

РАСЧЕТ ФАКТОРОВ ЭКОЛОГИЧНОСТИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ МИСКАНТУСА ГИГАНТСКОГО

N.A. Шаевыркина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, Россия

Одним из основных требований к современным промышленным процессам, является требование минимизации вреда для окружающей среды. Переработка растительной биомассы считается одним из самых перспективных направлений получения промышленно значимых продуктов. Процессы биотрансформации растительного сырья относятся к наиболее экологичным процессам. В данной работе приведена схема биотрансформации биомассы мискантуса гигантского в биоэтанол, бактериальную наноцеллюлозу и молочную кислоту. Эта схема оценивалась с точки зрения получения максимальных выходов целевых продуктов и минимизации воздействия на окружающую среду. Можно однозначно отметить преимущество одностадийной обработки мискантуса гигантского разбавленным раствором азотной кислоты, этот метод позволяет повысить выход биоэтанола на 11-40 %, бактериальной наноцеллюлозы на 13-30 %, молочной кислоты на 7-28 %, по сравнению с другими способами предобработки. В этом случае факторы экологичности имеют наименьшие значения, причём наиболее экологичным является трансформация биомассы мискантуса гигантского в бактериальную наноцеллюлозу.

Ключевые слова: мискантус гигантский, щелочная делигнификация, азотная кислота, ферментативный гидролиз, биоэтанол, бактериальная наноцеллюлоза, молочная кислота, фактор экологичности.

CALCULATION OF ECOLOGICAL FACTORS OF BIOTECHNOLOGICAL TRANSFORMATION OF MISCANTHUS GIANTUS

N.A. Shavyrkina

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russia

Abstract

One of the main requirements for modern industrial processes is the requirement to minimize harm to the environment. Processing of plant biomass is considered one of the most promising areas for obtaining industrially significant products. Biotransformation processes of plant raw materials are among the most environmentally friendly processes. This paper presents a scheme for the biotransformation of giant miscanthus biomass into bioethanol, bacterial nanocellulose and lactic acid. This scheme was evaluated from the point of view of obtaining maximum yields of target products and minimizing the impact on the environment. It is possible to clearly note the advantage of one-stage processing of giant miscanthus with a dilute solution of nitric acid, this method allows to increase the yield of bioethanol by 11-40%, bacterial nanocellulose by 13-30%, lactic acid by 7-28%, compared with other methods of pre-treatment. In this case, environmental factors have the lowest values, and the most environmentally friendly is the transformation of giant miscanthus biomass into bacterial nanocellulose.

Key words: *Miscanthus giganteus, alkaline delignification, nitric acid, enzymatic hydrolysis, bioethanol, bacterial nanocellulose, lactic acid, environmental factor.*

Введение

Важнейшим преимуществом использование биомассы в технологических процессах является её экологичность. В процессе роста биомасса связывает углекислый газ и обеспечивает отрицательный углеродный баланс, а при её технологической переработке достигается критерий углеродной нейтральности, что крайне важно в современных условиях [1,5]. Наиболее эффективным источником биомассы являются энергетические растения, одним из самых значимых энергетических растений во всем мире признан мискантус. Мискантус в основном используется для производства тепла и электроэнергии, а также активно вытесняет древесину в технологиях получения бумаги и выделения натуральной целлюлозы [2,3,11]. Но потенциальный спектр его применений намного шире. В данной работе представлена схема биотехнологической трансформации биомассы мискантуса в промышленно ценные продукты: биоэтанол, бактериальную наноцеллюлозу и молочную кислоту. Приведена оценка этой схемы с точки зрения влияния способа предобработки биомассы на выход целевых продуктов и экологичность процессов биотрансформации.

Оборудование и материалы

В качестве сырья был использован мискантус гигантский российской селекции (сорт КАМИС), предоставленный ООО «Мастер Брэнд», г. Москва, Россия.

