

3. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 676.16.022.6.034; 676.164.2; 676.166.6

А.В. Вураско, А.Л. Шерстобитов, И.А. Губанов, В.П. Сиваков

ПОЛУЧЕНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ КОМБИНИРОВАННОЙ ВАРКОЙ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ КОНОПЛИ ТЕХНИЧЕСКОЙ

Введение. Техническая целлюлоза и ее производные служат исходным сырьем для многих видов химической продукции: карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), микрокристаллической целлюлозы [Александров и др., 2024; Barbash et al., 2016], искусственного волокна (вискозное, ацетатное, медно-аммиачное), пластмасс, пленок (целлофана) и др. Обычно высококачественные эфиры целлюлозы в производстве ответственных изделий для оборонной промышленности и гражданской продукции изготавливаются из хлопковой целлюлозы. Качество продукции и стабильные свойства хлопковой целлюлозы, поставляемой в Россию из Узбекистана и Казахстана, оставляют желать лучшего [Тихомиров и др., 2001; Смирнов и др., 2011]. При промышленной переработке конопли путем декортикации происходит отделение волокна конопли (пенька) от костры. Костра эффективно перерабатывается натронным способом в тароупаковочные виды бумаги [Агеев и др., 2023], а волокно – в волокнистый материал с высоким содержанием альфа целлюлозы [Вураско и др., 2022а, b]. Для выделения целлюлозы из волокон и костры конопли использовали ступенчатый натронно-сульфатный, ступенчатый натронно-каталитический [Александров и др., 2021], окислительно-органо-растворительный [Вураско и др., 2022b], натронно-антрахиноновый [Александрин и др., 2007], перукусный и пероксидный [Жаретникова и др., 2018] способы. При некоторых способах переработки стеблей конопли костра содержит достаточно большое количество мелкого лубяного волокна, отделив которое, можно получить качественное сырье для получения целлюлозы, например, окислительно-органо-растворительным способом с предварительной щелочной обработкой [Вураско и др., 2023].

Цель работы – оценка эффективности апробации комбинированной двухступенчатой натронной окислительно-органоcольвентной варки отходов переработки конопли технической для получения технической целлюлозы.

Методика исследования. Объекты исследования – лубяное волокно и костра (вегетационный период 2019 г., Ивановская обл.) и отходы переработки конопли технической (вегетационный период 2022 г., Ивановская обл.). Лубяные волокна конопли предварительно разрезали на отрезки длиной 15...20 мм. Костру просеивали и использовали фракции, задержанные на сите с отверстиями диаметром 0,15 см и прошедшие через сито с отверстиями диаметром 0,7 см. Отсортированную фракцию промывали и высушивали. Отходы переработки конопли отделяли от костры просеиванием на вибросортировке ВП-300. Содержание волокон –70%, костры конопли – 30%. Для определения компонентного состава сырья образцы измельчали на лабораторной мельнице. Компонентный состав сырья представлен в табл. 1.

Таблица 1

Компонентный состав растительного сырья

The component composition of vegetable raw materials

Показатели, % от массы абсолютно сухого сырья (а.с.с.)	Конопля техническая		
	отходы переработки	волокно	костра
Массовая доля экстрактивных веществ, растворимых: в ацетоне (ГОСТ 6841); в горячей воде	1,9±0,2	0,4±0,5	1,2±0,5
	3,4±0,2	5,6±0,5	3,3±0,5
Массовая доля целлюлозы Кюршнера-Хоффера [Азаров и др., 2010]	56,7±1,0	68,3±1,0	40,3±1,0
Массовая доля лигнина (ГОСТ 11960)	21,7±0,2	6,6±0,2	25,5±0,2
Массовая доля золы (ГОСТ 18461)	1,1±0,1	2,3±0,1	1,6±0,1

Проведение первой ступени – натронной варки. Натронные варки отходов конопли технической проводили при условиях: гидромодуль – 5:1; расход NaOH – 20...24% в ед. Na₂O, % от а.с.с.; подъем температуры до 170°С – 40 мин; варка при 170 °С – 120 мин.

