

УДК 676.166

## ПЕРОКСИДНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА ИЗ СТЕБЛЕЙ ПШЕНИЦЫ И КОНОПЛИ

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

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

Стебли пшеницы (*Triticum sh.*), пеньку и костру из стеблей технической конопли (*Cannabis sativa*), древесину пихты (*Abies sibirica*) обрабатывали водным раствором гидроксида натрия (концентрация NaOH – 1 г-моль/дм<sup>3</sup>, гидромодуль – 6, температура – 93 °С, продолжительность – 2 ч), промывали водой и делигнифицировали раствором «уксусная кислота – пероксид водорода – серная кислота – вода» (начальная концентрация уксусной кислоты 6 г-моль/дм<sup>3</sup>, пероксида водорода – также 6 г-моль/дм<sup>3</sup>, серной кислоты – 1.5%; жидкостный модуль – 6; температура изотермической обработки – 93 °С, продолжительность – 210 мин). Одновременно делигнифицировали то же растительное сырье без щелочной предварительной обработки и без сернокислотного катализатора при варке. Цель исследования – оценка влияния названных факторов на выход и свойства целлюлозы. Математическая обработка выполнена методами кластерного и дисперсионного анализов. Щелочная предобработка привела к снижению выхода и степени полимеризации и к увеличению йодного числа только целлюлозы из пшеничной соломы. Добавка каталитического количества серной кислоты к варочному раствору приводила к снижению выхода и степени полимеризации и к увеличению йодного числа целлюлозы из всех видов использованного однолетнего растительного сырья. При подходящем выборе технологических режимов варки возможно получение продукта с характеристиками микрокристаллической целлюлозы (степень полимеризации – не выше 300, йодное число – не менее 10 мг/г) одноступенчатой пероксидной варкой без щелочной предобработки и катализатора.

*Ключевые слова:* целлюлоза, пшеничная солома, конопля, костра, пенька, делигнификация, йодное число, пероксид водорода, перуксусная кислота.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России на выполнение коллективом 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 все больше внимания уделяется получению технической целлюлозы из стеблей однолетних растений, в частности – пшеничной соломы и конопли. При этом в качестве перспективной «зеленой» альтернативы существующим способам делигнификации предлагаются окислительные процессы с использованием пероксосоединений [1–13]. Наибольшее число публикаций посвящено варкам растительного сырья с водными растворами уксусной кислоты и пероксида водорода в присутствии катализаторов – молибденовой и вольфрамовой кислот и их солей, диоксида титана, серной кислоты и других. Катализаторы ускоряют окисление уксусной кислоты пероксидом водорода. Образующаяся перуксусная кислота, в свою очередь, окисляет лигнин с образованием растворимых продуктов.

*Пен Роберт Зусьевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, ведущий научный сотрудник лаборатории глубокой переработки растительного сырья, e-mail: robertpen@yandex.ru

*Шапиро Ида Львовна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории глубокой переработки растительного сырья, 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

*Марченко Роман Александрович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой машин и аппаратов промышленных технологий, e-mail: marchenkora@sibsau.ru

В предлагаемом исследовании в качестве катализатора использовали серную кислоту. Другие катализаторы не применяли ввиду их высокой стоимости (вольфрамат и молибдат натрия [14]) или низкой эффективности (диоксиды титана и кремния

\* Автор, с которым следует вести переписку.

[15]). Серная кислота при повышенных температурах одновременно катализирует гидролитическое разложение легкогидролизуемых полисахаридов, что приводит к снижению выхода технической целлюлозы. Ацилирование пероксида водорода уксусной кислотой возможно без участия катализатора, но достижимая концентрация перуксусной кислоты при этом снижается [15].

К числу особенностей пшеничной соломы относится наличие воскового слоя на поверхности стеблей, из-за которого возможно затруднение делигнификации. Для его удаления рекомендуют обработку соломы раствором гидроксида натрия при температуре до 120 °С [6].