Предобработка сырья была проведена в лабораторных условиях при атмосферном давлении и температуре 90–96 °C с получением следующих продуктов:

1) продукт азотокислой обработки (ПАО) получен обработкой сырья 4 %-ным раствором азотной кислоты в одну стадию;

2) продукт щелочной делигнификации (ПЩД) получен обработкой сырья раствором 4 %-ного гидроксида натрия в одну стадию;

3) техническая целлюлоза, азотокислый способ (ЦАС) получен в две стадии: путём обработки ПАО 4 %-ным раствором гидроксида натрия;

4) техническая целлюлоза, модифицированный щелочной способ (ЦМЩС) получен в две стадии: путём обработки ПЩД 4 %-ным раствором азотной кислоты.

Далее проводили ферментативный гидролиз всех четырёх субстратов, полученные сахарные растворы подвергали сбраживанию с образованием трёх продуктов:

– биоэтанола с помощью *Saccharomyces cerevisiae* Y-3136 (ВКПМ), в условиях, описанных в работе [9]. Начальная концентрация субстрата 60 г/л, применена авторская технология совмещенного ферментативного гидролиза и спиртового брожения;

– бактериальной наноцеллюлозы с помощью *Medusomyces gisevii* Sa-12 (ВКПМ) в условиях, описанных в работе [10]. Начальная концентрация субстрата 30 г/л;

– молочной кислоты с помощью *Lactobacillus delbrueckii* subspecies *bulgaricus* (ООО «Барнаульская биофабрика») [8]. Начальная концентрация субстрата 90 г/л.

5) факторы экологичности рассчитывались как отношение суммарного количества образующихся отходов к сумме целевых продуктов [7]. Таким образом, чем ниже значение фактора экологичности, тем более экологичным является процесс.

Работа выполнена с использованием приборной базы Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН.

Обсуждение результатов

На рис. 1 представлена схема переработки биомассы мискантуса с указанием выходов целевых продуктов и побочных продуктов (отходов), расчеты произведены на 1000 кг сухой биомассы мискантуса. Массы основных и побочных продуктов приведены в натуральном выражении, без пересчёта масс на абсолютно сухие вещества.

