

УДК 676.166

ЦЕЛЛЮЛОЗА ИЗ СТЕБЛЕЙ ПОДСОЛНЕЧНИКА

© Р.З. Пен*, И.Л. Шапиро, Ю.А. Амбросович, Л.В. Чендылова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, пр. Мира, 82, Красноярск, 660049, Россия,
robertpen@yandex.ru

Стебли подсолнечника (*Helianthus annuus*) заготовлены на юге Красноярского края. Наружный (одревесневший) слой и сердцевину (паренхимную ткань) разделяли вручную. Установлена высокая степень неоднородности стеблей: коэффициент вариации массовой доли наружного слоя – до 8%, сердцевины – до 65%. Воздушно-сухой наружный слой измельчали в лабораторном дезинтеграторе (молотковой мельнице), отделяли материал в форме «спичек» длиной 10–20 мм, делигнифицировали водным раствором пероксида водорода и уксусной кислоты при жидкостном модуле 6 и температуре 93 °С. В ходе эксперимента варьировали начальные концентрации пероксида (диапазон варьирования 3.5–4.5 г-моль/л) и кислоты (3–5 г-моль/л), а также продолжительность изотермической варки (3–5 ч). Зависимости общего выхода твердого остатка, непровара и доли израсходованного пероксида водорода от переменных факторов аппроксимировали уравнениями регрессии второго порядка. Уравнения использовали для графического представления результатов. Анализируемые зависимости соответствуют априорной информации. С ростом величины каждого фактора растет доля израсходованного пероксида водорода, уменьшается общий выход твердого остатка и непровара. При выходе 40% и степени помола 30 °ШР целлюлоза имела разрывную длину 7300 м, сопротивление продавливанию – 225 кПа, раздиранию – 230 мН.

Ключевые слова: подсолнечник, делигнификация, целлюлоза, порошковая целлюлоза, пероксидная варка.

Для цитирования: Пен Р.З., Шапиро И.Л., Амбросович Ю.А., Чендылова Л.В. Целлюлоза из стеблей подсолнечника // Химия растительного сырья. 2025. №1. С. 311–317. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250115833>.

Введение

На протяжении последних десятилетий прослеживается тенденция увеличения доли недревесного растительного сырья (в частности, соломы злаковых растений) в сырьевом балансе целлюлозно-бумажных предприятий многих стран с развитой лесохимической промышленностью [1]. Этому способствует ряд обстоятельств: с одной стороны, дефицит древесины 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 растительных побочных продуктов сельскохозяйственного производства, в том числе подсолнечника.

Родиной подсолнечника считаются сухие прерии Северной Америки. В Европу завезен испанцами в 1510 году как декоративное растение. В Россию привезен из Голландии в XVIII веке [2]. Основное использование в настоящее время – получение масла и корма скоту (силоса). Согласно прогнозам, можно ожидать значительное использование стеблей подсолнечника в целлюлозно-бумажной промышленности [3]. В связи с ростом спроса на растительное масло количество выращиваемого подсолнечника ежегодно увеличивается на 10–20% [4]. Площадь посевов в России в 2001–2005 гг. составляла 4.5 млн га [5].

Красноярским НИИСХ выведен сорт «Енисей», районированный для Сибири и Поволжья.

По ботанической классификации подсолнечник *Helianthus annuus* L относится к семейству Астровых. Стебли высотой до 2.5 м состоят из одревесневшего твердого наружного слоя сложного строения (элементы структуры – кожица, пробка, первичная и вторичная кора, камбий, лубяные волокна и др.) и мягкой упругой сердцевины [6].

* Автор, с которым следует вести переписку.

Химический состав наружного слоя по основным компонентам, согласно опубликованным данным разных авторов [7–10], близок к составу стеблей других однолетних растений, в частности, пшеницы (табл. 1). В составе золы преобладают фосфаты, карбонаты, силикаты натрия, кальция, магния [11].

Внутренний слой представляет собой порошковую целлюлозу в виде сферических клеток паренхимной ткани, со степенью кристалличности около 45% [12].

Стебли подсолнечника могут служить сырьем для производства технической целлюлозы – волокнистой (из наружного слоя) и порошковой (внутренний слой) [9, 12]. При этом возможно как предварительное механическое разделение слоев и переработка каждого из них по своей технологии, так и варка измельченных стеблей с последующим разделением волокнистой и порошковой целлюлозы на вибраторе с размером ячеек 150–200 мкм [12].

