–2,2 млн клеток в 1 см³. В качестве контроля использовалась синтетическая глюкозная среда, содержащая 20 г/л глюкозы и 1,6 г/л экстрактивных веществ черного чая [15]. Биосинтез БНЦ проводили в ранее выявленных оптимальных условиях [16]: стационарные условия, температура 27 °С. Культивирование проводили в климатической камере (Binder, Германия), продолжительность культивирования составила 11 суток.

После окончания культивирования гель-пленку БНЦ снимали с поверхности питательной среды и промывали от компонентов питательной среды и клеток поэтапной обработкой 2 масс.% NaOH и 0,25 масс.% HCl с последующей промывкой дистиллированной водой до нейтральной реакции. Полученные пленки БНЦ подвергали сублимационной сушке в лиофилизаторе HR7000-M (Harvest Right LLC, Salt Lake City, США) до постоянной массы.

Выход высушенной БНЦ рассчитывали по следующей формуле:

$$W = \frac{m}{C \times V \times 0,9} \times 100\%,$$

где W – выход БНЦ, %; m – масса образца БНЦ в пересчете на абсолютно сухое вещество, г; C – концентрация редуцирующих веществ в среде в пересчете на глюкозу, г/л; V – начальный объем среды, л; 0,9 – коэффициент пересчета, обусловленный отщеплением молекулы воды при полимеризации глюкозы в целлюлозу.

Все реактивы приобретены в АО «Вектон» (г. Санкт-Петербург, Россия).

Степень полимеризации образцов БНЦ определялась вискозиметрическим методом [17] с использованием в качестве растворителя кадоксена (этилендиамин, регистрационный номер CAS 107-15-3, «Ленреактив», г. Санкт-Петербург, Россия; оксид кадмия, регистрационный номер CAS 1306-19-0, «Ленреактив», г. Санкт-Петербург, Россия).

Экспериментальные результаты получены в трехкратных повторностях, статистически обработаны с применением стандартных методов с помощью программы Microsoft Office Excel 2019.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе изучили компонентный состав биомассы мискантуса гигантского и продуктов, полученных из него с использованием четырех авторских способов предобработки. Результаты представлены на рис. 1.

Предобработка азотной кислотой приводит к повышению массовой доли целлюлозы в продукте азотно-кислотной обработки (ПАО) по сравнению с сырьем в 1,5 раза (83,0% против 54,0%), к снижению содержания нецеллюлозных компонентов: пентозанов в 3,1 раза (7,4% против 22,8%), лигнина в 2,8 раза (7,5% против 21,0%), при этом доля минеральной составляющей увеличивается с 1,7 до 2,1%, что является особенностью азотнокислотной обработки [13, 14].

Предобработка гидроксидом натрия в данной работе используется в качестве арбитражного метода, так как в мировом сообществе принято, что это классический способ предобработки недревесного целлюлозосодержащего сырья [10–12]. Содержание целлюлозы в продукте щелочной делигнификации (ПЩД) повышается в 1,6 раза (86,3% против 54,0%). Этот способ позволяет эффективно удалить пентозаны: их количество снижается в 5,1 раза (4,5% против 22,8%). Остаточное содержание лигнина составило 9,0%, что в 2,3 раза ниже, чем в исходном сырье. Содержание зольных компонентов

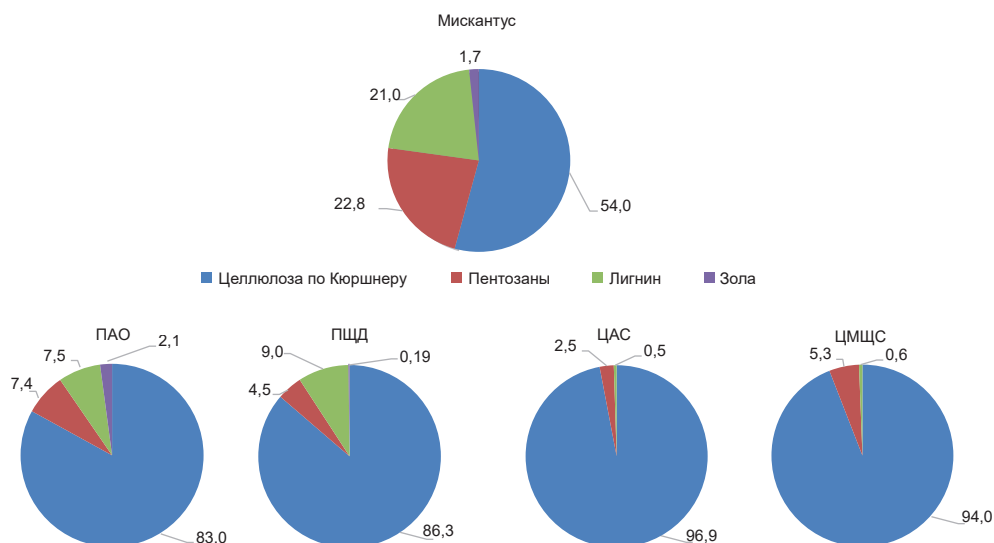


Рис. 1. Компонентный состав мискантуса гигантского и продуктов предварительной обработки

Fig. 1. Composition of *Miscanthus × giganteus* and pre-treatment products

при щелочной делигнификации снижается в 8,9 раза (0,19% против 1,7%).