Проведение второй ступени – окислительно-органоcольвентной делигнификации. Делигнификацию проводили композицией реагентов, содержащей равновесную перуксусную (рПУК), укcусную кислоты и пероксид водорода в заданных соотношениях. Расход композиции (в пересчете на рПУК к а.с.с.) равен 0,8 г/г а.с.с. при гидромодуле 10:1, подъем температуры до ва-

рочной – 15 минут, при температуре варки 90°C варку производили в течение 90 мин. С целью исследования кинетики и процесса варки во время окислительно-органо-сольвентной делигнификации проводили отбор проб волокнистого полуфабриката и варочного раствора. Анализ расходования основных компонентов проводили титрованием тиосульфатом натрия (для рПУК) и перманганатом натрия для пероксида водорода. При оценке кинетических характеристик учтено термическое разложение перуксусной кислоты и H₂O₂.

Полученную целлюлозу анализировали по показателям: влажность (ГОСТ 16932); содержание α-целлюлозы (ГОСТ 6840); содержание лигнина (ГОСТ 11960).

Результаты исследования. Из табл. 1 видно, что компонентный состав волокон конопли существенно отличается от состава костры. Лубяные волокна содержат лигнина в 3,9 раз меньше, а целлюлозы в 1,7 раз больше, чем костра. Остальные компоненты находятся в сопоставимых диапазонах. Отходы переработки конопли содержат лигнин, золу и экстрактивные вещества в количествах, сопоставимых с кострой, а по содержанию целлюлозы значительно превосходят их.

Первая ступень – натронная варка. В ходе натронной варки получен натронный полуфабрикат. Результаты варки представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты натронных варок

The results of natron brews

Показатель	Расход NaOH в ед. Na ₂ O, % от а.с.с.		
	20	22	24
Выход натронного полуфабриката, % от а.с.с.	58,7±0,5	57,7±0,5	57,2±0,5
Содержание лигнина, % от абсолютно сухого натронного полуфабриката	8,9±0,2	7,6±0,2	6,5±0,2

Из табл. 2 видно, что с увеличением расхода щелочи выход натронного полуфабриката и содержание лигнина снижаются. Так, лигнин при самом высоком расходе щелочи снижается до 6,5%, что ниже на 3,5%, чем при щелочной обработке 0,5 н. раствором NaOH 60 мин и органо-сольвентной варке 60 мин с расходом 0,8 г/г а.с.с. [Губанов и др., 2024]. При щелочной варке, в заданных условиях, на один процент удаленного лигнина разрушается от 2,8 до 3,2% углеводов.

Вторая ступень – окислительно-органо-сольвентная делигнификация. В ходе второй ступени получена техническая целлюлоза. Для установления вза-

имосвязи между расходом пероксидных соединений и продолжительностью варки, выходом, содержанием лигнина, α -целлюлозы исследована кинетика процесса окислительно-органосольвентной делигнификации натронного полуфабриката. Изменение концентраций рПУК и H_2O_2 в зависимости от продолжительности делигнификации натронных полуфабрикатов, полученных с расходами 20, 22 и 24 NaOH в ед. Na_2O , % от а.с.с., представлено на рис. 1.

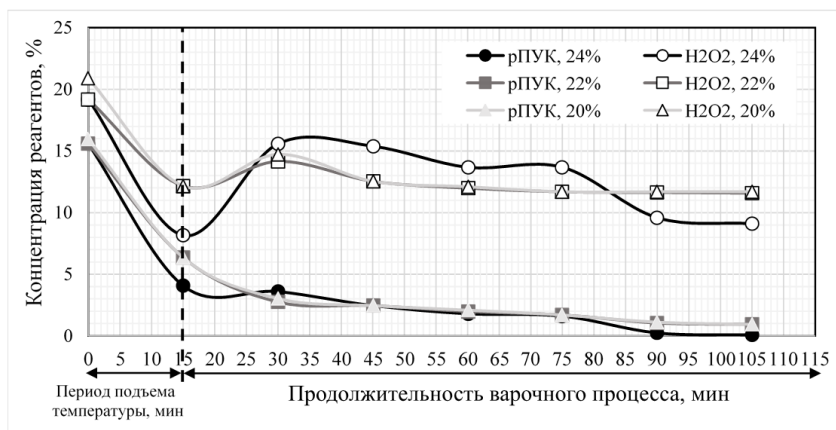


Рис. 1. Зависимость изменения концентрации рПУК и H_2O_2 от продолжительности окислительно-органосольвентной делигнификации натронного полуфабриката

