

УДК 676.166

ПЕРОКСИДНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА ИЗ ПШЕНИЧНОЙ СОЛОМЫ

© *Р.З. Пен*, И.Л. Шапиро, Н.В. Каретникова*

*Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М.Ф. Решетнева, пр. Мира, 82, Красноярск, 660049 (Россия),
e-mail: robertpen@yandex.ru*

Стебли пшеничной соломы (*Triticum sh.*), заготовленные в Емельяновском районе Красноярского края. Отрезки стеблей длиной 2–3 см обрабатывали водным раствором пероксида водорода и уксусной кислоты с добавкой каталитических количеств серной кислоты при гидромодуле 6. Уксусная кислота окисляется до перуксусной кислоты, которая, в свою очередь, окисляет лигнин с образованием растворимых продуктов. Переменные технологические факторы и диапазоны их варьирования: начальная концентрация уксусной кислоты (4–8 г-моль/л), пероксида водорода (3–5 г-моль/л); серной кислоты (0.25–0.65%); температура (80–90 °С) и продолжительность (240–330 мин.) варки. Зависимости доли растворившегося лигнина, выхода и белизны целлюлозы от переменных факторов аппроксимировали уравнениями регрессии второго порядка. Уравнения использовали для графического представления результатов и вычисления оптимальных условий процесса. По основным показателям (выход 49–63%, белизна до 89%, разрывная длина до 8700 м, сопротивление продавливанию до 240 кПа, сопротивление раздиранию 420 мН) пероксидная целлюлоза из пшеничной соломы со степенью помола 30°ШР не уступает регламентируемым свойствам сульфатной беленой целлюлозы из древесины лиственных пород. Возможность получения целлюлозы с высокой белизной после варки позволит в ряде случаев отказаться от дорогостоящей последующей отбелки.

Ключевые слова: пшеничная солома, пероксидная делигнификация, соломенная целлюлоза, прочность целлюлозы, белизна целлюлозы.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективного научной лаборатории «Глубокой переработки растительного сырья» проекта «Технология и оборудование химической переработки биомассы растительного сырья» (номер темы FEFE-2020-0016).

Введение

На протяжении последних десятилетий прослеживается тенденция увеличения доли соломы злаковых растений в сырьевом балансе целлюлозно-бумажных предприятий многих стран с развитой лесохимической промышленностью. Этому способствует ряд обстоятельств: с одной стороны, дефицит древесного сырья и необходимость сохранения лесов, как части глобальной экологической системы планеты; с другой – значительные размеры выращивания зерновых культур во многих регионах мира и необходимость квалифицированного использования соломы – побочного продукта сельскохозяйственного производства.

Первое место по объему переработки в целлюлозном производстве и числу опубликованных исследований принадлежит соломе пшеницы [1–17].

Выполненные ранее исследования продемонстрировали возможность получения технической целлюлозы окислительным пероксидным способом из пшеничной соломы [18–20]. Цель исследования, результаты

Пен Роберт Зусьевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства и химических волокон,
e-mail: robertpen@yandex.ru

Шапиро Ида Львовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры машин и аппаратов промышленных технологий,
e-mail: robertpen@yandex.ru

Каретникова Наталья Викторовна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий,
e-mail: karetnikova.tata@yandex.ru

которого изложены в предлагаемом сообщении: установить степень влияния основных технологических факторов на процесс делигнификации (варки) этого вида сырья; определить прочностные свойства получаемой целлюлозы и возможные области ее использования. В качестве катализатора окислительных процессов применяли серную кислоту. Другие катализаторы окисления не приме-

* Автор, с которым следует вести переписку.

няли в данном исследовании ввиду их неперспективности из-за высокой стоимости (вольфрамат и молибдат натрия [18, 19]) или низкой эффективности (диоксиды титана и кремния [21]).