Предобработка азотной кислотой на первой стадии и гидроксидом натрия на второй стадии приводит к получению химически чистого субстрата – целлюлозы, полученной азотнокислым способом (ЦАС), а именно: массовая доля целлюлозы по сравнению с сырьем увеличивается в 1,8 раза (96,9% против 54,0%), массовая доля пентозанов снижается в 8,4 раза (2,5% против 21,0%), массовая доля лигнина снижается в 42 раза (0,5% против 21,0%), зольность снижается в 17 раз (0,1% против 1,7%). Это очень эффективный способ выделения целлюлозы.

Предобработка гидроксидом натрия на первой стадии и азотной кислотой на второй стадии приводит к получению целлюлозы модифицированным щелочным способом (ЦМЩС) – субстрата с низкой зольностью и низким содержанием лигнина, но при этом сохраняется остаточное содержание пентозанов на уровне 5,3%. Это нельзя считать недостатком, если субстрат предназначен для гидролиза до РС.

Химические составы субстратов, полученные из мискантуса гигантского в ходе проведенного исследования, очень близки к химическим составам субстратов, полученных из мискантуса сахароцветного в работе [13]. Воспроизводимость результатов свидетельствует о стабильной работе используемых авторских методов предобработки недревесного целлюлозосодержащего сырья и подтверждает их эффективность. На рис. 2 представлена зависимость концентрации РС от продолжительности биокаталитического гидролиза полученных образцов.

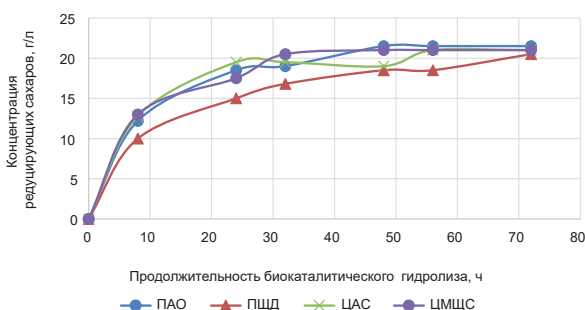


Рис. 2. Зависимость концентрации редуцирующих сахаров от продолжительности биокаталитического гидролиза

Fig. 2. Dependence of reducing sugar concentration on the duration of biocatalytic hydrolysis

Таблица 1. Ферментативный гидролиз пальпов из мискантуса гигантского

Table 1. Enzymatic hydrolysis of *Miscanthus × giganteus* pulps

Показатель	Способ предобработки мискантуса				
	ПАО	ПЩД	ЦАС	ЦМЩС	Нативный мискантус
Концентрация редуцирующих сахаров в гидролизате, г/л	21,5±0,2	20,8±0,2	21,0±0,2	21,0±0,2	0,6±0,1
Выход редуцирующих сахаров от суммы массовой доли целлюлозы и массовой доли пентозанов в субстрате, %	71,4±0,3	68,6±0,3	63,4±0,3	67,1±0,3	2,3±0,2
Концентрация ксилозы в гидролизате, г/л	2,0±0,1	1,4±0,1	0,5±0,1	1,3±0,1	0,0
Выход ксилозы от массовой доли пентозанов в субстрате, %	80,0±0,2	93,0±0,2	62,5±0,2	72,2±0,2	0,0
Вклад ксилозы в общее содержание редуцирующих сахаров, %	9,3±0,2	6,7±0,2	2,4±0,2	6,2±0,2	0,0

Выявлено, что все образцы имели схожую реакционную способность к ферментативному гидролизу. Концентрация РС через 72 ч составила 20,8–21,5 г/л. Выход РС от массы субстрата для полученных продуктов варьировался от 63,0% (для ПЩД) до 65,2% (для ПАО). Полученные данные ниже, чем данные, представленные в аналогичных исследованиях для мискантуса сахароцветкового [11].

В табл. 1 представлены обобщенные данные по выходу РС в результате ферментативного гидролиза четырех продуктов предобработки биомассы мискантуса гигантского, а также по результатам гидролиза нативной биомассы.

Все виды предобработок оказались чрезвычайно эффективными в отношении мискантуса гигантского, так как привели к повышению реакционной способности к ферментативному гидролизу гидролизующихся компонентов субстратов (суммы целлюлозы и гемицеллюлоз (пентозанов)) в 28–31 раз по сравнению с нативным сырьем, а именно выход РС составил от 63,4 до 71,4% для субстратов против 2,3% для нативного мискантуса. В литературе предобработка считается успешной, если она приводит к повышению реакционной способности субстрата по сравнению с сырьем в 5 и более раз [10], таким образом, результаты примененных предобработок можно считать выдающимися.