Конопля (*Cannabis sativa L* – конопля обыкновенная) в XIX и начале XX веков в России входила в число основных сельскохозяйственных культур. Но в 1961 г. СССР присоединился к конвенции ООН, запрещавшей выращивать сорта с содержанием наркотических веществ больше 0.2%, и посевы конопли резко сократились. В результате селекционной работы выведены сорта технической конопли, в которой содержание тетрагидроканнабинола и других психоактивных веществ не превышает 0.01%, и в 2011 г. в России было разрешено промышленное выращивание этой культуры. Ожидается, что к 2025 г. посевная площадь достигнет 20 тысяч гектаров, а урожайность конопли составит 8.5 центнера с гектара [16].

При декортикации (механической, химической или биологической обработке конопляной соломы, при которой разрушаются пектиновые вещества) получают тресту, которую механическим способом на мяльных и трепальных машинах разделяют на пеньку и костру. Доля костры составляет около 65% массы тресты, на долю пеньки приходится в среднем 20–25%, достигая в некоторых промышленных сортах 35–40%. Оба продукта, костра и пенька, могут служить сырьем для производства целлюлозной и бумажной продукции, но технологии их переработки различны. С одного гектара конопли можно получить столько же целлюлозы, сколько дают 4–7 гектаров леса. Поле, засеянное коноплей, плодоносит каждый год, в то время как деревьям нужно не менее 20 лет, чтобы достичь необходимой для производства кондиции.

Цель исследования: оценка характера и степени влияния щелочной предобработки и сернокислотного катализа при делигнификации пшеничной соломы и компонентов стеблей конопли в реакционной среде «пероксид водорода–уксусная кислота–сернокислотный катализатор–вода» на выход, степень полимеризации и сорбционную способность (йодное число) целлюлозы. Для сравнения в число объектов исследования включена древесина пихты, используемой целлюлозно-бумажными предприятиями в качестве сырья наряду с другими хвойными породами.

### **Методика и результаты исследования**

Объектом исследования служили стебли пшеничной соломы (*Triticum sh.*), технической конопли (*Cannabis sativa*) марки «Сурская» и пихтовая древесина (*Abies sibirica*), заготовленные в южных районах Красноярского края в период окончания вегетационного периода. Химический состав растительного сырья (массовые доли компонентов, табл. 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 декортикации 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. Древесину вручную измельчили до среднего размера частиц 2×2×20 мм.

Подготовленное воздушно-сухое растительное сырье (сухость – 94...95%) обрабатывали раствором гидроксида натрия. Условия обработки: масса сырья для одного опыта – 4 г; начальная концентрация раствора NaOH – 1 г-моль/дм<sup>3</sup>; жидкостный модуль – 6; температура изотермической обработки – 93 °С, продолжительность – 120 мин.

Отмытый водой от щелочи твердый остаток делигнифицировали раствором «уксусная кислота–пероксид водорода–серная кислота–вода». Варочный раствор готовили смешиванием перечисленных компонентов непосредственно перед варкой. Условия делигнификации (варки): начальные концентрации уксусной кислоты и пероксида водорода 6 г-моль/дм<sup>3</sup> каждого, серной кислоты – 1.5%; жидкостный модуль – 6; температура изотермической обработки – 93 °С, продолжительность – 210 мин. Во всех опытах использовали реагенты (гидроксид натрия, пероксид водорода, уксусную и серную кислоты) марки ХЧ.

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
Пихтовая древесина	49.9	29.4	3.13	0.52

Часть опытов проведена без щелочной предобработки и без добавления серной кислоты. Эксперимент выполнен согласно плану трехфакторного дисперсионного анализа с двумя наблюдениями в группе [18, 19].

Фактор А – вид растительного сырья, четыре уровня варьирования:

А1 – пшеничная солома;

А2 – конопляная пенька;

А3 – конопляная костра;

А4 – пихтовая древесина.

Фактор В – щелочная предобработка, два уровня варьирования:

В1 – с предобработкой;

В2 – без предобработки.