Методика исследования

Объектом исследования служили стебли пшеничной соломы *Triticum sh.*, заготовленной в Емельяновском районе Красноярского края. Результаты анализа (массовые доли компонентов): целлюлоза (азотно-кислый метод Кюршнера-Хоффера) 46.8%; лигнин (сернохлорный метод Класона-Комарова) 22.6%; экстрактивные вещества (этанольно-толуольный азеотроп, аппарат Сокслета) 1.22%, зола (прокаливание при 600 °С) 5.1%. Измельченное сырье в количестве 4 г подвергали изотермическому нагреванию с варочным раствором, содержащим уксусную кислоту и пероксид водорода, а также каталитические количества серной кислоты. В ходе эксперимента варьировали основные факторы, отобранные на основании предшествующих исследований [19, 20]: состав (доли компонентов) варочного раствора и режим (температуру, продолжительность) варки. Жидкостный модуль б был одинаков во всех опытах. Варки проводили в стеклянных колбах, снабженных воздушными обратными холодильниками и помещенных в термостат, без перемешивания.

Переменные факторы варки (в скобках – интервалы их варьирования):

X_1 – концентрация серной кислоты в варочном растворе (0.25–0.65%);

X_2 – концентрация уксусной кислоты в исходном растворе (4–8 г-моль/л);

X_3 – концентрация пероксида водорода в исходном растворе (3–5 г-моль/л);

X_4 – температура варки (80–90 °С);

X_5 – продолжительность варки (240–330 мин.).

Результаты эксперимента характеризовали следующими показателями (выходными параметрами):

Y_1 – выход целлюлозы (твердого остатка) из сырья, %;

Y_2 – доля растворившегося лигнина от его количества в исходном сырье, %;

Y_3 – белизна целлюлозы, %.

Переменные факторы варьировали в соответствии с планом эксперимента второго порядка на кубе типа 2^{5-1} (план Хартли-5 с «полуреplikой» линейной части) [22]. Для математической обработки использовали пакет прикладных программ Statgraphics Centurion XVI [23]. Зависимости каждого из выходных параметров от переменных факторов аппроксимировали уравнениями регрессии второго порядка общего вида

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ij} X_i X_j; i, j = 1, 2, 3, 4, 5.$$

Статистически незначимые коэффициенты регрессии (при критическом уровне значимости 0.05) исключили из уравнений с пересчетом оставшихся коэффициентов.

Для оценки прочностных свойств целлюлозы отдельно приготовили ряд образцов в количествах, необходимых для изготовления и испытания бумажных отливок. Целлюлозу размалывали в центробежном размалывающем аппарате ЦРА до степени помола 30° Шоппер-Риглера. Бумажные отливки 75 г/м² изготавливали на листоотливном аппарате Рапид-Кетен. Сопротивление разрыву и удлинение до разрыва измерили на динамометре РМБ-30-2М, сопротивление продавливанию – на приборе F18530, сопротивление раздиранию – на приборе Р-1, белизну целлюлозы – на лейкометре.

Обсуждение результатов

Условия и результаты основной серии опытов приведены в таблице 1, коэффициенты регрессии – в таблице 2, статистические характеристики массива наблюдений и аппроксимации – в таблице 3.

Полученные, как изложено выше, уравнения регрессии использовали для графического представления влияния переменных факторов (в границах интервалов их варьирования) на результаты варок. Часть поверхностей отклика приведена на рисунках 1, 2 и 3.

Влияние переменных факторов на результаты процесса соответствует априорной информации. С ростом величины каждого фактора уменьшается выход технической целлюлозы (рис. 1), растет доля растворившегося лигнина (рис. 2) и белизна целлюлозы (рис. 3). Наименьшее влияние на изменение всех выходных параметров оказало варьирование концентрации гомогенного катализатора – серной кислоты. Вероятно, в ходе дальнейших исследований процесса может быть принята минимальная величина этого фактора 0.25% или еще меньше.

