

УДК 661.124

ФЕРМЕНТАТИВНЫЙ ГИДРОЛИЗ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ОСТАТКА ПОСЛЕ КСИЛИТНОЙ ВАРКИ

© А.В. Бахтиярова^{1*}, С.Р. Мамбетова¹, С.Д. Пименов¹, В.В. Володин¹, А.П. Сеницын²

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, 194021, Россия,
Nyroc@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, Москва, 119991, Россия

Предварительная обработка лигноцеллюлозного растительного сырья является важным этапом для получения глюкозы ферментативными методами. В результате кислотной обработки растительного сырья и растворения его гемицеллюлозной части происходит образование ксилозного раствора и разрыхление структуры нерастворимого остатка. В статье рассмотрена реакционная способность целлолигнина после ксилитной варки березовой древесины при различном расходе кислоты на процесс гидролиза. Выход продуктов при завершении процесса ферментативного гидролиза в образце, обработанном с повышенным расходом кислоты (6.25 г/кг асд), составил 33.3 г/л, что на 55.6% выше, чем в случае образца, обработанного меньшим количеством кислоты (расход 3.75 г/кг асд). Выход продуктов при ферментативном гидролизе исходной древесины березы составил 8 г/л, таким образом, реакционная способность образцов лигноцеллюлозного остатка при ферментативном гидролизе увеличивается с увеличением расхода кислоты при ксилитной варке соответственно с 2.2 и 4 раза. На практике целесообразно комбинировать процессы ксилитной варки и ферментативного гидролиза для более эффективного использования ксилансодержащего сырья, получения ксилозы и глюкозы для последующего получения продуктов с добавленной стоимостью.

Ключевые слова: ксилитная варка, ферментативный гидролиз, реакционная способность, целлолигнин, ксилоза, глюкоза.

Для цитирования: Бахтиярова А.В., Мамбетова С.Р., Пименов С.Д., Володин В.В., Сеницын А.П. Ферментативный гидролиз лигноцеллюлозного остатка после ксилитной варки // Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 311–317. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250214675>.

Введение

Наблюдающаяся в мире тенденция перехода на здоровое питание и, как следствие этого, повышение качества жизни людей предполагает отказ от большого количества сахарозы и других быстрых углеводов в рационе питания людей. Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется использованию подсластителей – пищевых добавок, имеющих различную химическую природу, придающих пище сладкий вкус, но обладающих при этом низкой калорийностью. Среди веществ-подсластителей большим спросом пользуется ксилит (древесный сахар) [1–3].

Ксилит может быть получен химическим гидрированием ксилозы, которую, в свою очередь, получают либо кислотным, либо ферментативным гидролизом древесины или другого растительного сырья [4–6]. Ксилоза образуется при гидролизе гемицеллюлоз, которые в основном представлены ксиланом. Ксилит может быть также получен из ксилозы микробиологическим синтезом с использованием рекомбинантных штаммов некоторых дрожжей и грибов [7, 8]. Увеличение объемов производства ксилита приводит к необходимости разработки эффективных методов и технологий утилизации лигноцеллюлозных отходов, образующихся при его получении [9].

Растительная биомасса является альтернативным возобновляемым ресурсом для устойчивого производства глюкозы, жидкого топлива, химикатов и полимерных материалов. В природе древесина и другие природные лигноцеллюлозные субстраты обладают высокой устойчивостью к биodeградации благодаря

* Автор, с которым следует вести переписку.

тому, что в растениях фибриллы целлюлозы покрыты и сшиты гемицеллюлозами и дополнительно защищены лигнином. Особое строение лигноцеллюлозного комплекса растений препятствует проникновению в субстрат гидролитических ферментов – целлюлаз, продуцируемых микроорганизмами-деструкторами древесины. В то же время именно эти особенности не позволяют эффективно осуществлять ферментативный гидролиз лигноцеллюлозных материалов в биотехнологии без предварительной обработки [10–12].

При проведении ксилитной варки в разбавленных растворах минеральных кислот происходит гидролиз гемицеллюлоз до ксилозы с образованием значительного количества целлолигнина (до 70–80% от исходного сырья). В результате кислотной обработки и растворения гемицеллюлозы структура сложного лигноуглеводного комплекса разрыхляется и тем самым повышается доступность целлюлозных волокон для последующего ферментативного гидролиза целлюлазами [13–16].

