

ОТХОДЫ ЛЕСОЗАГОТОВОК И ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ КАК ИСХОДНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОГАЗА

О.В. СЕНЬКО^{1,2*}, Д.А. СЛЮСАРЕВ³, О.В. МАСЛОВА¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

²Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва;

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал, Мытищи, Московская область

Проведены обзор и анализ результатов научно-исследовательских работ, опубликованных в период с 2002 по 2017 гг. и посвященных изучению возможностей получения биогаза из различных отходов лесозаготовительной и деревообрабатывающей промышленности. Показано, что такие отходы, как опилки, стружка, кора и некондиционная древесина, а также листва, могут эффективно использоваться в качестве субстратов для метаногенного консорциума.

Ключевые слова: отходы деревообработки и лесозаготовок, биогаз, метаногенез, анаэробный ил.

Лесозаготовительная и деревообрабатывающая отрасли являются одними из старейших сфер экономики России [7]. В настоящее время на отечественном рынке функционирует более 60 крупных деревообрабатывающих комплексов. В XXI веке наблюдается активный и успешный переход этих отраслей на потенциально новый уровень. Основные цели — ориентир на производство высококачественной конкурентоспособной продукции с учетом основных принципов зеленой экономики. Активно развивается производство продукции глубокой переработки древесины, создаются новые материалы с уникальными свойствами [17], осуществляется внедрение на производство высокоточного оборудования, налаживается сотрудничество с сертификационными организациями [4]. При этом много внимания уделяется поиску путей минимизации и переработки отходов каждого производственного цикла.

В Российской Федерации ежегодно образуется порядка 35,5 млн. м³ древесных отходов [2, 6, 8]. Отходы образуются практически на всех стадиях лесозаготовительного и деревоперерабатывающего процессов, в некоторых случаях их доля равна половине от исходного сырья (табл. 1).

Таблица 1

Доли выхода отходов и потерь различных производств [2, 6, 8, 12]

Вид производства	Доля выхода, %	
	отходы	потери
Лесозаготовки и лесное хозяйство	20–37	-
Лесопиление и деревообработка		
- лесопиление и механическая обработка древесины	38–48	7
- плитное производство (в т.ч. древесные пластики)	5–10	5
- фанерное производство	42–52	8
- комбинированное производство	22–27	8
Лесохимическое производство (целлюлозно-бумажное и гидролизное производство, в т.ч. производство этилового спирта)	35–38	-

Вследствие низкой товарной ценности древесные отходы в большинстве случаев не используются, а иногда и не утилизируются. Мелкие сыпучие отходы лесозаготовки и лесопиления (хвоя, листья, опилки, стружка, древесная пыль, кора), из которых можно вырабатывать только отдельные виды продукции, пока не нашли еще широкого и полного применения, но имеют перспективные направления использования. Листья практически не используются, а опилки используются, но не более 30% от общего объема [12]. Расширение возможностей использования вторичных древесных ресурсов является важным шагом в развитии рационального природопользования и экологической безопасности.

© 2017 г. Сенько О.В., Слюсарев Д.А., Маслова О.В.

* Автор для переписки:

Сенько Ольга Витальевна

канд. хим. наук, научный сотрудник кафедры химической энзимологии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и Института биохимической физики имени Н.М. Эмануэля РАН
E-mail: senkoov@gmail.com

Отходы лесной промышленности — это, прежде всего, перспективное биотопливо — возобновляемый источник энергии (ВИЭ). По характеру использования древесное биотопливо разделяется на следующие виды: древесина для сжигания (дрова), генераторный газ из древесины, биогаз из древесины, жидкое биотопливо (метанол и этанол из древесины, биожидкости и химикаты второго поколения, очищенное топливо — древесный уголь, пеллеты и брикеты) [11]. По некоторым оценкам, экономический потенциал использования ВИЭ в России составляет до 25% объема ежегодного энергопотребления, а на практике ВИЭ составляют сегодня только 1%, а к 2020 году могут достигнуть отметки 4,5% [11].

В 2013 году Правительством РФ утвержден План мероприятий по созданию благоприятных условий с целью использования возобновляемых древесных источников для производства тепловой и электрической энергии [18].