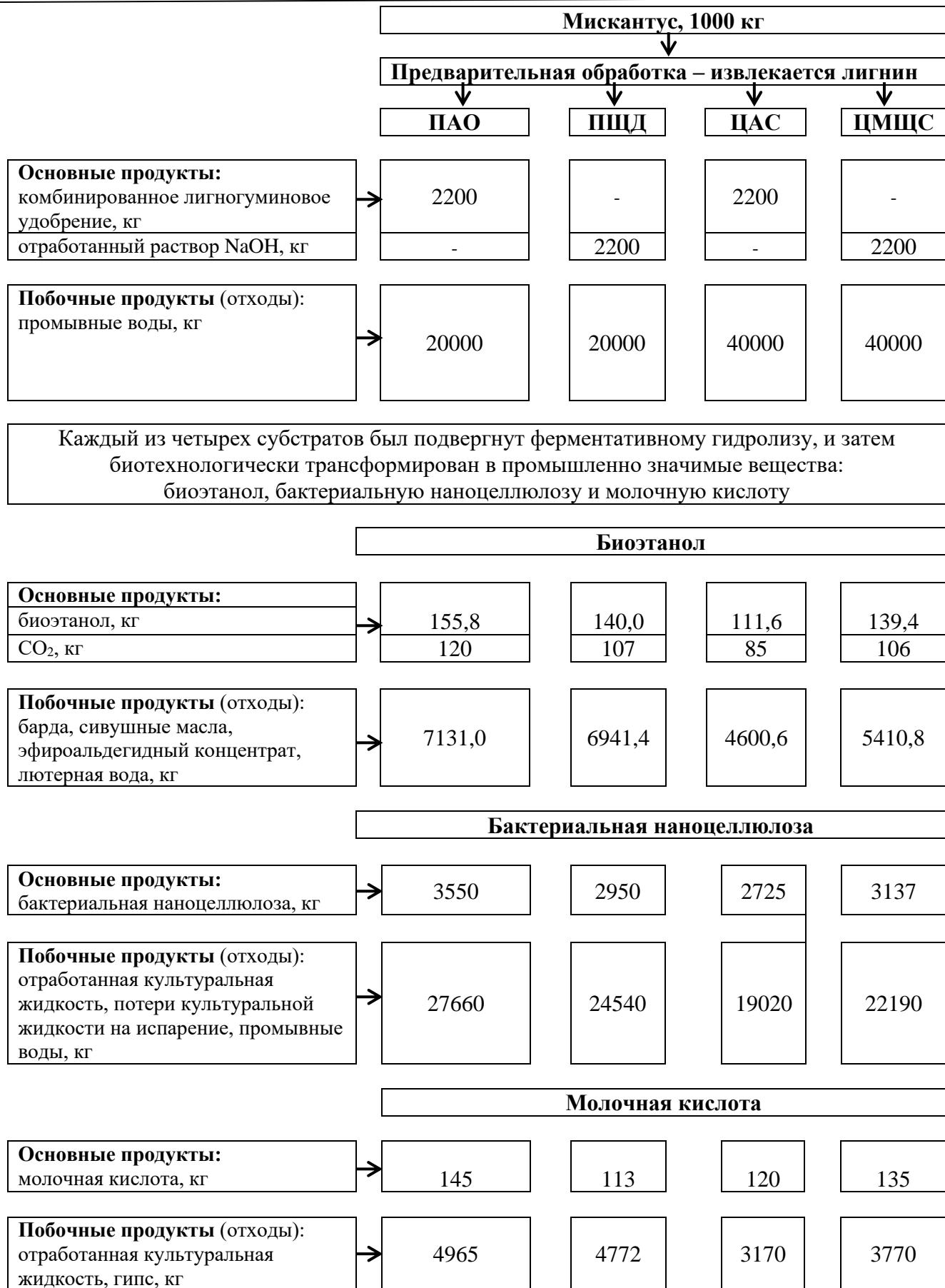


Рисунок 1. Схема биотехнологической трансформации биомассы мискантуса

Биотехнологическая трансформация биомассы мискантуса предполагает обязательную стадию предобработки для подготовки биомассы к последующему ферментативному гидролизу. В процессе предобработки происходит извлечение лигнина из биомассы и очень важна очередность обработки биомассы растворами азотной кислоты и щелочи: при использовании азотной кислоты (ПАО, ЦАС) происходит гумификация органических веществ мискантуса и образующийся раствор можно использовать в качестве лигногуминового удобрения; при первичном воздействии щелочи (ПЩД, ЦМЩС) образуется концентрированный щелочной раствор, содержащий извлеченные органические вещества, он может быть реализован для получения бетона повышенной прочности в строительстве [6], либо может быть использован для выделения лигнина и получения его производных [4].

Полученные данные свидетельствуют о том, что стадия предобработки оказывает значительное влияние на выход целевых продуктов: самой результативной оказалась одностадийная обработка азотной кислотой (ПАО), выход биоэтанола повышается на 11-40 %, бактериальной наноцеллюлозы на 13-30 %, молочной кислоты на 7-28 %, по сравнению с другими способами предобработки.

В табл. 1 приведены значения факторов экологичности для процессов биотрансформации биомассы мискантуса в промышленно значимые продукты. При этом, при получении каждого продукта учитывалась стадия предобработки с образованием целевого продукта (удобрения или концентрированного щелочного раствора) – его массу прибавляли к массе целевых продуктов биотрансформации, и побочных продуктов (промывных вод) – их массу складывали с массой побочных продуктов.

Таблица 1
Факторы экологичности для процессов биотрансформации биомассы мискантуса
в промышленно значимые продукты

Продукт	Вид предобработки биомассы мискантуса			
	ПАО	ПЩД	ЦАС	ЦМЩС
	Фактор экологичности			
Биоэтанол	11,0	11,0	18,6	18,6
Бактериальная наноцеллюлоза	8,3	8,6	11,0	11,7
Молочная кислота	10,6	10,7	18,6	18,7

При оценке экологичности процессов биотрансформации биомассы мискантуса, можно так же констатировать, что для минимизации воздействия на окружающую среду, необходимо предобрабатывать биомассу мискантуса гигантского через получение ПАО путем одностадийной обработки разбавленной азотной кислотой. В этом случае факторы экологичности имеют наименьшие значения, причём наиболее экологичным является трансформация биомассы мискантуса гигантского в бактериальную наноцеллюлозу.