Таким образом, кислотную обработку растительного сырья при ксилитной варке можно рассматривать как один из способов предварительной обработки растительного сырья перед ферментативным гидролизом. Можно полагать, что при комбинировании процессов ксилитной варки и ферментативного гидролиза остающегося после варки лигноцеллюлозного остатка можно достичь существенной валоризации отходов за счет получения ассортимента продуктов с добавленной стоимостью (рис. 1).

Цель настоящей работы заключалась в изучении влияния расхода серной кислоты на эффективность ферментативного гидролиза лигноцеллюлозного остатка после ксилитной варки.

Объекты и методы исследования

В работе использовали измельченную окоренную древесину березы (*Betula pendula*), заготовленную в Ленинградской области, с содержанием легкогидролизуемых полисахаридов – 25.2%. Для проведения ферментативного гидролиза были использованы ферментные препараты *Penicillium verruculosum*: B151 и F10. Характеристики ферментных препаратов приведены в таблице 1.

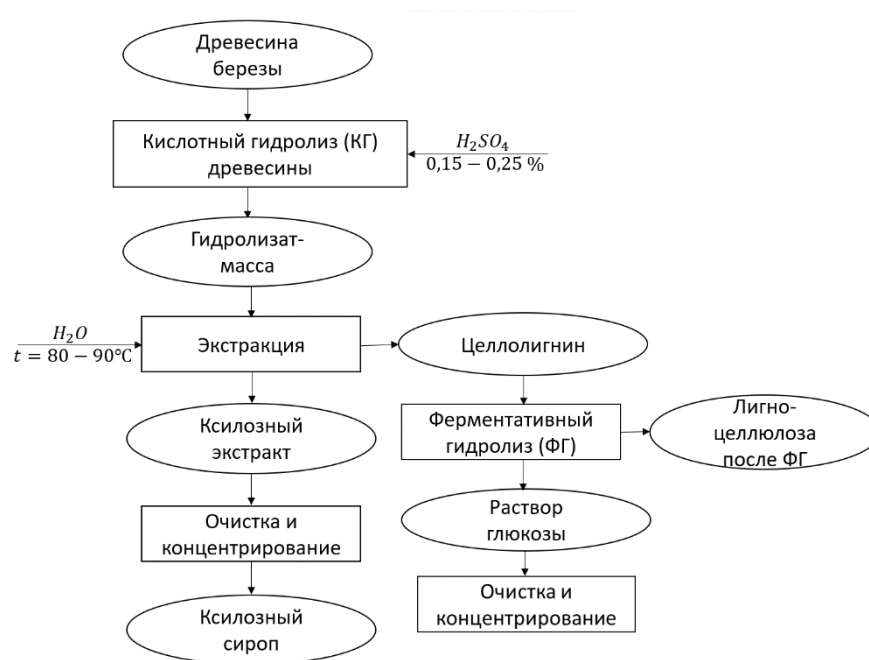


Рис. 1. Принципиальная схема получения ксилозы и глюкозы последовательным кислотным и ферментативным гидролизом

Таблица 1. Характеристики ферментных препаратов

Ферментный препарат	Содержание белка, мг/г	Активность по отношению к субстратам, ед./г				
		МКЦ	КМЦ	β-Глюкан	Ксилан	пНФГ
B1-151, #3.377.2H	970	620	16540	15100	17500	1070
F10, №3,341H	655	220	7000	6800	3800	39800

Условия кислотного гидролиза древесины. Процесс кислотного гидролиза древесины проводили в стальном автоклаве. Внутри автоклава помещали стеклянную пробирку, в которую загружали сырье, пропитанное раствором разбавленной серной кислоты в концентрации 0.25% (образец №1) и 0.15% (образец №2), при соотношении жидкость/твердое $L/S = 2.5$. Температура процесса составляла 180 °C, продолжительность – 50 мин. Полость между стенками автоклава и пробиркой для улучшения теплопередачи заполняли водой.

После завершения кислотного гидролиза образцы гидролизат-массы отмывали горячей водой до нейтральной реакции, образовавшийся целлолигнин использовали для ферментативного гидролиза.

Углеводы в полученном гидролизате анализировали на газожидкостном хроматографе фирмы SHIMADZU модели GC-2014 с использованием ПИД-детектора и капиллярной колонки Rx-5 SilMScolumn с размерами 30000×0.18 мм со слоем носителя 0.10 мкм (фаза силарилена низкой полярности с поперечными связями; аналогично 5% фенила/95% диметилполисилоксана) [17] по методике, приведенной ниже.