Цель предлагаемого вниманию исследования – оценить влияние факторов пероксидной делигнификации стеблей подсолнечника (наружной части) на выход и свойства технической целлюлозы.

Методика и результаты исследования

Объектом исследования служили стебли подсолнечника (вся надземная часть, освобожденная от листьев), отбор произведен в южном районе Красноярского края в период сбора созревших соцветий.

Наружный и внутренний слой разделены вручную, высушены и взвешены с целью определения массовых долей этих компонентов в стебле. Результаты измерений и статистические характеристики приведены в таблице 2. Установлена высокая вариабельность обсуждаемого свойства, особенно массовой доли сердцевины (коэффициент вариации – 64%). Величины долей обоих компонентов имеют распределения, близкие к нормальному, на это указывают относительно низкие (меньше статистически значимого уровня 2.0) абсолютные величины асимметрии и эксцесса распределений.

Серия пероксидных варок наружной части стеблей выполнена по режиму, разработанному ранее для делигнификации других видов растительного сырья (стеблей пшеницы, технической конопли, льняной костры) [10]. Этот способ делигнификации относится к числу «зеленых» и энергосберегающих технологий, так как реализуется при температуре ниже 100 °С и атмосферном давлении, при этом не используются соединения серы и хлора (в отличие от сульфатного способа варки с последующей отбелкой целлюлозы).

Воздушно-сухие стебли подсолнечника, освобожденные от внутренней части (сердцевины), измельчали с помощью лабораторного дезинтегратора сухого размола. Для варок использовали фракцию «спичек» длиной 10–20 мм. Делигнификацию осуществляли водным раствором пероксида водорода и уксусной кислоты при жидкостном модуле 6 и температуре 93 °С. В ходе процесса образуется перуксусная кислота, которая, в свою очередь, окисляет лигнин с образованием растворимых продуктов [13]. Варки проводили в стеклянных колбах, снабженных воздушными обратными холодильниками и помещенных в термостат, без перемешивания. В ходе эксперимента варьировали три фактора (в скобках – интервалы варьирования):

X_1 – начальная концентрация пероксида водорода, г-моль/л (3.5–5.5);

X_2 – начальная концентрация уксусной кислоты, г-моль/л (3–5);

X_3 – продолжительность изотермической варки, часы (3–5).

Результаты эксперимента характеризовали следующими выходными параметрами:

Y_1 – выход общий (целлюлоза и непровар), %;

Y_2 – выход непровара, % от исходного сырья;

Y_3 – доля израсходованного пероксида водорода, % от его начального количества.

Переменные факторы варьировали в соответствии с планом эксперимента второго порядка на элементах куба [14]. Условия и результаты опытов приведены в таблице 3.

Таблица 1. Химический состав стеблей подсолнечника (наружного слоя) и пшеницы

Компоненты	Стебли подсолнечника		Стебли пшеницы	
	[8]	[9]	[9]	[10]
Холоцеллюлоза	66.8	67.3	74.7	67.0
Целлюлоза	47.8	41.8	46.3	–
Пентозаны	–	24.4	26.4	27.8
Лигнин	14.4	20.1	18.6	22.8
Спирто-бензольный экстракт	7.48	2.15	5.21	–
Зола	7.99	3.07	4.28	–

Таблица 2. Массовые доли компонентов стеблей подсолнечника

Характеристики	Величины характеристик	
	наружный слой	сердцевина
Объем выборки	10	10
Среднее значение, %	87.7	8.08
Минимум, %	78.2	1.68
Максимум, %	95.7	16.8
Дисперсия	44.2	27.1
Коэффициент вариации, %	7.58	64.4
Асимметрия распределения	-0.47	0.95
Эксцесс распределения	-0.98	-0.21