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

С1 – варка с добавлением катализатора;

С2 – варка без катализатора.

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

Y<sub>1</sub> – выход целлюлозы, проценты от массы исходного сырья;

Y<sub>2</sub> – степень полимеризации целлюлозы (вискозиметрия раствора в ЖВНК, ГОСТ 25438);

Y<sub>3</sub> – сорбционная емкость целлюлозы (йодное число, ТУ 9199-005-12043303-2003), мг/г;

Y<sub>4</sub> – концентрация остаточного пероксида водорода в щелоке, %мас.

План эксперимента и результаты наблюдений приведены в таблице 2, статистические характеристики выходных параметров – в таблице 3.

На первом этапе исследования произвели классификацию результатов наблюдений методом кластерного анализа [20]. Вычисления выполнили с использованием пакета программ Statgraphics Centurion XVI, метод Nearest Neighbor, Distance Metric Squared Euclidean; значения выходных параметров в процессе вычислений нормализованы.

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

Номера опытов	Уровни факторов			Выходные параметры			
	А	В	С	Y <sub>1</sub> ,%	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub> , мг/г	Y <sub>4</sub> ,%
1	A1	B1	C1	31.3	108	20	2.48
2	A1	B1	C2	33.3	196	10	0.08
3	A1	B2	C1	41.7	339	11	0.82
4	A1	B2	C2	46.5	471	10	6.46
5	A2	B1	C1	54.0	92	20	0.08
6	A2	B1	C2	60.2	107	14	0.04
7	A2	B2	C1	52.4	85	24	0.88
8	A2	B2	C2	61.2	153	12	0.82
9	A3	B1	C1	35.9	231	17	0.49
10	A3	B1	C2	40.1	315	11	4.88
11	A3	B2	C1	33.9	310	14	0.49
12	A3	B2	C2	43.0	407	11	6.10
13	A4	B1	C1	45.9	531	10	1.35
14	A4	B1	C2	48.2	547	10	6.70
15	A4	B2	C1	43.8	405	9	0.85
16	A4	B2	C2	47.5	685	9	4.75

Таблица 3. Статистические характеристики результатов наблюдений

Характеристики	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
Число наблюдений	32	32	32	32
Среднее значение	44.9	311	14.6	2.32
Минимальная величина	31.2	84	9.0	0.03
Максимальная величина	61.7	748	24.0	6.76
Стандартное отклонение	9.02	186	9.19	2.37
Коэффициент вариации, %	20.0	59.3	33.6	105.2

Результат кластеризации приведен в виде дендрограммы на рисунке 1. Визуально выделяются три кластера. Первый кластер (опыты с номерами 1, 3, 9, 11, 13, 15) – варка всех образцов сырья (за исключением пеньки) без серной кислоты. Второй кластер (опыты 2, 4, 10, 12, 14, 16) – варка того же сырья с добавками серной кислоты. Третий кластер – пенька, в нем выделились два «подкластера» – варка с добавлением серной кислоты (опыты 5 и 7) и без нее (опыты 6 и 8). Характерные свойства выходных параметров в каждом кластере приведены в таблице 4.

В дополнение к кластеризации выполнен трехфакторный дисперсионный анализ результатов наблюдений [18, 19], позволивший уточнить некоторые детали процессов делигнификации.

Рисунок 2 иллюстрирует влияние переменных факторов на выход целлюлозы. Этот показатель связан естественным образом с массовой долей целлюлозы в растительном сырье (табл. 1). Щелочная предобработка привела к заметному уменьшению выхода только целлюлозы из пшеничной соломы; одна из причин этого, вероятно, – удаление воскового слоя с поверхности стеблей и улучшение доступа реагентов к внутренним слоям клеточных стенок. Присутствие серной кислоты в варочном растворе сопровождалось примерно одинаковым уменьшением выхода при варке всех сравниваемых видов сырья, причем независимо от наличия или отсутствия щелочной предобработки.