Широкий спектр отходов лесозаготовок и деревообрабатывающих предприятий (в том числе и сточные воды) может стать сырьем для получения биогаза, представляющего собой перспективный ВИЭ [3, 14, 16]. Сейчас для Российской Федерации получение биогаза из отходов является, прежде всего, вопросом организации экологически безопасного производства. Однако в дальнейшем при переходе к экологическим видам топлива для небольших предприятий данный подход может стать достойным экономичным вариантом переработки отходов.

Биогаз — смесь газов, выделяющихся в процессе анаэробного брожения отходов. Древесные отходы разлагаются с выделением следующих газов: метан — 60–70%; углекислый газ — 30–40%; небольшое количество сероводорода — 0–3%; примеси водорода, аммиака и оксидов азота [6].

В настоящее время известно ограниченное количество работ, посвященных изучению возможностей использования отходов лесозаготовок и предприятий деревообрабатывающей промышленности в качестве субстратов для получения биогаза. Большая часть таких работ посвящена рассмотрению опилок и щепы в качестве основных субстратов, которые могут быть получены, в том числе, и при измельчении некондиционной древесины. Главным ограничивающим фактором для использования древесных отходов в качестве сырья для получения биогаза является наличие в древесине компонентов — ингибиторов активности микробных биокатализаторов процесса получения биогаза, таких как лигнин, смолы хвойных пород. Так что из-за низкой степени конверсии субстрата себестоимость продукта

неконкурентоспособен, а сам процесс биоконверсии — нерентабелен. Содержание основных органических компонентов в древесине зависит от ее вида (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав углеводов в различных видах древесины [23]

Углеводы	Содержание, %	
	Хвойные породы	Лиственные породы
Целлюлоза	48–56	46–48
Лигнин	26–30	19–27
Гемицеллюлоза, в т.ч.:	23–25	26–35
- пентозаны	10–12	23–29
- гексозаны	13	3–6

Повысить эффективность биокаталитических процессов переработки отходов возможно при использовании различных подходов на стадиях предварительной обработки сырья, непосредственно в ходе биоконверсии предобработанного субстрата в конечный продукт, а также на стадии выделения и очистки конечного продукта [15, 21, 22]. В частности, метаногенное брожение древесины позволяет интенсифицировать различные способы предобработки исходных отходов, однако экономически обоснованное решение для данного биотехнологического процесса до сих пор не найдено. Таким образом, актуальным представляется вопрос подбора эффективных методов предварительной обработки древесины, применяемой в технологии производства биометана. Существуют механические, термические, фотохимические, химические и ферментативные методы деструкции лигниноцеллюлозной биомассы, в результате которых происходит увеличение реакционной способности сырья [13].

Так, при исследовании влияния содержания основных органических веществ в различных видах древесины на интенсивность выхода биогаза применялась механическая предобработка. Фракционный состав опилок в среднем составлял 1–3 мм, после ее механического измельчения изготавливались пеллеты. Установлено, что процессы метаногенеза пеллет осинового и букового опилок происходят наиболее интенсивно в первые три недели от внесения культуры метаногенных микроорганизмов в субстрат, по сравнению с дубовыми и сосновыми опилками и корой (рис. 1) [13]. В древесине хвойных видов содержатся смолы, которые служат ингибиторами для метаногенных процессов; кроме того, в этих породах отмечается и высокое содержание лигнина (см. табл. 2), который также является ингибитором метаногенного консорциума. Сравнительный анализ состава лиственных видов деревьев

дает возможность сделать вывод о том, что наибольшим содержанием целлюлозы и наименьшим содержанием лигнина характеризуются опилки осины, древесина которой служит предпочтительным субстратом для метаногенного брожения. В древесине дуба содержатся дубильные вещества, которые тоже являются ингибиторами для анаэробного ила. Содержание целлюлозы в опилках бука сравнительно меньше, но, учитывая небольшое относительное содержание лигнина и высокое относительное содержание гемицеллюлозы, выход биогаза из отходов этой древесины достаточно высок.

