

УДК 581.6:581.192

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КУЛЬТУРЫ *MISCANTHUS* ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА**Н.А. Шавыркина, Ю.А. Гисматулина***Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия*

Все более острой в мировом масштабе становится экономико-экологическая дилемма: правительство любого государства стремится повысить уровень комфорта жизни населения страны, при этом спрос на энергоносители значительно растет. Это, в свою очередь, влечет увеличение потребления ископаемых невозобновляемых энергетических ресурсов и, как следствие, повышение углеродного следа. Общее конечное потребление энергии увеличилось вдвое с 1973 года, достигнув 9425 млн тонн нефтяного эквивалента в 2014 году [1]. Кроме энергетического кризиса, изменение климата часто рассматривается как серьезная экологическая угроза для будущего развития общества [2]. Экологические последствия, такие как резкое изменение климата, чрезмерный выброс парниковых газов в атмосферу и повышение цен на топливо за последние несколько лет, являются следствием крайней зависимости от невозобновляемых ресурсов. Солнечная, гидроэнергия, энергия ветра, биомасса растений относятся к числу возобновляемых источников энергии, которым уделяется наибольшее внимание [3]. Среди этих альтернативных энергетических направлений конверсия биомассы является наиболее прогнозируемым и устойчивым углеродным ресурсом, способным заменить ископаемые виды топлива [4, 5]. Уже на сегодняшний момент растительная биомасса обеспечивает почти 25 % мирового энергоснабжения [6, 7]. Преимущества биомассы в качестве альтернативного возобновляемого энергоресурса достаточно очевидны: ежегодная воспроизводимость в значительных количествах, низкая стоимость, умеренное количество примесей [8,9].

Практически все растения используют энергию солнечного света для преобразования углекислого газа и воды в кислород и сахара посредством фотосинтеза. Растения поглощают углекислый газ из атмосферы. Большинство растений используют ферментативный путь, который называется фотосинтезом C_3 . Некоторые растения способны более активно фиксировать углекислый газ, интенсивность фотосинтеза у них выше. Такой тип преобразования солнечной энергии, называемый фотосинтезом C_4 , сопряжен с механизмом, который увеличивает уровень углекислого газа в клетках [10]. То есть растения, реализующие такой путь фотосинтеза, поглощают из окружающей среды больше углекислого газа и способны более существенно снизить его уровень в атмосфере.

Такие энергетические культуры, как мискантус (*Miscanthus*) – многолетнее травянистое растение с фотосинтетическим путем C_4 , сочетают высокую продуктивность и эффективность использования ресурсов с низкими требованиями к агрономическим ресурсам, т. е. они обладают способностью высокоэффективно преобразовывать солнечную энергию в биомассу [11]. Мискантус растет на маргинальных или неиспользуемых землях, привлекает внимание не только как биоинтермедиат, способствующий сокращению выбросов углекислого газа на суше, но и как растительный ресурс, способный обеспечить реальную, масштабируемую и устойчивую альтернативу невозобновляемым ресурсам. Зарегистрированный годовой объем производства сухого вещества для этой культуры составляет до 4 кг на квадратный метр посевной площади. При этом, мискантус не имеет свойства разрастаться бесконтрольно на всей доступной ему территории, т. е. он не будет вытеснять традиционные для данной местности виды растительности и нарушать биоценозы [12,13]. Кроме того, мискантус успешно выполняет экологические и средоулучшающие функции: защищает ландшафты от эрозии, способствует накоплению органического вещества в почве, значительно уменьшая эмиссию CO_2 [14].

Виды *Miscanthus giganteus* и *Miscanthus sinensis* характеризуются высоким уровнем производства биомассы на гектар. Виды *Miscanthus giganteus* и *Miscanthus sacchariflorus*, для которых характерно высокое содержание лигнина, представляются более подходящими для процессов термохимического преобразования. Напротив, виды *M. sinensis* и некоторые подвиды *M. giganteus* с низким содержанием лигнина представляют интерес для процессов биохимической конверсии. *Miscanthus sacchariflorus* из-за его низкой зольности интересен как исходный вариант для селекционных программ, позволяющих получить биомассу различного состава, в зависимости от запроса, и реализовать всевозможные процессы преобразования биоэнергии [15].

