

УДК 676.166

ПЕРОКСИДНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА ИЗ СТЕБЛЕЙ ПШЕНИЦЫ И КОНОПЛИ: ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© 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,
robertpen@yandex.ru

Стебли пшеницы (*Triticum sh.*), пеньку и костру из стеблей технической конопли (*Cannabis sativa*), заготовленные в южных районах Красноярского края в период окончания вегетационного периода, делигнифицировали раствором «уксусная кислота – пероксид водорода – серная кислота – вода». Условия процесса: начальная концентрация уксусной кислоты – 24%, пероксида водорода – 11.9–15.3%, серной кислоты – 1.5%; жидкостный модуль – 6; температура изотермической обработки – 93 °С, продолжительность – 2.5–4.5 ч. Одновременно делигнифицировали растительное сырье при тех же условиях, но без добавления катализатора – серной кислоты. Цель исследования: оценка влияния серной кислоты на выход и физические (в том числе прочностные) свойства целлюлозы из разных видов растительного сырья. Для математической обработки использован двухфакторный дисперсионный анализ. Добавление каталитического количества серной кислоты к варочному раствору приводило к снижению выхода, степени полимеризации и прочностных характеристик (особенно сопротивления разрыву и продавливанию) целлюлозы из пшеничной соломы и конопляной костры. Отмечено аномально высокое сопротивление раздиранию целлюлозы, сваренной из конопляной пеньки без катализатора, и резкое снижение этого показателя при варке с добавлением катализатора. На скорость размола соломенной и костричной целлюлозы серная кислота не повлияла. Скорость размола целлюлозы из пеньки значительно увеличилась в результате воздействия кислоты.

Ключевые слова: целлюлоза, пшеничная солома, конопля, костра, пенька, делигнификация, пероксид водорода.

Для цитирования: Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Пероксидная целлюлоза из стеблей пшеницы и конопли: физические свойства // Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 343–349. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250216588>.

Введение

Солома злаковых культур привлекает все большее внимание как перспективное сырье для химической переработки, в частности, в целлюлозно-бумажную продукцию [1–5]. 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. Потенциальные ресурсы этого ежегодно возобновляемого сырья очень велики. Согласно исследованиям, выполненным в конце минувшего века, из общего количества пшеничной соломы в мире 545 млн т в год использовано для получения волокнистых полуфабрикатов только 4.5 млн т [6].

Конопля в XIX и начале XX веков в России входила в число основных сельскохозяйственных культур. В результате селекционной работы выведены сорта технической конопли, в которой содержание психоактивных веществ не превышает 0.01%, и эта культура постепенно возвращает утраченные позиции. Ожидается, что в 2025 г. посевная площадь конопли достигнет 20 тыс. га [7].

В настоящее время основным промышленным способом производства технической целлюлозы является сульфатная варка. Однако этому способу присущ ряд недостатков экологического и технологического характера: сравнительно невысокий выход целлюлозы из растительного сырья; темный цвет небеленой целлюлозы и трудности ее последующей отбелки; высокие первоначальные затраты на создание нового производства; образование токсичных и дурнопахнущих, в том числе серосодержащих, летучих соединений.

* Автор, с которым следует вести переписку.

Несмотря на постоянное совершенствование технологии и оборудования для очистки промышленных газовых выбросов, часть этих соединений попадает в атмосферу и создает серьезные экологические проблемы. По мнению экспертов, вследствие этого возможен постепенный отказ от использования сульфатной варки. К числу альтернативных способов относится окислительная делигнификация растительного сырья с использованием пероксида водорода и органических перкислот (пермуравьиной, перуксусной) [8–10]. Применяемые реагенты не представляют опасности для окружающей среды. Уже в ходе окислительной варки целлюлоза приобретает высокую белизну, достаточную для включения этого волокнистого полуфабриката в композицию многих видов бумажно-картонной продукции, что делает весь процесс производства высококачественной целлюлозы экологически более приемлемым в сравнении с традиционными технологиями.

