

ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ
TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING

УДК 676.166.3.041:677.11
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-229-239>

Поступила в редакцию 03.02.2026
Received 03.02.2026

Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский, Е. П. Шишаков

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИСЛОТНО-ЩЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ
НА КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ КОРОТКОГО ВОЛОКНА ЛЬНА-ДОЛГУНЦА**

Аннотация. Представлены результаты исследований влияния двухстадийной кислотно-щелочной обработки на компонентный состав, структуру и показатель белизны короткого волокна льна-долгунца. Предварительная обработка 1,0%-й азотной кислотой в течение 1 ч с последующей щелочной варкой растворами гидроксида натрия с концентрацией 1,0–5,0 % в течение 1–5 ч позволила установить, что увеличение концентрации щелочи и продолжительности варки способствует снижению содержания лигнина с 5,9 до 0,25 % и зольности с 1,2 до 0,3 %, при этом содержание альфа-целлюлозы увеличивается с 84,0 до 95,4 %. Анализ данных показывает, что двухстадийная обработка короткого волокна льна существенно повышает белизну целлюлозы, обеспечивая максимальное увеличение показателя белизны при использовании 5,0%-го раствора щелочи в течение 5 ч обработки. Это связано с интенсивным удалением окрашивающих компонентов – преимущественно лигнина, пигментов и экстрактивных веществ. Полученные результаты свидетельствуют о том, что обработка азотной кислотой обеспечивает ключевые технологические преимущества двухстадийного процесса (малая продолжительность процесса, проведение варки при атмосферном давлении и невысокой температуре) и позволяет повысить эффективность процесса получения целлюлозы высокого качества из короткого льняного волокна.

Ключевые слова: лен-долгунец, короткое волокно, лигнин, делигнификация, азотная кислота, гидроксид натрия, альфа-целлюлоза

Для цитирования. Захарчук, Д. Д. Влияние параметров кислотно-щелочной обработки на компонентный состав короткого волокна льна-долгунца / Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский, Е. П. Шишаков // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя хімічных навук. – 2026. – Т. 62, № 3. – С. 229–239. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-229-239>

D. D. Zakharchuk, V. S. Boltovsky, E. P. Shishakov

Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

**THE EFFECT OF ACID-BASE TREATMENT PARAMETERS
ON THE COMPONENT COMPOSITION OF SHORT FLAX FIBER**

Abstract. The article presents the results of research on the effect of two-stage acid-base treatment on the component composition, structure and whiteness index of short flax fiber provided by the Republican Unitary Industrial and Trading Enterprise “Orsha Flax Processing Plant”. Pretreatment with 1.0 % nitric acid for 1 h followed by alkaline cooking with sodium hydroxide solutions with a concentration of 1.0–5.0 % for 1–5 h made it possible to establish that an increase in alkali concentration and cooking time contributes to a decrease in lignin content from 5.9 to 0.25 % and ash content from 1.2 to 0.3 %, while the content of alpha-cellulose increases from 84.0 to 95.4 %. Data analysis shows that the two-stage processing of short flax fiber significantly increases the whiteness of cellulose, providing a maximum increase in the whiteness index when using 5.0 % alkali solution for 5 h of treatment. This is due to the intensive removal of coloring components, mainly lignin, pigments and extractives. The data obtained indicate that nitric acid treatment provides the key technological advantages of the two-stage process: short process time, cooking at atmospheric pressure and low temperature. These findings make it possible to increase the efficiency of the process for obtaining high-quality cellulose from short flax fiber.

Keywords: flax, short fiber, lignin, delignification, nitric acid, sodium hydroxide, alpha cellulose

For citation. Zakharchuk D. D., Boltovsky V. S., Shishakov E. P. The effect of acid-base treatment parameters on the component composition of short flax fiber. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2026, vol. 62, no. 3, pp. 229–239 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2026-62-3-229-239>

Введение. Одним из крупнотоннажных и востребованных продуктов, получаемых из растительного сырья, является целлюлоза (техническая, микрокристаллическая, наноцеллюлоза и разнообразные продукты ее химической переработки). В настоящее время в качестве сырья для получения целлюлозы используется преимущественно древесина хвойных и лиственных пород.

Целлюлозу получают в основном сульфатным [1], сульфитным [2] методами и их модификациями [3]. Увеличение объемов производства целлюлозы и ужесточение экологических требований обосновывают необходимость постепенного отказа от технологических процессов делигнификации с применением серо- и хлорсодержащих реагентов. Это стимулирует разработку более экологичных альтернативных способов переработки растительного сырья.

Вследствие интенсивно используемых и сокращающихся запасов древесины, возобновление которой происходит длительное время, все большее значение, в том числе для получения целлюлозы высокого качества, приобретают недревесные растительные отходы сельского хозяйства, образующиеся при выращивании, сборе и первичной переработке травянистых, зерновых, масличных и плодовых культур [4–8].

Особый интерес для получения целлюлозы представляют лубяные культуры – лен-долгунец и конопля [9–14].

Конопля в Республике Беларусь не культивируется, а основной лубяной, традиционно возделываемой культурой является лен-долгунец [15].

Лен – это ежегодно возобновляемый, отечественный и экологически чистый ресурс, что делает его перспективным сырьем для применения в различных отраслях промышленности. В связи с растущим мировым спросом на льняное волокно в Республике Беларусь, являющейся одним из крупнейших производителей льна-долгунца, активно проводятся мероприятия по увеличению посевных площадей и расширению сырьевой базы. Особый интерес для химической переработки представляет короткое волокно льна-долгунца, которое является отходом при получении длинного волокна и в настоящее время используется нерационально [16]. Благодаря своему компонентному составу оно может применяться для получения целлюлозы с высоким содержанием альфа-целлюлозы, которая востребована в производстве материалов различного функционального назначения.

Важным этапом обработки льняного волокна при получении целлюлозы является делигнификация – удаление лигнина – неуглеводного биополимера, придающего прочность и жесткость клеточным стенкам растений, а также обеспечивающего их защиту от внешних факторов. Этот процесс необходим для получения высококачественной целлюлозы, пригодной для дальнейшей химической переработки. Изучение различных методов делигнификации растительного сырья позволяет оценить их эффективность и выбрать оптимальный способ для получения льняной целлюлозы с высоким содержанием альфа-целлюлозы и минимальным – лигнина.