Аналогично проявилось влияние переменных факторов на степень полимеризации (СП) целлюлозы (рис. 3). Щелочная предобработка сопровождалась заметным уменьшением СП при последующей варке соломенной целлюлозы и практически не повлияла на СП целлюлозы из других видов сырья. Использование каталитического количества серной кислоты при варке во всех случаях снизило СП целлюлозы примерно до одинаковой степени.

Рисунок 4, отображающий зависимость йодного числа (сорбционной способности) целлюлозы от переменных факторов – почти «зеркальное отражение» рисунка 3 (коэффициент линейной корреляции между Y<sub>2</sub> и Y<sub>3</sub> равен –0.74), что согласуется с априорной информацией о взаимосвязи между этими характеристиками целлюлозы.

Более детально обсуждаемая взаимосвязь представлена на рисунке 5. Наиболее «крутые» участки всех кривых приходятся на диапазон степени полимеризации 100–300. У менее разрушенной целлюлозы, при СП 400–800, сорбционная способность не зависит от степени полимеризации.

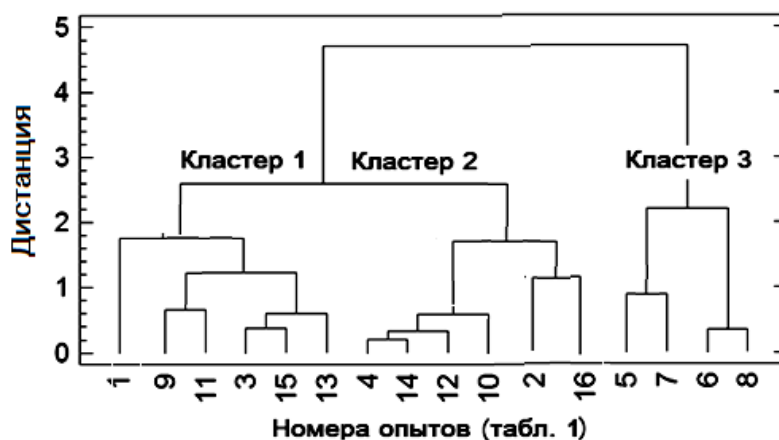


Рис. 1. Дендрограмма кластеризации результатов наблюдений

Таблица 4. Характеристики выходных параметров в кластерах

Выходные параметры	Кластер 1 (опыты 1, 3, 9, 11, 13, 15)		Кластер 2 (опыты 4, 10, 12, 14, 16)		Кластер 3 (опыты 5, 6, 7, 8)	
	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее
Y <sub>1</sub> , %	31.3–45.0	38.9	40.1–47.5	45.1	52.4–61.2	56.9
Y <sub>2</sub>	108–531	338	315–685	485	92–153	109
Y <sub>3</sub> , мг/г	10–20	13	10–12	11	12–24	18
Y <sub>4</sub> , %	0.82–2.48	1.20	4.75–6.46	5.78	0.04–0.88	0.45

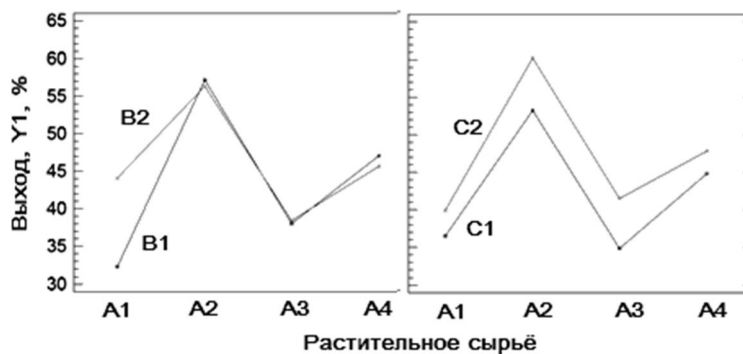


Рис. 2. Влияние вида сырья (уровни А), щелочной предобработки (уровни В) и серной кислоты (уровни С) на выход целлюлозы