Сложилось мнение, что реализация пероксидного способа делигнификации требует обязательного использования катализаторов, в числе которых наиболее перспективной считают серную кислоту [11–13]. Однако при повышенных температурах серная кислота одновременно катализирует гидролитическое разложение легкогидролизуемых полисахаридов, что приводит к снижению выхода и некоторых прочностных свойств технической целлюлозы. Между тем установлено, что стебли однолетних растений могут быть успешно делигнифицированы пероксидным способом без катализаторов [14–16].

Цель исследования: оценка влияния каталитического количества серной кислоты на ход процесса делигнификации растительного сырья и свойства технической целлюлозы.

Методика и результаты исследования

Объектом исследования служили стебли пшеничной соломы (*Triticum sh.*) и технической конопли (*Cannabis sativa*) марки «Сурская», заготовленные в южных районах Красноярского края в период окончания вегетационного периода. Химический состав растительного сырья (массовые доли компонентов, таблица 1) установлен общепринятыми методами анализов [17]: целлюлозы – по методу Кюршнера-Хоффера, лигнина – сернокислотным методом в модификации Комарова, экстрактивных веществ – извлечением этанольно-толуольным азеотропом в аппарате Сокслета, золы – сжиганием и прокаливанием при 600 °С.

Стебли соломы разрезали на отрезки длиной 20–30 мм. Пеньку и костру отобрали после декортки конопли на промышленном предприятии. Волокна пеньки измельчили в лабораторном дисковом дезинтеграторе сухого размола. Для опытов использовали фракцию, прошедшую через сито с диаметром отверстий 8 мм.

Подготовленное воздушно-сухое растительное сырье (сухость 94–95%) делигнифицировали раствором «уксусная кислота – пероксид водорода – серная кислота – вода». Варочный раствор готовили смешиванием перечисленных компонентов непосредственно перед варкой. Постоянные условия делигнификации: концентрация уксусной кислоты – 24%; начальная концентрация пероксида водорода при варке соломы и костры – 15.3%, пеньки – 11.9%; жидкостный модуль – 6; температура изотермической обработки – 93 °С; продолжительность варки соломы и костры – 4.5 ч, пеньки – 2.5 ч. Концентрация серной кислоты – 1.5%, часть опытов выполнили без добавления серной кислоты. Во всех опытах получена целлюлоза без непровара. Размол выполнен в аппарате ЦРА до степени помола 33–35 °ШР, отливки изготовлены на аппарате Рапид-Кетен, их физические свойства (плотность, сопротивление разрыву, продавливанию, раздиранию) определены стандартными методами.

Эксперимент выполнен согласно плану двухфакторного дисперсионного анализа с двумя наблюдениями в группе [18].

Фактор А – вид растительного сырья, три уровня варьирования:

А1 – стебли пшеничной соломы;

А2 – конопляная костра;

А3 – конопляная пенька.

Фактор В – использование катализатора (серной кислоты), два уровня варьирования:

В1 – варка без катализатора;

В2 – варка с добавлением катализатора (концентрация серной кислоты 1.5% мас.).

Результаты опытов оценивали по восьми показателям (выходным параметрам) Y:

Y₁ – выход целлюлозы, проценты от массы исходного сырья;

Y₂ – степень полимеризации целлюлозы (вискозиметрия раствора в ЖВНК, ГОСТ 25438);

Y₃ – доля израсходованного пероксида водорода от начального количества, проценты;

Y_4 – отношение степени помола целлюлозы к продолжительности размола, °ШР/мин;

Y_5 – плотность отливок, г/см³;

Y_6 – разрывная длина отливок, м;

Y_7 – сопротивление отливок продавливанию, кПа;

Y_8 – сопротивление отливок раздиранию, мН.

План эксперимента и результаты наблюдений приведены в таблице 2, статистические характеристики выходных параметров – в таблице 3, зависимости выходных параметров от переменных факторов варки – на рисунках 1 и 2. Для математической обработки использовали пакет прикладных программ Statgraphics Centurion [18].