Известны исследования, посвященные получению целлюлозы из различных частей льна: волокна [17], костры [18, 19] и соломы [11, 20], которые являются отходами льноперерабатывающей промышленности. Для этих целей были предложены химические (щелочные, кислотные, окислительные и т. д.) [10, 13, 21, 22], биологические (с использованием грибов, бактерий и ферментных препаратов, способных к селективной делигнификации) [23–26], а также комбинированные физико-химические [27–31] методы делигнификации. Несмотря на положительные результаты лабораторных исследований, ни один из предложенных способов до настоящего времени не получил широкого промышленного внедрения. Это связано как с технологической сложностью масштабирования процессов, так и с недостаточной экономической эффективностью, а также отсутствием комплексных решений, сочетающих экологическую безопасность, ресурсосбережение и соответствие требованиям современного производства. Таким образом, актуальной задачей является разработка эффективной и экономически целесообразной технологии переработки льняного сырья, обеспечивающей уменьшение количества стадий и исключение токсичных серо- и хлорсодержащих делигнифицирующих агентов при получении целлюлозного продукта с высоким содержанием альфа-целлюлозы.

Одним из химических методов выделения целлюлозы из растительного сырья является азотнокислый способ, основанный на последовательной обработке сырья разбавленной азотной

кислотой с последующей щелочной экстракцией продуктов окисления и представляющий собой, по сути, двухстадийный азотно-кислотно-щелочной процесс делигнификации. Азотная кислота обеспечивает гидролиз гемицеллюлоз и окислительную деструкцию лигнина с образованием нитролигнина и карбоксилированных фрагментов, которые впоследствии легко растворяются в щелочи. Данный подход может быть особенно эффективен при переработке травянистого сырья и листовенной древесины благодаря их высокой проницаемости, в то время как хвойная древесина из-за плотной структуры плохо поддается пропитке кислотой. Несмотря на выделение токсичных газообразных побочных продуктов (оксиды азота, CO_2 и др.), метод остается перспективным благодаря возможности проведения варки при атмосферном давлении и регенерации реагентов. Ввиду высокой селективности и относительной простоты аппаратного оформления азотнокислый способ рассматривается как потенциально применимый для получения целлюлозы из короткого льняного волокна и других однолетних культур [32–35].

В процессе обработки волокна азотной кислотой основная часть лигнина, пектина и жировых веществ окисляется. Другая часть этих веществ конденсируется и остается в структуре волокна. Такое волокно имеет желтый цвет и непригодно для производства бумаги и целлюлозы для химической переработки. Обработка окисленного льняного волокна раствором гидроокиси натрия позволяет перевести частично окисленный лигнин в водорастворимое состояние. Высокая реакционная способность азотной кислоты по отношению к лигнину определяет основные технологические преимущества процесса – быстроту, умеренную температуру и отсутствие повышенного давления. Сравнительно низкая температура варки и щелочной экстракции способствует уменьшению расхода тепла, а проведение варки при атмосферном давлении позволяет использовать более простое варочное оборудование [36].

Целью данной работы является изучение закономерностей изменения содержания основных компонентов в коротком волокне льна-долгунца после кислотно-щелочной обработки.

Методика эксперимента и методы исследования. В качестве объекта исследования использовали образцы короткого льняного волокна, предоставленные РУПТП «Оршанский льнокомбинат» с исходным содержанием альфа-целлюлозы 84,0 %, лигнина 5,9 % и золы 1,2 %.

Образцы подвергали двухстадийной химической обработке. На первой стадии их обрабатывали 1,0%-м водным раствором азотной кислоты в течение 1 ч при температуре кипения раствора (данные параметры, как нами было установлено ранее [37], обеспечивают частичное удаление лигнина при минимальной деструкции альфа-целлюлозы), на второй – осуществляли щелочную обработку растворами гидроксида натрия в диапазоне концентраций 1,0–5,0 % в течение 1–5 ч при температуре кипения раствора для дальнейшей делигнификации и очистки целлюлозной фракции. Визуально оценивали изменение внешнего вида волокна и определяли содержание лигнина, альфа-целлюлозы, золы по стандартным методикам, принятым в химии и химической технологии растительного сырья [38], и степень белизны [ГОСТ 30437-96]. Относительная погрешность определения содержания компонентов составила ± 2 %.

Результаты и их обсуждение. В процессе кислотно-щелочной обработки волокна происходит растворение продуктов окисления и переход их в раствор. В твердом остатке накапливается целлюлоза.

Изменение содержания альфа-целлюлозы в волокне льна после двухстадийной обработки в зависимости от концентрации раствора щелочи и продолжительности воздействия представлено на рис. 1. Как видно из графика, содержание альфа-целлюлозы в коротком льняном волокне после кислотно-щелочной обработки 1,0%-й азотной кислотой в течение 1 ч и растворами NaOH с концентрацией 1,0–3,0 % в течение первых 3 ч увеличивается: так при обработке 1,0%-м раствором щелочи ее содержание возрастает до 95,4 %; 2,0%-м – до 95,1 %; 3,0%-м – до 93,2 %. Максимум достигается после 3 ч варки. При последующей обработке волокна содержание альфа-целлюлозы начинает незначительно снижаться.

При увеличении концентрации раствора щелочи до 4,0–5,0 % максимальное содержание альфа-целлюлозы – до 91,9 % достигается уже через 2 ч варки при обработке 4,0%-м раствором и 92,2 % – 5,0 %-м, а после 5 ч варки ее содержание падает до 89,3 % (при 4,0%-м растворе) и 89,1 %

(при 5,0%-м растворе). Такая динамика свидетельствует о более интенсивном и жестком воздействии щелочной среды, приводящем не только к эффективному удалению лигнина, но и к частичной деградации целлюлозы при длительной обработке. Наиболее сильное разрушение целлюлозы происходит в конце варки, когда в волокне остается мало лигнина.