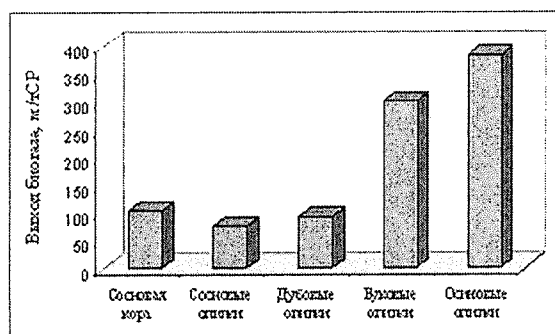


Рис. 1. Выход биогаза из различных древесных отходов, прошедших через механическую предобработку (по материалам [13])

Для увеличения выхода биогаза в ходе биоконверсии сосновых опилок предложена химическая предобработка древесины путем выдерживания исходного субстрата в 8,0% (мас) растворе NaOH [24]. Самое значительное увеличение выхода метана (181,2%) по сравнению с использованием в качестве субстрата необработанной древесины получено при обработке сырья щелочным раствором в течение 10 мин при 100 °С. Анализ изменения химического состава и физических характеристик предобработанной таким образом древесины свидетельствует о снижении кристалличности целлюлозы за счет предварительной обработки и о нарушении структуры сосновой древесины.

Для увеличения выхода биогаза при использовании в качестве субстрата древесины японского кедра предложена ферментативная предобработка путем культивирования грибов белой гнили *Ceriporiopsis subvermispore* [20]. Эти грибы культивировались на древесных стружках с пшеничными отрубями и без них в течение 4—8 недель. Показано, что предварительная обработка с помощью *C. subvermispore* в присутствии пшеничных отрубей в течение 8 недель уменьшала количество α -арильных эфирных связей в лигнине на 74—76%. После подобной предобработки древесины выход метана достигал 35% от теоретического выхода. При этом выход

метана при трансформации необработанной древесины составлял 25% от теоретически возможного выхода. Ферментативная предобработка путем культивирования *C. subvermispore* в отсутствие пшеничных отрубей приводила к увеличению выхода метана только 6—9% метана.

Цель еще одного исследования состояла в том, чтобы охарактеризовать анаэробную биodeградируемость некоторых древесных отходов на городских свалках путем измерения выхода метана [26] (табл. 3).

Таблица 3

Выход метана при анаэробном разложении некоторых древесных отходов [26]

Отход	Метан, мл CH ₄ /г сух. в-в субстрата
Древесина красного дуба	32,5
Древесина эвкалипта	0
Древесина ели	7,5
Древесина сосны	0,5
Фанера	6,3
Ориентированно-стружечная плита из:	
- древесины твердых пород	84,5
- древесины мягких пород	0
Древесностружечная плита	5,6
Древесноволокнистая плита	4,6

Несмотря на то, что целью указанного исследования не было получение биогаза, принципиально можно оценить, какие отходы являются потенциальными субстратами для метаногенного консорциума: стружечная плита из твердых сортов древесины и отходы древесины красного дуба. Древесина эвкалипта оказалась наиболее токсичной для микроорганизмов. При этом авторы отмечают, что анаэробное биоразложение древесностружечной и древесноволокнистой плит сопровождается образованием аммиака, что также необходимо учитывать при организации подобного процесса.

Ряд исследовательских работ посвящен применению отходов обработки древесины как добавки при проведении процессов метаногенеза или компонента смесовых субстратов.

Так, например, для достижения максимального экономического эффекта предлагается смешивать отходы деревообрабатывающего цеха с отходами столовой и навозом крупного рогатого скота [5]. При этом опилки должны быть предобработаны путем вываривания в водном или щелочном растворе. Для повышения рыхлости опилки следует термически обработать в автоклаве. При этом

геометрические размеры отходов деревообрабатывающего цеха не должны превышать 35 мм. Навоз рекомендуется смешивать с опилками в массовом соотношении 7:3, что позволит избежать затрат на увлажнение опилок и получить максимальный выход биогаза, а также качественное биоудобрение по окончании процесса метаногенеза.

Другие исследователи предлагают добавлять древесную золу при анаэробной биотрансформации навоза свиней и кожуры маниоки для поддержания оптимального для метаногенного консорциума уровня pH культуральной среды [19].

В качестве субстрата для метаногенного консорциума может выступать и листва деревьев (рис. 2) [1, 10].