Fig. 1. Dependence of the change in the concentration of RPK and H_2O_2 on the duration of oxidative-organosolvent delignification of a sodium semi-finished product

Из рис. 1 видно, что в период подъема температуры до варочной происходит значительное снижение концентрации варочных компонентов: рПУК снижается в 2,5–3,9 раза, а H_2O_2 – в 1,6–2,3 раза в зависимости от расхода равновесной перуксусной кислоты к абсолютно сухому натронному полуфабрикату. В период подъема температуры происходит проникновение раствора внутрь волокон и сорбция активных компонентов на их поверхности. Особенно это заметно для процесса делигнификации натронного полуфабриката, полученного с расходом 24% от а.с.с. Очевидно, что более делигнифицированная клеточная стенка обладает лучшими сорбционными свойствами (табл. 2).

Основная стадия делигнификации характеризуется равномерным, практически полным расходом рПУК. При делигнификации

натронного полуфабриката, полученного при расходе 24% в ед. Na_2O от а.с.с., расходуется 97% рПУК, а при делигнификации натронного полуфабриката, полученного при расходах 20 и 22% от а.с.с. – 85% рПУК. Концентрация пероксида водорода при достижении температуры основной стадии делигнификации за 15 мин увеличивается в 1,2–1,9 раза и монотонно убывает, аналогично рПУК, до концентраций 9,1–11,7%, или в 1,2–1,7 раза. Таким образом, на протяжении стадии окислительно-органосольвентной делигнификации натронного полуфабриката рПУК является основным делигнифицирующим агентом, а пероксид водорода служит «буферным» источником для поддержания необходимой концентрации рПУК.

Для количественной оценки зависимости скорости делигнификации от продолжительности варки и расхода рПУК были определены константы скорости реакций (K_p). Процесс описывается уравнением реакции I порядка [Галимова и др., 2007]. Данные представлены на рис. 2.

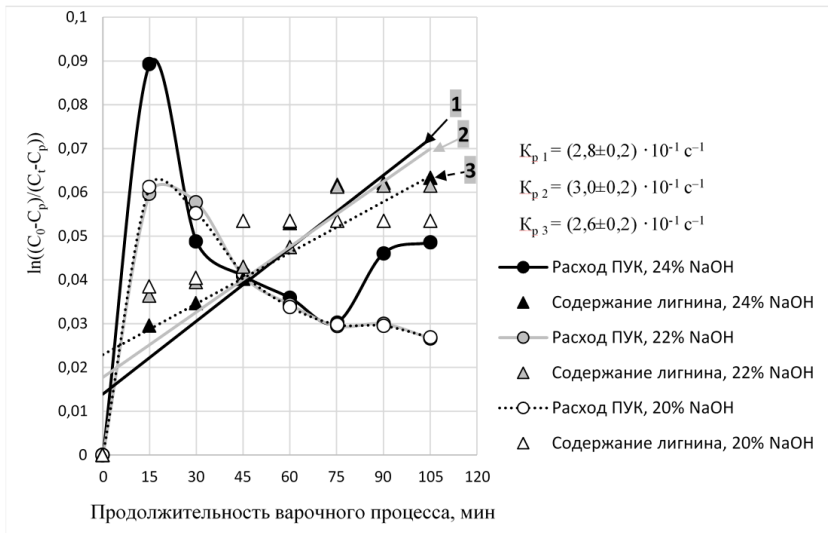


Рис. 2. Зависимость $\ln((C_0 - C_p)/(C_t - C_p))$ от продолжительности органосольвентной делигнификации натронного полуфабриката расходом NaOH в ед. Na_2O 20...24% от а.с. полуфабриката

Fig. 2. In dependence $\ln((C_0 - C_p)/(C_t - C_p))$ from the duration of organosolvent delignification of a sodium semi-finished product with a consumption of NaOH in units of Na_2O 20 % of the total amount of the semi-finished product

Из рис. 2 видно, что более активное расходование рПУК происходит во время подъема температуры в первые 15 мин. Для всех варок средняя константа скорости реакции одинакова с учетом погрешности и равна $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$. Константа скорости реакции при применении на первой ступени натронной варки (температура 170 °С) значительно выше, чем при щелочной обработке с температурой 90 °С – $(3,0) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, [Галимова и др., 2007].