Таблица 1. Химический состав растительного сырья

Растительное сырье	Массовые доли компонентов в сырье, %			
	целлюлоза	лигнин	экстрактивные вещества	зола
Пшеничная солома	46.8	22.6	1.22	5.10
Конопляная костра	41.2	23.4	4.64	1.10
Конопляная пенька	71.2	5.35	0.32	1.75

Таблица 2. План эксперимента и результаты наблюдений (средние из двух опытов)

Уровни факторов		Выходные параметры							
A	B	Y_1 , %	Y_2	Y_3 , %	Y_4 , °ШР/мин	Y_5 , г/см ³	Y_6 , м	Y_7 , кПа	Y_8 , мН
A1	B1	52.3	481	48.6	6.4	0.636	7220	279	373
A1	B2	48.7	350	84.2	8.6	0.635	5155	197	325
A2	B1	46.5	471	61.4	19.0	0.775	9505	322	215
A2	B2	40.5	330	97.7	18.6	0.704	6800	235	147
A3	B1	73.8	408	32.1	0.5	0.425	1940	137	1885
A3	B2	72.7	279	68.0	8.0	0.547	1615	60	173

Таблица 3. Статистические характеристики результатов наблюдений (выходных параметров)

Характеристики	Выходные параметры							
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8
Число опытов	12	12	12	12	12	12	12	12
Среднее значение	54.9	387.4	65.4	10.2	0.620	5387	205.7	527
Дисперсия	198.2	5496	512.1	48.3	0.013	8.8E6	8436	44027
Минимальная величина	40.1	266	31.8	0.4	0.421	1583	59.0	122
Максимальная величина	74.5	489	97.9	19.4	0.778	9693	334.0	2020
Коэффициент вариации, %	25.1	19.1	34.6	68.2	18.8	55.0	44.6	125.8

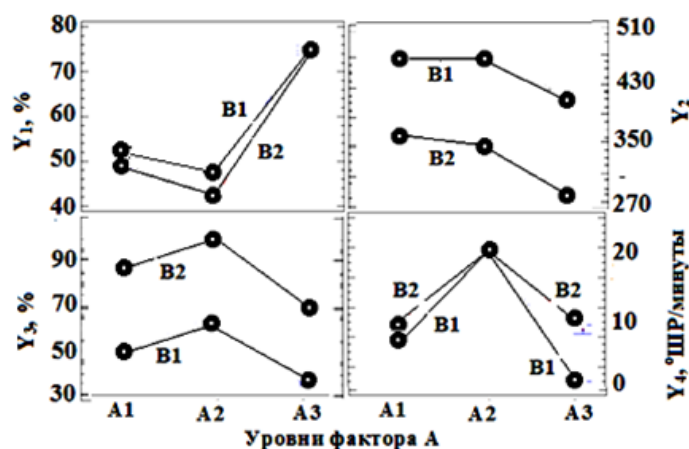


Рис. 1. Зависимость выхода (Y_1) и степени полимеризации целлюлозы (Y_2), доли израсходованного пероксида водорода (Y_3), скорости размола (Y_4) от переменных факторов варки

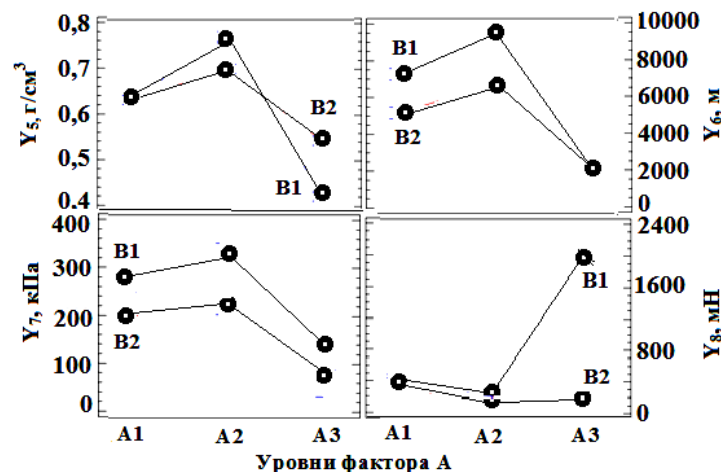


Рис. 2. Зависимость плотности (Y_5), сопротивления разрыву (Y_6), продавливанию (Y_7) и раздиранию (Y_8) отливок от переменных факторов варки