В то же время в стремлении к научной объективности необходимо обратить внимание на чрезвычайную устойчивость к ферментативному гидролизу нативного мискантуса гигантского: выход РС составляет всего 2,3% от суммы гидролизующихся компонентов, что в 7,4 раза ниже, чем гидролизующесть нативного мискантуса сахароцветкового, для которого выход РС составляет 17% [13]. Данный факт можно объяснить особенностями морфологии мискантуса гигантского. Мискантус гигантский – это мощное, прочное, крепкое растение, высота которого в 2 раза превосходит высоту мискантуса сахароцветного, а толщина стебля – в 2–3 раза больше толщины стебля указанного вида. Особенности морфологии повлияли и на поведение субстратов в процессе ферментативного гидролиза: несмотря на то, что реакционная способность к ферментативному гидролизу значительно повышается после предобработки, она для субстратов из мискантуса гигантского на 13–25% ниже, чем для субстратов из мискантуса сахароцветного. Это очень важное обстоятельство. Полученные результаты хорошо согласуются с информацией, приведенной в источниках [18, 19], где отмечена исключительная устой-

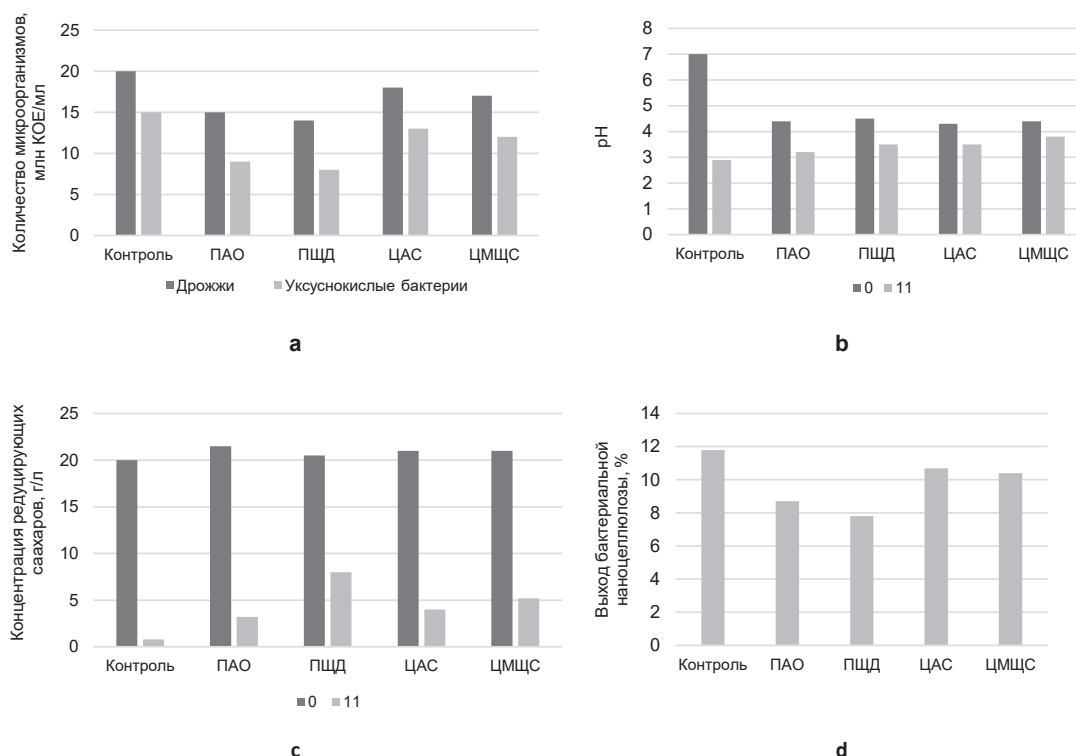


Рис. 3. Показатели биосинтеза бактериальной наноцеллюлозы: а – количество дрожжей и уксуснокислых бактерий; б – pH; в – редуцирующие сахара; г – выход бактериальной наноцеллюлозы

Fig. 3. Indicators of bacterial nanocellulose biosynthesis: а – the number of yeast and acetic acid bacteria; б – pH; в – reducing sugars; г – yield of bacterial nanocellulose

чивость мискантуса к ферментативному гидролизу, а поведение при ферментативном гидролизе не модельных, а природных субстратов объясняется в первую очередь морфологией субстрата [19].

Субстраты из мискантуса гигантского характеризуются достаточно высокой эффективностью гидролиза гемицеллюлоз. Выход ксилозы от массовой доли пентозанов в субстратах составляет от 62,5 до 93,0% (см. табл. 1). При этом вклад ксилозы в общее содержание РС составляет всего 2,4-9,3%, таким образом, получены преимущественно глюкозные гидролизаты.

На третьем этапе эксперимента проводили биосинтез БНЦ на четырех полученных гидролизатах. На рис. 3 отражены основные параметры процесса биосинтеза.

Продуцент, используемый в работе, представляет собой консорциум различных видов и родов дрожжей и уксуснокислых бактерий. Из литературных данных известно, что дрожжи синтезируют этанол для стимуляции роста количества уксуснокислых бактерий, а те в свою очередь синтезируют БНЦ для защиты дрожжей от влияния окружающей среды [20]. В связи с этим количество дрожжей превышает количество уксуснокислых бактерий. Следует отметить, что содержание дрожжей и уксуснокислых бактерий на разных питательных средах незначительно отличается между собой (см. рис. 3, а). Снижение pH в процессе культивирования (см. рис. 3, б) происходит в результате активной жизнедеятельности уксуснокислых бактерий и образования таких метаболитов, как уксусная, янтарная, глюконовая кислота и др. [21].