Для анализа брали нейтрализованный известковым молоком гидролизат 10 мл с pH 5.0–6.0. Далее раствор выпаривали на ротационном испарителе при 55 °C и сушили до постоянного веса. Около 5–10 мг остатка от высушивания переносили в емкость на 10 мл. Затем сухой остаток в этой же колбе растворяли в 0.2 мл свежеперегнанного сухого пиридина, добавляли 0.9 мл гексаметилдисилазана и 0.2 мл триметилхлорсилана. Колбу нагревали и выдерживали реакционную смесь в течение 10 мин. Остаток растворяли в этой же колбе в 2 см³ гексана [18].

Полученный раствор помещали в пробозадатчик хроматографа. Условия анализа: газ-носитель N₂, 30.0 см/с; программа температур – 1 мин при 70 °C, подъем 4 °C/мин до 320 °C, 5 мин при 320 °C; температура ввода пробы – 280 °C, делитель потока – 1 : 20, объем пробы – 4 мкл; детектор пламенно-ионизационный, температура – 325 °C [19].

Определение активностей ферментных препаратов. За 1 ед. активности принимали такое количество фермента, которое катализирует образование 1 мкмоль продукта за 1 мин.

Активности по отношению к полисахаридным субстратам – Na-соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), β-глюкану ячменя, микрокристаллической целлюлозе (МКЦ), ксилану бука (концентрация 5 г/л в реакционной смеси) определяли по начальным скоростям образования восстанавливающих сахаров (ВС) при pH 5.0 и 50 °C методом Шомоди-Нельсона [20].

Активности по отношению к *n*-нитрофенил-β-D-глюкозиду (пНФГ, 0.9 мМ в реакционной смеси) определяли по скорости образования *n*-нитрофенола при pH 5.0 и 50 °C [20].

Содержание белка в ферментных препаратах определяли методом Лоури, используя бычий сывороточный альбумин в качестве стандарта.

Ферментативный гидролиз целлолигнина проводили в термостатируемых при 50 °C ячейках объемом 50 мл, помещенных на качалку (250 колебаний/мин). В ячейку вносили навеску целлолигнина, рассчитанное количество 0.1 М Na-ацетатного буфера (pH 5.0) и 1 мл раствора, содержащего необходимое количество ферментного препарата. Общий объем реакционной смеси составлял 20 мл. Концентрация целлолигнина в реакционной смеси составляла 100 г/л (в пересчете на сухое вещество). Дозировка ферментного препарата *P. verruculosum* B151 составляла 10 мг белка на 1 г сухого вещества (а.с.в.) субстрата. Совместно с препаратом *P. verruculosum* B151 в реакционную среду добавляли содержащий β-глюкозидазу препарат *P. verruculosum* F10 так, чтобы концентрация белка F10 в реакционной среде составляла 3 мг на 1 г сухого вещества субстрата. Через определенные промежутки времени из реакционной смеси отбирали пробы (по 0.5 мл), центрифугировали (10 тыс. об./мин, 3 мин) и измеряли в них концентрацию ВС методом Шомоди-Нельсона, а также концентрацию глюкозы глюкозооксидазно-пероксидазным методом [20].

Результаты исследования и их обсуждение

Гидролиз образцов древесины березы был проведен в двух режимах, отличающихся концентрацией серной кислоты – образец №1 получали с использованием серной кислоты в концентрации 0.25% (расход 6.25 г/кг абсолютно сухой древесины (а.с.д.), а образец №2 – в концентрации 0.15% (расход 3.75 г/кг а.с.д.) Другие параметры процесса в обоих случаях оставались неизменными: гидромодуль (L/S) – 2.5, температура 180 °C, время процесса – 50 мин.

По данным газовой хроматографии (табл. 2), время удерживания продуктов силилирования ксилозы составили 17.7 и 18.9 мин с расчетным выходом ксилозы в гидролизатах 73.8 и 75.6% соответственно от суммы углеводов. Эти показатели свидетельствуют об эффективности применения низких концентраций

серной кислоты для гидролиза гемицеллюлоз древесины березы, причем наибольший выход ксилозы наблюдается при использовании серной кислоты в концентрации 0.25%.