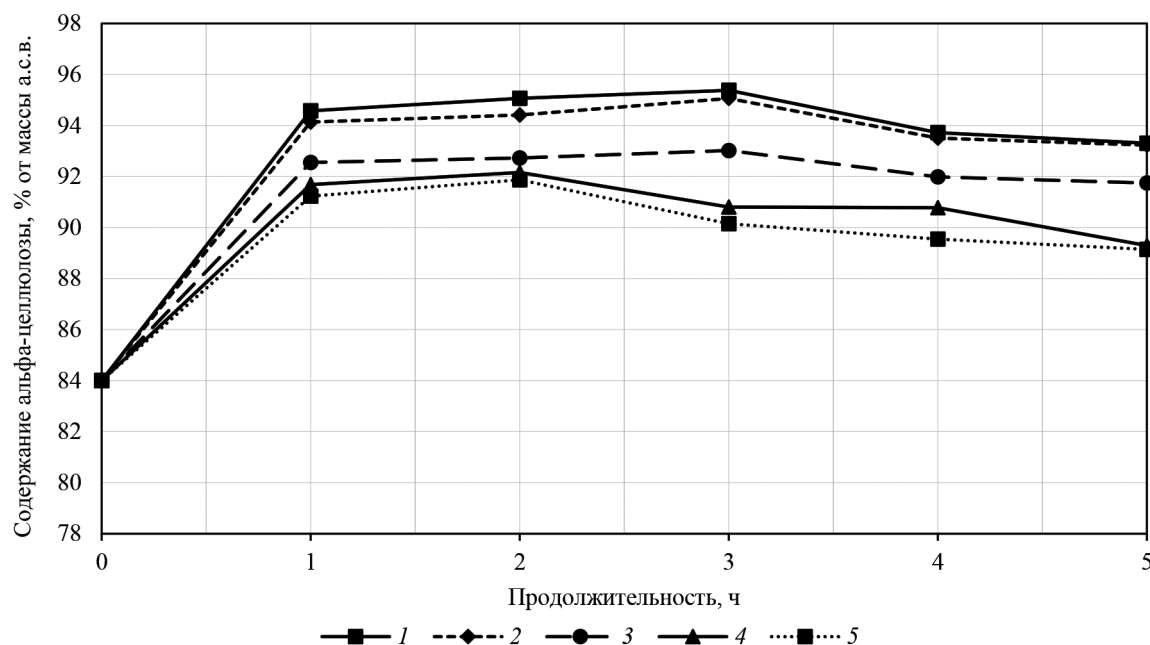


Рис. 1. Изменение содержания альфа-целлюлозы в волокне льна, предварительно обработанном раствором азотной кислоты, в зависимости от продолжительности воздействия раствора гидроксида натрия различной концентрации: 1 – 1,0 %; 2 – 2,0 %; 3 – 3,0 %; 4 – 4,0 %; 5 – 5,0 %

Fig. 1. Changes in alpha-cellulose content in flax fiber, pre-treated with a solution of nitric acid, depending on the duration of treatment with sodium hydroxide solutions of different concentrations: 1 – 1.0 %; 2 – 2.0 %; 3 – 3.0 %; 4 – 4.0 %; 5 – 5.0 %

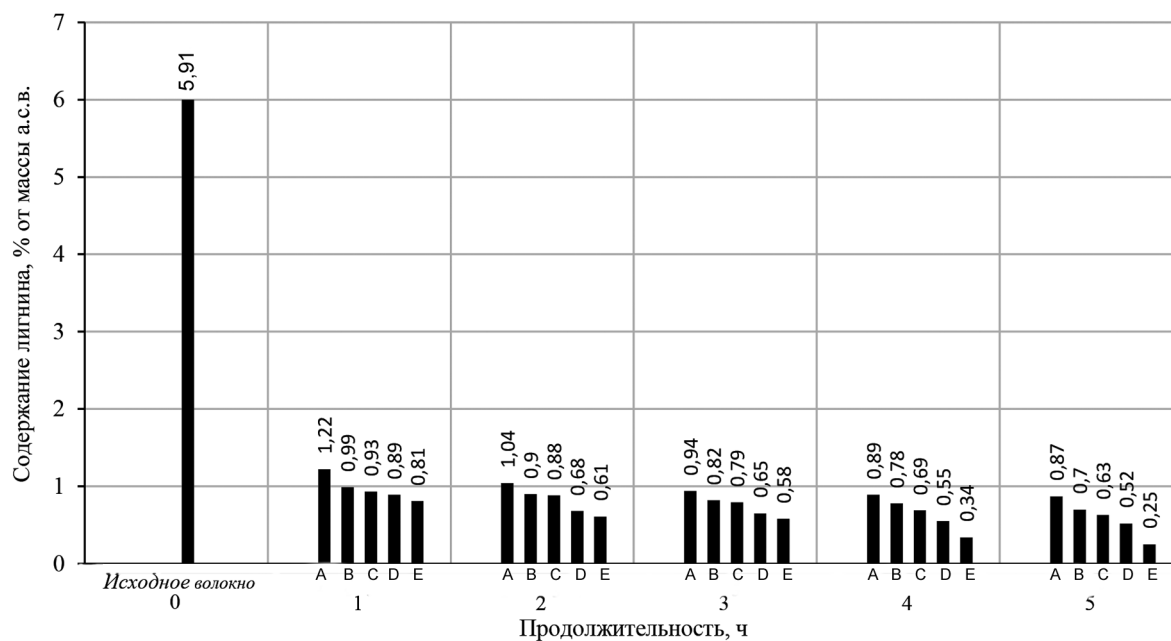


Рис. 2. Изменение содержания лигнина в волокне льна, предварительно обработанном раствором азотной кислоты, в зависимости от продолжительности воздействия раствора гидроксида натрия различной концентрации: А – 1,0 %; В – 2,0 %; С – 3,0 %; D – 4,0 %; E – 5,0 %

Fig. 2. Changes in lignin content in flax fiber, pre-treated with a solution of nitric acid, depending on treatment duration with sodium hydroxide solutions of different concentrations: A – 1.0 %; B – 2.0 %; C – 3.0 %; D – 4.0 %; E – 5.0 %

Изменение содержания лигнина в волокне льна после двухстадийной обработки в зависимости от продолжительности воздействия и концентрации раствора щелочи представлено на рис. 2. При повышении концентрации щелочи и увеличении продолжительности обработки происходит снижение содержания лигнина по сравнению с исходным образцом (5,9 %). При использовании 1,0%-го раствора NaOH содержание лигнина снижается до 0,9 % за 5 ч, 2,0%-го – до 0,7 %, 3,0%-го – до 0,6 %, 4,0%-го – до 0,5 %, 5,0%-го – 0,25 % (минимальное значение).

