

УДК 661.728.7

ДЕЛИГНИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. ИК-СПЕКТРЫ И ИНДЕКСЫ УПОРЯДОЧЕННОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

© *Е.Ю. Кушниц^{1*}, А.Г. Шахова¹, Н.Г. Базарнова¹, М.К. Кымбатбекова¹, И.В. Афанасенкова²*

¹ *Алтайский государственный университет, пр-т Ленина, 61, Барнаул, 656049 (Россия), e-mail: eugenekuschnier@gmail.com*

² *Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова, ул. Казахстан, 55, Усть-Каменогорск, 070004 (Казахстан)*

Исследовано влияние химической обработки соломы однолетних растений и древесины растворами надуксусной кислоты под воздействием микроволнового излучения на характеристики полученной целлюлозы. Показано, что микроволновый нагрев замедляет процессы упорядочения надмолекулярной структуры целлюлозы в поперечном и продольном направлениях микрофибрилл при делигнификации растительного сырья надуксусной кислотой. При одинаковых условиях химической обработки растительного сырья под воздействием микроволнового излучения характеристики получаемой целлюлозы сильно зависят от особенностей химического состава исходного сырья, строения и надмолекулярной организации растительных полимеров и их реакционной способности в процессах окислительной и гидролитической деструкции. Целлюлоза, полученная под воздействием микроволнового излучения, характеризуется выходом 46–48% и индексом упорядоченности Нельсон и О'Коннора 0,64–0,79.

Установлено, что вклад процессов рекристаллизации и деструкции в увеличение степени упорядоченности целлюлозы при делигнификации древесины и соломы надуксусной кислотой под воздействием микроволнового излучения определяется особенностями состава исходного сырья и надмолекулярной организации полисахаридов.

Ключевые слова: древесина осины, древесина сосны, солома овса, солома гречихи, надуксусная кислота, микроволновое излучение, делигнификация, целлюлоза, ИК-спектроскопия.

Введение

Целлюлоза является одним из наиболее востребованных продуктов химической переработки растительного сырья, из которого в крупных масштабах производят повсеместно используемые изделия и материалы. При этом с течением времени постоянно возрастает значение этого полисахарида как природного экологически безопасного возобновляемого сырья для получения биоразлагаемых полимерных материалов с разнообразными эксплуатационными свойствами.

Рост ежегодных объемов производства и потребления целлюлозы приводит к необходимости решения проблем, связанных с рациональным и комплексным использованием естественных лесосырьевых ресурсов

Кушниц Евгений Юрьевич – преподаватель кафедры органической химии, e-mail: eugenekuschnier@gmail.com

Шахова Анастасия Геннадьевна – студентка, e-mail: snegko.1985@mail.ru

Базарнова Наталья Григорьевна – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой органической химии, e-mail: bazarnova@chem.asu.ru

Кымбатбекова Мырзагул Кымбатбековна – студентка, e-mail: myrza97ice@gmail.com

Афанасенкова Ирина Владимировна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры химии, e-mail: ivekz08@mail.ru

и загрязнением окружающей среды отходами и вредными побочными продуктами целлюлозно-бумажного производства. В связи с этим актуальным направлением исследований в области химической переработки растительного сырья является разработка экологически приемлемых способов делигнификации низкосортного целлюлозосодержащего сырья, обеспечивающих эффективное удаление лигнина без проведения дополнительных стадий химической обработки.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Один из путей решения данной проблемы основан на делигнификации растительного сырья высокоэффективными бесхлорными реагентами с применением физических воздействий, интенсифицирующих процессы окислительной и гидролитической деструкции растительных полимеров. В качестве такого решения сотрудниками кафедры органической химии Алтайского государственного университета ранее предложен способ получения целлюлозы, основанный на делигнификации растительного сырья надуксусной кислоты (НУК) под воздействием микроволнового излучения (МВИ) [1]. Было установлено, что под воздействием МВИ значительно интенсифицируется окислительная деструкция лигнина НУК, что позволяет сократить продолжительность процесса получения целлюлозы в два раза (до 25–30 мин) по сравнению нагревом теплопроводностью при 100 °С [2, 3].

В настоящей работе исследовано влияние химической обработки растительного сырья растворами НУК под воздействием МВИ на характеристики целлюлозы древесных и травянистых растений.