Непрореагировавшие остатки древесины (гидролизат-масса) в обоих опытах имели влажность 71%. Гидролизат-массу промывали водой для удаления серной кислоты и для извлечения образовавшихся моно- и олигосахаридов. В образце №1 содержание водорастворимых веществ оказалось 37%, а выход инвертированных редуцирующих веществ – 20.9%. В образце №2 – соответственно 33.2 и 15.7%.

После промывки оба образца гидролизат-массы подвергли ферментативному гидролизу. За критерий реакционной способности целлолигнина при ферментативном гидролизе принимали выход продуктов (ВС) при предельной степени его ферментативной конверсии по отношению к а.с.в., т.е. выход продуктов (ВС) при исчерпывающем гидролизе субстрата [17]. Выход ВС при ферментативном гидролизе образца №1 через 24 ч составил 25.8 г/л (рис. 2), что на 42% выше по сравнению с образцом №2 (10.9 г/л); выход ВС через 48 ч (при завершении процесса ферментативного гидролиза) в случае образца №1 составил 33.3 г/л – это на 55.6% выше, чем в случае образца №2 (18.5 г/л). Очевидно, что образец №1, обработанный серной кислотой с более высокой концентрацией, проявил высокую реакционную способность при ферментативном гидролизе, что обусловлено более глубоким кислотным гидролизом гемицеллюлозной части древесины и, вероятно, частичным разрушением кристаллической решетки целлюлозы. Важно подчеркнуть, что в составе продуктов ферментативного гидролиза преобладала глюкоза – ее концентрация в реакционной смеси была сопоставима с концентрацией ВС (рис. 2).

Выход ВС при ферментативном гидролизе исходной древесины березы составил 8 г/л, таким образом, реакционная способность образца №1 при ферментативном гидролизе увеличилась примерно в 4 раза, образца №2 – в 2.2 раза.

Таблица 2. Выход моносахаридов по данным газовой хроматографии

Углеводы	Выход моносахаридов, %		Выход моносахаридов, мг/г а.с.д.	
	Образец №1	Образец №2	Образец №1	Образец №2
арабиноза	3.6	3.6	7.52	5.63
рамноза	1.5	3.5	3.07	5.45
фукоза	3.8	3.8	8.01	5.96
ксилоза	73.8	75.6	154.18	118.65
фруктоза	0.2	0.7	0.37	1.10
манноза	8.5	7.1	17.71	11.22
галактоза	1.3	1.9	2.69	2.91
глюкоза	7.4	3.9	15.46	6.09
ВСЕГО	100.00	100.00	209	157

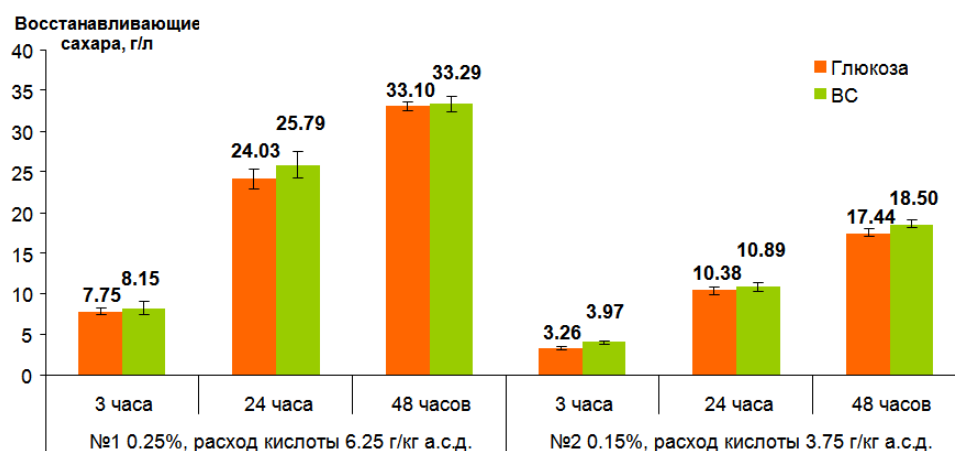


Рис. 2. Выход восстанавливающих сахаров и глюкозы при ферментативном гидролизе целлолигнина

Отметим, что реакционная способность при ферментативном гидролизе образца №1 сопоставима с таковой осиновых опилок гидролизованных 1% серной кислотой при 140 °C в течение 1 ч (36 г/д ВС) или багассы после парового взрыва (34 г/л ВС) [21].