Предварительная обработка азотной кислотой существенно улучшает доступ щелочи к лигнину за счет его частичного разрушения, обеспечивая более полную делигнификацию. Это свидетельствует о высокой эффективности двухстадийной обработки в удалении лигнина.

В результате двухстадийной химической обработки короткого льняного волокна, включающей кислотную стадию с последующей щелочной обработкой, наблюдается значительное снижение содержания минеральных примесей (зольности). На первой кислотной стадии обработки 1,0%-й азотной кислотой в течение 1 ч наблюдалось интенсивное вымывание водорастворимых минеральных веществ и разрушение минерализованных структур, что обеспечило основное снижение зольности. В конечных образцах содержание золы стабилизировалось в узком диапазоне 0,1–0,3 % ($\pm 0,1$ %), что свидетельствует о высокой воспроизводимости процесса и эффективности удаления минеральных примесей. Таким образом, зольность в продукте снизилась в 4–6 раз по сравнению с исходным значением (1,2 %).

В таблице представлен выход целлюлозного продукта после двухстадийной обработки в зависимости от продолжительности воздействия гидроксида натрия различной концентрации.

**Изменение выхода целлюлозного продукта в зависимости
от продолжительности воздействия гидроксида натрия различной концентрации**

**Change in the yield of the cellulose product depending
on the duration of exposure to sodium hydroxide of different concentrations**

Концентрация раствора гидроксида натрия, %	Выход продукта, % от а. с. в., при продолжительности, ч				
	1	2	3	4	5
1,0	65,97	64,61	62,68	60,76	59,64
2,0	65,00	62,56	60,87	60,60	58,66
3,0	63,14	60,11	59,12	58,42	56,98
4,0	61,44	59,11	57,69	57,31	56,85
5,0	59,89	58,29	56,74	56,50	55,91

При двухстадийной обработке наблюдается постепенное снижение выхода целлюлозного продукта (содержание в нем альфа-целлюлозы и лигнина приведено на рис. 1 и 2) с ростом как концентрации гидроксида натрия, так и продолжительности щелочной варки. При использовании 1,0%-го раствора NaOH выход твердого остатка снижается с 66,0 % (1 ч) до 59,6 % (5 ч), при этом содержание альфа-целлюлозы составляет 96,4 и 93,3 % соответственно. При концентрации раствора щелочи 5,0 % выход твердого остатка снижается с 59,9 до 55,9 % за то же время, а содержание альфа-целлюлозы составляет 91,2 и 89,1 % соответственно. Это свидетельствует об удалении лигнина, гемицеллюлоз и частичной деструкции целлюлозы под действием более агрессивных условий.

Полученная щелочными методами целлюлоза более однородна и имеет высокое содержание альфа-целлюлозы, что подтверждается имеющимися данными [36].

Гемицеллюлозы в ходе исследований не определялись, поскольку под действием растворов минеральных кислот и щелочей при определенных параметрах обработки они почти полностью гидролизуются и удаляются из лигноцеллюлозного сырья [40], вследствие чего их остаточное содержание в конечном продукте незначительно и не требует количественного определения.

В практике оценки целлюлозных материалов наиболее широко применяется показатель белизны ISO (Brightness), определяемый как коэффициент диффузного отражения излучения с длиной волны 457 нм, который отражает степень приближения образца к идеальному белому цвету за счет высокой яркости, способности эффективно рассеивать свет и отсутствия заметного

цветового оттенка. Для измерения белизны целлюлозы применяли фотометрический прибор фотометр «КОЛИР», откалиброванный рабочими проверочными пластинами, источник освещения – А.

Изменение белизны целлюлозы после двухстадийной обработки в зависимости от продолжительности воздействия раствора гидроксида натрия различной концентрации отражено на рис. 3.

Анализ данных показывает, что двухстадийная обработка короткого волокна льна существенно повышает белизну целлюлозы. За первые 2 ч щелочной обработки происходит увеличение данного показателя, достигая максимальных значений при использовании 5,0%-го раствора. Это связано с интенсивным удалением окрашивающих компонентов – преимущественно лигнина, пигментов и экстрактивных веществ.

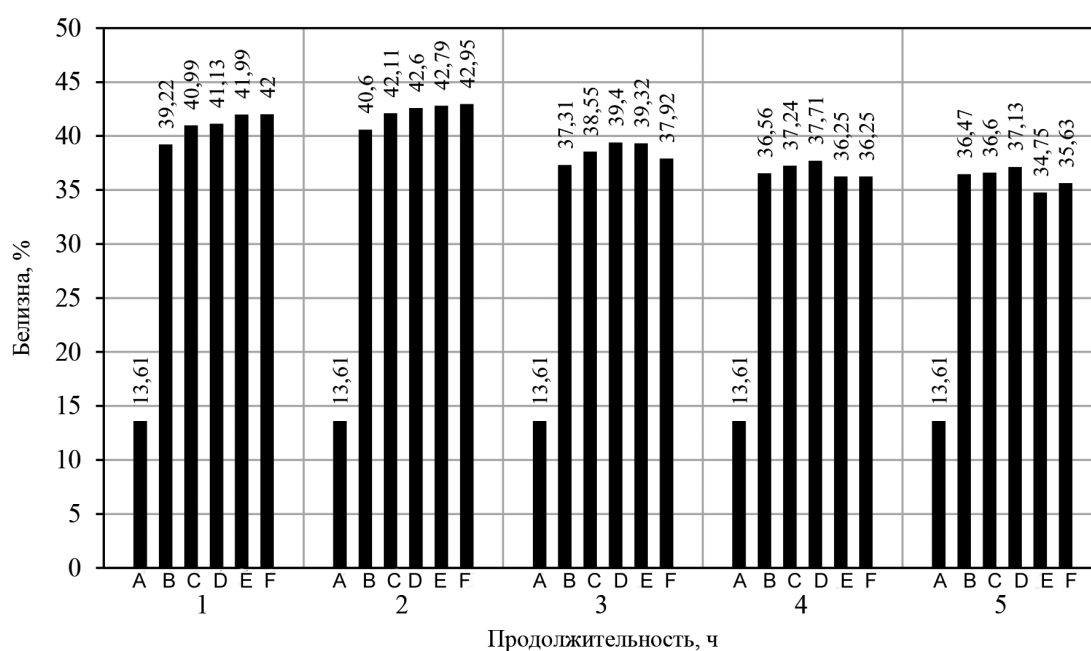


Рис. 3. Изменение белизны целлюлозы в зависимости от продолжительности воздействия раствора гидроксида натрия различной концентрации: А – исходное волокно; В – 1,0 %; С – 2,0 %; D – 3,0 %; E – 4,0 %; F – 5,0 %