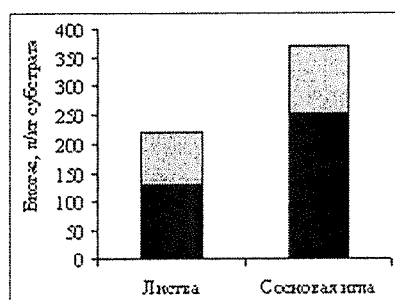


Рис. 2. Выход биогаза при анаэробной биотрансформации листвы и сосновых игл [1]. Черный цвет — доля метана в составе биогаза

Листва деревьев относится к категории естественного опада, наблюдающегося ежегодно в лесах умеренного климата и в парковых городских зонах. Ресурсы городского листового опада значительны, но утилизация его постоянно сопровождается экологическими и экономическими издержками. Показано, что наибольший выход метана наблюдается при использовании измельченной биомассы листового опада и адаптированной ассоциации метаногенов [9].

Что касается сточных вод предприятий по получению древесных плит, то они содержат различные типы фенольных соединений, ингибирующих микроорганизмы метаногенного консорциума [25]. Так, анаэробная трансформация сточных вод после получения различных типов плит (из древесины сосны и эвкалипта) возможна только под действием адаптированного анаэробного консорциума при низких скоростях органических нагрузок (0,1–0,4 г ХПК/л/сут) с удалением ХПК от 10 до 30%; при этом удаления цветности не происходило [25].

Таким образом, можно утверждать, что отходы древесины являются прекрасным сырьем для использования в биогазовых технологиях, особенно при наличии специальной предобработки исходного субстрата. Листва деревьев

также позволяет накапливать значительные концентрации биогаза с высокой долей метана. Что касается сточных вод деревообрабатывающих предприятий, то их использование в качестве субстрата для получения биогаза осложнено наличием химических примесей — ингибиторов биокатализаторов. Однако метаногенный консорциум в принципе может быть использован для очистки подобных стоков.

Работа выполнена при поддержке Президиума РАН (Программа «Фундаментальные аспекты химии углеродной энергетики» № 18).

Литература

1. Адамовская В.Н. Перспективы введения в использование биогазовых установок в сельском хозяйстве республики Башкортостан // Никоновские чтения. — 2009. — № 14. — С. 121–122.
2. Андреев А.А. Ресурсосбережение и использование отходов заготовки и переработки древесного сырья // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. — 2014. — № 10. — С. 148–155.
3. Ваваева М.С., Марушко М.В. Биогаз как современный источник энергоресурсов в Белгородской области // Образование, наука, производство (VII Международный Молодежный Форум) Белгород, 20–22 октября 2015 г.). — 2015. — С. 1212–1216.
4. Ворopaев А. Продвижение устойчивого лесопользования и добровольной лесной сертификации в мире (Итоги Ежегодной конференции всемирной сети по торговле сертифицированной лесной продукцией) // Устойчивое лесопользование. — 2009. — № 2. — С. 39–41.
5. Гумерова Р.Х., Черняховский В.А. Возможность применения биогазовой установки для утилизации отходов производства промышленных предприятий // Вестник Казанского технологического университета. — 2017. — Т. 20(9). — С. 134–139.
6. Дитрих В.И., Андрияс А.А., Пережилин А.И., Корпачев В.П. Оценка объемов и возможные пути использования отходов лесозаготовок на примере Красноярского края // Хвойные бореальной зоны. — 2010. — Т. 27(3–4). — С. 346–351.
7. Жиров Н.Н. Деревообработка на Руси // Наука и современность. — 2015. — № 39. — С. 12–15.
8. Колесникова А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук. — 2013. — № 33. — С. 116–120.
9. Куканова С.И., Зайнитдинова Л.И., Ташпулатов Ж.Ж., Арипов Т.Ф. Фитомасса городского листового опада как источник получения биотоплива // Микробиология және вирусология. — 2014. — № 2. — С. 104–110.
10. Куцев Л.А., Сулов Д.Ю. Физико-химические и технологические основы процесса получения биогаза в био-

