

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ ИЗ БИОМАССЫ МИСКАНТУСА ГИГАНТСКОГО**Н.А. Шавыркина***Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН, Бийск, Россия*

Мискантус гигантский (*Miscanthus × giganteus*) представляет собой перспективную энергетическую культуру в фитотехнологии производства биомассы [1]. Биомасса, как широко распространенный и доступный возобновляемый ресурс, обладает большим потенциалом в замене невозобновляемых ископаемых источников энергии. Мискантус считается превосходной энергетической культурой второго поколения для производства биотоплива [2]. Мискантус относится к многолетним растениям и может эффективно наращивать биомассу более 20 лет. Благодаря своей высокой плодovitости и устойчивости к вредителям и болезням он требует меньше удобрений и может давать урожай до 30 т/га в год. Кроме того, мискантус можно выращивать на малоплодородных землях, сводя к минимуму конкуренцию за продовольствие и использование пахотных земель [3].

Оборотной стороной остро стоящей проблемы энергетического обеспечения потребностей населения Земли является необходимость улучшения экологической обстановки на планете, которая на данный момент становится катастрофической. 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 [4]. Одним из возможных путей снижения углеродного следа является культивирование растений с высокой скоростью роста, интенсивным уровнем биосинтеза и образованием значительного количества биомассы. При культивировании такие растения активно поглощают углекислый газ, выделяют кислород, их биомасса может служить сырьем для химических и биотехнологических трансформаций [5]. К таким экологически и промышленно перспективным растениям можно отнести мискантус. Кроме непосредственного использования в качестве источника энергии при сжигании, растительная биомасса может иметь множество приложений в качестве исходного сырья для всевозможных производств: в составе композитных материалов, в качестве сырья для фракционной переработки с извлечением целлюлозы, лигнина и других ценных веществ (гидроксиметилфурфурола, фурфурола, фенолов) для последующего химического синтеза широко спектра продуктов, а так же представлены возможности биотехнологической трансформации биомассы мискантуса сначала в углеводные питательные среды, а затем в конечные продукты микробиологического синтеза [6,7]. Разработка технологий получения широкого спектра высокоценных продуктов на основе растительной биомассы во всех областях человеческой деятельности однозначно будет способствовать улучшению экологической ситуации на планете.

В данном исследовании приведены данные о возможных направлениях биотехнологической переработки биомассы мискантуса гигантского с расчетом факторов экологичности реализуемых процессов (суммарное количество отходов/ суммарное количество целевых продуктов) [8] – таким образом, чем ниже значение этого фактора, тем процесс более экологичен.

Биомасса мискантуса гигантского (сорт КАМИС) была предоставлена ООО «Мастер Брэнд», г. Москва, Россия. Предварительную обработку биомассы мискантуса гигантского проводили 4-мя способами [9], в результате получали 4 субстрата для дальнейшей переработки в различные продукты: ПАО (продукт азотнокислой обработки, 1 стадия обработки HNO_3); ПЩД (продукт щелочной делигнификации, 1 стадия обработки NaOH); ЦАС (техническая целлюлоза азотнокислый способ, 2 стадии обработки – сначала HNO_3 , потом NaOH); ЦМЩС (техническая целлюлоза модифицированный щелочной способ, 2 стадии обработки – сначала NaOH , потом HNO_3).

Далее, эти четыре субстрата были подвергнуты ферментативному гидролизу с помощью композиции из ферментных препаратов Целлюлюкс-А («Сиббиофарм, Россия») и «Ультрафло Коре» («Novozymes A/S», Дания). Полученные глюкозные питательные среды подвергали сбраживанию различными продуцентами и получали продукты биотехнологической трансформации: биоэтанол, бактериальная наноцеллюлоза, молочная кислота.

В таблице 1 приведены выходы основных и побочных продуктов из 1 т биомассы мискантуса гигантского, и экологические факторы получения основных продуктов. В процессе предобработки происходит извлечение лигнина из биомассы. При первичном воздействии 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 [10], либо может быть использован для выделения лигнина и получения его производных [11].