Fig. 3. Change in cellulose brightness depending on the duration of treatment with sodium hydroxide solutions of different concentrations: A – untreated fiber; B – 1.0 %; C – 2.0 %; D – 3.0 %; E – 4.0 %; F – 5.0 %

Однако при увеличении продолжительности варки свыше 2 ч происходит постепенное снижение белизны, особенно при повышении концентрации щелочи (4,0–5,0 %): после 3 ч – на 8,1 % (в 1,0%-м растворе); 8,5 % (в 2,0%-м растворе); 7,51 % (в 3,0%-м растворе); 8,1 % (в 4,0%-м растворе); 11,7 % (в 5%-м растворе). Это обусловлено наличием остаточных продуктов деструкции лигнина, которые образуются в результате окислительных процессов, протекающих в щелочной среде при длительном воздействии. В результате проведения обширных исследований было выявлено, что образовавшиеся в процессе делигнификации лигниногенные фенольные соединения при дальнейшем окислении переходят в хиноны, которые придают целлюлозе устойчивый коричневый цвет [39].

На рис. 4 представлен внешний вид льняного волокна исходного и после двухстадийной кислотно-щелочной обработки.

Наблюдается значительное отличие внешнего вида между исходным образцом льняного волокна (рис. 4, а) и образцом, прошедшим двухстадийную обработку (рис. 4, б). Исходное короткое волокно льна-долгунца имеет темный коричнево-серый цвет, что согласуется с ранее полученными данными: содержанием лигнина (5,9 %) и низким значением белизны (13,6 %).

Все образцы, прошедшие двухстадийную кислотно-щелочную обработку, характеризуются светло-серым оттенком, при этом различия между ними по цвету незначительны, но при увели-

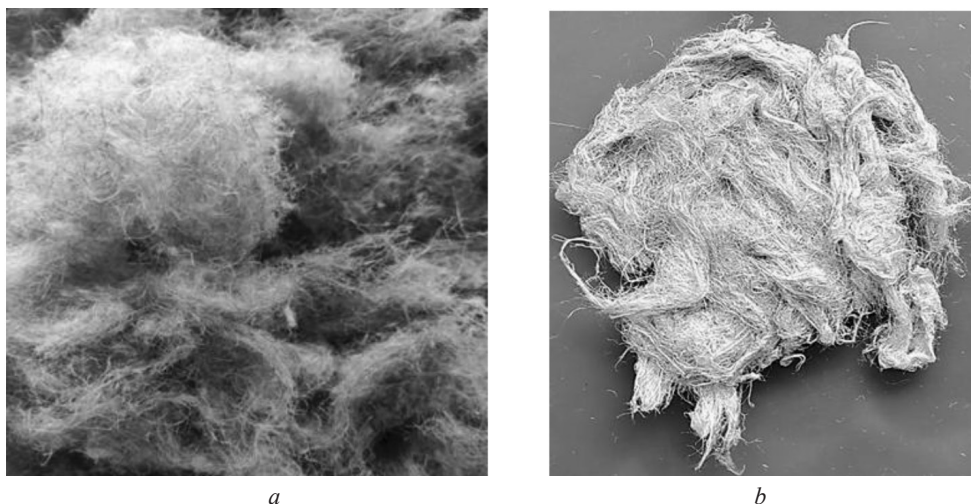


Рис. 4. Внешний вид исходного короткого волокна льна-долгунца (а) и льняного волокна после двухстадийной кислотнo-щелочной обработки (b)

Fig. 4. Appearance of the untreated short fiber of long-stem flax (a), and flax fiber after two-stage acid-base treatment (b)

чении концентрации щелочи и продолжительности варки приобретают более темно-серый цвет, что подтверждается экспериментальными данными о снижении белизны при длительной обработке (например, с 43,0 % при варке в 5,0%-м растворе щелочи 2 ч до 35,6 % при той же концентрации раствора за 5 ч (снижение на 7,4 %)).

Заклучение. Проведенные исследования показали, что двухстадийная кислотнo-щелочная обработка короткого льняного волокна обеспечивает эффективную делигнификацию: остаточное содержание лигнина снижается с 5,9 до 0,25 %. Это сопровождается существенным повышением белизны (до 43,0 %) и интенсивным удалением минеральных примесей (зольность снижается до 0,1–0,3 %).

В то же время установлено, что увеличение концентрации NaOH (4,0–5,0 %) и продолжительности варки свыше 2–3 ч приводит к частичной деструкции целлюлозы, что проявляется в снижении выхода продукта, уменьшении содержания альфа-целлюлозы и падении белизны вследствие образования окрашенных продуктов окисления лигнина и деструкции углеводов.

Таким образом, двухстадийная кислотнo-щелочная обработка короткого льняного волокна является перспективной альтернативой существующим способам получения целлюлозы, обеспечивая высокую степень очистки от лигнина и минеральных примесей, значительное повышение белизны и получение продукта с высоким содержанием альфа-целлюлозы.