Таким образом, целлюлолигнин, полученный после гемицеллюлозного гидролиза древесины березы с расходом кислоты 6.25 г/кг абсолютно сухой древесины, пригоден для получения глюкозы методом ферментативного гидролиза и может быть рекомендован для использования в производстве глюкозы для их последующей переработки в спирты, аминокислоты и другие продукты микробного синтеза.

Финансирование

Работа выполнена в рамках работ по теме ГЗ НИР МГУ (номер ЦИТИС 121041500039-8).

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Silva T.P., Cordeiro de Assis G., Santana N.B., Tavares I.M.C., Santos P.H., Salay L.C., Iqbal M.W., Bilal M., Franco M. Chapter 1 – Conversion of lignocellulosic biomass to xylitol and its applications // Valorization of Biomass to Bioproducts. Elsevier, 2023. Pp. 1–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822887-6.00005-X>.
2. Ravella S., Gallagher J., Fish S., Prakasham R.S. Overview on Commercial Production of Xylitol, Economic Analysis and Market Trends // D-Xylitol. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. Pp. 291–306. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31887-0_13.
3. Мамбетова С.Р., Бахтиярова А.В., Михайлова А.Е. Анализ рынка ксилита // Тенденции развития науки и образования. 2023. №100-2. С. 112–114. <https://doi.org/10.18411/trnio-08-2023-88>.
4. Prakasham R.S., Rao R.S., Hobbs P.J. Current trends in biotechnological production of xylitol and future prospects // Curr. Trends. Biotechnol. Pharm. 2009. Vol. 3. Pp. 8–36.
5. Arcano Y.D., Valma na Garcia O.D., Mandelli D., Carvalho W.A., Magalhaes Pontes L.A. Xylitol: A review on the progress and challenges of its production by chemical route // Catalysis Today. 2020. Vol. 344. Pp. 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.07.060>.
6. Deng W., Feng Y., Fu J. et. al. Catalytic conversion of lignocellulosic biomass into chemicals and fuels // Green Energy & Environment. 2023. Vol. 8, no. 1. Pp. 10–114. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.07.003>.
7. Патент №2142999 (РФ). Способ получения ксилита / А.М. Харкки и др. – 20.12.1999.
8. Болотникова Т.А., Базарнова Ю.Г., Аронова Е.Б., Болотникова О.И. Ферментация лигноцеллюлозных гидролизатов в производстве ксилита // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. СПб, 2019. Т. 1. С. 6–8.
9. Satyavolu J., Ganesh Dattatreya Tadimetri J., Thilakarathne R. Xylose production and the associated integration for biocoal production // Energy Conversion and Management: X. 2021. Vol. 10. 100073. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100073>.
10. Zhu J.Y., Pan X. Efficient sugar production from plant biomass: Current status, challenges, and future directions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 164. 112583. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112583>.
11. Шарапова И.Э. Применение биоалпинга для предварительной обработки древесного сырья в процессе производства биоэтанола. Часть 1. Отбор штаммов базидиальных и микромицелиальных грибов для биоалпинга древесных субстратов // Бутлеровские сообщения. 2018. Т. 56, №11. С. 140–145.
12. Донцов А.Г., Шарапова И.Э. Применение биоалпинга для предварительной обработки древесного сырья в процессе производства биоэтанола. Часть 2. Влияние биоалпинга на реакционную способность древесных субстратов при ферментативном гидролизе // Бутлеровские сообщения. 2018. Т. 56, №11. С. 146–152.
13. Бахтиярова А.В., Белоусов И.И., Кинд А.В., Романенко К.А., Спицын А.А. Пиролиз и активация уплотненного целлюлолигнина // Химическая технология. 2019. Т. 20, №3. С. 98–103. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2019-20-3-98-103>.
14. Purnawan A., Thontowi A., Kholida L.N., dan Urip Perwitasari U. Hidrolisis Biomasa Lignoselulosa Untuk Xilitol // Jurnal Ilmu Lingkungan. 2021. Vol. 19(3). Pp. 485–496. <https://doi.org/10.14710/jil.19.3.485-496>.
15. El Hage M., Louka N., Rezzoug S.-A., Maugard T., Sablé S., Koubaa M., Debs E., Maache-Rezzoug Z. Bioethanol Production from Woody Biomass: Recent Advances on the Effect of Pretreatments on the Bioconversion Process and Energy Yield Aspects // Energies. 2023. Vol. 16. 5052. <https://doi.org/10.3390/en16135052>.
16. Santos V.T.D.O., Siqueira G., Milagres A.M.F., Ferraz A. Role of hemicellulose removal during dilute acid pretreatment on the cellulose accessibility and enzymatic hydrolysis of compositionally diverse sugarcane hybrids // Ind. Crop. Prod. 2018. Vol. 111. Pp. 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.053>.
17. Bakanov V.V., Vedernikov D.N., Khabarova L.S. Extractive substances of saprotrophic mushrooms lentinula edodes and pholiota squarrosa. Heavy metal content // Химия растительного сырья. 2020. №3. С. 67–72. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020037277>.