Экспериментальная часть

В качестве целлюлозосодержащего сырья в работе использовали воздушно-сухую измельченную древесину осины и сосны и солому овса и гречихи с размерами частиц 0.315–0.630 мм. Компонентный состав растительного сырья определяли методами, описанными в [17]. Содержание целлюлозы определяли по методу Кюршнера-Хоффера, лигнина – по методу Комарова, гемицеллюлоз – по разности выхода холоцеллюлозы, выделенной 10% раствором надуксусной кислоты, и содержания целлюлозы.

Надуксусную кислоту получали, смешивая ледяную уксусную кислоту с 50% раствором пероксида водорода и 94% серной кислотой. Содержание пероксида водорода и надуксусной кислоты в приготовленном растворе определяли методами перманганатометрии и косвенной иодометрии, описанными в [17]. Приготовленный раствор содержал 18% надуксусной кислоты, 15% пероксида водорода и 0.16% серной кислоты.

Для получения целлюлозы исходное растительное сырье обрабатывали 18% раствором надуксусной кислоты при жидкостном модуле 50 в течение 30 мин. В качестве реактора использовали коническую колбу, которую помещали в прямоугольный резонатор объемом 13.6 дм³ и соединяли с обратным холодильником. Реакционную смесь нагревали прерывистым воздействием МВИ с частотой 2450 МГц, используя магнетрон с максимальной выходной мощностью 700 Вт. Под воздействием МВИ реакционная смесь нагревалась до температуры, соответствующей кипению жидких компонентов. По окончании обработки полученный остаток отделяли на стеклянном пористом фильтре, промывали дистиллированной водой, нагретой до 70–80 °С, и высушивали до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, а затем до постоянной массы при 103 °С. С целью изучения влияния МВИ на характеристики целлюлозы аналогичным способом получали продукты делигнификации с применением нагрева теплопроводностью (водяная баня, 100 °С) при продолжительности обработки растительного сырья раствором надуксусной кислоты 60 мин.

ИК-спектры образцов полученной целлюлозы регистрировали в диапазоне волновых чисел 4000–550 см⁻¹ с применением Фурье-спектрометра «Инфралюм ФТ-801» (Симекс, Россия). Для регистрации ИК-спектров использовали диски, приготовленные прессованием смесей, состоящих из 2 мг исследуемого образца целлюлозы и 300 мг бромида калия, прокаленного при 600 °С. Индекс упорядоченности целлюлозы рассчитывали по методу Нельсон и О'Коннора как отношение значений оптической плотности полос деформационных (1372 см⁻¹) и валентных (2900 см⁻¹) колебаний связей С–Н [18].

Обсуждение результатов

Влияние МВИ на характеристики целлюлозы, полученной делигнификацией древесины и соломы 18% раствором надуксусной кислоты, исследовали с учетом особенностей химического состава исходного растительного сырья (табл. 1). Результаты химического анализа свидетельствуют о высоком содержании целлюлозы в исходном сырье. В отличие от соломы древесное сырье характеризуется более высоким содержанием целлюлозы и лигнина, но содержит меньше гемицеллюлоз.

Таблица 1. Содержание структурных компонентов в исходном растительном сырье, % (от а.с.с.)

Растительное сырье	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлозы
Древесина осины	48	22	26
Древесина сосны	50	28	16
Солома овса	41	17	35
Солома гречихи	44	17	32

Обработка растительного сырья 18% раствором надуксусной кислоты обеспечивает высокую скорость делигнификации как при нагреве теплопроводностью, так и под воздействием МВИ. В ИК-спектрах образцов полученной целлюлозы (рис. 1–4) отсутствуют полосы скелетных колебаний ароматического кольца фенолпропановых единиц лигнина. Независимо от способа получения надмолекулярная структура продуктов делигнификации соответствует полиморфной модификации целлюлозы I. ИК-спектры образцов целлюлозы характеризуются четко выраженной структурой полос при 1430 (ножничные деформационные колебания CH_2 -групп), 1372 (деформационные колебания связей $\text{C}-\text{H}$), 1320 (всерные деформационные колебания CH_2 -групп) и 898 см^{-1} (асимметричные внефазные валентные колебания пиранозных циклов и деформационные колебания связей C^1-H), отражающих степень упорядоченности надмолекулярной структуры целлюлозы I. Интенсивность полос при 1430, 1320 и 898 см^{-1} в ИК-спектрах практически не зависит от способа получения образцов целлюлозы, что свидетельствует об отсутствии выраженного влияния МВИ на структуру кристаллических областей природного полиморфа в условиях проведенного эксперимента. ИК-спектры образцов целлюлозы, полученных с применением нагрева теплопроводностью, характеризуются несколько большей интенсивностью полосы при 1372 см^{-1} по сравнению с образцами целлюлозы, полученными под воздействием МВИ. Данное различие позволяет сделать предположение о том, что при делигнификации растительного сырья надуксусной кислотой с применением микроволнового нагрева процессы упорядочения надмолекулярной структуры целлюлозы протекают с меньшей скоростью, чем при нагреве теплопроводностью. Это может быть обусловлено возбуждением колебательных и вращательных движений полярных молекул и связей, а также увеличением скорости диффузионных процессов под воздействием МВИ. Отличительной особенностью ИК-спектров образцов целлюлозы, полученных из соломы гречихи, является несколько меньшая интенсивность полосы при 1320 см^{-1} по сравнению с образцами целлюлозы, полученными из древесины осины и сосны и соломы овса. По-видимому, различная интенсивность этой полосы в ИК-спектрах полученных образцов обусловлена незначительным влиянием особенностей надмолекулярной организации полисахаридов в составе исходного сырья на процессы упорядочения целлюлозы при делигнификации раствором надуксусной кислоты.