Список использованных источников

1. Непенин, Ю. Н. Технология целлюлозы : в 3 т. / Ю. Н. Непенин. – М. : Лес. пром-сть, 1990. – Т. 2 : Производство сульфатной целлюлозы. – 600 с.
2. Непенин, Ю. Н. Технология целлюлозы : в 3 т. / Ю. Н. Непенин. – М. : Лес. пром-сть, 1976. – Т. 1 : Производство сульфитной целлюлозы. – 624 с.
3. Hoenich, N. A. Cellulose for Medical Applications: Past, Present, and Future / N. A. Hoenich // BioResources. – 2006. – Vol. 1, № 2. – P. 270–280. <https://doi.org/10.15376/biores.1.2.270-280>
4. Материалы из нетрадиционных видов волокон: технологии получения, свойства, перспективы применения : монография / Е. Г. Смирнова, Е. М. Лоцманова, Н. М. Журавлева [и др.]. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2020. – 252 с.
5. Ресурсосберегающая технология получения технической целлюлозы из недревесного растительного сырья и области ее применения / А. В. Вураско, Е. И. Симонова, И. Г. Первова, А. Р. Минакова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 2 (30). – С. 21–32.
6. Danielewicz, D. *Miscanthus* × *giganteus* stalks as a potential non-wood raw material for the pulp and paper industry. Influence of pulping and beating conditions on the fiber and paper properties / D. Danielewicz, B. Surma-Slusarska // Industrial Crops and Products. – 2019. – Vol. 141. – Art. 111744. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111744>

7. Meadow hay, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. as potential non-wood raw materials for the pulp and paper industry / M. Holler, A. Lunze, C. Wever [et al.] // *Industrial Crops and Products*. – 2021. – Vol. 167. – Art. 113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>
8. Высококачественные целлюлозы из различного вида сырья и управление процессом их получения / З. Т. Валишина, А. В. Косточко, О. Т. Шипина, А. А. Александров // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – № 21. – С. 29–31.
9. Валишина, З. Т. Целлюлоза на основе альтернативных источников отечественного сырья: целлюлоза из пенькового волокна / З. Т. Валишина, А. А. Александров, Е. Л. Матухин [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2015. – № 2. – С. 259–262.
10. Химический состав волокна и костры лубяных культур и продуктов их щелочной делигнификации / А. А. Корчагина, Е. К. Гладышева, В. В. Будаева, Е. А. Скиба // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 621–630. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630>
11. Гисматулина, Ю. А. Целлюлоза из соломы льна-межеумка / Ю. А. Гисматулина // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. – 2022. – № 3. – С. 377–386. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0301>
12. Manian, A. P. Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: a review / A. P. Manian, M. Cordin, T. Pham // *Cellulose*. – 2021. – Vol. 28, № 13. – P. 8275–8294. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04051-x>
13. Левданский, В. А. Способ получения из льна целлюлозного продукта с высоким содержанием альфа-целлюлозы / В. А. Левданский, А. В. Левданский, Б. Н. Кузнецов // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 63–70.
14. Recent advancements in biological conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products / A. Ji, L. Jia, D. Kumar, C. G. Yoo // *Fermentation*. – 2021. – Vol. 7, № 1. – P. 6. <https://doi.org/10.3390/fermentation7010006>
15. Шаршунов, В. А. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь и пути повышения ее эффективности / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеев, М. В. Цайц // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2019. – № 2. – С. 267–271.
16. Захарчук, Д. Д. Комплексная переработка льна с получением инновационной продукции (обзор) / Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский // *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2024. – № 2. – С. 77–91. <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2024-283-10>
17. Богданова, О. Ф. Особенности получения целлюлозы из льняного волокна моносультитным способом / О. Ф. Богданова, О. А. Горач // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2022. – № 1. – С. 183–187.
18. Каретникова, Н. В. Делигнификация льняной костры / Н. В. Каретникова, Л. В. Чендылова, Р. З. Пен // *Химия растительного сырья*. – 2018. – № 1. – С. 155–162. <https://doi.org/10.1425/8/j.cprm.2018012757>
19. Техническая целлюлоза из костры льна / Н. В. Каретникова, Л. В. Чендылова, Р. З. Пен, А. А. Муравицкая // *Решетневские чтения*. – 2017. – № 21-2. – С. 143–144.
20. Богданова, О. Ф. Переработка льняной соломы механо-химическим способом для получения качественной целлюлозы / О. Ф. Богданова, Т. Н. Головенко, А. В. Князев // *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. – 2015. – Вып. 15, т. 1. – С. 48–56.
21. Закономерности процесса пероксидно-ацетатной делигнификации недревесного целлюлозосодержащего сырья в присутствии сернокислотного катализатора / Д. Ю. Арсеньева, Я. В. Казаков, Е. О. Окулова, А. Ю. Лагунов // *Известия вузов. Лесной журнал*. – 2019. – № 3. – С. 143–151. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.143>
22. Nailemariam, T. T. Production and characterization of pulp and paper from flax straw / T. T. Nailemariam, B. Woldeyes // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – Art. 24300. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74096-y>
23. Захарчук, Д. Д. Изменение содержания основных биополимерных компонентов в коротком волокне льна-долгунца под действием базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 / Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский // *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2025. – № 2 (295). – С. 79–86. <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2025-295-11>
24. Алтекей, А. Б. Биодеградация лигнина соломы культурой гриба *Schizophyllum commune*, выделенной с поверхности дерева / А. Б. Алтекей, А. А. Сапарбекова, Е. А. Олейникова [и др.] // *Микробиология және вирусология*. – 2023. – № 1 (40). – С. 127–138. <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.01.08>
25. Минаков, Д. В. Изучение химического состава субстрата после выращивания некоторых базидиальных грибов / Д. В. Минаков, А. Л. Верещагин, А. А. Синицына // *Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы X Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (Бийск, 24–26 мая 2017 г.)*. – Бийск, 2017. – С. 359–362.
26. Морыганов, П. А. Изучение влияния биодеструкторов на целлюлозу и природные примеси льноволокна / П. А. Морыганов, В. Н. Галашина, О. Ю. Кузнецов // *Химия растительного сырья*. – 2015. – № 2. – С. 225–237. <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502870>
27. Малюшевская, А. П. Получение целлюлозы из льняного волокна с использованием электроразрядной объемной кавитации / А. П. Малюшевская, П. П. Малюшевский, А. Н. Ющишина // *Электронная обработка материалов*. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 49–54. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3747835>
28. Болтовский, В. С. Применение метода автогидролиза-взрыва при переработке растительной биомассы (обзор) / В. С. Болтовский // *Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология*. – 2021. – № 2 (247). – С. 5–12.
29. Putnina, A. Steam explosion as the pretreatment method of lignocellulosic biomass / A. Putnina, S. Kukle, J. Gravitis // *Scientific Journal of Riga Technical University*. – 2012. – № 7. – P. 80–83.