18. Ruiz-Matute A.I. et al. Derivatization of carbohydrates for GC and GC-MS analyses // J. Chromatogr. B. 2011. Vol. 879. Pp. 1226–1240. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2010.11.013>.
19. Мухутдинов Р.Р., Пилипенко Т.В., Кручина-Богданов И.В. Идентификация порошкообразных продуктов методом газовой хроматографии с предварительной дериватизацией проб // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2019. №4. С. 75–84.
20. Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов: учеб. пособие. М., 1995. 224 с.
21. Доценко Г.С., Чекушина А.В., Кондратьева Е.Г., Правильников А.Г., Андрианов Р.М., Осипов Д.О., Сеницына О.А., Короткова О.Г., Степанов В.И., Новожилов Е.В., Ачильдиев Е.Р., Константинова С.А., Синицын А.П., Реакционная способность различных целлюлозосодержащих материалов при ферментативном гидролизе // Лесной вестник Московского государственного университета леса. 2012. №8 (91). С. 129–134.

Поступила в редакцию 23 января 2024 г.

После переработки 2 февраля 2024 г.

Принята к публикации 21 января 2025 г.

Bakhtiyarova A.V.^{1}, Mambetova S.R.¹, Pimenov S.D.¹, Volodin V.V.¹, Sinitsyn A.P.² ENZYMATIC HYDROLYSIS OF LIGNOCELLULOSIC WASTES AFTER XYLITOL PRODUCTION*

¹ Saint Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov, Institutsky per., 5, Saint Petersburg, 194021, Russia, Nyroc@rambler.ru

² Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991, Russia

Pretreatment of lignocellulosic plant feedstock is an important step for glucose production by enzymatic methods. Acid treatment of birch sawdusts results in dissolution of hemicelluloses with xylose formation. The article considers the reactivity of cellolignin after xylitol production of birch wood at different acid consumption for the hydrolysis process. The yield of products after the enzymatic hydrolysis in the sample treated with increased acid consumption (6.25 g/kg dry wood) was 33.3 g/L, which is 55.6% higher than in the case of the sample treated with less amount of acid (consumption of 3.75 g/kg dry wood). The yield of products of enzymatic hydrolysis of untreated birch was 8 g/l. Thus the reactivity of lignocellulosic wastes for enzymatic hydrolysis increases with the increase of acid consumption at xylitol production from 2.2 to 4 times, respectively. In practice, it is advisable to combine the processes of xylitol production with enzymatic hydrolysis for more efficient utilization of xylan-containing feedstock, the obtaining both xylose and glucose for subsequent production of value-added products.

Keywords: xylitol production, enzymatic hydrolysis, reactivity, cellolignin, xylose, glucose.

For citing: Bakhtiyarova A.V., Mambetova S.R., Pimenov S.D., Volodin V.V., Sinitsyn A.P. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 311–317. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250214675>.

References

1. Silva T.P., Cordeiro de Assis G., Santana N.B., Tavares I.M.C., Santos P.H., Salay L.C., Iqbal M.W., Bilal M., Franco M. *Valorization of Biomass to Bioproducts*. Elsevier, 2023, pp. 1–26. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822887-6.00005-X>.
2. Ravello S., Gallagher J., Fish S., Prakasham R.S. *D-Xylitol*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, pp. 291–306. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31887-0_13.
3. Mambetova S.R., Bakhtiyarova A.V., Mikhaylova A.Ye. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2023, no. 100-2, pp. 112–114. <https://doi.org/10.18411/trnio-08-2023-88>. (in Russ.).
4. Prakasham R.S., Rao R.S., Hobbs P.J. *Curr. Trends. Biotechnol. Pharm.*, 2009, vol. 3, pp. 8–36.
5. Arcano Y.D., Valma na Garcia O.D., Mandelli D., Carvalho W.A., Magalhaes Pontes L.A. *Catalysis Today*, 2020, vol. 344, pp. 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.07.060>.
6. Deng W., Feng Y., Fu J. et. al. *Green Energy & Environment*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 10–114. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2022.07.003>.
7. Patent 2142999 (RU). 20.12.1999. (in Russ.).
8. Bolotnikova T.A., Bazarnova Yu.G., Aronova Ye.B., Bolotnikova O.I. *Nedelya nauki SPbPU: materialy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. [Science Week of SPbPU: Proceedings of a scientific conference with international participation]. St. Petersburg, 2019, vol. 1, pp. 6–8. (in Russ.).
9. Satyavolu J., Ganesh Dattatreya Tadimetri J., Thilakarathne R. *Energy Conversion and Management: X*, 2021, vol. 10, 100073. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100073>.