ИК-спектры образцов полученной целлюлозы независимо от способа обработки исходного сырья 18% раствором надуксусной кислоты характеризуются наличием интенсивной полосы валентных колебаний карбонильных групп, максимум которой находится в диапазоне волновых чисел $1739-1735 \text{ см}^{-1}$ для древесной целлюлозы, и $1734-1726 \text{ см}^{-1}$ для целлюлозы однолетних растений. Наличие этой полосы свидетельствует о неполном удалении трудногидролизуемых фракций ксиланов и протекании побочных процессов окисления макромолекул целлюлозы в наименее упорядоченных участках элементарных фибрилл. По данным работы [19] окислительные превращения ангидрогликопиранозного звена целлюлозы под действием надуксусной кислоты включают образование карбоксильной группы по атому C^6 и расщепление связи C^2-C^3 с образованием альдегидных групп.

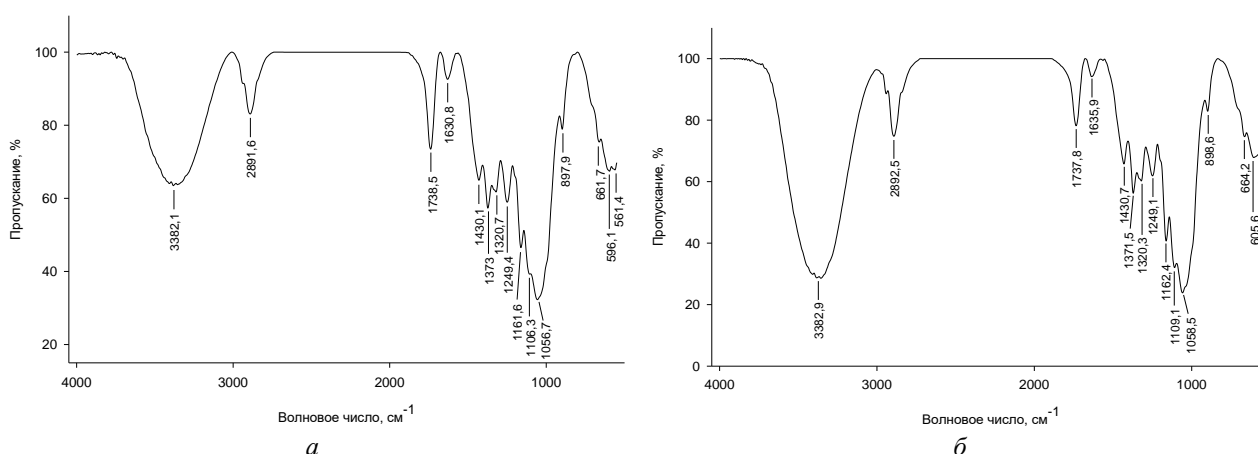


Рис. 1. ИК-спектры целлюлозы, полученной из древесины осины под воздействием МВИ (а) и при нагреве теплопроводностью (б)