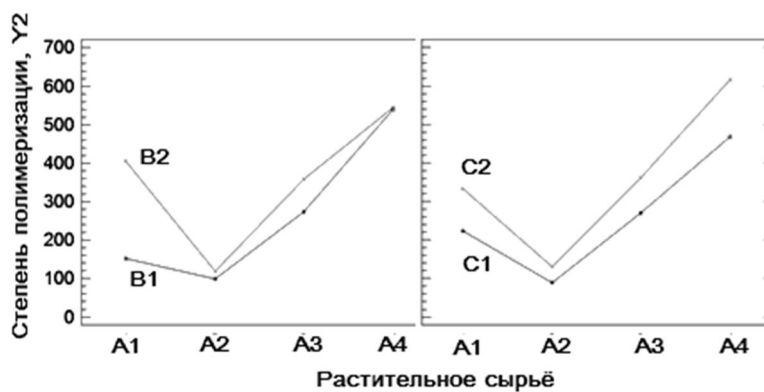


Рис. 3. Влияние вида сырья (уровни А), щелочной предобработки (уровни В) и серной кислоты (уровни С) на степень полимеризации целлюлозы

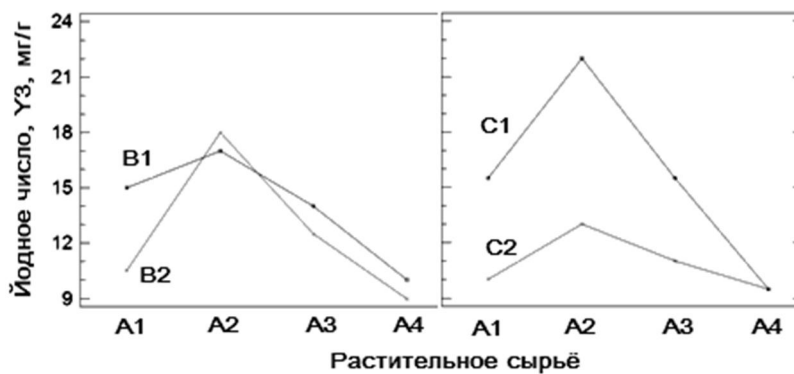


Рис. 4. Влияние вида сырья (уровни А), щелочной предобработки (уровни В) и серной кислоты (уровни С) на йодное число целлюлозы

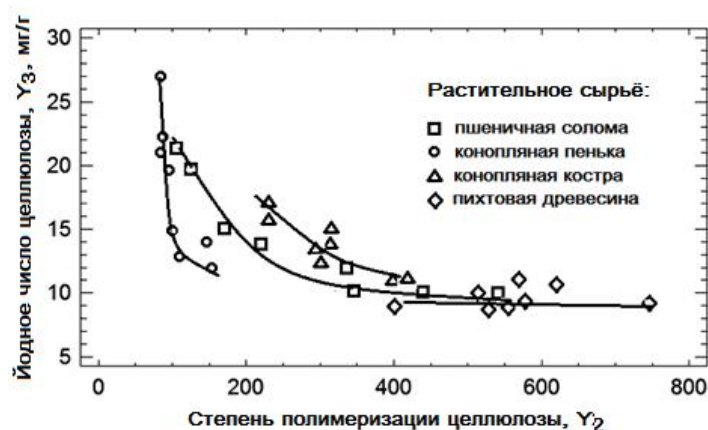


Рис. 5. Взаимосвязь между степенью полимеризации и сорбционной способностью (йодным числом) целлюлозы

Зависимость остаточной концентрации пероксида водорода в щелоче от переменных факторов не имеет простой интерпретации, поскольку пероксид участвует в нескольких реакциях одновременно: окисление уксусной кислоты до перуксусной, окисление компонентов сырья и растворившихся продуктов их разрушения, разложение на воду и кислород и др.