* Corresponding author.

10. Zhu J.Y., Pan X. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 164, 112583. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112583>.
11. Sharapova I.E. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2018, vol. 56, no. 11, pp. 140–145. (in Russ.).
12. Dontsov A.G., Sharapova I.E. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2018, vol. 56, no. 11, pp. 146–152. (in Russ.).
13. Bakhtiyarova A.V., Belousov I.I., Kind A.V., Romanenko K.A., Spitsyn A.A. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 98–103. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2019-20-3-98-103>. (in Russ.).
14. Purnawan A., Thontowi A., Kholida L.N., dan Urip Perwitasari U. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 2021, vol. 19(3), pp. 485–496. <https://doi.org/10.14710/jil.19.3.485-496>.
15. El Hage M., Louka N., Rezzoug S.-A., Maugard T., Sablé S., Koubaa M., Debs E., Maache-Rezzoug Z. *Energies*, 2023, vol. 16, 5052. <https://doi.org/10.3390/en16135052>.
16. Santos V.T.D.O., Siqueira G., Milagres A.M.F., Ferraz A. *Ind. Crop. Prod.*, 2018, vol. 111, pp. 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.053>.
17. Bakanov V.V., Vedernikov D.N., Khabarova L.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 3, pp. 67–72. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020037277>.
18. Ruiz-Matute A.I. et al. *J. Chromatogr. B*, 2011, vol. 879, pp. 1226–1240. <https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2010.11.013>.
19. Mukhutdinov R.R., Pilipenko T.V., Kruchina-Bogdanov I.V. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Pishchevyye i biotekhnologii»*, 2019, no. 4, pp. 75–84. (in Russ.).
20. Sinitsyn A.P., Gusakov A.V., Chernoglazov V.M. *Biokonversiya lignotsellyuloznykh materialov: ucheb. posobiye*. [Bioconversion of lignocellulosic materials: textbook]. Moscow, 1995, 224 p. (in Russ.).
21. Dotsenko G.S., Chekushina A.V., Kondrat'yeva Ye.G., Pravil'nikov A.G., Andrianov R.M., Osipov D.O., Sinitsyna O.A., Korotkova O.G., Stepanov V.I., Novozhilov Ye.V., Achil'diyev Ye.R., Konstantinova S.A., Sinitsyn A.P., *Lesnoy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa*, 2012, no. 8 (91), pp. 129–134. (in Russ.).

Received January 23, 2024

Revised February 2, 2024

Accepted January 21, 2025

Сведения об авторах

Бахтиярова Анна Валерьевна – старший преподаватель кафедры технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии, nyroc@rambler.ru

Мамбетова Софья Романовна – магистрант, sofya.mam@icloud.com

Пименов Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, младший научный сотрудник инновационного инженерингового центра, chudopim@mail.ru

Володин Владимир Витальевич – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры технологии лесохимических продуктов, химии древесины и биотехнологии, vladimir131035@yandex.ru

Синицын Аркадий Пантелеймонович – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией, apsinitsyn@gmail.com

Information about authors

Bakhtiyarova Anna Valerievna – Senior Lecturer, Department of Technology of Forest Chemical Products, Wood Chemistry and Biotechnology, nyroc@rambler.ru

Mambetova Sofia Romanovna – Master's student, sofya.mam@icloud.com

Pimenov Sergey Dmitrievich – Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, Innovation Engineering Center, chudopim@mail.ru

Volodin Vladimir Vitalyevich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor, Department of Technology of Forest Chemical Products, Wood Chemistry and Biotechnology, vladimir131035@yandex.ru

Sinitsyn Arkady Panteleimonovich – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Head of Laboratory, apsinitsyn@gmail.com