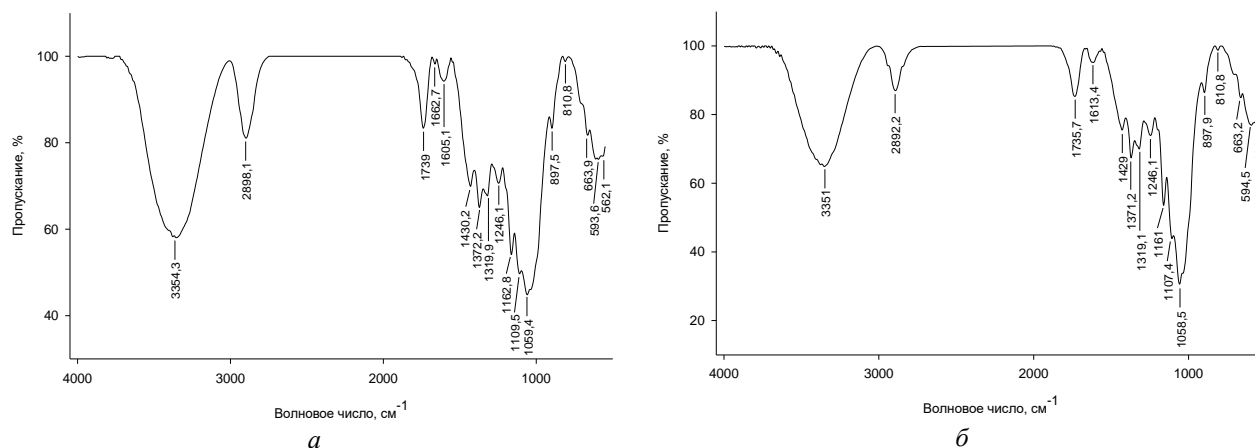


Рис. 2. ИК-спектры целлюлозы, полученной из древесины сосны под воздействием МВИ (а) и при нагреве теплопроводностью (б)

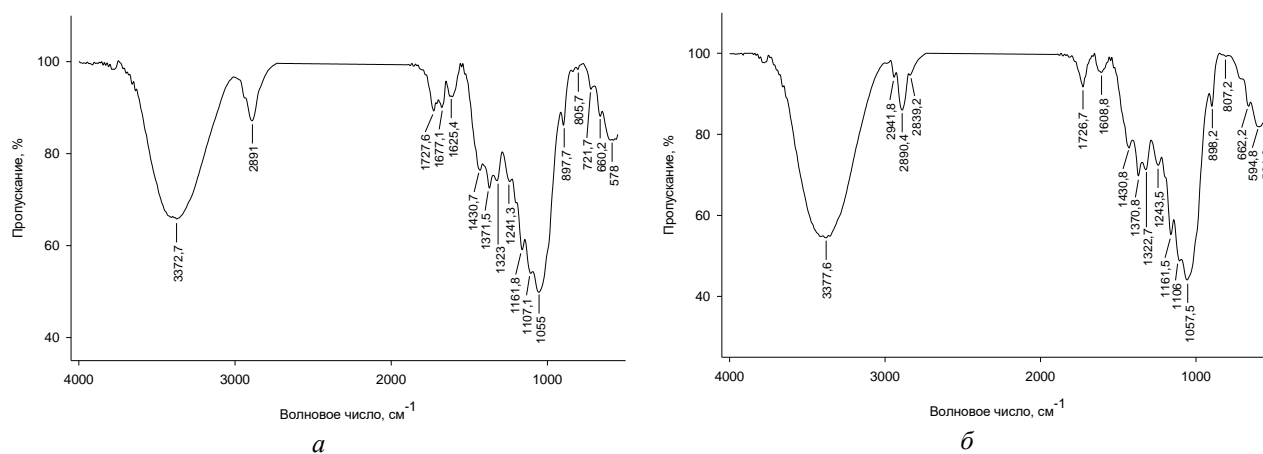


Рис. 3. ИК-спектры целлюлозы, полученной из соломы овса под воздействием МВИ (а) и при нагреве теплопроводностью (б)