Это создает благоприятные условия жизнедеятельности продуцента и снижает риск контаминации посторонней микрофлорой. Остаточная концентрация РС на 11-е сутки культивирования была минимальной на синтетической питательной среде (контроль) и составила менее 1 г/л. Концентрация РС на питательных средах ферментативных гидролизатов ПАО, ЦАС и ЦМШС составила от 3,2 до 5,2 г/л. Наибольшая остаточная концентрация редуцирующих веществ наблюдалась на среде ПШД – 8 г/л. На этой же питательной среде наблюдалось самое низкое содержание дрожжей и уксуснокислых бактерий, что объясняется негативным влиянием ионов натрия на процесс биосинтеза БНЦ [22].

Наиболее значимым показателем эффективности процессов является выход целевого продукта. Если речь идет о БНЦ, то есть два наглядных способа представления результатов: расчет выхода БНЦ в пересчете на РС и в пересчете на исходное сырье. На рисунке 3, г приведены данные по выходу БНЦ от суммы РС. Наибольшие выходы БНЦ были получены на питательных средах ферментативных гидролизатов ЦАС и ЦМШС (10,7 и 10,4% соответственно) – они сопоставимы с контролем (11,8%), для гидролизата ПАО выход был средним (8,7%), наименьший же выход БНЦ получен на среде ПШД (7,8%). В аналогичном исследовании при использовании в качестве продуцента Kombucha Original Bio выход БНЦ составил от 1 до 4%, что в 3,0–7,8 раза ниже, чем выходы БНЦ, полученные в данном исследовании [23].

Таблица 2. Расчет выхода полупродуктов и бактериальной наноцеллюлозы из мискантуса гигантского

Table 2. Calculation of the yield of semi-finished products and bacterial nanocellulose from *Miscanthus × giganteus*

Показатель	Способ предобработки мискантуса			
	ПАО	ПЩД	ЦАС	ЦМЩС
Выход пальп от массы мискантуса	50±2	48±2	32±2	38±2
Выход редуцирующих сахаров от массы субстрата, %	65,2±0,3	63,0±0,3	63,6±0,3	63,6±0,3
Выход бактериальной наноцеллюлозы от редуцирующих сахаров, %	8,7±0,1	7,8±0,1	10,7±0,1	10,4±0,1
Выход бактериальной наноцеллюлозы от массы мискантуса, %	2,84±0,05	2,36±0,05	2,18±0,05	2,51±0,05

В табл. 2 обобщены данные расчета выхода полупродуктов и БНЦ из мискантуса гигантского. Данный расчет является технологическим, поэтому для стадии ферментативного гидролиза приводится выход РС не от суммы гидролизующих компонентов, а от массы субстрата, чтобы объективно оценить, каков будет выход продукта на реальном производстве. Также приводится выход БНЦ от общих, а не от утилизированных РС, чтобы избежать математического завышения выхода. Авторы современных работ по исследованию биосинтеза БНЦ часто математически завышают выход [24, 25] в отличие от авторов классических работ, которые придерживаются реальных расчетов [26, 27].

Анализ табл. 2 показывает, что наиболее существенный вклад оказывает выход субстратов от массы мискантуса. Это ключевая стадия технологии, оказывающая наибольшее влияние на выход БНЦ в целом. На стадии ферментативного гидролиза получены примерно равные выходы РС от массы субстрата, «выпал» лишь субстрат, полученный обработкой гидроксидом натрия. Только совокупный анализ позволил определить лидера. Очевидно, что наиболее эффективной оказалась предобработка с помощью азотной кислоты, позволившая получить выход абсолютно сухой БНЦ 2,84% от массы мискантуса, что в 1,1–1,3 раза выше, чем при других способах предобработки.

В ходе проведенного исследования также определяли степень полимеризации полученных образцов БНЦ. Она составила: для синтетической питательной среды (контроль) – 2500; для ПАО – 2830, для ПЩД – 2600, для ЦАС – 3050, для ЦМЩС – 3000. Полученные значения являются близкими между собой и довольно высокими. Авторы работы [28] исследовали получение БНЦ с применением альтернативных углеродных субстратов, а именно отходов и побочных продуктов биодизельной и кондитерской промышленности (сырого глицерина, гидролизатов подсолнечного шрота, гидролизатов отходов мучных изделий). Полученные ими образцы БНЦ имели степень полимеризации в пределах 1889,1–2672,8, что ниже, чем в данной работе. При биосинтезе БНЦ на средах с использованием в качестве источника углерода различных чистых сахаров [29], что можно считать идеальными условиями, самые высокие значения степени полимеризации отмечены для сред с глюкозой и мальтозой (4350–4400), а самые низкие – для сред с маннозой (2340). Таким образом, образцы БНЦ, полученные на гидролизных средах из мискантуса гигантского, имеют вполне сопоставимые значения степени полимеризации по сравнению с образцами БНЦ, полученными как на чистых сахарных средах, так и на средах с альтернативными источниками углерода.