Таблица 1. Условия и результаты эксперимента

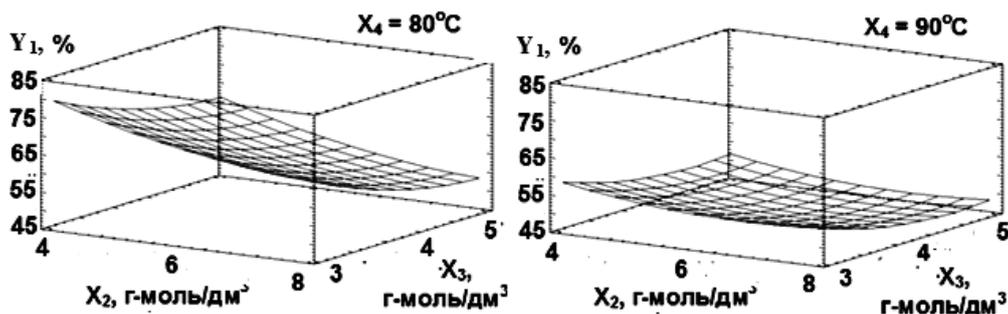
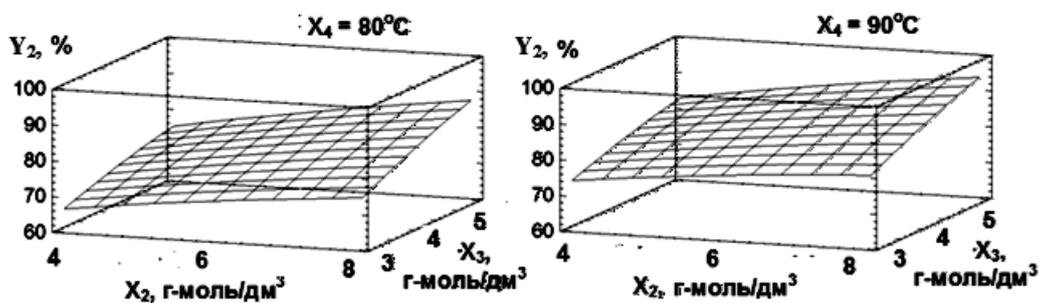
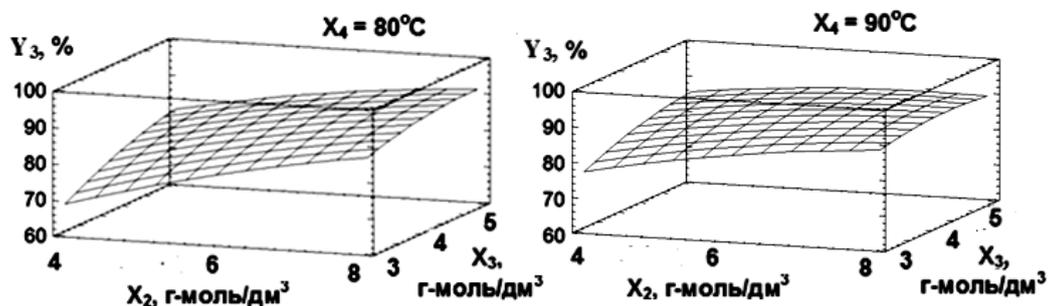
№ режима	Независимые переменные (факторы варки)					Выходные параметры (результаты наблюдений)		
	X ₁ , %	X ₂ , г-моль/л	X ₃ , г-моль/л	X ₄ , °С	X ₅ , мин	Y ₁ , %	Y ₂ , %	Y ₃ , %
1	0.45	6	4	85	285	54.3	87.2	77
2	0.25	4	3	80	330	78.3	65.6	64
3	0.65	4	3	80	240	81.3	57.8	63
4	0.25	8	3	80	240	73.3	81.4	65
5	0.65	8	3	80	330	58.3	86.7	72
6	0.25	4	5	80	240	72.6	75.7	66
7	0.65	4	5	80	330	58.6	81.9	71
8	0.25	8	5	80	330	49.6	85.6	87
9	0.65	8	5	80	240	58.1	86.2	83
10	0.25	4	3	90	240	64.1	80.5	67
11	0.65	4	3	90	330	54.1	83.3	74
12	0.25	8	3	90	330	53.6	83.7	80
13	0.65	8	3	90	240	54.3	82.1	79
14	0.25	4	5	90	330	50.6	83.6	84
15	0.65	4	5	90	240	51.6	84.9	82
16	0.25	8	5	90	240	48.1	84.1	88
17	0.65	8	5	90	330	50.3	87.5	90
18	0.25	6	4	85	285	57.3	87.1	75
19	0.65	6	4	85	285	53.6	87.1	81
20	0.45	4	4	85	285	63.1	85.8	68
21	0.45	8	4	85	285	54.7	88.2	86
22	0.45	6	3	85	285	62.3	87.4	69
23	0.45	6	5	85	285	56.3	86.8	85
24	0.45	6	4	80	285	61.3	88.5	70
25	0.45	6	4	90	285	47.3	87.6	89
26	0.45	6	4	85	240	58.3	85.5	73
27	0.45	6	4	85	330	51.1	86.9	78
28	0.45	6	4	85	285	54.6	87.9	76