- ректорах с барботажным перемешиванием субстрата // Сборник материалов региональной научно-технической конференции по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области. — 2015. — С. 205–217.
11. Луговая Д. Принципы устойчивого производства древесного биотоплива // Устойчивое лесопользование. — 2013. — № 4(37). — С. 36–42.
12. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона. — 2015. — Т. 36 — № 2–2. — С. 81.
13. Павліський В.М., Захарів О.Я., Тригуба Б.М. Вплив попередньої обробки відходів різних видів деревини на інтенсивність метаногенного бродіння // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Біологія, біотехнологія, екологія. — 2015. — № 214. — С. 228–233.
14. Полосин И.И., Кузнецова Н.В., Скрипак А.Г. Биогаз как способ обеспечения топливными ресурсами сооружений. // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология. — 2011. — № 1. — С. 137–141.
15. Сенько О.В., Степанов Н.А., Маслова О.В., Лягин И.В., Ефременко Е.Н. Ресурсосберегающая биотехнология получения фумаровой кислоты из возобновляемого растительного сырья // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2013. — № 1. — С. 111–113.
16. Ситдикова Р.Р., Еналиева Д.Р., Голубь К.А. Биогаз как альтернативный источник энергии // Сборники конференций НИЦ Социосфера. — Vedecko vydavatel'ske centrum Sociosfera-CZ sro. — 2016. — № 10. — С. 118–121.
17. Стородубцева Т.Н. Отходы промышленности и лесного комплекса в композитах // Международный журнал экспериментального образования. — 2013. — № 3. — С. 78–80.
18. Электронный ресурс. <http://www.mnr.gov.ru/news/detail.php?ID=131039>. Дата доступа 06.10.2017.
19. Adeyanju A. Effect of seeding of wood-ash on biogas production using pig waste and cassava peels // J. Eng. Appl. Sci. — 2008. — Vol. 3(3). — P. 242–245.
20. Amirta R., Tanabe T., Watanabe T., Honda Y., Kuwahara M., Watanabe T. Methane fermentation of Japanese cedar wood pretreated with a white rot fungus *Ceriporiopsis subvermispora* // Journal of biotechnology. — 2006. — Vol. 123(1). — P. 71–77.
21. Maslova O., Senko O., Stepanov N., Lyagin I., Aslanli A., Makhlis T., Efremenko E. Polyfunctional enzymatic biologics for development of technology useful for improvement of qualitative characteristics of renewable vegetable raw materials // Abstract book. International Conference «Renewable plant resources: Chemistry, Technology, Medicine». — Saint Petersburg: VVM Publishing Ltd., 2017. — P. 56.
22. Maslova O.V., Senko O.V., Stepanov N.A., Efremenko E.N. Lactic acid production using free cells of bacteria and filamentous fungi and cells immobilized in polyvinyl alcohol cryogel: A comparative analysis of the characteristics of biocatalysts and processes // Catalysis in Industry. — 2016. — Vol. 8(3). — P. 280–285.
23. Pérez J., Munoz-Dorado J., de la Rubia T.D.L.R., Martinez J. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview // International microbiology. — 2002. — Vol. 5(2). — P. 53–63.
24. Salehian P., Karimi K., Zilouei H., Jeyhanipour A. Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment. // Fuel. — 2013. — Vol. 106. — P. 484–489.
25. Vidal G., Diez M.C. Methanogenic toxicity and continuous anaerobic treatment of wood processing effluents // Journal of Environmental Management. — 2005. — Vol. 74(4). — P. 317–325.
26. Wang X., Padgett J.M., De la Cruz F.B., Barlaz, M.A. Wood biodegradation in laboratory-scale landfills // Environmental science and technology. — 2011. — Vol. 45(16). — P. 6864–6871.

WASTE FROM LOGGING AND WOOD PROCESSING INDUSTRY AS SUBSTRATES FOR BIOGAS PRODUCTION

O.V. SENKO^{1,2*}, D.A. SLIUSAREV³, O.V. MASLOVA¹

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University

² N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics RAS

³ Moscow State Forest University

A review and analysis of the results of research papers published between 2002 and 2017 were conducted and devoted to the study of the possibilities of obtaining biogas from various wastes from the forestry and woodworking industries. It is shown that such wastes as sawdust, chips, bark and substandard wood, as well as foliage, can be effectively used as substrates for the methanogenic consortium.

Keywords: waste wood processing and logging, biogas, methanogenesis, anaerobic sludge.