Обсуждение результатов

Использование катализатора (серной кислоты) сопровождалось заметным уменьшением выхода технической целлюлозы из конопляной костры, небольшим снижением – из пшеничной соломы, практически не отразилось на выходе целлюлозы из пеньки (Y_1 на рисунке 1). Степень полимеризации целлюлозы, естественно, заметно уменьшилась под действием серной кислоты, причем почти в одинаковой степени – при варке каждого вида сырья (Y_2 на рисунке 1). Соответственно глубине протекающих процессов (делигнификации, кислотного гидролиза полисахаридов) увеличивается доля израсходованного пероксида водорода, достигая в отдельных случаях почти 98% от его количества, заданного на варку (Y_3 на рисунке 1).

На скорость размола соломенной и костричной целлюлозы серная кислота не повлияла. Скорость размола целлюлозы из пеньки значительно увеличилась в результате воздействия кислоты (Y_4 на рисунке 1).

Почти симбатно со скоростью размола изменяется плотность бумажных отливок (Y_5 на рисунке 2).

Присутствие серной кислоты в варочном растворе привело к существенному снижению прочностных характеристик целлюлозы из пшеничной соломы и конопляной костры, особенно сопротивления разрыву и продавливанию (Y_6 , Y_7 на рисунке 2). Особо следует отметить аномально высокое сопротивление раздиранию целлюлозы из конопляной пеньки, полученной без катализатора, и резкое снижение этого показателя при варке с добавлением катализатора (Y_8 на рисунке 2).

Результаты исследования подтвердили возможность делигнификации стеблей однолетних растений без использования катализаторов. Серная кислота ускоряет образование перуксусной кислоты, которая, в свою очередь, окисляет и разрушает лигнин. Возможно образование перуксусной кислоты и путем прямого ацилирования пероксида водорода уксусной кислотой без участия катализатора, но с меньшей скоростью [9, 19]. Очевидно, этого достаточно для успешной делигнификации благодаря особенностям строения лигнина однолетних растений. Отметим две особенности.

Во-первых, имеются доказательства того, что лигнины злаковых растений принадлежат к классу полимеров с преимущественно линейной топологией макромолекул [20, 21]. Деполимеризация их протекает легче и полнее, чем разрушение сетчатых структур, характерных для макромолекул древесного лигнина.

Во-вторых, при варке стеблей соломы инактивация лигнина выражена очень слабо [10]. Отсутствие конденсационных явлений отмечалось ранее при пероксидной делигнификации осинового дерева, в то время как делигнификация сосновой древесины в тех же условиях сопровождалась весьма значительной инактивацией [22, 23]. Эта особенность обусловлена тем, что хвойные лигнины имеют структуру *G*-типа, поэтому возможно протекание алкил-фенольных конденсационных процессов по пятому положению в ароматическом ядре гваяцильных звеньев, а для лиственных лигнинов характерна структура *GS*-типа, синрингильные фрагменты которой не участвуют в конденсационных процессах по этому механизму. Лигнины стеблей злаковых растений содержат структуры *GSH*-типа [24]. По данным Л.С. Кочевой, в лигнинах

стеблей пшеницы, ржи, овса и ячменя усредненное соотношение мономерных единиц гваяцильного, сиригильного и *п*-кумарового типов составляет соответственно 100 : 80 : 60. Значительная доля сиригильных фрагментов, по-видимому, вносит заметный вклад в обсуждаемую особенность делигнификации однолетних растений.

Заключение

1. Стебли пшеницы и конопли (вероятно, и других злаковых растений) могут быть успешно делигнифицированы водным раствором пероксида водорода и уксусной кислоты без применения катализаторов окисления (серной кислоты и других), благодаря особенностям строения и свойств лигнина этих растений.