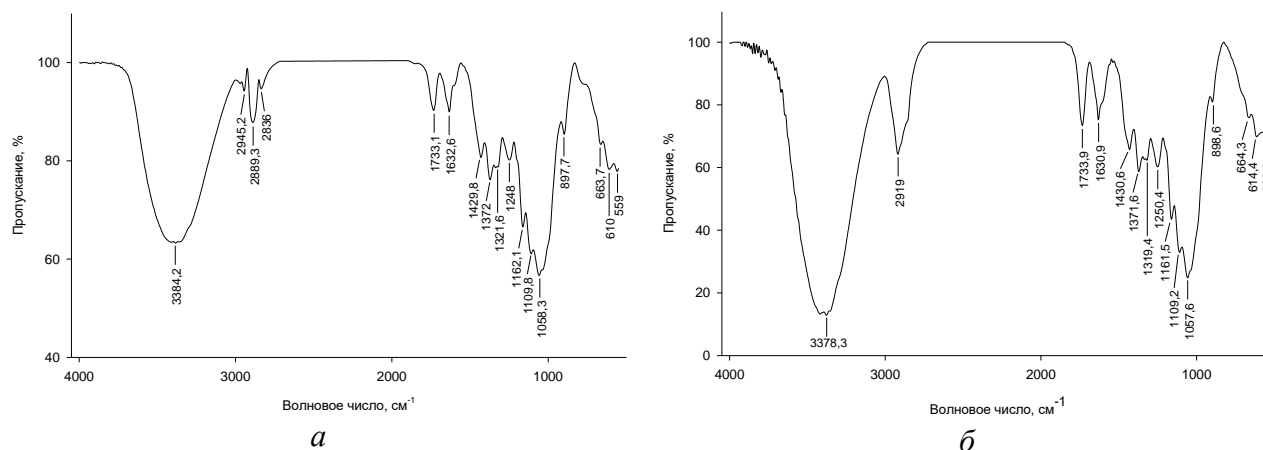


Рис. 4. ИК-спектры целлюлозы, полученной из соломы гречихи под воздействием МВИ (а) и при нагреве теплопроводностью (б)

Сравнение выхода образцов целлюлозы (табл. 2) с ее содержанием в исходном сырье (табл. 1) позволяет сделать вывод о в целом эффективном удалении гемицеллюлоз из древесины и недостаточно полной деструкции ксиланов соломы в условиях обработки 18% раствором надуксусной кислоты. Независимо от способа получения образцы древесной целлюлозы соответствуют целлюлозе нормального выхода. При этом выход образцов, полученных делигнификацией древесины под воздействием МВИ, на 1–2% ниже, чем при об-

работке древесины раствором надуксусной кислоты с применением нагрева теплопроводностью. Для образцов целлюлозы однолетних растений характерна более сложная зависимость выхода от условий получения. В условиях обработки раствором надуксусной кислоты с применением нагрева теплопроводностью выход образцов, полученных из соломы овса, соответствует содержанию целлюлозы в исходном сырье, тогда как выход образцов, полученных из соломы гречихи, на 7% превышает содержание целлюлозы в исходной соломе. Применение микроволнового нагрева в сочетании с меньшей продолжительностью обработки однолетнего сырья приводит к увеличению выхода образцов целлюлозы из соломы овса на 5% и уменьшению выхода образцов целлюлозы из соломы гречихи на 3%. Очевидно, при незначительно отличающемся содержании гемицеллюлоз в соломе овса и гречихи наблюдаемые различия в закономерностях изменения выхода образцов целлюлозы обусловлены различными особенностями строения, надмолекулярной организации и реакционной способности полисахаридов в составе этих видов растительного сырья. Образцы целлюлозы, полученные из соломы овса и гречихи под воздействием МВИ, соответствуют целлюлозе высокого выхода. Отмеченные особенности влияния условий получения образцов целлюлозы на их выход согласуются с различным содержанием целлюлозы и гемицеллюлоз в исходной древесине и соломе.