Таблица 2. Статистически значимые коэффициенты уравнений регрессии

Коэффициенты регрессии b_{ij}	Величины коэффициентов		
	Y ₁	Y ₂	Y ₃
b_0	55.11	83.45	76.5
b_1	-1.52	0.567	1.056
b_2	-4.11	3.689	5.056
b_3	-4.65	2.655	5.722
b_4	-6.22	2.661	5.112
b_5	-3.18	1.478	1.889
b_{12}	1.02	–	–
b_{13}	1.19	–	–
b_{22}	2.64	–	–
b_{24}	2.34	-3.362	–
b_{33}	2.64	–	–
b_{34}	1.68	–	–
b_{45}	1.94	–	–

Таблица 3. Статистические характеристики результатов наблюдений и уравнений регрессии

Характеристики	Y ₁	Y ₂	Y ₃
Результаты опытов:			
среднее значение	58.25	76.5	83.4
минимальная величина	47.3	57.8	63
максимальная величина	81.3	88.5	90
стандартное отклонение	8.79	8.22	6.86
коэффициент вариации, %	15.1	10.8	8.2
Уравнения регрессии:			
коэффициент детерминации, R ² , %	98.2	95.3	94.4
стандартная ошибка аппроксимации	1.18	2.92	3.82
статистика Дарбина-Ватсона	2.15	3.27	3.27

Рис. 1. Зависимость выхода целлюлозы Y_1 от переменных факторов варкиРис. 2. Зависимость доли удаленного (растворившегося) лигнина Y_2 от переменных факторов варкиРис. 3. Зависимость белизны целлюлозы Y_3 от переменных факторов варки

Для оценки прочностных свойств соломенной пероксидной целлюлозы изготовили три образца волокнистого полуфабриката с разными выходами из сырья по режимам с номерами 1, 24 и 25 (табл. 1). Режимы отличаются только температурой варки, остальные условия одинаковы. Результаты испытаний приведены в таблице 4; в этой же таблице приведены для сравнения нормы ГОСТ14940-96 для сульфатной блененной целлюлозы из лиственной древесины (осины), марки ОБ-0 и ОБ-3.

Особо отметим легкую размалываемость обсуждаемой целлюлозы: требуемая степень помола во всех случаях достигнута в течение 3–5 мин, тогда как для достижения аналогичного результата при размолке различных лабораторных и промышленных образцов древесной целлюлозы требовалось, как правило, не менее 18–20 мин. Эта особенность целлюлозы, полученной разными способами варки из стеблей злаковых культур и тростника, неоднократно отмечалась другими исследователями [24]. Ее связывают с высокой степенью удержания воды и набухаемостью из-за повышенного содержания гемицеллюлоз, особенно пентозанов. Известна также затрудненная водоотдача соломенной целлюлозой на сетках из-за образования на их поверхности плотного слоя, который оказывает значительное сопротивление фильтрации [24]. По этой причине представляется сомнительной надежностью контроля процесса размала соломенной целлюлозы по скорости водоотдачи при степени помола выше 30°ШР .

Таблица 4. Белизна и прочностные свойства целлюлозы: лабораторные образцы (пероксидная из соломы, режимы 1, 24, 25); сульфатная беленая из осины (нормы ГОСТ 14940-96 для марок ОБ-0, ОБ-3)

Номер режима, марка	Температура варки, °С	Белизна целлюлозы, %	Прочность отливок			
			разрывная длина, м	удлинение до разрыва, %	сопротивление про-давлению, кПа	сопротивление раздиранию, мН
24	80	70	4750	2.0	136	418
1	85	77	8690	2.9	249	314
25	90	89	8050	2.9	231	340
ОБ-0	–	86	5900	–	–	300
ОБ-3	–	80	6300	–	–	350

Заключение

По основным показателям пероксидная целлюлоза из пшеничной соломы со степенью помола 30°ШР не уступает регламентируемым свойствам сульфатной беленой целлюлозы из древесины лиственных пород (в частности – осины) со степенью помола 60°ШР (условия испытаний по ГОСТ). Она может быть использована для производства тех же видов продукции, что и целлюлоза названных выше марок. Немаловажным обстоятельством является возможность получения целлюлозы с высокой белизной после варки, что позволит в ряде случаев отказаться от дорогостоящей последующей отбелки.