2. По ряду свойств пероксидная целлюлоза со степенью помола 32–35 °ШР из стеблей пшеницы и конопли не уступает регламентируемым свойствам сульфатной блененной целлюлозы из древесины лиственных пород (в частности – из осины, марки ОБ-0 и ОБ-3, ГОСТ 14940) со степенью помола 60 °ШР. Это открывает перспективу использования обсуждаемых волокнистых полуфабрикатов в композиции с другими марками технической целлюлозы в бумажно-картонном производстве.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

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. Zia-ullah Khokhar, Syed Q., Nadeem M., Baig S., Irfan M., Gull I., Tipu I., Aslam S., Samra Z.Q., Amin Athar M. Delignification of Wheat Straw with Acid and Hydro-Steam under Pressure // World Applied Sciences Journal. 2010. Vol. 11(12). Pp. 1524–1530.
2. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. Complete characterization of wheat straw // BioResources. 2011. Vol. 6, no. 1. Pp. 154–177. <https://doi.org/10.15376/biores.6.1.154-177>.
3. Wel T., Jiang C., Zhi-qi B., Qi Z., Chang L., Yue G. Analysis and research on papermaking process of corn straw // J. Harbin Univ. Commer. Natur. Sci. Ed. 2015. Vol. 31, no 4. Pp. 458–459, 464.
4. 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. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>.
5. Крупин В.И., Демьяновская Н.В., Кудряшов В.Н. Солома – сырьё для бумажной промышленности // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2010. №3. С. 50–51.
6. 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. 1. Pp. 69–82. <https://doi.org/10.1080/02773819809350126>.
7. Белопухова Ю.Б. Российское коноплеводство 2019. Итоги трехлетки // Третье Всероссийское совещание коноплеводов. М., 2019. URL: <https://www.rosflaxhemp.ru/zhurnal/informacija-i-analiz.html/id/3265>.
8. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Шапиро И.Л. Катализируемая делигнификация растительного сырья пероксидом водорода и пероксидами (обзор) // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 329–347. <https://doi.org/10.14258/jcrpm.2020048119>.
9. Полюттов А.А., Пен Р.З., Бывшев А.В. Технология целлюлозы. Экологически чистое производство. Красноярск, 2012. 294 с.
10. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Пероксидная целлюлоза из однолетних растений. Красноярск, 2022. 144 с.
11. 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.
12. Кузнецов Б.Н., Судакова И.Г., Гарынцева Н.Г., Иванченко Н.М. Состав и применение растворимых продуктов каталитической окислительной делигнификации соломы пшеницы // Химия в интересах устойчивого развития. 2011. №19. С. 527–533.

13. Вураско А.В., Дрикер Б.Н., Галимова А.Р. Получение и свойства окислительно-органо-сольвентной целлюлозы из недревесного растительного сырья // Лесной вестник. 2008. №3. С. 153–156.
14. Pen R.Z., Shapiro I.L., Marchenko R.A. Delignification of wheat straw and hemp shive with peroxidate without catalyst and alkaline pretreating // Proceeding of the International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration”, International Conference (September 30, 2023). Beijing, China, 2023. Part 1. Pp. 127–132. <https://doi.org/10.34660/INF.2023.61.79.295>.
15. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Марченко Р.А. Делигнификация стеблей пшеничной соломы пероксоединениями без катализаторов // Высшая школа: научные исследования. Материалы Межвузовского международного конгресса (Москва, 13 октября 2023 г.). М., 2023. Т. 1. С. 124–129. <https://doi.org/10.34660/INF.2023.64.37.385>.
16. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В., Марченко Р.А. Пероксидная целлюлоза из стеблей пшеницы и конопли // Химия растительного сырья. 2023. №4. С. 415–422. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412954>.
17. Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М., 1991. 320 с.
18. Пен Р.З., Пен В.Р. Статистические методы математического моделирования, анализа и оптимизации технологических процессов. СПб, 2020. 308 с.
19. Пен Р.З., Пен В.Р. Теоретические основы делигнификации. Красноярск, 2007. 348 с.
20. Кочева Л.С., Карманов А.П., Миронов М.В., Белый В.А., Беляев В.Ю., Монаков Ю.Б. Лигнины из соломы: гидродинамические и конформационные свойства макромолекул // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81, №11. С. 1918–1923.
21. Карманов А.П., Кочева Л.С., Миронов М.В., Белый В.А., Беляев В.Ю. Гидродинамические свойства макромолекул лигнина из соломы пшеницы и овса // Химия растительного сырья. 2008. №3. С. 33–38.
22. Пен Р.З., Пен В.Р., Леонова М.О., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Кинетика делигнификации хвойной древесины перуксусной кислотой // Журнал прикладной химии. 1999. Т. 72, №9. С. 1541–1545.
23. Пен Р.З., Пен В.Р., Каретникова Н.В., Шапиро И.Л. Кинетика делигнификации лиственной древесины перуксусной кислотой // Вестник СибГТУ. 1999. №1. С. 76–83.
24. Кочева Л.С. Структурная организация и свойства лигнина и целлюлозы травянистых растений семейства злаковых: дис. ... докт. хим. наук. Сыктывкар, 2007. 381 с.