Для оценки влияния стадии натронной варки на результаты органосолевой делигнификации определены выход технической целлюлозы (рис. 3) и массовая доля лигнина в ней (рис. 4).

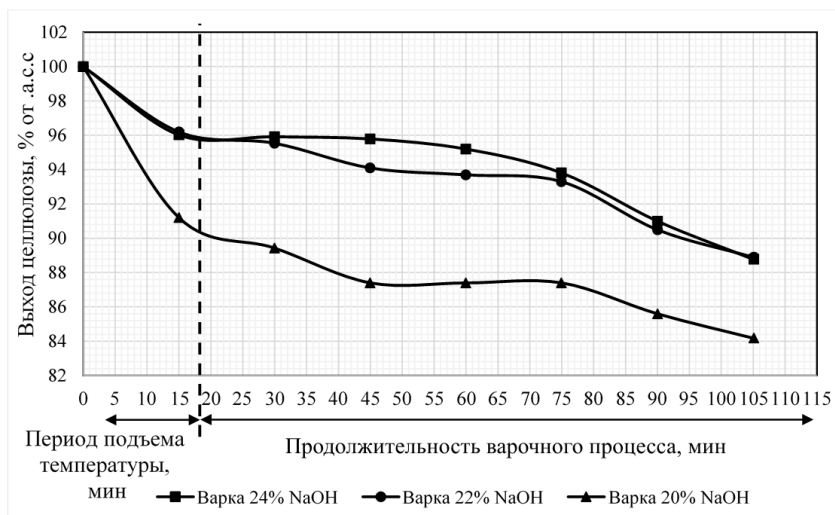


Рис. 3. Зависимость выхода целлюлозы от продолжительности органосолевой делигнификации натронного полуфабриката

Fig. 3. Dependence of the cellulose yield on the duration of organosolvent delignification of a sodium semi-finished product

Из полученных результатов видно, что роль органосолевой делигнификации заключается в удалении остаточного лигнина в мягких условиях процесса (рис. 3, 4).

При натронной варке с расходом 20% в ед. Na_2O от а.с.с. удаляется 59% лигнина. Потери в выходе при органосолевой делигнификации за время подъема температуры составляют около 9%, из них 6,4% приходится на долю лигнина, а при достижении температуры варки потери выхода со-

составляют 3,8% из них на долю лигнина приходится только 1,4%. При натронной варке с расходами 22% и 24% в ед. Na_2O от а.с.с. удаляется в среднем 65 и 70% лигнина соответственно, при органосольвентной делигнификации наблюдается снижение выхода на 4% и лигнина на 4,8 и 3,0% за время подъема температуры до варочной. В период варки от 0 до 75 минут на 1% потери выхода происходит удаление 1% лигнина, то есть во время органосольвентной делигнификации удаляется только лигнин.

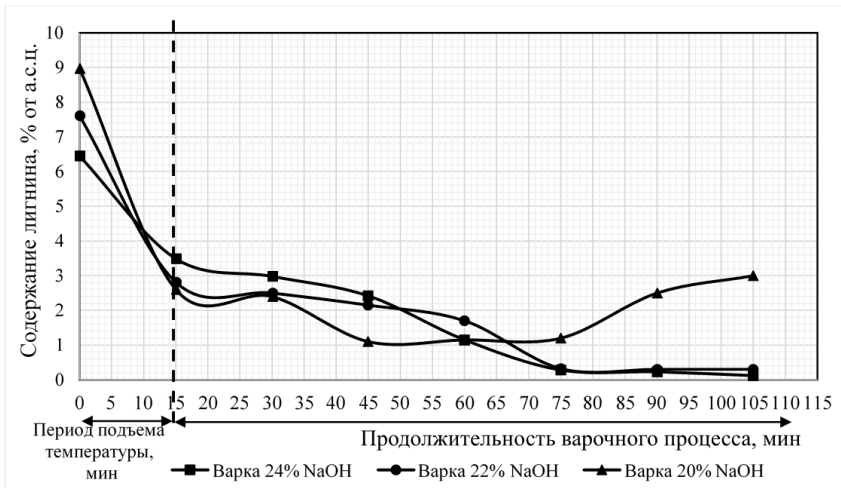


Рис. 4. Зависимости массовой доли лигнина от продолжительности органосольвентной делигнификации натронного полуфабриката

Fig. 4. Dependences of the mass fraction of lignin on the duration of organosolvent delignification of a sodium semi-finished product

Из рис. 3 и 4 следует, что окислительно-органосольвентную делигнификацию следует проводить не более 75 мин.