По сравнению с литературными данными выход БНЦ из мискантуса гигантского в 1,6–1,8 раза выше, чем выход БНЦ из мискантуса сахароцветного [14]. Так как в обоих случаях применялись идентичные методы и подходы, отличия выходов связаны с особенностями сырья. Химический состав мискантуса гигантского и мискантуса сахароцветного очень близок, но возможно, в мискантуса сахароцветном содержатся минорные компоненты, отвечающие за его зимостойкость и устойчивость к внешним факторам, и они же являются ингибиторами биосинтеза БНЦ. Известно, что продуценты БНЦ чувствительны к ингибиторам и требовательны к составу питательных сред [1, 2, 30]. Важным аспектом является воспроизводимость результатов: и в работе [14], и в данной работе максимальный выход БНЦ достигается при одностадийной предварительной обработке биомассы мискантуса с помощью азотной кислоты.

В работе [31] мискантус (вид не приводится) был подвергнут гидротермической обработке в присутствии серной кислоты, затем полученный пальп был подвергнут ферментативному гидролизу с помощью ферментного комплекса Celic CTec2 (Novozymes, Багсверд, Дания), гидролизат был стандартизован по РС (50 г/л), также были добавлены питательные соли и витамины, далее с помощью *Gluconacetobacter xylinus* ATCC 53524 была синтезирована БНЦ, ее продуктивность составила 16,7 г/л. Таким образом, стадия биосинтеза осуществлена с высоким выходом (37% от концентрации РС), но, к сожалению, авторы не приводят материальный баланс получения БНЦ из мискантуса, поэтому сравнить выходы не представляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования показана принципиальная возможность биосинтеза высокоценной БНЦ из доступного целлюлозосодержащего сырья – биомассы мискантуса гигантского российской селекции. Трансформация мискантуса осуществлялась в три этапа. На первом этапе проведена химическая предобработка с помощью разбавленных растворов азотной кислоты и гидроксида натрия. На второй стадии осуществлен ферментативный гидролиз полученных субстратов, на третьей стадии осуществлен биосинтез БНЦ с помощью симбиотической культуры *Medusomyces gisevii* Sa-12. Вторая и третья стадии проведены идентично для всех вариантов предобработки. Установлено, что нативный мискантус устойчив к ферментативному гидролизу. Выявлено, что химическая предобработка с помощью разбавленных растворов азотной кислоты и гидроксида натрия является чрезвычайно эффективной и позволяет повысить реакционную способность к ферментативному гидролизу в

28–31 раз по сравнению с нативным мискантусом. Наиболее эффективным способом предобработки мискантуса гигантского является одностадийная предварительная обработка с помощью азотной кислоты, при этом выход БНЦ от массы мискантуса

составил 2,84%. Преимуществом данной работы является осуществление полного цикла трансформации мискантуса в БНЦ, полного расчета выхода полупродуктов и целевого продукта от массы сырья.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khan S., Ul-Islam M., Fatima A., Manan S., Khattak W.A., Ullah M.W., et al. Potential of food and agro-industrial wastes for cost-effective bacterial cellulose production: an updated review of literature // *ES Food & Agroforestry*. 2023. Vol. 13. P. 905. DOI: 10.30919/esfaf905.
2. Avcioglu N.H. Bacterial cellulose: recent progress in production and industrial applications // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2022. Vol. 38. P. 86. DOI: 10.1007/s11274-022-03271-y.
3. Zhong C. Industrial-scale production and applications of bacterial cellulose // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. P. 605374. DOI: 10.3389/fbioe.2020.605374.
4. Volova T.G., Kiselev E.G., Demidenko A.V., Zhila N.O., Nemtsev I.V., Lukyanenko A.V. Production and properties of microbial polyhydroxyalkanoates synthesized from hydrolysates of Jerusalem artichoke tubers and vegetative biomass // *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 1. P. 132. DOI: 10.3390/polym14010132.
5. Ha D.T., Kanarskiy A.V., Kanarskaya Z.A., Scherbakov A.V., Scherbakova E.N., Pranovich A.V. Impact of cultivation conditions on xylanase production and growth in *Paenibacillus mucilaginosus* // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. N 3. С. 459–469. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-3-459-469. EDN: OMLQLP.
6. Евстафьев С.Н., Фомина Е.С., Тигунцева Н.П. Термохимическое ожигание соломы пшеницы в среде суб- и сверхкритического тетралина // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. N 1. С. 160–166. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166. EDN: VQQNNY.
7. Shavyrkina N.A., Budaeva V.V., Skiba E.A., Gismatulina Y.A., Sakovich G.V. Review of current prospects for using *Miscanthus*-based polymers // *Polymers*. 2023. Vol. 15, no. 14. P. 3097. DOI: 10.3390/polym15143097.
8. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. *Miscanthus*: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production // *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*. 2021. Vol. 13, no. 1. P. 58–69. DOI: 10.1111/gcbb.12761.
9. Banerjee S., Dien B.S., Eilts K.K., Sacks E.J., Singh V. Pilot-scale processing of *Miscanthus x giganteus* for recovery of anthocyanins integrated with production of microbial lipids and lignin-rich residue // *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 485. P. 150117. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150117.
10. Zayed H., Sahu J.N., Boyce A.N., Faruq G. Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 66. P. 751–774. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.038.
11. Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 199. P. 42–48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.
12. Chaudhary G., Chaudhary N., Saini S., Gupta Y., Vivekanand V., Panghal A. Assessment of pretreatment strategies for valorization of lignocellulosic biomass: path forwarding towards lignocellulosic biorefinery // *Waste and Biomass Valorization*. 2024. Vol. 15. P. 1–36. DOI: 10.1007/s12649-023-02219-z.
13. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis // *Polymers*. 2019. Vol. 11, no. 10. P. 1645. DOI: 10.3390/polym11101645.
14. Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Sakovich G.V. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass // *Carbohydrate Polymers*. 2021. Vol. 252. P. 117178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117178.
15. Goh W.N., Rosma A., Kaur B., Fazilah A., Karim A.A., Rajeev B. Fermentation of black tea broth (Kombucha): I. Effects of sucrose concentration and fermentation time on the yield of microbial cellulose // *International Food Research Journal*. 2012. Vol. 19, no. 1. P. 109–117.
16. Gladysheva E.K., Skiba E.A., Zolotukhin V.N., Sakovich G.V. Study of the conditions for the biosynthesis of bacterial cellulose by the producer *Medusomyces gisevii* Sa-12 // *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2018. Vol. 54. P. 179–187. DOI: 10.1134/S0003683818020035.
17. Bogolitsyn K., Parshina A., Aleshina L. Structural features of brown algae cellulose // *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 9787–9800. DOI: 10.1007/s10570-020-03485-z.
18. Van der Cruysen K., Al Hassan M., van Erven G., Dolstra O., Trindade L.M. Breeding targets to improve biomass quality in *Miscanthus* // *Molecules*. 2021. Vol. 26, no. 2. P. 254. DOI: 10.3390/molecules26020254.
19. Rohrbach J.C., Luterbacher J.S. Investigating the effects of substrate morphology and experimental conditions on the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass through modeling // *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2021. Vol. 14. P. 103. DOI: 10.1186/s13068-021-01920-2.
20. Krystynowicz A., Czaja W., Wiktorowska-Jezierska A., Gonçalves-Miśkiewicz M., Turkiewicz M., Bielecki S. Factors affecting the yield and properties of bacterial cellulose // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2002. Vol. 29, no. 4. P. 189–195. DOI: 10.1038/sj.jim.7000303.
21. Yurkevich D.I., Kutysenko V.P. *Medusomyces* (tea fungus): a scientific history, composition, features of physiology and metabolism // *Biophysics*. 2002. Vol. 47, no. 6. P. 1035–1048.
22. Hong F., Qiu K. An alternative carbon source from konjac powder for enhancing production of bacterial cellulose in static cultures by a model strain *Acetobacter aceti* subsp. *xylinus* ATCC 23770 // *Carbohydrate Polymers*. 2008. Vol. 72, no. 3. P. 545–549. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.09.015.
23. Amorim L.F.A., Li L., Gomes A.P., Fanguiero R., Gouveia I.C. Sustainable bacterial cellulose production by low cost feedstock: evaluation of apple and tea by-products