Заключение

Оценивая процессы биотехнологической трансформации биомассы мискантуса гигантского в биоэтанол, бактериальную наноцеллюлозу и молочную кислоту с точки зрения количественных выходов и экологичности, можно однозначно отметить преимущество одностадийной обработки мискантуса гигантского разбавленным раствором азотной кислоты, этот метод позволяет повысить выход биоэтанола на 11-40 %, бактериальной наноцеллюлозы на 13-30 %, молочной кислоты на 7-28 %, по сравнению с другими способами предобработки. В этом случае факторы экологичности имеют наименьшие значения, причём наиболее экологичным является трансформация биомассы мискантуса гигантского в бактериальную наноцеллюлозу.

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

Библиографический список

1. Al Souki, K.S., Burdová, H., Trubač, J., Štojdl, J., Kuráň, P., Kříženecká, S., Machová, I., Kubát, K., Popelka, J., Malinská, H. A., Nebeská, D., Ust'ak, S., Honzík, R., Trögl, J. Enhanced carbon

sequestration in marginal land upon shift towards perennial C4 *Miscanthus × giganteus*: A case study in North-Western Czechia. *Agronomy*. **2021**, *11*, 293. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020293>

2. Barbash, V.A., Yashchenko, O.V., Vasylieva, O.A. Preparation and application of nanocellulose from *Miscanthus × giganteus* to improve the quality of paper for bags. *SN Appl. Sci.* **2020**, *2*, 727. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2529-2>

3. Boakye-Boaten, N.A., Kurkalova, L., Xiu, S., Shahbazi, A. Techno-economic analysis for the biochemical conversion of *Miscanthus* x *giganteus* into bioethanol. *Biomass and Bioenergy*. **2017**, *98*, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.017>.

4. Brienza, F., Cannella, D., Montesdeoca, D., Cybulska, I., & Debecker, D. P. (2024). A guide to lignin valorization in biorefineries: traditional, recent, and forthcoming approaches to convert raw lignocellulose into valuable materials and chemicals. *RSC Sustainability*, *2*(1), 37-90. <https://doi.org/10.1039/D3SU00140G>

5. Dželetović, Ž., Andrejić, G. Z., Simić, A., Geren, H. Influence of rhizome mass on the crop establishment and dry matter yield of *Miscanthus* × *giganteus* over ten seasons. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*. **2019**, *64*(1), 21-35. <https://doi.org/10.2298/JAS1901021D>

6. Makul N. Modern sustainable cement and concrete composites: Review of current status, challenges and guidelines // Sustainable Materials and Technologies/ 2020. 25. e00155. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00155>

7. 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. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05112>

8. Shavyrkina NA, Skiba EA. Obtaining lactic acid from oat husks // Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotehnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2021. 11 (1). 99–106. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-99-10621>

9. Skiba E.A., Ovchinnikova E.V., Budaeva V.V., Banzaraktsaeva S.P., Kovgan M.A., Chumachenko V. A., Mironova G.F., Kortusov A.N., Parmon V.N., Sakovich, G. V. *Miscanthus* bioprocessing using HNO₃-pretreatment to improve productivity and quality of bioethanol and downstream ethylene // *Industrial Crops and Products*. 2022. 177. 114448. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114448>

10. 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, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>

11. Zhang, Y., Oates, L.G., Serate, J., Xie, D., Pohlmann, E., Bukhman, Y.V., Karlen, S.D., Young, M.K., Higbee, A., Eilert, D., Sanford, G.R., Piotrowski, J.S., Cavalier, D., Ralph, J., Coon, J.J., Sato, T.K., Ong, R.G. Diverse lignocellulosic feedstocks can achieve high field-scale ethanol yields while providing flexibility for the biorefinery and landscape-level environmental benefits. *GCB Bioenergy*. 2018, 1-16. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12533>