Из-за значительного сопротивления водоотдаче целлюлозу из соломы рекомендуют использовать в композиции с другими видами волокнистых материалов в количестве от 15 до 60%, в зависимости от вида бумаги [24].

Список литературы

1. Tsang L.J., Reid J.D., Coxworth E.C. Delignification of Wheat Straw by *Pleurotus* spp. under Mushroom-Growing Conditions // Applied and Environmental. Microbiology. 1987. Vol. 53. N6. Pp. 1304–1306.
2. Junenez I., Maestre F., Torre M.J., Perez I. Organosolv pulping of wheat straw by use of methanol-water mixtures // Tappi J. 1997. Vol. 80. N12. Pp. 148–154.
3. Epelde Gonzalo I., Lindgren C.T., Lindstrom M.E. Kinetics of wheat straw delignification in soda and kraft pulping // J. Wood Chem. and Technol. 1998. Vol. 18. N1. Pp. 69–82.
4. Sun R.C., Fang J.M., Rowlands P. Physico-chemical and thermal characterization of alkali-soluble lignins from wheat straw // Polim. J. 1998. Vol. 30. N4. Pp. 289–294.
5. Sudhagar M., Tabil L.G., Sokhansanj S. Grinding performance and physical properties of wheat barley straws, corn stover and switchgrass // Biomass and Bioenergy. 2004. Vol. 27. Pp. 339–352.
6. Sun X.F., Sun R.C., Su Y., Sun J.X. Comparative study of crude and purified cellulose from wheat straw // J. Agricult. Food Chemist. 2004. Vol. 52. Pp. 839–847.
7. Kabel M.A., Bos G., Zeevalking J., Voragen A.G.J., Schols H.A. Effect of pretreatment severity on xylan solubility and enzymatic breakdown of the remaining cellulose from wheat straw // Bioresour. Technol. 2007. Vol. 98. N10. Pp. 2034–2042.
8. Petersen M.O., Larsen J., Thomsen M.H. Optimization of hydrothermal pretreatment of wheat straw for production of bioethanol at low water consumption without addition of chemicals // Biomass Bioengineer. 2009. Vol. 33. Pp. 834–840.
9. Кузнецов Б.Н., Данилов В.Г., Судакова И.Г., Яценкова О.В., Гарынцева Н.И., Ибрагимова Е.Ф. Делигнификация соломы пшеницы смесью уксусной кислоты и пероксида водорода в присутствии сернокислотного катализатора // Химия растительного сырья. 2009. №4. С. 39–44.
10. Khokhar Z.-u., Syed Q., Nadeem M., Baig S., Irfan M., Gul I., Tipu I., Aslam S., Zahoor Q., Samra M. Athar A. Delignification of Wheat Straw with Acid and Hydro-Steam under Pressure // World Applied Sciences Journal. 2010. Vol. 11(12). Pp. 1524–1530.
11. Chen Y.M., Wang Y., Wan J.Q., Ma Y.W. Cristal and pore structure of wheat straw cellulose fiber during recycling // Cellulose. 2010. Vol. 17. N2. Pp. 329–338.
12. Крупин В.И., Демьяновская Н.В., Кудряшов В.Н. Солома – сырье для бумажной промышленности // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2010. №3. С. 50–51.
13. Кузнецов Б.Н., Судакова И.Г., Гарынцева Н.В., Иванченко Н.М. Состав и применение растворимых продуктов каталитической окислительной делигнификации соломы пшеницы // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. №19. С. 527–533.
14. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. Complete characterization of wheat straw // BioResources. 2011. Vol. 6. N1. Pp. 154–177.
15. Yimmon B.M., Gogate P.R., Horvath M. Cavitation assisted delignification of wheat straw: A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2012. Vol. 19. Pp. 984–993. DOI: 10.1016/j.ultsorich.2012.02.007.
16. Liu Z., Cao Y., Yao H., Wu S. Oxygen Delignification of Wheat Straw Soda Pulp with Anthraquinone Addition // BioResources. 2013. Vol. 8. Pp. 1306–1319.