as alternative sources of nutrients // *Cellulose*. 2023. Vol. 30. P. 5589–5606. DOI: 10.1007/s10570-023-05238-0.

24. Han Y.-H., Mao H.-L., Wang S.-S., Deng J.-C., Chen D.-L., Li M. Ecofriendly green biosynthesis of bacterial cellulose by *Komagataeibacter xylinus* B2-1 using the shell extract of *Sapindus mukorossi* Gaertn. as culture medium // *Cellulose*. 2020. Vol. 27. P. 1255–1272. DOI: 10.1007/s10570-019-02868-1.

25. Carreira P., Mendes J.A.S., Trovatti E., Serafim L.S., Freire C.S.R., Silvestre A.J.D., et al. Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102, no. 15. P. 7354–7360. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.04.081.

26. Hestrin S., Schramm M. Synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*. 2. Preparation of freeze-dried cells capable of polymerizing glucose to cellulose // *Biochemical Journal*. 1954. Vol. 58, no. 2. P. 345–352. DOI: 10.1042/bj0580345.

27. Bae S.O., Shoda M. Production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* BPR2001 using molasses medium in a jar fermentor // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005. Vol. 67. P. 45–51. DOI: 10.1007/s00253-004-1723-2.

REFERENCES

1. Khan S., Ul-Islam M., Fatima A., Manan S., Khattak W.A., Ullah M.W., et al. Potential of food and agro-industrial wastes for cost-effective bacterial cellulose production: an updated review of literature. *ES Food & Agroforestry*. 2023;13:905. DOI: 10.30919/esfa905.

2. Avcioglu N.H. Bacterial cellulose: recent progress in production and industrial applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2022;38:86. DOI: 10.1007/s11274-022-03271-y.

3. Zhong C. Industrial-scale production and applications of bacterial cellulose. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020;8:605374. DOI: 10.3389/fbioe.2020.605374.

4. Volova T.G., Kiselev E.G., Demidenko A.V., Zhila N.O., Nemtsev I.V., Lukyanenko A.V. Production and properties of microbial polyhydroxyalkanoates synthesized from hydrolysates of Jerusalem artichoke tubers and vegetative biomass. *Polymers*. 2022;14(1):132. DOI: 10.3390/polym14010132.

5. Ha D.T., Kanarskiy A.V., Kanarskaya Z.A., Scherbakov A.V., Scherbakova E.N., Pranovich A.V. Impact of cultivation conditions on xylanase production and growth in *Paenibacillus mucilaginosus*. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(3):459–469. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-3-459-469. EDN: OMLQLP.