На рис. 5 представлены гистограммы зависимости выхода технической целлюлозы и содержания α -целлюлозы и лигнина в ней от продолжительности щелочной варки и органосольвентной делигнификации.

Из представленных результатов видно, что при варке отходов переработки конопли с продолжительностью щелочной варки 120 мин при расходе щелочи 24% в ед. Na_2O от а.с.с. и последующей окислительно-органосольвентной делигнификации в течение 30 мин возможно получение технической целлюлозы с выходом 54,9% от массы а.с.с., массовой долей лигнина 3% и α -целлюлозой 88,9% от технической целлюлозы.

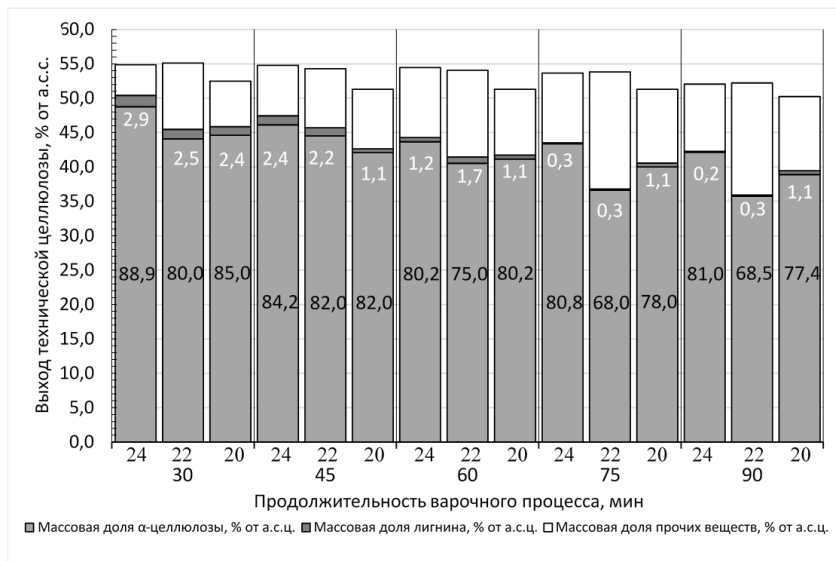


Рис. 5. Зависимости выхода технической целлюлозы и содержание α -целлюлозы и лигнина в ней от продолжительности щелочной варки и органосольвентной делигнификации

Fig. 5. Dependences of the yield of technical cellulose and the content of alpha-cellulose and lignin in it on the duration of alkaline cooking and organosolvent delignification

В состав прочих веществ входят смолистые вещества, гемицеллюлозы и зола в разных соотношениях.

Выводы. Установлено, что на первой ступени (щелочная варка) в заданных условиях на один процент удаленного лигнина разрушается от 2,8 до 3,2% углеводов. Получен натронный полуфабрикат с выходом 58,7; 57,7; 57,2% от а.с.с. и массовой долей лигнина 8,9; 7,6; 6,5% от абсолютно сухого натронного полуфабриката, в зависимости от расхода активной щелочи.

Показано, что на второй ступени в период подъема температуры до варочной происходит значительное снижение концентрации варочных компонентов: рПУК снижается в 2,5–3,9 раза, а H_2O_2 в – 1,6–2,3 раза в зависимости от расхода рПУК к абсолютно сухому натронному полуфабрикату. Основная стадия делигнификации характеризуется полным расходом рПУК.

Выявлено, что для всех окислительно-органо-сольвентных варок средняя константа скорости реакции одинакова с учетом погрешности и равна $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$.

Показано, что при ступенчатой варке отходов переработки конопли с продолжительностью щелочной варки 120 мин при расходе щелочи 24% в ед. Na_2O от а.с.с. и последующей окислительно-органо-сольвентной делигнификации в течение 30 мин возможно получение технической целлюлозы с выходом 54,9% от массы а.с.с., массовой долей лигнина 3% и α-целлюлозой 88,9% от технической целлюлозы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агеев М.А., Вураско А.В., Шерстобитов А.Л., Губанов И.А. Исследование возможности получения тароупаковочных видов бумаги из костры конопли // Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: мат. VII Межд. науч.-тех. конф. им. профессора В.И. Комарова. Архангельск, 2023. С. 70–75.

Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник. СПб: СПбЛТА, 2010. 624 с.

Александрин А.П., Комягин Е.А., Мынин В.Н., Петров В.В., Терпугов Г.В., Терпугов Д.Г. Способ получения целлюлозы из технической конопли. Патент на изобретение RU 2360055 С2, 27.06.2009. Заяв. № 2007103225/12 от 29.01.2007.

Александров А.А., Валишина З.Т., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Ямашев Т.А., Канарский А.В., Дебердеев Р.Я. Сравнительный анализ способов получения целлюлозы из конопляного волокна и оценка ее качества // Вестник технологического университета. 2021. Т. 24, №8. С. 42–45.

Александров А.А., Момзякова К.С., Дебердеев Т.Р., Канарский А.В., Дебердеев Р.Я., Ямашев Т.А., Канарская З.А. Получение микрокристаллической целлюлозы из тресты технической конопли // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 249. С. 297–309. DOI: 10.21266/20794304.2024.249.297-309.

Вураско А.В., Агеев М.А., Дудорова А.Ю., Минакова А.Р. Окислительно-органо-сольвентная делигнификация лубяных волокон конопли технической // Актуальные вопросы химической технологии и защиты окружающей среды: сб. мат. IX Всерос. конф., посвящ. 55-летию Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова. Чебоксары, 2022а. С. 142–143.

Вураско А.В., Агеев М.А., Дудорова А.Ю., Минакова А.Р. Целлюлоза из волокон конопли технической, полученная окислительно-органо-сольвентным способом // Химия и технология растительных веществ: тез. докл. XII Всерос. науч. конф. с межд. уч. и шк. молодых ученых. Киров, 2022b. С. 34.

Вураско А.В., Шерстобитов А.Л., Кривоногов П.С. Получение целлюлозы окислительно-органо-солевным способом из отходов переработки конопли технической // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2023. Т. 3. С. 206–210.

Галимова А.Р., Вураско А.В., Дрикер Б.Н., Земнухова Л.А., Федорищева Г.А. Получение волокнистых полуфабрикатов при комплексной переработке соломы риса // *Химия растительного сырья*. 2007. №3. С. 47-53.

Губанов И.А., Вураско В.А., Вураско А.В. Получение целлюлозы из отходов переработки конопли технической // *Химия. Экология. Урбанистика*. 2024. Т. 2. С. 128-131.

Каретникова Н.В., Чендылова Л.В., Пен Р.З. Делигнификация льняной коры // *Химия растительного сырья*. 2018. №1. С. 155–162. DOI: 10.14258/jcprgm.2018012757.

Смирнов А.А., Серков В.А., Зеленина О.Н. К вопросу общей концепции инновационного развития отечественного коноплеводства. // *Достижения науки и техники АПК*. 2011. №12. С. 34-35.

Тихомиров В.Т., Барашкин В.А., Зеленина О.Н. Перспективы и основные направления использования продуктов переработки конопли // *Сельскохозяйственная биология*. 2001. №5. С. 24-30.

Barbash V., Karakutsa M., Trembus I., Yashchenko O. Development the technology of obtaining microcrystalline cellulose from the hemp fibers // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2016. Vol. 3, no. 6 (81). P. 51-56. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71275.

References

Ageev M.A., Vurasko A.V., Sherstobitov A.L., Gubanov I.A. Investigation of the possibility of obtaining taropackage types of paper from hemp bark. *Problems of mechanics of pulp and paper materials: proceedings of the VII Int. sci.-tech. conf. named after professor V.I. Komarov*. Arkhangelsk, 2023, pp. 70-75. (In Russ.)

Aleksandrin A.P., Komyagin E.A., Mynin V.N., Petrov V.V., Terpugov G.V., Terpugov D.G. Method of obtaining cellulose from industrial hemp. Patent for invention RU 2360055 C2, 06.27.2009. Appl. No. 2007103225/12 dated 01.29.2007. (In Russ.)

Aleksandrov A.A., Valishina Z.T., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Yamashev T.A., Kanarskiy A.V., Deberdeev R.Ya. Comparative analysis of methods for obtaining cellulose from hemp fiber and evaluation of its quality. *Herald of Technological University*, 2021, vol. 24, no. 8. pp. 42-45. (In Russ.)