30. Просвирников, Д. Б. Исследование механизма паровзрывного диспергирования лигноцеллюлозного материала / Д. Б. Просвирников, Р. А. Халитов, В. А. Лашков // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 1. – С. 241–243.
31. Зиятдинова, Д. Ф. Разработка опытно-промышленной установки для разделения лигноцеллюлозного материала на компоненты методом высокотемпературного парового гидролиза / Д. Ф. Зиятдинова, Р. Г. Сафин, Д. Б. Просвирников // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 12. – С. 93–101.
32. Гисматулина, Ю. А. Азотнокислый способ получения целлюлозы (обзор) / Ю. А. Гисматулина, В. В. Будаева // Ползуновский вестник. – 2016. – Т. 1, № 4. – С. 174–178.
33. Гисматулина, Ю. А. Получение целлюлозы азотнокислым способом напрямую из соломы льна-межеумка // Ползуновский вестник. – 2014. – № 3. – С. 160–163.
34. Шишонов, М. В. Азотнокислая варка и отбелка котонизированных волокон как способ выделения льняной ваты / М. В. Шишонов, В. И. Шадрин // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2008. – Т. 51, вып. 7. – С. 97–100.
35. Шипина, О. Т. Исследование влияния растворов азотной кислоты на свойства льняной целлюлозы / О. Т. Шипина, М. Р. Гараева, Н. С. Рогова // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 6. – С. 141–147.
36. Никитин, В. М. Теоретические основы делигнификации / В. М. Никитин. – М. : Лес. пром-сть, 1981. – 296 с.
37. Захарчук, Д. Д. Влияние параметров обработки льняного волокна азотной кислотой на содержание основных компонентов / Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2025 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Курск, 9 окт. 2025 г.). – Курск : ЮЗГУ, 2025. – С. 87–90.
38. Оболенская, А. В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская, З. П. Ельницкая, А. А. Леонович. – Мн. : Экология, 1991. – 320 с.
39. Древесина как химическое сырье. История и современность. IV. Делигнификация древесины как путь получения целлюлозы. Часть II / Г. Н. Кононов, А. Н. Веревкин, Ю. В. Сердюкова, В. А. Жукова // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 69–84. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-69-84>
40. Азаров, В. И. Химия древесины и синтетических полимеров : учебник / В. И. Азаров, А. В. Буров, А. В. Оболенская. – 2-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2010. – 624 с.

References

1. Nepenin Yu. N. *Technology of Cellulose. Vol. 2. Production of Kraft Pulp.*, Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 600 p. (in Russian).
2. Nepenin Yu. N. *Technology of Cellulose. Vol. 1. Production of Sulfite Pulp.* Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 624 p. (in Russian).
3. Hoenich N. A. Cellulose for Medical Applications: Past, Present, and Future. *BioResources*, 2006, vol. 1, no. 2, pp. 270–280. <https://doi.org/10.15376/biores.1.2.270-280>
4. Smirnova E. G., Lotsmanova E. M., Zhuravleva N. M., Reznik A. S., Vurasko A. V., Driker B. N., Minakova A. R., et al. *Materials from Non-Traditional Fiber Types: Production Technologies, Properties, and Application Prospects*. Yekaterinburg, Ural State Forest Technical University, 2020. 252 p. (in Russian).
5. Vurasko, A. V., Simonova, E. I., Pervova, I. G., Minakova, A. R. Resource-Saving Technology for Producing Technical Cellulose from Non-Wood Plant Raw Materials and Its Application Areas. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = PNRPU Bulletin, Applied ecology. Urban development*, 2018, no. 2 (30), pp. 21–32 (in Russian).
6. Danielewicz, D., Surma-Slusarska, B. *Miscanthus × giganteus* stalks as a potential non-wood raw material for the pulp and paper industry. Influence of pulping and beating conditions on the fiber and paper properties. *Industrial Crops and Products*, 2019, vol. 141, art. 111744. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111744>
7. Holler M., Lunze A., Wever C., Deutschle A. L., Stucker A., Fras N., Pestsova, E., Spiess A. C., Westhoff P., Pude R. Meadow hay, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. as potential non-wood raw materials for the pulp and paper industry. *Industrial Crops and Products*, 2021, vol. 167, art. 113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>
8. Valishina, Z. T., Kostochko, A. V., Shipina, O. T., Aleksandrov, A. A. High-Quality Celluloses from Various Raw Materials and Process Control of Their Production. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, no. 21, pp. 29–31 (in Russian).
9. Valishina Z. T., Aleksandrov A. A., Matukhin E. L., Khramova E. V., Kostochko A. V. Cellulose Based on Alternative Domestic Raw Materials: Cellulose from Hemp Fiber. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, no. 2, pp. 259–262 (in Russian).
10. Korchagina A. A., Gladysheva E. K., Budaeva V. V., Skiba E. A. Chemical Composition of Bast Fiber and Shives of Bast Crops and Products of Their Alkaline Delignification. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 621–630 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-4-621-630>
11. Gismatulina Yu. A. Cellulose from Intermediate Flax Straw. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2022, no. 3, pp. 377–386 (in Russian). <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0301>
12. Manian A. P., Cordin M., Pham T. Extraction of cellulose fibers from flax and hemp: a review. *Cellulose*, 2021, vol. 28, no. 13, pp. 8275–8294. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-04051-x>