Таблица 3. Условия и результаты эксперимента

Номера опытов	Переменные факторы			Выходные параметры		
	X ₁ , г-моль/л	X ₂ , г-моль/л	X ₃ , ч	Y ₁ , %	Y ₂ , %	Y ₃ , %
1	5.5	5	5	38.3	0.0	67.6
2	3.5	5	5	36.7	2.4	66.7
3	5.5	3	5	37.0	0.0	49.3
4	3.5	3	5	50.0	26.7	47.9
5	5.5	5	3	38.3	1.0	52.0
6	3.5	5	3	61.3	50.6	50.0
7	5.5	3	3	50.7	32.3	34.7
8	3.5	3	3	68.7	68.7	36.7
9	5.5	4	4	36.7	0.0	60.4
10	5.5	4	4	35.3	0.0	61.0
11	3.5	4	4	49.0	21.0	51.0
12	3.5	4	4	57.0	28.3	52.0
13	4.5	5	4	37.4	0.7	62.9
14	4.5	3	4	47.7	18.3	43.3
15	4.5	4	5	31.0	0.0	62.7
16	4.5	4	3	51.0	30.7	47.6
17	4.5	4	4	41.0	0.0	54.8

Для математической обработки использовали пакет прикладных программ Statgraphics Centurion XVI [14, 15]. Зависимости каждого из выходных параметров от переменных факторов аппроксимировали уравнениями регрессии второго порядка:

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

Статистически незначимые коэффициенты регрессии (при критическом уровне значимости 0.05) исключили из уравнений с пересчетом оставшихся коэффициентов. Значимые коэффициенты, статистические характеристики массива наблюдений и аппроксимации приведены в таблице 4.

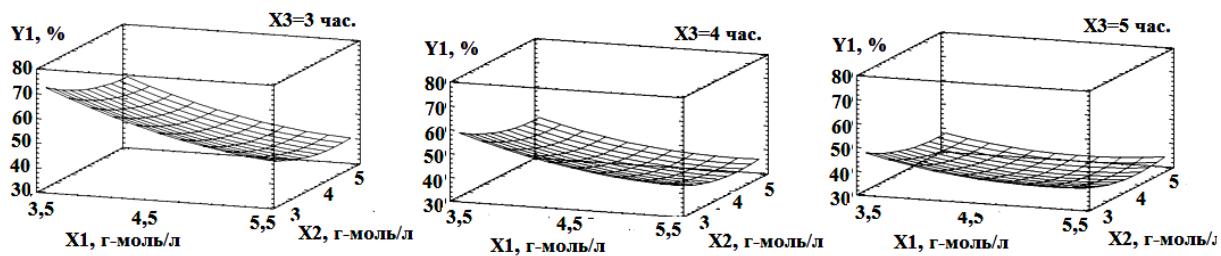
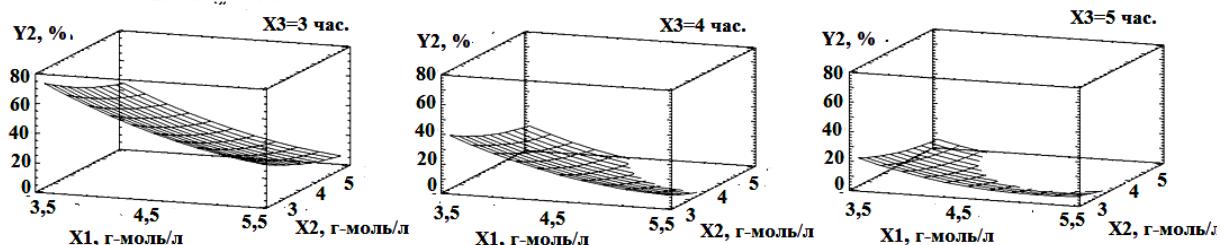
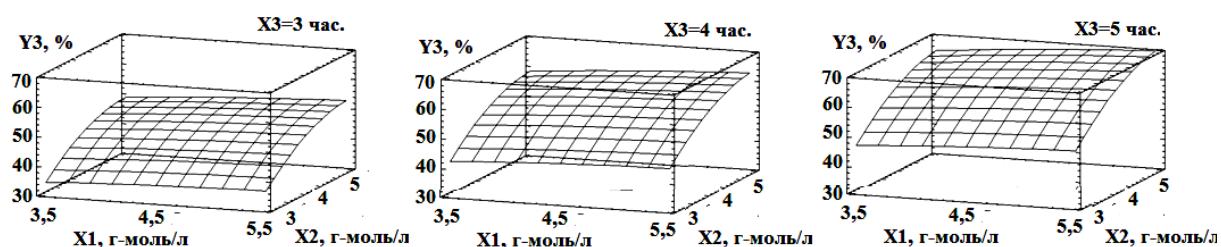
В серии опытов получена волокнистая целлюлоза со средним выходом около 40%. Особого внимания заслуживает факт успешной делигнификации без использования катализаторов окисления, в частности – наиболее часто рекомендуемой для этой цели серной кислоты. Ранее эта возможность установлена при делигнификации стеблей других однолетних растений (пшеницы, технической конопли) [10, 16, 17].