Aleksandrov A.A., Momzyakova K.S., Deberdeev T.R., Kanarskiy A.V., Deberdeev R.Ya., Yamashev T.A., Kanarskaya Z.A. Obtaining microcrystalline cellulose from technical hemp trusts. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2024, iss. 249, pp. 297-309. DOI: 10.21266/20794304.2024.249.297-309. (In Russ.)

Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. Chemistry of wood and synthetic polymers. Textbook. St. Petersburg: SPbLTA, 2010. p.624.

Barbash V., Karakutsa M., Trembus I., Yashchenko O. Development the technology of obtaining microcrystalline cellulose from the hemp fibers. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2016, vol. 3, no. 6 (81), pp. 51–56. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71275.

Galimova A.R., Vurasko A.V., Driker B.N., Zemnukhova L.A., Fedorishcheva G.A. Production of fibrous semi-finished products in complex processing of rice straw. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2007, no. 3, pp. 47-53. (In Russ.)

Gubanov I.A., Vurasko V.A., Vurasko A.V. Obtaining cellulose from industrial hemp processing waste. *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2024, vol. 2, pp. 128–131. (In Russ.)

Karetnikova N.V., Chendylova L.V., Pen R.Z. Delignification of flax bonfire. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2018, no. 1, pp. 155-162. DOI: 10.14258/jcprm.2018012757. (In Russ.)

Smirnov A.A., Serkov V.A., Zelenina O.N. On the issue of the general concept of innovative development of domestic hemp breeding. *Achievements of science and technology of the Agroindustrial complex*, 2011, no. 12, pp. 34-35. (In Russ.)

Tikhomirov V.T., Barashkin V.A., Zelenina O.N. Prospects and main directions of using cannabis processing products. *Agricultural Biology*, 2001, no. 5, pp. 24–30. (In Russ.)

Vurasko A.V., Ageev M.A., Dudorova A.Yu., Minakova A.R. Oxidative-organosolvent delignification of technical hemp bast fibers. *Actual issues of chemical technology and environmental protection: collection of mat. of the IX All-Russ. conf. dedic. to the 55th anniversary of the Chuvash Republic State University named after I.N. Ulyanov*. Cheboksary, 2022a, pp. 142–143. (In Russ.)

Vurasko A.V., Ageev M.A., Dudorova A.Yu., Minakova A.R. Cellulose from technical hemp fibers obtained by the oxidative-organosolvent method. *Chemistry and technology of plant substances: abstr. of the XII All-Russ. sci. conf. with int. part. and the school of young scientists*. Kirov, 2022b, p. 34. (In Russ.)

Vurasko A.V., Sherstobitov A.L., Krivonogov P.S. Obtaining cellulose by the oxidative-organosolvent method from hemp processing waste. *Chemistry. Ecology. Urbanistics*, 2023, vol. 3, pp. 206–210. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.04.2025

Вураско А.В., Шерстобитов А.Л., Губанов И.А., Сиваков В.П. Получение волокнистых материалов комбинированной варкой отходов переработки конопли технической // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2026. Вып. 257. С. 413–426. DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.413-426

Цель работы – оценка эффективности апробации комбинированной двухступенчатой натронной окислительно-органо-сольвентной варки отходов переработки конопли технической для получения целлюлозы. Компонентный состав сырья: массовая доля смол и жиров – 1,9%, веществ, растворимых в горячей воде – 3,4%, целлюлозы – 56,7%, лигнина – 21,7%, золы – 1,1%. Условия натронной варки: гидромодуль – 5:1; расход NaOH – 20...24% в ед. Na₂O, % от абс. сух. сырья; подъем температуры до 170 °С – 40 мин; варка при 170 °С – 120 мин. Условия окислительно-органо-сольвентной делигнификации: расход равновесной перуксусной кислоты – 0,8 г/г абс. сух. сырья, гидромодуль – 10:1, подъем температуры до варочной – 15 минут, температура варки – 90 °С, продолжительность – 90 мин. На первой ступени (щелочная варка) на один процент удаленного лигнина разрушается от 2,8 до 3,2% углеводов в зависимости от расхода активной щелочи. На второй ступени в период подъема температуры до варочной происходит значительное снижение концентрации варочных компонентов: рПУК снижается в 2,5–3,9 раза, а Н₂О₂ – в 1,6–2,3 раза в зависимости от расхода рПУК к абсолютно сухому натронному полуфабрикату. Основная стадия делигнификации характеризуется полным расходом рПУК. Для всех вариантов окислительно-органо-сольвентной делигнификации константа скорости реакции равна $(2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$. При ступенчатой варке отходов переработки конопли с продолжительностью щелочной варки 120 мин при расходе щелочи 24% в ед. Na₂O от абс. сух. сырья и последующей окислительно-органо-сольвентной делигнификации в течение 30 мин возможно получение технической целлюлозы с выходом 54,9% от массы абс. сух. сырья, массовой долей лигнина 3% и α-целлюлозой 88,9% от технической целлюлозы.