6. Evstaf'ev S.N., Fomina E.S., Tiguntceva N.P. Thermochemical liquefaction of wheat straw in sub- and supercritical tetralin. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):160–166. (In Russ.). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-1-160-166. EDN: VQQNNY.

7. Shavyrkina N.A., Budaeva V.V., Skiba E.A., Gismatulina Y.A., Sakovich G.V. Review of current prospects for using *Miscanthus*-based polymers. *Polymers*. 2023;15(14):3097. DOI: 10.3390/polym15143097.

8. Wang C., Kong Y., Hu R., Zhou G. *Miscanthus*: a fast-growing crop for environmental remediation and biofuel production. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*. 2021;13(1):58–69. DOI: 10.1111/gcbb.12761.

28. Tsouko E., Kourmentza C., Ladakis D., Kopsahelis N., Mandala I., Papanikolaou S., et al. Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams // *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16, no. 7. P. 14832–14849. DOI: 10.3390/ijms160714832.

29. Chen G., Wu G., Chen L., Wang W., Hong F.F., Jönsson L.J. Comparison of productivity and quality of bacterial nanocellulose synthesized using culture media based on seven sugars from biomass // *Microbial Biotechnology*. 2019. Vol. 12, no. 4. P. 677–687. DOI: 10.1111/1751-7915.13401.

30. Revin V.V., Liyaskina E.V., Parchaykina M.V., Kuzmenko T.P., Kurgaeva I.V., Revin V.D., et al. Bacterial cellulose-based polymer nanocomposites: a review // *Polymers*. 2022. Vol. 14, no. 21. P. 4670. DOI: 10.3390/polym14214670.

31. Kim H., Son J., Lee J., Yoo H.Y., Lee T., Jang M., et al. Improved production of bacterial cellulose through investigation of effects of inhibitory compounds from lignocellulosic hydrolysates // *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*. 2021. Vol. 13, no. 3. P. 436–444. DOI: 10.1111/gcbb.12800.

9. Banerjee S., Dien B.S., Eilts K.K., Sacks E.J., Singh V. Pilot-scale processing of *Miscanthus x giganteus* for recovery of anthocyanins integrated with production of microbial lipids and lignin-rich residue. *Chemical Engineering Journal*. 2024;485:150117. DOI: 10.1016/j.cej.2024.150117.

10. Zabed H., Sahu J.N., Boyce A.N., Faruq G. Fuel ethanol production from lignocellulosic biomass: an overview on feedstocks and technological approaches. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2016;66:751–774. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.038.

11. Kim J.S., Lee Y.Y., Kim T.H. A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*. 2016;199:42–48. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.08.085.

12. Chaudhary G., Chaudhary N., Saini S., Gupta Y., Vivekanand V., Panghal A. Assessment of pretreatment strategies for valorization of lignocellulosic biomass: path forwarding towards lignocellulosic biorefinery. *Waste and Biomass Valorization*. 2024;15:1–36. DOI: 10.1007/s12649-023-02219-z.

13. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis. *Polymers*. 2019;11(10):1645. DOI: 10.3390/polym11101645.

14. Skiba E.A., Gladysheva E.K., Golubev D.S., Budaeva V.V., Aleshina L.A., Sakovich G.V. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass. *Carbohydrate Polymers*. 2021;252:117178. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.117178.

15. Goh W.N., Rosma A., Kaur B., Fazilah A., Karim A.A., Rajeev B. Fermentation of black tea broth (Kombucha): I. Effects of sucrose concentration and fermentation time on the yield of microbial cellulose. *International Food Research Journal*. 2012;19(1):109–117.

16. Gladysheva E.K., Skiba E.A., Zolotukhin V.N., Sakovich G.V. Study of the conditions for the biosynthesis of bacterial cellulose by the producer *Medusomyces*

gisevii Sa-12. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2018;54:179-187. DOI: 10.1134/S0003683818020035.

17. Bogolitsyn K., Parshina A., Aleshina L. Structural features of brown algae cellulose. *Cellulose*. 2020;27:9787-9800. DOI: 10.1007/s10570-020-03485-z.

18. Van der Cruysen K., Al Hassan M., van Erven G., Dolstra O., Trindade L.M. Breeding targets to improve biomass quality in *Miscanthus*. *Molecules*. 2021;26(2):254. DOI: 10.3390/molecules26020254.

19. Rohrbach J.C., Luterbacher J.S. Investigating the effects of substrate morphology and experimental conditions on the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass through modeling. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. 2021;14:103. DOI: 10.1186/s13068-021-01920-2.

20. Krystynowicz A., Czaja W., Wiktorowska-Jezierska A., Gonçalves-Miśkiewicz M., Turkiewicz M., Bielecki S. Factors affecting the yield and properties of bacterial cellulose. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2002;29(4):189-195. DOI: 10.1038/sj.jim.7000303.

21. Yurkevich D.I., Kutysenko V.P. Medusomyces (tea fungus): a scientific history, composition, features of physiology and metabolism. *Biophysics*. 2002;47(6):1035-1048.

22. Hong F., Qiu K. An alternative carbon source from konjac powder for enhancing production of bacterial cellulose in static cultures by a model strain *Acetobacter aceti* subsp. *xylinus* ATCC 23770. *Carbohydrate Polymers*. 2008;72(3):545-549. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.09.015.