17. Wel T., Jiang C., Zhi-qi B., Qi Z., Chang L., Yue G. Исследование и анализ применения пшеничной соломы для производства бумаги (кит.) // J. Harbin Univ. Commer. Natur. Sci. Ed. 2015. Vol. 31. N4. Pp. 458–459.
18. Пен Р., Каретникова Н., Шапиро И. Пероксидная целлюлоза. Делигнификация растительного сырья пероксидными соединениями. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2013. 245 с.
19. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Шапиро И.Л. Катализируемая делигнификация растительного сырья пероксидом водорода и пероксикислотами (обзор) // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 329–347. DOI: 10.14258/jcrpm.2020048119.
20. Pen R.Z., Shapiro I.L., Silin D.R. Delignification of plant raw materials with peroxo compounds // “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”. International Conference (2020, December 8). Beijing, China, 2020. Vol. 3. Pp. 163–168.
21. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Марченко Р.А. Окислительная делигнификация пшеничной соломы: сравнение активности катализаторов // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы VI Международной научно-технической конференции. Архангельск, 2021. С. 333–338.
22. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion. Красноярск, 2014. 291 с.
23. Пен Р.З., Пен В.Р. Статистические методы математического моделирования, анализа и оптимизации технологических процессов. СПб., 2020. 308 с.
24. Фляте Д.М. Бумагообразующие свойства волокнистых материалов. М., 1990. 136 с.

Поступила в редакцию 8 декабря 2021 г.

После переработки 23 января 2022 г.

Принята к публикации 1 февраля 2022 г.

Для цитирования: Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Пероксидная целлюлоза из пшеничной соломы // Химия растительного сырья. 2022. №2. С. 299–305. DOI: 10.14258/jcrpm.20220210688.

Pen R.Z. , Shapiro I.L., Karetnikova N.V. PEROXIDE CELLULOSE FROM WHEAT STRAW*

Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetneva, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049 (Russia), e-mail: robertpen@yandex.ru

The stalks of wheat straw (*triticum sh.*), stored up in Emelyanovsk region of the Krasnoyarsk hand edge in the form of segment in 2–3 cm treated by the water solution of hydrogen peroxide and acetic acid with the catalytic amount of the sulfuric acid under hydromodule 6. The acetic acid is oxidated to peracetic acid, which, in turn, oxidizes lignin with forming of the dissolved products. The variable technological factors and ranges of their variation: initial concentration of the acetic acid (4–8-mol/l), hydrogen peroxide (3–5-mol/l); the sulfuric acid (0.25–0.65 mass.%); the temperature (80–90 °C) and cooking duration (240–330 min). The dependencies of the dissolved lignin part, output and whiteness of the cellulose from variable factor approximated by the regression equations of the second order. The equations used for graphic presentation results and calculation of the optimum conditions of the process. On the leading indexes (output 49–63%, whiteness before 89%, explosive length before 8700 m, forcing through resistance before 240 кПа, tear resistance 420 mN) peroxide cellulose from wheat straw with the degree of the grind 30 °ShR does not concession by specified characteristic of the sulphate unbleached cellulose from hard wood. The possibility of the cellulose reception with high whiteness after cooking will allow in the row account to refuse from high-priced following bleaching.

Keywords: wheat straw, peroxide delignification, straw cellulose, toughness of the cellulose, whiteness of the cellulose

* Corresponding author.