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. В целом анализируемые зависимости соответствуют априорной информации. С ростом величины каждого фактора уменьшается общий выход твердого остатка (рис. 1) и непровара (рис. 2), растет доля израсходованного пероксида водорода (рис. 3).

Для оценки прочностных свойств целлюлозу, сваренную по режиму №17 (табл. 3), размололи в центробежном размалывающем аппарате ЦРА до 30 °ШР и изготовили отливки массой 75 г/м². Результаты испытаний: разрывная длина – 7300 м; удлинение – 22.2%; сопротивление продавливанию – 225 кПа, раздиранию – 230 мН.

Таблица 4. Статистические характеристики результатов наблюдений и уравнений регрессии

Характеристики	Y ₁	Y ₂	Y ₃
Результаты опытов:			
среднее значение	44.8	16.5	52.9
минимальная величина	31.0	0.0	34.7
максимальная величина	68.7	68.7	67.6
стандартное отклонение	10.1	20.8	9.7
коэффициент вариации, %	22.6	126.0	18.2
Уравнения регрессии:			
b_0	358.3	677.8	-81.5
b_1	-57.3	-184.1	2.71
b_2	36.4	-58.2	32.5
b_3	-38.8	-128.9	15.4
b_{11}	3.43	—	—
b_{13}	3.70	7.11	—
b_{22}	—	—	-3.62
b_{33}	—	8.62	—
коэффициент детерминации, R^2 , %	90.8	91.6	91.0
стандартная ошибка аппроксимации	3.2	6.81	2.98
статистика Дарбина-Уотсона	2.67	2.61	2.05

Рис. 1. Зависимость выхода целлюлозы Y₁ от переменных факторов варкиРис. 2. Зависимость выхода непровара Y₂ от переменных факторов варкиРис. 3. Зависимость доли израсходованного пероксида водорода Y₃ от переменных факторов варки

Отмечена легкая размалываемость обсуждаемой целлюлозы. Требуемая степень помола достигнута в течение 3 мин, тогда как для достижения аналогичного результата при размоле 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 [18–20]. Ее связывают с высокой степенью удержания воды и набухаемостью размолотой целлюлозы из-за повышенного содержания гемицеллюлоз, особенно пентозанов. Известна также затрудненная водоотдача соломенной целлюлозой на сетках из-за образования плотного слоя, который оказывает значительное сопротивление фильтрации [18]. По этой причине представляется сомнительной надежность контроля процесса размола целлюлозы из стеблей однолетних растений по скорости водоотдачи при степени помола выше 30 °ШР.

Заключение

По основным показателям пероксидная целлюлоза из стеблей подсолнечника со степенью помола 30 °ШР не уступает регламентируемым свойствам сульфатной беленой целлюлозы из древесины лиственных пород (в частности – из осины, марки ОБ-0 и ОБ-3, ГОСТ 14940) со степенью помола 60 °ШР.