Образцы полученной целлюлозы характеризуются высокими значениями индекса упорядоченности, определенного по методу Нельсон и О'Коннора, независимо от способа обработки исходного сырья 18% раствором надуксусной кислоты (табл. 2). При незначительно отличающемся выходе (в пределах 1–2%) значения индекса упорядоченности образцов древесной целлюлозы, полученных под воздействием МВИ, меньше, чем у образцов, полученных обработкой древесины раствором надуксусной кислоты с применением нагрева теплопроводностью. Данный факт свидетельствует о различном влиянии способа нагрева на процессы упорядочения надмолекулярной структуры целлюлозы в поперечном и продольном направлениях элементарных фибрилл и согласуется с предположением об уменьшении скорости этих процессов в условиях делигнификации растительного сырья надуксусной кислотой под воздействием МВИ. Для образцов целлюлозы, полученных из соломы, характерна корреляция значений индекса упорядоченности не со способом нагрева, а с остаточным содержанием гемицеллюлоз. Образцы целлюлозы однолетних растений с меньшим выходом имеют более высокие значения индекса упорядоченности. При этом различная устойчивость ксиланов соломы овса и гречихи к окислительной и гидролитической деструкции наряду с их остаточным содержанием в полученных образцах не позволяют на основании значений индекса упорядоченности Нельсон и О'Коннора оценить влияние способа нагрева на процессы упорядочения надмолекулярной структуры целлюлозы однолетних растений в изученных условиях делигнификации.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать заключение о том, что высокие значения индексов упорядоченности целлюлозы, полученной в изученных условиях делигнификации древесины и соломы надуксусной кислотой, в первую очередь обусловлены протеканием процессов упорядочения надмолекулярной структуры элементарных фибрилл, а не полным разрушением ее аморфных участков. Очевидно, под воздействием МВИ процессы упорядочения надмолекулярной структуры целлюлозы протекают медленнее, чем при нагреве теплопроводностью, что может быть обусловлено ослаблением межмолекулярных водородных связей в неупорядоченных участках микрофибрилл в результате возбуждения колебательных и вращательных движений связей С–О и О–Н ангидроглюкопиранозного звена. Достижению более высоких значений индекса упорядоченности при получении целлюлозы с применением нагрева теплопроводностью способствуют менее жесткие условия окислительно-гидролитической деструкции макромолекул целлюлозы в сочетании с большей продолжительностью пластифицирующего действия полярных компонентов раствора надуксусной кислоты (уксусная кислота и вода) на неупорядоченные участки элементарных фибрилл, что приводит к их дополнительной рекристаллизации. При прочих равных условиях соотношение вклада процессов рекристаллизации и окислительно-гидролитической деструкции в изменение структуры неупорядоченных участков элементарных фибрилл определяется особенностями химического состава исходного сырья.

Таблица 2. Выход и индекс упорядоченности целлюлозы в зависимости от условий получения

Растительное сырье	Микроволновый нагрев, продолжительность обработки 30 мин		Нагрев теплопроводностью, продолжительность обработки 60 мин	
	Выход*, %	Индекс упорядоченности	Выход*, %	Индекс упорядоченности
Древесина осины	46	0.72	48	0.86
Древесина сосны	48	0.64	49	0.84
Солома овса	46	0.69	41	0.83
Солома гречихи	48	0.79	51	0.70

* от массы абсолютно сухого сырья.

Выводы

1. Установлено, что микроволновый нагрев замедляет процессы упорядочения надмолекулярной структуры элементарных фибрилл целлюлозы при делигнификации древесины и соломы надуксусной кислотой, не оказывая достоверного влияния на структуру кристаллитов полиморфной модификации целлюлозы I.

2. Показано, что вклад процессов рекристаллизации и деструкции в увеличение степени упорядоченности целлюлозы при делигнификации древесины и соломы надуксусной кислотой под воздействием МВИ определяется особенностями состава исходного сырья и надмолекулярной организации полисахаридов.