Referenses

1. Tsang L.J., Reid J.D., Coxworth E.C. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, vol. 53, no. 6, pp. 1304–1306.
2. Junenez I., Maestre F., Torre M.J., Perez I. *Tappi J.*, 1997, vol. 80, no. 12, pp. 148–154.
3. Epelde Gonzalo I., Lindgren C.T., Lindstrom M.E. *J. Wood Chem. and Technol.*, 1998, vol. 18, no. 1, pp. 69–82.
4. Sun R.C., Fang J.M., Rowlands P. *Polim. J.*, 1998, vol. 30, no. 4, pp. 289–294.
5. Sudhagar M., Tabil L.G., Sokhansanj S. *Biomass and Bioenergy*, 2004, vol. 27, pp. 339–352.
6. Sun X.F., Sun R.C., Su Y., Sun J.X. *J. Agricult. Food Chemist.*, 2004, vol. 52, pp. 839–847.
7. Kabel M.A., Bos G., Zeevalking J., Voragen A.G.J., Schols H.A. *Bioresour. Technol.*, 2007, vol. 98, no. 10, pp. 2034–2042.
8. Petersen M.O., Larsen J., Thomsen M.H. *Biomass Bioengineer*, 2009, vol. 33, pp. 834–840.
9. Kuznetsov B.N., Danilov V.G., Sudakova I.G., Yatsenkova O.V., Garyntseva N.I., Ibragimova Ye.F. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2009, no. 4, pp. 39–44. (in Russ.).
10. Khokhar Z.-u., Syed Q., Nadeem M., Baig S., Irfan M., Gul I., Tipu I., Aslam S., Zahoor Q., Samra M. Athar A. *World Applied Sciences Journal*, 2010, vol. 11(12), pp. 1524–1530.
11. Chen Y.M., Wang Y., Wan J.Q., Ma Y.W. *Cellulose*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 329–338.
12. Krupin V.I., Dem'yanovskaya N.V., Kudryashov V.N. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2010, no. 3, pp. 50–51. (in Russ.).
13. Kuznetsov B.N., Sudakova I.G., Garyntseva N.V., Ivanchenko N.M. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2011, no. 19, pp. 527–533. (in Russ.).
14. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. *BioResources*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 154–177.
15. Yimmon B.M., Gogate P.R., Horvath M. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, pp. 984–993. DOI: 10.1016/j.ultsorch.2012.02.007.
16. Liu Z., Cao Y., Yao H., Wu S. *BioResources*, 2013, vol. 8, pp. 1306–1319.
17. Wel T., Jiang C., Zhi-qi B., Qi Z., Chang L., Yue G. *J. Harbin Univ. Commer. Natur. Sci. Ed.*, 2015, vol. 31, no. 4, pp. 458–459.
18. Pen R., Karetnikova N., Shapiro I. *Peroksidnaya tsellyuloza. Delignifikatsiya rastitel'nogo syr'ya perokso-soyedineniyami*. [Peroxide cellulose. Delignification of plant raw materials with peroxo compounds]. Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2013, 245 p. (in Russ.).
19. Pen R.Z., Karetnikova N.V., Shapiro I.L. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 329–347. DOI: 10.14258/jcprm.2020048119. (in Russ.).
20. Pen R.Z., Shapiro I.L., Silin D.R. "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration". *International Conference (2020, December 8)*. Beijing, China, 2020, vol. 3, pp. 163–168.
21. Pen R.Z., Shapiro I.L., Marchenko R.A. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov. Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Problems of Mechanics of Pulp and Paper Materials. Materials of the VI International Scientific and Technical Conference]. Arkhangel'sk, 2021, pp. 333–338. (in Russ.).
22. Pen R.Z. *Planirovaniye eksperimenta v Statgraphics Centurion*. [Planning an experiment in Statgraphics Centurion]. Krasnoyarsk, 2014, 291 p. (in Russ.).
23. Pen R.Z., Pen V.R. *Statisticheskiye metody matematicheskogo modelirovaniya, analiza i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov*. [Statistical methods of mathematical modeling, analysis and optimization of technological processes]. St. Petersburg, 2020, 308 p. (in Russ.).
24. Flyate D.M. *Bumagoobrazuyushchiye svoystva voloknistykh materialov*. [Paper-forming properties of fibrous materials]. Moscow, 1990, 136 p. (in Russ.).

Received December 8, 2021

Revised January 23, 2022

Accepted February 1, 2022

For citing: Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 299–305. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20220210688.