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. Карелина А.А., Алашкевич Ю.Д., Кожухов В.А. Недревесное сырьё как источник целллюлозных волокон. Перспективы использования, проблемы и решения (обзор) // Химия растительного сырья. 2024. №2. С. 55–75. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240213401>.
2. Вавилов П.П., Гриценко В.В., Кузнецов В.С. и др. Растениеводство. М., 1986. 512 с.
3. Rudi H., Resalati H., Eshkiki R.B., Kermanian H. Sunflower stalk neutral sulfite semi-chemical pulp: an alternative fiber source for production of fluting paper // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 127. Pp. 562–566. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.049>.
4. Mehdikhani H., Jalali Torshizi H., Dahmardeh Ghalehno M. Deeper insight into the morphological features of sunflower stalk as Biorefining criteria for sustainable production // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2019. Vol. 34. Pp. 250–263. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0032>.
5. Коломейченко В.В. Растениеводство. М., 2007. 600 с.
6. Васильев Д.С. Подсолнечник. М., 1990. 173 с.
7. Polucek F., Milichovsky M. Rapeseed straw as a possible source of non-wood fiber materials // Cellulose Chemistry and Technology. 2011. Vol. 45, no. 1-2. Pp. 21–28.
8. Ales S., Deniz I., Kirci H. Comparison of pulping and bleaching behaviors of some agricultural residues // Turkish Journal of agricultural and Forestry. 2015. Vol. 39. Pp. 144–153. <https://doi.org/10.3906/tar-1403-41>.
9. Barash V., Trembus S., Alushkin S. Comparative pulping of sunflower stalks // Science Rise. 2016. Vol. 3. Pp. 71–78. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.63098>.
10. Пен Р.З., Шапиро И.Л., Каретникова Н.В. Пероксидная целлюлоза из однолетних растений. Красноярск, 2022. 144 с. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210688>.
11. Ковехова А.В., Арефьева О.Д., Земнухова Л.А. Неорганические компоненты стеблей подсолнечника // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13, №2. С. 220–227. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-220-227>.
12. Патент №2802641C1 (РФ). Способ получения беленой порошковой и волокнистой целлюлозы из растений семейства зонтичных, лубяных культур и отходов их переработки / С.А. Баскаков, О.И. Веселова, В.А. Якимов. – 30.08.2023.
13. Пен Р.З., Пен В.Р. Теоретические основы делигнификации. Красноярск, 2007. 348 с.
14. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics Centurion. Красноярск, 2014. 293 с.

15. Пен Р.З., Пен В.Р. Статистические методы математического моделирования, анализа и оптимизации технологических процессов. СПб, 2020. 308 с.
16. 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.
17. Пен Р.З., Шapiro И.Л., Марченко Р.А. Делигнификация стеблей пшеничной соломы пероксовоединениями без катализаторов // Высшая школа: научные исследования: материалы Международного конгресса (Москва, 13 октября 2023 г.). М., 2023. Т. 1. С. 124–129. <https://doi.org/10.34660/INF.2023.64.37.385>.
18. Фляте Д.М. Бумагообразующие свойства волокнистых материалов. М., 1990. 136 с.
19. Фляте Д.М. Свойства бумаги. М., 1976. 648 с.
20. Непенин Н.Н., Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы. В 3-х томах. Т. 3. Очистка, сушка и отбелка целлюлозы. Прочие способы производства целлюлозы. М., 1994. 594 с.

Поступила в редакцию 18 сентября 2024 г.

После переработки 5 декабря 2024 г.

Принята к публикации 9 января 2025 г.

Pen R.Z.*, Shapiro I.L., Ambrosovich Yu.A., Chendilova L.V. CELLULOSE FROM THE SUNFLOWER STALKS
Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Mira av., 82, Krasnoyarsk, 660049, Russia,
robertpen@yandex.ru

The stalks of the sunflower (*helianthus annuus*) are stored up in the south Krasnoyarsk of the edge. The external layer and the pith (parenchyma fibers) was separated by hand. High degree of the stalks nonhomogeneity was installed: coefficient of variation of the external layer mass part to be taken before 8%, pith – before 65%. The air-dry external layer reduced in laboratory desintegrator (beater mill), the material separated in the form particles length 10–20 mms, delignified with the peroxide hydrogen and acetic acid water solution under liquid module 6 and temperature 93 °C. In the course of experiment varied the initial concentrations peroxide (the range of variation 3.5–4.5 g-mol/l) and acid (3–5 g-mol/l), length of the isothermal cooking (3–5 hours). The dependencies of the total leaving the hard remainder, noncooked and consumed peroxide hydrogen parts from the variable factor approximated with the second order equations of the regression. The equations used for graphic presentation result. The analyses dependencies correspond to a priori information. With growing of the value of each factor grows the part consumed peroxide hydrogen, decreases total leaving the hard remainder and noncooked. When leaving 40% and degree of the grind 30 °SR cellulose had a breakup length 7300 m, forcing through resistance 225 kPa, tearing – 230 mN.