Список литературы

1. Singh R., Tiwari S., Srivastava M., Shukla A. Experimental study on the performance of microwave assisted Hydrogen peroxide (H₂O₂) pretreatment of rice straw // *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2014. Vol. 16, no. 1. Pp. 173–181.
2. Azelee N.I.W., Adnan S.A.M., Manas N.H.A., Dailin D.J., Ramli A.N.M., Illias R.M. Assessment of microwave-assisted pretreatments for enhancing pineapple waste delignification // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2155, no. 1. Article 020003. DOI: 10.1063/1.5125507.
3. Natalia D., Winarta J.P., Soetaredjo F.E. Delignification of oil palm empty bunch using physical and chemical combination methods // *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017. Vol. 12, no. 24. Pp. 7124–7128.
4. Wang H., Maxim M.L., Gurau G., Rogers R.D. Microwave-assisted dissolution and delignification of wood in 1-ethyl-3-methylimidazolium acetate // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 136, no. 8. Pp. 739–742. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.064.
5. Akhtar J., Teo C.L., Lai L.W., Hassan N., Idris A., Aziz R.A. Factors affecting delignification of oil palm empty fruit bunch by microwave-assisted dilute acid/alkali pretreatment // *BioResources*. 2015. Vol. 10, no. 1. Pp. 588–596.
6. Khandanlou R., Ngho G.C., Chong W.T. Feasibility study and structural analysis of cellulose isolated from rice husk: Microwave irradiation, optimization, and treatment process scheme // *BioResources*. 2016. Vol. 11, no. 3. Pp. 5751–5766.
7. Davis J.L., Young R.A. Microwave-Assisted Solvent Pulping // *Holzforchung*. 1991. Vol. 45, no. S1. Pp. 71–78. DOI: 10.1515/hfsg.1991.45.s1.71.
8. Abramovitch R.A., Lyannar K. Organosolv Pulping Using a Microwave Oven // *Holzforchung*. 1994. Vol. 48, no. 4. Pp. 349–354. DOI: 10.1515/hfsg.1994.48.4.349.
9. Bussemaker M.J., Mu X., Zhang D. Ultrasonic pretreatment of wheat straw in oxidative and nonoxidative conditions aided with microwave heating // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52, no. 35. Pp. 12514–12522. DOI: 10.1021/ie401181f.
10. Song W., Liu J. Kinetics research of wheat straw sodium sulfate-AQ pulping process // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2013. Vol. 5, no. 12. Pp. 1217–1221.
11. Song W., Deng Y., Xu Y., Cui M. Microwave pulping process for rice straw in basic ionic liquid [NH-(C₂H₄OH)₃]⁺ // *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 2014. Vol. 6, no. 8. Pp. 260–263.
12. Zhou S., Liu L., Wang B., Xu F., Sun R. Microwave-enhanced extraction of lignin from birch in formic acid: Structural characterization and antioxidant activity study // *Process Biochemistry*. 2012. Vol. 47, no. 12. Pp. 1799–1806. DOI: 10.1016/j.procbio.2012.06.006.
13. Almeida D., Santos R.B., Hart P.W., Jameel H. Hardwood pulping kinetics of bulk and residual phases // *TAPPI Journal*. 2015. Vol. 14, no. 10. Pp. 652–662. DOI: 10.32964/tj14.10.652.
14. Ouyang X., Huang X., Ruan T., Qiu X. Microwave-assisted oxidative digestion of lignin with hydrogen peroxide for TOC and color removal // *Water Science and Technology*. 2015. Vol. 71, no. 3. Pp. 390–396. DOI: 10.2166/wst.2014.535.
15. Verma P., Chaturvedi V. A Comparative assessment of autoclave and microwave-assisted peroxometal complex in delignification of wood biomass for enhanced sugar production // *Wood is Good: Current Trends and Future Prospects in Wood Utilization*; ed. by K.K. Pandey, V. Ramakantha, S.S. Chauhan and A.N. Arun Kumar. Singapore: Springer, 2017. Pp. 383–390. DOI: 10.1007/978-981-10-3115-1_35.
16. Кушнир Е.Ю., Аутлов С.А., Базарнова Н.Г. Делигнификация древесины надуксусной кислотой под воздействием микроволнового излучения // *Известия Алтайского государственного университета*. 2014. №3-2(83). С. 165–170.
17. Шарков В.И., Куйбина Н.И., Соловьева Ю.П., Павлова Т.А. Количественный химический анализ растительного сырья. М., 1976. 72 с.
18. Nelson M.L., O'Connor R.T. Relation of certain infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. Part II. A new infrared ratio for estimation of crystallinity in cellulose I and II // *Journal of Applied Polymer Science*. 1964. Vol. 8, no. 3. Pp. 1325–1341. DOI: 10.1002/app.1964.070080323.
19. Hatakeyama H., Iwai M., Nakano J., Migita N. Degradation of cellulose with peracetic acid // *The Journal of the Society of Chemical Industry, Japan*. 1968. Vol. 71, no. 1. Pp. 153–156. DOI: 10.1246/nikkashi1898.71.153.

Поступила в редакцию 6 апреля 2020 г.

После переработки 28 сентября 2020 г.

Принята к публикации 26 ноября 2020 г.

Для цитирования: Кушнир Е.Ю., Шахова А.Г., Базарнова А.Г., Кымбатбекова М.К., Афанасенкова И.В. Делигнификация растительного сырья под воздействием микроволнового излучения. ИК-спектры и индексы упорядоченности целлюлозы // *Химия растительного сырья*. 2020. №4. С. 101–107. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048962.

Kushnir E.Yu.^{1*}, Shakhova A.G.¹, Bazarnova N.G.¹, Kymbatbekova M.K.¹, Afanasenkova I.V.² DELIGNIFICATION OF PLANT MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION. IR SPECTRA AND ORDERING INDICES OF THE CELLULOSE

¹ Altai State University, Lenina, 61, Barnaul, 656049 (Russia), e-mail: eugenekuschnier@gmail.com

² Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, 30 Gvardeiskoi divisii str. 34, Ust-Kamenogorsk, 070020 (Republic of Kazakhstan)

The effect of chemical treatment of straw of annual plants and wood with solutions of peracetic acid under the influence of microwave radiation on the characteristics of the obtained cellulose was investigated. It is shown that microwave heating slows down the processes of ordering of the supramolecular structure of cellulose in the transverse and longitudinal directions of microfibrils during the delignification of plant materials with peracetic acid. Under the same conditions of chemical processing of plant raw materials under the influence of microwave radiation, the characteristics of the resulting cellulose strongly depend on the characteristics of the chemical composition of the raw material, the structure and supramolecular organization of plant polymers and their reactivity in the processes of oxidative and hydrolytic destruction. Cellulose obtained under the influence of microwave radiation has a yield of 46–48% and a Nelson and O'Connor index of 0.64–0.79.