23. Amorim L.F.A., Li L., Gomes A.P., Fangueiro R., Gouveia I.C. Sustainable bacterial cellulose production by low cost feedstock: evaluation of apple and tea by-products as alternative sources of nutrients. *Cellulose*. 2023;30:5589-5606. DOI: 10.1007/s10570-023-05238-0.

24. Han Y.-H., Mao H.-L., Wang S.-S., Deng J.-C., Chen D.-L., Li M. Ecofriendly green biosynthesis of bacterial cellulose by *Komagataeibacter xylinus* B2-1 using the

shell extract of *Sapindus mukorossi* Gaertn. as culture medium. *Cellulose*. 2020;27:1255-1272. DOI: 10.1007/s10570-019-02868-1.

25. Carreira P., Mendes J.A.S., Trovatti E., Serafim L.S., Freire C.S.R., Silvestre A.J.D., et al. Utilization of residues from agro-forest industries in the production of high value bacterial cellulose. *Bioresource Technology*. 2011;102(15):7354-7360. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.04.081.

26. Hestrin S., Schramm M. Synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*. 2. Preparation of freeze-dried cells capable of polymerizing glucose to cellulose. *Biochemical Journal*. 1954;58(2):345-352. DOI: 10.1042/bj0580345.

27. Bae S.O., Shoda M. Production of bacterial cellulose by *Acetobacter xylinum* BPR2001 using molasses medium in a jar fermentor. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2005;67:45-51. DOI: 10.1007/s00253-004-1723-2.

28. Tsouko E., Kourmentza C., Ladakis D., Kopsahelis N., Mandala I., Papanikolaou S., et al. Bacterial cellulose production from industrial waste and by-product streams. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015;16(7):14832-14849. DOI: 10.3390/ijms160714832.

29. Chen G., Wu G., Chen L., Wang W., Hong F.F., Jönsson L.J. Comparison of productivity and quality of bacterial nanocellulose synthesized using culture media based on seven sugars from biomass. *Microbial Biotechnology*. 2019;12(4):677-687. DOI: 10.1111/1751-7915.13401.

30. Revin V.V., Liyaskina E.V., Parchaykina M.V., Kuzmenko T.P., Kurgaeva I.V., Revin V.D., et al. Bacterial cellulose-based polymer nanocomposites: a review. *Polymers*. 2022;14(21):4670. DOI: 10.3390/polym14214670.

31. Kim H., Son J., Lee J., Yoo H.Y., Lee T., Jang M., et al. Improved production of bacterial cellulose through investigation of effects of inhibitory compounds from lignocellulosic hydrolysates. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy*. 2021;13(3):436-444. DOI: 10.1111/gcbb.12800.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шавыркина Надежда Александровна,

к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
доцент,
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Героя Советского Союза Трофимова, 27, Российская Федерация,
32nadina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Гладышева Евгения Константиновна,

к.т.н., научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda A. Shavyrkina,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Senior Researcher,
Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 6592322,
Russian Federation,
Associate Professor,
Biysk Technological Institute,
Polzunov Altai State Technical University,
27, Hero of the Soviet Union Trofimov St.,
Biysk, 659305, Russian Federation,
32nadina@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5572-1476>

Evgeniya K. Gladysheva,

Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 6592322,
Russian Federation,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

Зенкова Анастасия Александровна,
инженер-исследователь,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
магистрант,
Бийский технологический институт (филиал) Алтай-
ского государственного технического
университета им. И.И. Ползунова,
659305, г. Бийск, ул. Героя Советского Союза
Трофимова, 27, Российская Федерация,
zenkova_nastasya080401@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-0868-5444>

Скиба Екатерина Анатольевна,
д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
✉ eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Вклад авторов

Н.А. Шавыркина – разработка концепции
исследования, обработка полученных данных,
обсуждение результатов, написание
текста статьи.
Е.К. Гладышева – проведение экспериментов,
обработка полученных данных, подготовка
иллюстративного материала.
А.А. Зенкова – проведение экспериментов.
Е.А. Скиба – разработка концепции
исследования, обработка полученных
данных, осуществление расчетов,
обсуждение результатов, валидация.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.09.2024.
Одобрена после рецензирования 15.11.2024.
Принята к публикации 30.11.2024.

Anastasia A. Zenkova,
Research Engineer,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 6592322,
Russian Federation,
Student of the Master's Program,
Biysk Technological Institute,
Polzunov Altai State Technical University,
27, Hero of the Soviet Union Trofimov St.,
Biysk, 659305, Russian Federation,
zenkova_nastasya080401@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-0868-5444>

Ekaterina A. Skiba,
Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Leading Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 6592322,
Russian Federation,
✉ eas08988@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8897-347X>

Contribution of the authors

Nadezhda A. Shavyrkina – research concept
development, data processing, results discussion,
writing the text of manuscript.
Evgeniya K. Gladysheva – conducting
experiments, data processing, visualization.
Anastasia A. Zenkova – conducting experiments.
Ekaterina A. Skiba – research concept
development, data processing, calculations,
results discussion, validation.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 02.09.2024.
Approved after reviewing 15.11.2024.
Accepted for publication 30.11.2024.