При произрастании мискантуса происходит обогащение почвы органическими веществами и повышение ее дыхательной активности. Таким образом выращивание мискантуса позволяет связывать в органическом веществе почвы значимое количество углерода [16]. В работах [17, 18] представлены экспериментальные данные об увеличении гумуса в верхнем слое почвы при выращивании мискантуса и высоком соотношении энергии, содержащейся в надземной биомассе с суммарными затратами технической энергии на возделывание и уборку урожая, что свидетельствует о высокой агрономической, энергетической и экологической эффективности возделывания мискантуса. *Miscanthus sacchariflorus* сорта Сорановский способен накапливать биомассу в краткосрочную вегетативную фазу в суровом континентальном климате Сибири с коротким засушливым летом, морозоустойчив, устойчив к вредителям и заболеваниям, не нуждается в удобрении плантации во время вегетативной фазы – все это обосновывает перспективность мискантуса в качестве легковозобновляемого лигноцеллюлозного сырья для переработки в суровых условиях сибирского климата [19].

Каким же образом можно использовать биомассу мискантуса в промышленном масштабе, чтобы это способствовало улучшению экологической ситуации и снижению углеродного следа? Например, как исходное сырье для получения биотоплива. В самом первом приближении можно производить топливные пеллеты из мискантуса. Результаты исследований показывают, что пеллеты из мискантуса оказывают меньшее воздействие на окружающую среду по сравнению с древесными, в основном из-за меньшего потребления энергии во время гранулирования [20]. Еще одним перспективным направлением трансформации мискантуса в биотопливо является предварительная предобработка его биомассы с последующим метановым сбраживанием и, соответственно, получением биогаза на выходе [21]. Кроме того, поскольку биомасса мискантуса содержит значительное количество целлюлозы (порядка 50 %), ее можно гидролизовать до раствора простых сахаров и посредством спиртового брожения получить биоэтанол, который может быть использован в качестве энергоносителя [22], либо как прекурсор для дальнейших трансформаций, например, в этилен [23].

Помимо энергетического применения мискантусы находят применение в других областях. Эти травы высаживают на очистных сооружениях, вокруг промышленных предприятий и свалок, где они собирают загрязняющие вещества и, тем самым, делают более эффективным процесс очистки сточных вод и способствуют удалению из почвы загрязняющих веществ, например, тяжелых металлов [24]. В работе [25] приведены данные об эффективной ремедиации почвы, загрязненной нефтью, при выращивании на ней культуры *Miscanthus giganteus*. Надземные части мискантуса гигантского используют для производства строительных материалов [26, 27] и различных биокомпозитов [28]. Солома мискантуса отличается хорошей впитывающей способностью, поэтому ее используют в качестве подстилки для сельскохозяйственных животных [29]. Целлюлозу мискантуса успешно используют в качестве компонента определенных видов бумаги для замены древесной целлюлозы [22, 30]. Наноцеллюлозу, полученную из целлюлозы мискантуса, вводят в состав бумаги для улучшения ее характеристик [31]. Целлюлоза, полученная из мискантуса, может быть использована в качестве прекурсора востребованных нитратов целлюлозы [32].

Широчайшие перспективы представляет ферментативный гидролиз предварительно обработанной биомассы мискантуса для получения сахаросодержащих питательных сред с целью последующей микробной трансформации в высокоценные продукты, такие, например, как бактериальная целлюлоза [19,33,34] или с целью извлечения из культуральной жидкости различных ферментов [35]. Мискантус можно использовать в рамках концепции глубокой переработки биомассы для получения ценных химических веществ, таких как гидроксиметилфурфурол, фурфурол, фенолы [36], этиленгликоль [37].