Keywords: aspen wood, pine wood, oat straw, buckwheat straw, peracetic acid, microwave radiation, delignification, cellulose, IR spectroscopy.

References

- Singh R., Tiwari S., Srivastava M., Shukla A. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2014, vol. 16, no. 1, pp. 173–181.
- Azelee N.I.W., Adnan S.A.M., Manas N.H.A., Dailin D.J., Ramli A.N.M., Illias R.M. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2155, no. 1. Article 020003. DOI: 10.1063/1.5125507.
- Natalia D., Winarta J.P., Soetaredjo F.E. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, vol. 12, no. 24, pp. 7124–7128.
- Wang H., Maxim M.L., Gurau G., Rogers R.D. *Bioresource Technology*, 2013, vol. 136, no. 8, pp. 739–742. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.03.064.
- Akhtar J., Teo C.L., Lai L.W., Hassan N., Idris A., Aziz R.A. *BioResources*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 588–596.
- Khandanlou R., Ngho G.C., Chong W.T. *BioResources*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 5751–5766.
- Davis J.L., Young R.A. *Holzforchung*, 1991, vol. 45, no. S1, pp. 71–78. DOI: 10.1515/hfsg.1991.45.s1.71.
- Abramovitch R.A., Lyanar K. *Holzforchung*, 1994, vol. 48, no. 4, pp. 349–354. DOI: 10.1515/hfsg.1994.48.4.349.
- Bussemaker M.J., Mu X., Zhang D. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2013, vol. 52, no. 35, pp. 12514–12522. DOI: 10.1021/ie401181f.
- Song W., Liu J. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2013, vol. 5, no. 12, pp. 1217–1221.
- Song W., Deng Y., Xu Y., Cui M. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 2014, vol. 6, no. 8, pp. 260–263.
- Zhou S., Liu L., Wang B., Xu F., Sun R. *Process Biochemistry*, 2012, vol. 47, no. 12, pp. 1799–1806. DOI: 10.1016/j.procbio.2012.06.006.
- Almeida D., Santos R.B., Hart P.W., Jameel H. *TAPPI Journal*, 2015, vol. 14, no. 10, pp. 652–662. DOI: 10.32964/tj14.10.652.
- Ouyang X., Huang X., Ruan T., Qiu X. *Water Science and Technology*, 2015, vol. 71, no. 3, pp. 390–396. DOI: 10.2166/wst.2014.535.
- Verma P., Chaturvedi V. *Wood is Good: Current Trends and Future Prospects in Wood Utilization*; ed. by K.K. Pandey, V. Ramakantha, S.S. Chauhan and A.N. Arun Kumar. Singapore: Springer, 2017, pp. 383–390. DOI: 10.1007/978-981-10-3115-1_35.
- Kushnir Ye.YU., Autlov S.A., Bazarnova N.G. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 3-2, pp. 165–170. (in Russ.).
- Sharkov V.I., Kuybina N.I., Solov'yeva YU.P., Pavlova T.A. *Kolichestvennyy khimicheskiy analiz rastitel'nogo syr'ya*, [Quantitative chemical analysis of plant materials]. Moscow, 1976, 72 p. (in Russ.).
- Nelson M.L., O'Connor R.T. *Journal of Applied Polymer Science*, 1964, vol. 8, no. 3, pp. 1325–1341. DOI: 10.1002/app.1964.070080323.
- Hatakeyama H., Iwai M., Nakano J., Migita N. *The Journal of the Society of Chemical Industry, Japan*, 1968, vol. 71, no. 1, pp. 153–156. DOI: 10.1246/nikkashi1898.71.153.

Received April 6, 2020

Revised September 28, 2020

Accepted November 26, 2020

For citing: Kushnir E.Yu., Shakhova A.G., Bazarnova N.G., Kymbatbekova M.K., Afanasenkova I.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 101–107. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020048962.