### Заключение

Вопреки сложившемуся мнению, растительное сырьё может быть успешно делигнифицировано пероксидом водорода в среде уксусной кислоты и воды без использования катализаторов. При подходящем выборе технологических режимов варки возможно получение продукта с характеристиками микрокристаллической целлюлозы (степень полимеризации – не выше 300, йодное число – не менее 10 мг/г). Это открывает перспективу создания промышленной одноступенчатой «зеленой» и ресурсосберегающей технологии целлюлозных материалов различного назначения.

*Использовано оборудование Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН. Выражаем благодарность сотрудникам центра коллективного пользования за оказанное содействие при проведении исследований.*

### Список литературы

1. 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.
2. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В., Марченко Р.А. Пероксидная целлюлоза из однолетних растений. Красноярск, 2022. 144 с.
3. Zia-ullah Khokhar, Syed Q., Nadeem M., Baig S., Irfan M., Gul I., Tipu I., Aslam S., Samra Z.Q., Athar M.A. Delignification of Wheat Straw with Acid and Hydro-Steam under Pressure // World Applied Sciences Journal. 2010. N11(12). Pp. 1524–1530.
4. 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.
5. Крупин В.И., Демьяновская Н.В., Кудряшов В.Н. Солома – сырьё для бумажной промышленности // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2010. №3. С. 50–51.
6. 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.
7. 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.
8. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. Complete characterization of wheat straw // BioResources. 2011. Vol. 6. N1. Pp. 154–177.
9. Yimmon B.M., Gogate P.R., Horvath M. Cavitation assisted delignification of wheat straw: A review // Ultrasonics Sonochemistry. 2012. Vol. 19. Pp. 984–993.

10. 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.
11. 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. N4. Pp. 458–459.
12. Вураско А.В., Дрикер Б.Н. Целлюлоза из однолетних растений. Окислительно-органо-сольвентная варка. Saarbrücken, 2004. 129 с.
13. 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/jcprm.20220210688.
14. Пен Р., Каретникова Н., Шапиро И. Пероксидная целлюлоза. Делигнификация растительного сырья пероксидными соединениями. Saarbrücken, 2013. 245 с.
15. 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.
16. Белопухова Ю.Б. Российское коноплеводство 2019. Итоги трехлетки // Третье Всероссийское совещание коноплеводов. Москва, 2019. URL: <https://www.rosflaxhemp.ru/zhurnal/informacija-i-analiz.html/id/3265>.
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. 2-е изд., стереотипное. СПб., 2002. 308 с.
19. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В. Статистические методы анализа процессов целлюлозно-бумажного производства. Красноярск, 2021. 156 с.
20. Дубров А.М., Мхитарян В.С., Трошин Л.И. Многомерные статистические методы. М., 2003. 352 с.

*Поступила в редакцию 12 мая 2023 г.*

*После переработки 27 августа 2023 г.*

*Принята к публикации 27 августа 2023 г.*

**Для цитирования:** 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. DOI: 10.14258/jcprm.20230412954.

*Pen R.Z.\**, *Shapiro I.L.*, *Karetnikova N.V.*, *Marchenko R.A.* PEROXIDE CELLULOSE FROM WHEAT AND HEMP STEMS *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049 (Russia), e-mail: robertpen@yandex.ru*

The wheat stems (*Triticum sh.*), hemp and shive from the technical cannabis (*Cannabis sativa*), wood of Siberia fir (*Abies sibirica*) was processed with the sodium hydrate (concentration NaOH 1 g-mol/dm<sup>3</sup>, liquid module 6, temperature 93 °C, length 2 hours), washed with water and delignified by the “hydrogen peroxide – sulfuric acid – water” solution (initial concentration of the acetic acid 6 g-mol/dm<sup>3</sup>, hydrogen peroxide – also 6 g-mol/dm<sup>3</sup>, sulfuric acid – 1.5% (mass.), liquid module 6, temperature of the isothermal process 93 °C, length 210 minutes). Simultaneously the same vegetable raw material was delignified without alkaline preprocessing and without sulfuric acid catalyst at the cooking. The purpose of the study – estimation of the influence named factors on output and characteristic of the cellulose. Mathematical processing is performed with the methods of the cluster and dispersing analysis. Alkaline preprocessing has brought to reduction of the output and degree polymerization and to increase the iodine number only to celluloses from wheat straw. The additive catalytic amount of the sulfuric acid to cooking solution brought to the reduction of the output and degree polymerization and to increase the iodine number of the cellulose from all type used one-year vegetable raw. Under approaching choice technological cooking conditions it is possible reception of the product with the characteristics microcrystalline celluloses (the degree polymerization not above 300, iodine number not less 10 mg/g) with one-stage peroxide cooking without alkaline preprocessing and catalyst.