Поступила в редакцию 16 декабря 2024 г.

Принята к публикации 3 апреля 2025 г.

*Pen R.Z.**, *Shapiro I.L.*, *Karetnikova N.V.* PEROXIDE CELLULOSE FROM WHEAT AND HEMP STEMS: PHYSICAL CHARACTERISTIC

M.F. Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Mira av., 82, Krasnoyarsk, 660049, Russia, robertpen@yandex.ru

The stem of the wheat (*triticum sh.*), hemp and shive from stem of the technical hemp (*cannabis sativa*), stored up in south region Krasnoyarsk edges at period of the completion vegetational period, were delignifying with solution «acetic acid – peroxide hydrogen – sulfuric acid – water». The conditions of the process: initial concentration of the acetic acid 24%, peroxide hydrogen 11.9–15.3%, sulphuric acid 1.5%; the liquid module 6; the temperature isotherm cal processing 93°, length 2.5–4.5 hour. Simultaneously was delignifying vegetable raw material under the same condition, but without addition of the catalyst – sulphuric acid. The purpose of the study: estimation of the influence of the acid on the output and physical (including strengthful) cellulose characteristics from different type vegetable raw material. Two-factor dispersion analyses were used for mathematical treatment. Addition of the catalytic amount of the sulphuric acid to cooking solution brought to reduction of the output, degree polymerization and strengthful characteristics (particularly resistances breakup and forcing through) of the cellulose from wheat straw and hemp shive. Anomalous high resistance of tearing of the cellulose from hemp, received without catalyst, and sharp reduction of this factor at the cooking with catalyst addition was noted. On the milling velocity of the straw and shive cellulose influence sulfuric acid did not noted. The milling velocity from the hemp cellulose increased significantly in result of the influence of the acid action.

Keywords: cellulose, wheat straw, hemp, shive, delignification, hydrogen peroxide.

For citing: Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 343–349. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250216588>.

* Corresponding author.