Keywords: sunflower, delignification, cellulose, powdered cellulose, peroxide cooking.

For citing: Pen R.Z., Shapiro I.L., Ambrosovich Yu.A., Chendilova L.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 1, pp. 311–317. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250115833>.

References

1. Karelina A.A., Alashkevich Yu.D., Kozhukhov V.A. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2024, no. 2, pp. 55–75. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20240213401>. (in Russ.).
2. Vavilov P.P., Gritsenko V.V., Kuznetsov V.S. i dr. *Rasteniyevodstvo*. [Plant growing]. Moscow, 1986, 512 p. (in Russ.).
3. Rudi H., Resalati H., Eshkiki R.B., Kermanian H. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 127, pp. 562–566. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.049>.
4. Mehdikhani H., Jalali Torshizi H., Dahmardeh Ghalehno M. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2019, vol. 34, pp. 250–263. <https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0032>.
5. Kolomeychenko V.V. *Rasteniyevodstvo*. [Plant growing]. Moscow, 2007, 600 p. (in Russ.).
6. Vasil'yev D.S. *Podsolnechnik*. [Sunflower]. Moscow, 1990, 173 p. (in Russ.).
7. Polucek F., Milichovsky M. *Cellulose Chemistry and Technology*, 2011, vol. 45, no. 1-2, pp. 21–28.
8. Ales S., Deniz I., Kirci H. *Turkish Journal of agricultural and Forestry*, 2015, vol. 39, pp. 144–153. <https://doi.org/10.3906/tar-1403-41>.
9. Barash V., Trembus S., Alushkin S. *Science Rise*, 2016, vol. 3, pp. 71–78. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2016.63098>.

* Corresponding author.

10. Pen R.Z., Shapiro I.L., Karetnikova N.V. *Peroksidnaya tsellyuloza iz odnoletnikh rasteniy*. [Peroxide cellulose from annual plants]. Krasnoyarsk, 2022, 144 p. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220210688>. (in Russ.).
11. Kovekhova A.V., Aref'yeva O.D., Zemnukhova L.A. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 220–227. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-2-220-227>. (in Russ.).
12. Patent 2802641C1 (RU). 30.08.2023. (in Russ.).
13. Pen R.Z., Pen V.R. *Teoreticheskiye osnovy delignifikatsii*. [Theoretical foundations of delignification]. Krasnoyarsk, 2007, 348 p. (in Russ.).
14. Pen R.Z. *Planirovaniye eksperimenta v Statgraphics Centurion*. [Experimental planning in Statgraphics Centurion]. Krasnoyarsk, 2014, 293 p. (in Russ.).
15. 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.).
16. 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.
17. Pen R.Z., Shapiro I.L., Marchenko R.A. *Vysshaya shkola: nauchnyye issledovaniya. Materialy Mezhvuzovskogo 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.).
18. Flyate D.M. *Bumagoobrazuyushchiye svoystva voloknistykh materialov*. [Paper-forming properties of fibrous materials]. Moscow, 1990, 136 p. (in Russ.).
19. Flyate D.M. *Svoystva bumagi*. [Properties of paper]. Moscow, 1976, 648 p. (in Russ.).
20. Nepenin N.N., Nepenin Yu.N. *Tekhnologiya tsellyulozy. V 3-kh tomakh. T. 3. Ochistka, sushka i otbelka tsellyulozy. Prochiye sposoby proizvodstva tsellyulozy*. [Cellulose technology. In 3 volumes. Vol. 3. Cleaning, drying and bleaching of cellulose. Other methods of cellulose production]. Moscow, 1994, 594 p. (in Russ.).

Received September 18, 2024

Revised December 5, 2024

Accepted January 9, 2025

Сведения об авторах

Пен Роберт Зусьевич – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, robertpen@yandex.ru
Шапиро Ида Львовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, robertpen@yandex.ru

Амбросович Юлия Алексеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, julija-76@mail.ru
Чендылова Лариса Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий, 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 Lvovna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the Department of Machines and Apparatus of Industrial Technologies, robertpen@yandex.ru
Ambrosovich Yulia Alekseevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and Apparatus of Industrial, julija-76@mail.ru
Chendylova Larisa Valерьевна – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and Apparatus of Industrial Technologies, lorik-krs@mail.ru