*Keywords:* cellulose, wheat straw, cannabis, shive, hemp, delignification, iodine number, hydrogen peroxide, peracetic acid.

---

\* Corresponding author.

## References

1. 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.).
2. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V., Marchenko R.A. *Peroksidnaya tsellyuloza iz odnoletnikh rasteniy*. [Cellulose peroxide from annual plants]. Krasnoyarsk, 2022, 144 p. (in Russ.).
3. Zia-ullah Khokhar, Syed Q., Nadeem M., Baig S., Irfan M., Gul I., Tipu I., Aslam S., Samra Z.Q., Athar M.A. *World Applied Sciences Journal*, 2010, no. 11(12), pp. 1524–1530.
4. Chen Y.M., Wang Y., Wan J.Q., Ma Y.W. *Cellulose*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 329–338.
5. Krupin V.I., Dem'yanovskaya N.V., Kudryashov V.N. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2010, no. 3, pp. 50–51. (in Russ.).
6. 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.).
7. 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.).
8. Singh S., Dutt D., Tyagi C.H. *BioResources*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 154–177.
9. Yimmon B.M., Gogate P.R., Horvath M. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, vol. 19, pp. 984–993.
10. Liu Z., Cao Y., Yao H., Wu S. *BioResources*, 2013, vol. 8, pp. 1306–1319.
11. Wel T., Jiang C., Zhi-qi B., Qi Z., Chang L., Yue G. *J. Harbin Univ. Commer. Natur. Sci. Ed.*, 2015, no. 4, pp. 458–459.
12. Vurasko A.V., Driker B.N. *Tsellyuloza iz odnoletnikh rasteniy. Okislitel'no-organosol'ventnaya varka*. [Cellulose from annual plants. Oxidative-organosolv cooking]. Saarbrücken, 2004, 129 p. (in Russ.).
13. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 2, pp. 299–305. DOI: 10.14258/jcprm.20220210688. (in Russ.).
14. Pen R., Karetnikova N., Shapiro I. *Peroksidnaya tsellyuloza. Delignifikatsiya rastitel'nogo syr'ya peroksoyedineniyami*. [Cellulose peroxide. Delignification of plant raw materials with peroxo compounds]. Saarbrücken, 2013, 245 p. (in Russ.).
15. 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.).
16. Belopukhova Yu.B. *Tret'ye Vserossiyskoye soveshchaniye konoplevodov*. [III All-Russian meeting of hemp breeders]. Moscow, 2019. URL: <https://www.rosflaxhemp.ru/zhurnal/informacija-i-analiz.html/id/3265>. (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. 2-ye izd., stereotipnoye*. [Statistical methods of mathematical modeling, analysis and optimization of technological processes. 2nd ed., stereotypical]. St. Petersburg, 2002, 308 p. (in Russ.).
19. Pen R.Z., Karetnikova N.V., Chendylova L.V. *Statisticheskiye metody analiza protsessov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva*. [Statistical methods for analyzing pulp and paper production processes]. Krasnoyarsk, 2021, 156 p. (in Russ.).
20. Dubrov A.M., Mkhitarjan V.S., Troshin L.I. *Mnogomernyye statisticheskiye metody*. [Multivariate statistical methods]. M., 2003, 352 p. (in Russ.).

Received May 12, 2023

Revised August 27, 2023

Accepted August 27, 2023

**For citing:** Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V., Marchenko R.A. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2023, no. 4, pp. 415–422. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20230412954.