Можно сказать, что на сегодняшний день мискантус является одним из наиболее перспективных растительных объектов для промышленной переработки. Целенаправленное культивирование и глубокая переработка этого растения позволят получить реальные результаты по снижению углеродного следа, при этом спектр получаемых продуктов из биомассы мискантуса чрезвычайно широк.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22–13–00107

Литература

1. Holmatov B., Hoekstra A.Y., Krol M.S. Land, water and carbon footprints of circular bioenergy production systems // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. 111. P. 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.085>.
2. Velvizhi G. et al. Valorisation of lignocellulosic biomass to value-added products: Paving the pathway towards low-carbon footprint // *Fuel*. 2022. 313. P. 122678. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122678>.
3. Gross R., Leach M., Bauen A. Progress in renewable energy // *Environment international*. 2003. 29. No. 1. P. 105–122. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00130-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00130-7).
4. Hassain A., Arif S.M., Aslam M. 20017 // *Emerging renewable nergy technologies: state of the art. Renewable and sustainable review*. 2017. 71. P. 12–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.033>.
5. Cintas O. et al. Carbon balances of bioenergy systems using biomass from forests managed with long rotations: Bridging the gap between stand and landscape assessments // *GCB Bioenergy*. 2017. 9. No 7. P. 1238–1251. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12425>.
6. Kuna E. et al. Sonocatalysis: a potential sustainable pathway for the valorization of lignocellulosic biomass and derivatives // *Chemistry and chemical technologies in waste valorization*. 2017. P. 1–20.
7. Vanneste J. et al. Unconventional pretreatment of lignocellulose with low-temperature plasma // *ChemSusChem*. 2017. 10. No 1. P. 14–31. <https://doi.org/10.1002/cssc.201601381>.
8. Tekin K., Karagöz S. Bektas, S1: CAS: 528: DC % 2BC2cXhsVSntLrL: A review of hydrothermal biomass processing. vol. 40 // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. P. 673–687. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.216>.
9. Gunnarsson I.B. et al. Potential of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a biorefinery crop // *Industrial Crops and Products*. 2014. 56. P. 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.024>.
10. Blätke M.A., Bräutigam A. Evolution of C4 photosynthesis predicted by constraint-based modelling // *Elife*. 2019. 8. <https://doi.org/10.7554/eLife.49305>.
11. Lobell, David B., et al. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030 // *Science*. 2008. 319.5863. P. 607–610. DOI: 10.1126/science.1152339.
12. Heaton E.A. et al. *Miscanthus* for renewable energy generation: European Union experience and projections for Illinois // *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2004. 9. No 4. P. 433–451.
13. Heaton E., Voigt T., Long S.P. A quantitative review comparing the yields of two candidate C4 perennial biomass crops in relation to nitrogen, temperature and water // *Biomass and bioenergy*. 2004. 27. No 1. P. 21–30.
14. Анисимов А.А., Хохлов Н.Ф., Тараканов И.Г. Мискантус (*Miscanthus* Spp.) в России: возможности и перспективы // *Новые и нетрадиционные растения и перспективы их использования*. 2016. № 12. С. 3–5.
15. Arnould S., Brancourt-Hulmel M. A review on miscanthus biomass production and composition for bioenergy use: genotypic and environmental variability and implications for breeding // *BioEnergy Research*. 2015. 8. No 2. P. 502–526.
16. Булаткин Г.А. и др. Энергетическая и экологическая эффективность выращивания растительной биомассы мискантуса китайского в ЦФО России // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2015. № 6. С. 39–45.
17. Капустянчик С.Ю., и др. Продуктивность мискантуса сорта Сорановский первого года вегетации и дыхательная активность почвы // *Научно-практический журнал Пермский аграрный вестник*. 2016. № 4 (16). С. 82–87.
18. Булаткин Г.А., и др. Энергетическая и экологическая эффективность выращивания растительной биомассы мискантуса китайского в ЦФО России // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2015. № 6 (144). С. 39–45.