Ключевые слова: ступенчатая варка, органо-сольвентная делигнификация, натронная варка, конопля техническая, α-целлюлоза, лигнин, выход целлюлозы, перуксусная кислота, пероксид водорода.

Vurasko A.V., Sherstobitov A.L., Gubanov I.A., Sivakov V.P. Production of fibrous materials by combined cooking of technical hemp processing waste. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoi Akademii*, 2026, iss. 257, pp. 413–426 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2026.257.413-426

The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of testing combined two-stage sodium oxidative-organosolvent cooking of industrial hemp processing waste for the production of cellulose. The component composition of the raw material: the mass fraction of resins and fats is 1.9%, substances soluble in hot water are 3.4%, cellulose is 56.7%, lignin is 21.7%, ash is 1.1%. Conditions of sodium cooking: hydromodule – 5:1; consumption of NaOH – 20...24% in units of Na₂O, % of abs. dry raw materials; temperature rise to 170 °C – 40 min; cooking at 170 °C – 120 min. Conditions of oxidative-organosolvent delignification: consumption of equilibrium peracetic acid – 0.8 g/g abs. dry raw materials, hydraulic module – 10:1, temperature rise to cooking –

15 min, cooking temperature – 90°C, duration – 90 min. At the first stage (alkaline cooking), 2.8 to 3.2% of carbohydrates are destroyed per one percent of the removed lignin, depending on the consumption of active alkali. At the second stage, during the temperature rise to the cooking point, there is a significant decrease in the concentration of cooking components: RPA decreases by 2.5-3.9 times, and H₂O₂ by 1.6-2.3 times, depending on the consumption of RPA for an absolutely dry soda semi-finished product. The main stage of delignification is characterized by the complete expenditure of RPA. For all variants of oxidative-organosolvent delignification, the reaction rate constant is $(2.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. During step-by-step cooking of cannabis processing waste with an alkaline cooking duration of 120 minutes at an alkali consumption of 24% in units of Na₂O from abs. dry. raw materials and subsequent oxidation-organosolvent delignification within 30 minutes can produce technical cellulose with a yield of 54.9% of the mass of abs. dry raw materials with a mass fraction of lignin of 3% and alpha-cellulose of 88.9% of technical cellulose.

Key words: step cooking, organosolvent delignification, sodium cooking, technical hemp, alpha cellulose, lignin, cellulose yield, peracetic acid, hydrogen peroxide.

ВУРАСКО Алеся Валерьевна – профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

VURASKO Alesya V. – DSc (Technical), Professor, Department of Technology of Pulp and Paper Industries and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

ШЕРСТОБИТОВ Алексей Леонидович – ассистент кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: sherstobitov@l.m.usfeu.ru

SHERSTOBITOV Aleksey L. – Assistant, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: sherstobitov@l.m.usfeu.ru

ГУБАНОВ Иван Александрович – техник-лаборант кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: gubanovia@m.usfeu.ru

GUBANOV Ivan A. – Laboratory Technician, Department of Technologies of Pulp and Paper Production and Polymer Processing, Ural State Forest Engineering University

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: gubanovia@m.usfeu.ru

СИВАКОВ Валерий Павлович – профессор кафедры технологических машин и технологии машиностроения Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

620100, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: sivakovvp@m.usfeu.ru

SIVAKOV Valeriy P. – DSc (Technical), Professor, Department of Technological Machines and Mechanical Engineering Technology, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: sivakovvp@m.usfeu.ru