References

1. Zia-ullah Khokhar, Syed Q., Nadeem M., Baig S., Irfan M., Gull I., Tipu I., Aslam S., Samra Z.Q., Amin Athar M. *World Applied Sciences Journal*, 2010, vol. 11(12), pp. 1524–1530.
2. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. *BioResources*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 154–177. <https://doi.org/10.15376/biores.6.1.154-177>.
3. 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, 464.
4. Sudhagar M., Tabil L.G., Sokhansanj S. *Biomass and Bioenergy*, 2004, vol. 27, pp. 339–352. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.007>.
5. Krupin V.I., Dem'yanovskaya N.V., Kudryashov V.N. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2010, no. 3, pp. 50–51. (in Russ.).
6. Epelde Gonzalo I., Lindgren C.T., Lindstrom M.E. *J. Wood Chem. and Technol.*, 1998, vol. 1, pp. 69–82. <https://doi.org/10.1080/02773819809350126>.
7. Belopukhova Yu.B. *Tret'ye Vserossiyskoye soveshchaniye konoplevodov*. [Third All-Russian conference of hemp growers]. Moscow, 2019. URL: <https://www.rosflaxhemp.ru/zhurnal/informaciya-i-analiz.html/id/3265>. (in Russ.).
8. Pen R.Z., Karetnikova N.V., Shapiro I.L. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 329–347. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020048119>. (in Russ.).
9. Polyutov A.A., Pen R.Z., Byvshev A.V. *Tekhnologiya tsellyulozy. Ekologicheski chistoye proizvodstvo*. [Cellulose technology. Environmentally friendly production]. Krasnoyarsk, 2012, 294 p. (in Russ.).
10. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Peroksidnaya tsellyuloza iz odnoletnikh rasteniy*. [Peroxide cellulose from annual plants]. Krasnoyarsk, 2022, 144 p. (in Russ.).
11. 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.).
12. Kuznetsov B.N., Sudakova I.G., Garyntseva N.G., Ivanchenko N.M. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2011, no. 19, pp. 527–533. (in Russ.).
13. Vurasko A.V., Driker B.N., Galimova A.R. *Lesnoy vestnik*, 2008, no. 3, pp. 153–156. (in Russ.).
14. Pen R.Z., Shapiro I.L., Marchenko R.A. *Proceeding of the International Conference "Scientific research of the SCO countries: synergy and integration", International Conference (September 30, 2023)*. Beijing, China, 2023, part 1, pp. 127–132. <https://doi.org/10.34660/INF.2023.61.79.295>.
15. Pen R.Z., Shapiro I.L., Marchenko R.A. *Vysshaya shkola: nauchnyye issledovaniya. Materialy Mezhevskogo mezhdunarodnogo kongressa (Moskva, 13 oktyabrya 2023 g.)*. [Higher school: scientific research. Proceedings of the Interuniversity International Congress (Moscow, October 13, 2023)]. Moscow, 2023, vol. 1, pp. 124–129. <https://doi.org/10.34660/INF.2023.64.37.385>. (in Russ.).
16. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V., Marchenko R.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 4, pp. 415–422. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20230412954>. (in Russ.).
17. Obolenskaya A.V., Yel'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy*. [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow, 1991, 320 p. (in Russ.).
18. 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.).
19. Pen R.Z., Pen V.R. *Teoreticheskiye osnovy delignifikatsii*. [Theoretical foundations of delignification]. Krasnoyarsk, 2007, 348 p. (in Russ.).
20. Kocheva L.S., Karmanov A.P., Mironov M.V., Belyy V.A., Belyayev V.Yu., Monakov Yu.B. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2008, vol. 81, no. 11, pp. 1918–1923. (in Russ.).
21. Karmanov A.P., Kocheva L.S., Mironov M.V., Belyy V.A., Belyayev V.Yu. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2008, no. 3, pp. 33–38. (in Russ.).
22. Pen R.Z., Pen V.R., Leonova M.O., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1999, vol. 72, no. 9, pp. 1541–1545. (in Russ.).
23. Pen R.Z., Pen V.R., Karetnikova N.V., Shapiro I.L. *Vestnik SibGTU*, 1999, no. 1, pp. 76–83. (in Russ.).
24. Kocheva L.S. *Strukturnaya organizatsiya i svoystva lignina i tsellyulozy travyanistyykh rasteniy semeystva zlakovykh: dis. ... dokt. khim. nauk*. [Structural organization and properties of lignin and cellulose of herbaceous plants of the cereal family: diss. ... Doctor of Chemical Sciences]. Syktyvkar, 2007, 381 p. (in Russ.).

Received December 16, 2024

Accepted April 3, 2025

Сведения об авторах

Пен Роберт Зусевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, robertpen@yandex.ru

Шapiro Ида Львовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, robertpen@yandex.ru

Каретникова Наталья Викторовна – кандидат химических наук, доцент, lorik-krs@mail.ru

Information about authors

Pen Robert Zusevich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Machines and Apparatus of Industrial Technologies, robertpen@yandex.ru

Shapiro Ida L'vovna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, robertpen@yandex.ru

Karetnikova Natalia Viktorovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, lorik-krs@mail.ru