13. Levdansky V. A., Levdansky A. V., Kuznetsov B. N. Method for Producing a Cellulosic Product from Flax with High Alpha-Cellulose Content. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya = Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 63–70 (in Russian).
14. Ji A., Jia L., Kumar D., Yoo C. G. Recent advancements in biological conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products. *Fermentation*, 2021, vol. 7, no. 1, p. 6. <https://doi.org/10.3390/fermentation7010006>.
15. Sharshunov V. A., Alekseenko A. S., Tsayts M. V. Status of the Flax Industry in the Republic of Belarus and Ways to Improve Its Efficiency. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi selskokhozyaystvennoi akademii = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*, 2019, no. 2, pp. 267–271 (in Russian).
16. Zakharchuk D. D., Boltovsky V. S. Integrated Processing of Flax to Obtain Innovative Products (Review). *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. 2, Khimicheskiye tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya = Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2024, no. 2, pp. 77–91 (in Russian). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2024-283-10>
17. Bogdanova O. F., Gorach O. A. Features of Cellulose Production from Flax Fiber by the Monosulfite Method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti = Proceedings of Higher Educational Institutions. Textile Industry Technology*, 2022, no. 1, pp. 183–187 (in Russian).
18. Karetnikova N. V., Chendylova L. V., Pen, R. Z. Delignification of Flax Shives. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2018, no. 1, pp. 155–162 (in Russian). <https://doi.org/10.1425 8/j cprm.2018012757>
19. Karetnikova N. V., Chendylova L. V., Pen R. Z., Muravitskaya A. A. Technical Cellulose from Flax Shives. *Reshetnev Readings*, 2017, no. 21-2, pp. 143–144 (in Russian).
20. Bogdanova O. F., Golovenko T. N., Knyazev A. V. Mechanochemical Processing of Flax Straw for High-Quality Cellulose Production. *Pratsi Tavriis'kogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu*, 2020, iss. 15, vol. 1, pp. 48–56 (in Russian).
21. Arsen'yeva D. Yu., Kazakov Ya. V., Okulova E. O., Lagunov A. Yu. Regularities of Peroxide-Acetate Delignification of Non-Wood Cellulosic Raw Materials in the Presence of Sulfuric Acid Catalyst. *Lesnoy zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, no. 3, pp. 143–151 (in Russian). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.3.143>
22. Hailemariam T. T., Woldeyes B. Production and characterization of pulp and paper from flax straw. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. 24300. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74096-y>
23. Zakharchuk D. D., Boltovskiy V. S. Changes in the Content of Main Biopolymer Components in Short Fibers of Long-Stem Flax under the Action of the Basidiomycete Fungus *Sporotrichum pulverulentum* BIM F-111. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. 2, Khimicheskiye tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya = Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 79–86 (in Russian). <https://doi.org/10.52065/2520-2669-2025-295-11>
24. Altekey A. B., Saparbekova A. A., Oleinikova E. A., Seitmagzimov A. A., Mambaeva A. Sh. Biodegradation of Straw Lignin by a Culture of the Fungus *Schizophyllum commune* Isolated from Tree Surface. *Mikrobiologiya i virusologiya = Microbiology and Virology*, 2023, no. 1 (40), pp. 127–138 (in Russian). <https://doi.org/10.53729/MV-AS.2023.01.08>
25. Minakov D. V., Vereshchagin A. L., Sinitsyna A. A. Study of the Chemical Composition of Substrate after Cultivation of Certain Basidiomycete Fungi. *Tekhnologii i oborudovaniye khimicheskoy, biotekhnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti : materialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem* [Technologies and Equipment for Chemical, Biotechnological and Food Industries : Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation]. Biysk, 2017, pp. 359–362 (in Russian).
26. Moryganov P. A., Galashina V. N., Kuznetsov O. Yu. Study of the Effect of Biodegraders on Cellulose and Natural Impurities in Flax Fibers. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of Plant Raw Materials*, 2015, no. 2, pp. 225–237 (in Russian). <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502870>
27. Malyushevskaya A. P., Malyushevskiy P. P., Yushchishina A. N. Production of Cellulose from Flax Fiber Using Electrical Discharge Volume Cavitation. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic Processing of Materials*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 49–54 (in Russian). <https://doi.org/10.5281/zenodo.3747835>
28. Boltovskiy V. S. Application of Steam Explosion Autohydrolysis in Plant Biomass Processing (Review). *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. 2, Khimicheskiye tekhnologii, biotekhnologii, geoekologiya = Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 5–12 (in Russian).
29. Putnina A., Kukle S., Gravitis J. Steam explosion as the pretreatment method of lignocellulosic biomass. *Scientific Journal of Riga Technical University*, 2012, no. 7, pp. 80–83.
30. Prosvirnikov D. B., Khalitov R. A., Lashkov V. A. Study of the Mechanism of Steam Explosion Dispersing of Lignocellulosic Material. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2014, no. 1, pp. 241–243 (in Russian).
31. Ziatdinova D. F., Safin R. G., Prosvirnikov D. B. Development of a Pilot-Scale Unit for Fractionating Lignocellulosic Material by High-Temperature Steam Hydrolysis. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2011, no. 12, pp. 93–101 (in Russian).
32. Gismatulina Yu. A., Budaeva V. V. Nitric Acid Method for Cellulose Production (Review). *Polzunovskiy vestnik*, 2016, no. 4, vol. 1, pp. 174–178 (in Russian).
33. Gismatulina Yu. A. Direct Nitric Acid Production of Cellulose from Intermediate Flax Straw. *Polzunovskiy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 160–163 (in Russian).
34. Shishonok M. V., Shadrina V. I. Nitric Acid Cooking and Bleaching of Cottonized Fibers as a Method for Isolating Flax Wool. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 2008, vol. 51, iss. 7, pp. 97–100 (in Russian).

35. Shipina O. T., Garaeva M. R., Rogova N. S. Study of the Effect of Nitric Acid Solutions on Flax Cellulose Properties. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*, 2009, no. 6, pp. 141–147 (in Russian).
36. Nikitin V. M. *Theoretical Foundations of Delignification*. Moscow, Forest Industry Publ., 1981, 296 p. (in Russian).
37. Zakharchuk D. D. Effect of Nitric Acid Treatment Parameters on the Content of Main Components in Flax Fiber. *Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya v oblasti khimii i ekologii – 2025 : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Fundamental and Applied Research in Chemistry and Ecology – 2025: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Kursk, YuZGU, 2025, pp. 87–90 (in Russian).
38. Obolenskaya A. V., El'nitskaya Z. P., Leonovich A. A. *Laboratory Works on Wood and Cellulose Chemistry*. Minsk, Ekologiya Publ., 1991. 320 p. (in Russian).
39. Kononov G. N., Verevkin A. N., Serdyukova Yu. V., Zhukova V. A. Wood as Chemical Feedstock. History and Modernity. IV. Delignification of Wood as a Pathway to Cellulose. Part II. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 2, pp. 69–84 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2022-2-69-84>
40. Azarov V. I., Burov A. V., Obolenskaya A. V. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. Saint Petersburg, Lan' Publ., 2010. 624 p. (in Russian).

Информация об авторах

Захарчук Дарья Дмитриевна – аспирант. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bekzarichya@gmail.com

Болтовский Валерий Станиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Шишаков Евгений Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: eshishakov@mail.ru

Information about the authors

Zakharchuk Daria D. – Postgraduate Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bekzarichya@gmail.com

Boltovsky Valery S. – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor of the Department. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Shishakov Evgeny P. – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eshishakov@mail.ru