Таблица 1 – Выход основной и побочной продукции, кг из 1 т мискантуса гигантского с указанием факторов экологичности получения основных продуктов

Продукция	Способы химической предварительной обработки			
	ПАО	ПЩД	ЦАС	ЦМЩС
Платформа: лигнин				
Основные продукты				
Комбинированное лигногуминовое удобрение	2200	–	2200	–
Отработанный раствор NaOH	–	2200	–	2200
Побочные продукты				
Промывные воды (после HNO ₃)	20000	–	20000	20000
Промывные воды (после NaOH)	–	20000	20000	20000
С6-платформа: биоэтанол				
Основные продукты				
Биоэтанол	155,8	140,0	111,6	139,4
CO ₂	120	107	85	106
Побочные продукты				
Барда	6900	6700	4400	5200
Сивушные масла	0,4	0,7	0,2	0,3
Эфиральдегидный концентрат	0,6	0,7	0,4	0,5
Лютерная вода	230	240	200	210
Фактор экологичности	11,0	11,0	18,6	18,6
С6-платформа: бактериальная nanoцеллюлоза				
Основные продукты				
Бактериальная nanoцеллюлоза	2840	2360	2180	2510
Побочные продукты				
Отработанная культуральная жидкость	11070	10520	6520	7810
Потери культуральной жидкости на испарение	2390	2220	1500	1780
Промывные воды (после NaOH)	7100	5900	5500	6300
Промывные воды (после HCl)	7100	5900	5500	6300
Фактор экологичности	8,3	8,6	11,0	11,7
С6-платформа: молочная кислота				
Основные продукты				
Молочная кислота	145	113	120	135
Побочные продукты				
Отработанная культуральная жидкость	4855	4687	3080	3665
Гипс	110	85	90	105
Фактор экологичности	10,6	10,7	18,6	18,7

При расчете факторов экологичности для каждого продукта биотрансформации учитывали продукты, получаемые на стадии предварительной обработки сырья: к сумме целевых продуктов прибавляли основные продукты стадии предобработки (лигногуминовое удобрение или отработанный раствор NaOH), а к сумме отходов прибавляли суммарное количество промывных вод.

Оценивая полученные экспериментальные и расчетные данные, можно проследить следующие тенденции: самый высокий выход всех целевых продуктов был получен в случае одностадийной предварительной обработки биомассы мискантуса гигантского (ПАО, ПЩД), при этом факторы экологичности для процессов получения этих продуктов имели самые низкие значения – 11,0 при получении биоэтанола, 8,3 и 8,6 при получении бактериальной nanoцеллюлозы, 10, 6 и 10,7 при получении молочной кислоты соответственно. И самым экологичным биотехнологическим процессом трансформации биомассы мискантуса в промышленные продукты является получение бактериальной nanoцеллюлозы. Применение двухстадийной предварительной обработки сырья приводит к повышению факторов экологичности в 1,7 раза при получении биоэтанола, в 1,3 раза при получении БНЦ, в 1,8 раза при получении молочной кислоты.

Таким образом, при оценке экологичности процессов получения биотехнологических продуктов из биомассы мискантуса гигантского, можно утверждать, что для минимизации экологических последствий, для предварительной обработки биомассы необходимо применять одностадийную предварительную обработку азотной кислотой.

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

Литература

1. Mamirova A., Pidlisnyuk V. The Economic and Environmental Aspects of Miscanthus× giganteus Phytomanagement Applied to Non-Agricultural Land // *Agronomy*. – 2024. – Vol. 14. – №. 4. – P. 791. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040791>
2. Ma Y. et al. The economic and environmental sustainability of converting Miscanthus to hydrocarbon biofuel by pyrolysis and catalytic hydrotreatment // *Biomass and Bioenergy*. – 2024. – Vol. 181. – P. 107041. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.107041>
3. Tian H. et al. Techno-economic analysis of developing miscanthus biorefinery for the production of platform chemicals and renewable resins // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Vol. 427. – P. 139172. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139172>
4. Al Souki K.S. et al. Enhanced carbon sequestration in marginal land upon shift towards perennial C4 Miscanthus× giganteus: a case study in North-Western Czechia // *Agronomy*. – 2021. – Vol. 11. – №. 2. – P. 293. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020293>
5. Velvizhi, G. Valorisation of lignocellulosic biomass to value-added products: Paving the pathway towards low-carbon footprint / G. Velvizhi, C. Goswami, N.P. Shetti et al. // *Fuel*. – 2022. – Vol. 313. – P. 122678. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122678>
6. Shavyrkina N.A. et al. Review of current prospects for using Miscanthus-based polymers // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15. – №. 14. – P. 3097. <https://doi.org/10.3390/polym15143097>
7. Götz M. et al. Processing Miscanthus to high-value chemicals: A techno-economic analysis based on process simulation // *GCB Bioenergy*. – 2022. – Vol. 14. – №. 4. – P. 447–462. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12923>
8. 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>
9. 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. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>
10. 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>
11. 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>