19. Гисматулина, Ю.А., и др. Особенности ресурсного вида *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Hack. при интродукции в Западной Сибири // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019. 23.7. С. 933–940. <https://doi.org/10.18699/VJ19.569>.
20. Fusi A. et al. Pellet Production from *Miscanthus*: Energy and Environmental Assessment // *Energies*. 2020. 14. No 1. P. 73.
21. Thomas H.L. et al. Methane production variability according to miscanthus genotype and alkaline pretreatments at high solid content // *BioEnergy Research*. 2019. 12. No 2. P. 325–337. <https://doi.org/10.1007/s12155-018-9957-5>.
22. Капустянчик, С.Ю., и др. Мискантус-перспективная энергетическая культура для промышленной переработки // *Экология и промышленность России*. 2021. 25.3. С. 66–71.
23. Skiba E.A. et al. *Miscanthus* bioprocessing using HNO₃-pretreatment to improve productivity and quality of bioethanol and downstream ethylene // *Industrial Crops and Products*. 2022. 177. P. 114448. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114448>.
24. Kowalczyk-Juśko A. et al. Evaluation of the Effects of Using the Giant *Miscanthus* (*Miscanthus Giganteus*) Biomass in Various Energy Conversion Processes // *Energies*. 2022. 15. No 10. P. 3486. <https://doi.org/10.3390/en15103486>.
25. Nebeská D. et al. *Miscanthus giganteus* role in phytodegradation and changes in bacterial community of soil contaminated by petroleum industry // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. 224. P. 112630. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112630>.
26. Ntimugura F. et al. Environmental performance of miscanthus-lime lightweight concrete using life cycle assessment: Application in external wall assemblies // *Sustainable Materials and Technologies*. 2021. 28. P. e00253.
27. Park H.J., Oh S.W., Wen M.Y. Manufacture and properties of *Miscanthus*-wood particle composite boards // *Journal of wood Science*. 2012. 58. No 5. P. 459–464. <https://doi.org/10.1007/s10086-012-1262-x>.
28. Wang T. et al. Sustainable carbonaceous biofiller from miscanthus: Size reduction, characterization, and potential bio-composites applications // *BioResources*. 2018. 13. No 2. P. 3720–3739. DOI:10.15376/biores.13.2.3720-3739.
29. Wolfzorn, J.; Harding, D.; Davis, A.; Santiago, M.; Porr, C. *Miscanthus* and hemp as alternative bedding material for horses // *J. Equine Vet. Sci*. 2019. 76. P. 97–98. <https://digitalcommons.murraystate.edu/orcagrants/45>.
30. Tsalagkas D. et al. Assessment of the papermaking potential of processed *Miscanthus giganteus* stalks using alkaline pre-treatment and hydrodynamic cavitation for delignification // *Ultrasonics sonochemistry*. 2021. 72. P. 105462.
31. 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 Applied Sciences*. 2020. 2. No. 4. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2529-2>.
32. Gismatulina Y.A., Budaeva V.V. Chemical composition of five *Miscanthus sinensis* harvests and nitric-acid cellulose therefrom // *Industrial Crops and Products*. 2017. 109. P. 227–232. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.08.026.
33. Skiba E. A. et al. Self-standardization of quality of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* in nutrient media derived from *Miscanthus* biomass // *Carbohydrate Polymers*. 2021. 252. P. 117178. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117178>.
34. Son J. et al. Enhanced Production of Bacterial Cellulose from *Miscanthus* as Sustainable Feedstock through Statistical Optimization of Culture Conditions // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. 19. No. 2. P. 866.
35. Xiang J., Wang X., Sang T. Cellulase production from *Trichoderma reesei* RUT C30 induced by continuous feeding of steam-exploded *Miscanthus lutarioriparius* // *Industrial Crops and Products*. 2021. 160. P. 113129.
36. Götz M. et al. Processing *Miscanthus* to high-value chemicals: A techno-economic analysis based on process simulation // *GCB Bioenergy*. 2022. 14. No 4. P. 447–462. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12923>.
37. Pang J. et al. Catalytic conversion of concentrated miscanthus in water for ethylene glycol production // *AIChE Journal*. 2014. 60. No 6. P. 2254–2262. <https://doi.org/10.1002/aic.14406>.