

Исследование способов подготовки конопляного волокна для армирования текстильных биокompозитов**В. В. Иванова,***Витебский государственный технологический университет,***Н. В. Скобова***Республика Беларусь*

Аннотация. Современные тенденции в области наукоемких производств, импортозамещения и экологической безопасности предъявляют повышенные требования к материалам технического назначения. Ключевыми критериями становятся не только традиционные показатели (гигиеничность, многофункциональность, стоимость), но и такие характеристики, как экологичность, регенерируемость и утилизируемость. Значительный научный и практический интерес представляют биокompозиционные материалы, основу которых составляет возобновляемое природное сырье. Республика Беларусь обладает потенциалом для развития данного направления, являясь одним из крупнейших производителей льняного волокна. Разрабатываемые биокompозиты перспективны для применения в производстве биоматов, фильтров, прокладочных материалов в строительстве, автомобилестроении, обувной и швейной промышленности.

Целью работы является оценка влияния способов предварительной подготовки конопляного волокна на его структурно-морфологические свойства для повышения эффективности последующей модификации путем пропитки водными нанодисперсиями для гидрофобизации волокон при их использовании в качестве армирующего наполнителя в биокompозитах.

Проведено сравнительное исследование трех методов предварительной обработки – ферментативного, щелочного и комбинированного (ферментативно-щелочного). В результате исследований установлено, что предложенная биохимическая модификация вызывает элементаризацию комплексных волокон вследствие разрушения лигно-пектинового комплекса. Это подтверждается снижением среднего диаметра волокон и смещением пика их распределения в сторону меньших значений.

Ключевые слова: биокompозиты, лубяное волокно, котонизация, ферментативная обработка, армирующий материал, биоотварка.

Информация о статье: поступила 4 декабря 2025 года.

Study of methods for preparing hemp fiber for reinforcing textile biocomposites**Valeriya V. Ivanova,***Vitebsk State Technological University,***Natallia V. Skobova***Republic of Belarus*

Abstract. Modern trends in knowledge-intensive manufacturing, import substitution, and environmental safety place increased demands on technical materials. Key criteria include not only traditional indicators (hygiene, versatility, cost), but also characteristics such as environmental friendliness, regeneration, and recyclability. Biocomposite materials based on renewable natural raw materials are of significant scientific and practical interest. Belarus has the potential to develop this area, being one of the largest producers of flax fiber. The biocomposites being developed are promising for use in the production of biomats, filters, and gasket materials in the construction, automotive, footwear, and clothing industries.

The aim of the work is to study the influence of methods of preliminary preparation of hemp fiber on its structural and morphological properties in order to increase the efficiency of subsequent modification by impregnation with aqueous nanodispersions for hydrophobization of fibers when they are used as a reinforcing filler in biocomposites.

A comparative study of three pretreatment methods – enzymatic, alkaline, and combined (enzymatic-alkaline) – was conducted. The research revealed that the proposed biochemical modification causes the elementarization of complex

fibers due to the destruction of the ligno-pectin complex. This is confirmed by a decrease in the average fiber diameter and a shift in the peak of their distribution toward smaller values.

Keywords: biocomposite, bast fiber, cottonization, enzymatic treatment, reinforcing material, bioscouring.

Article info: received December 4, 2025.

Введение

В современных условиях перехода к экологизации промышленности все большую актуальность приобретает создание и внедрение биоразлагаемых материалов из возобновляемых источников сырья. Одним из таких направлений является разработка биокomпозитов на основе природных армирующих наполнителей и полимерных матриц [Faruk et al., 2012].

Биокomпозиты находят широкое применение в современных отраслях промышленности, таких как авиокосмическая, автомобильная, судостроительство, медицина, производство спортивного инвентаря и другие (рисунок 1) [Gurunathan, Mohanty and Nayak, 2015]. Значительный потенциал биокomпозитные материалы демонстрируют в текстильной промышленности, где их применение направлено на разработку функциональных продуктов. Их используют для создания спе-

циализированной рабочей одежды с повышенными барьерными и прочностными свойствами, экологичные материалы для упаковки, а также для производства биоматов, фильтров, препрегов, основ композиционных и прокладочных материалов для различных отраслей промышленности.

Композиционные материалы представляют собой гетерогенные системы, полученные путем сочетания двух или более отдельных компонентов, сохраняющих свои индивидуальные свойства. Составляющие композита не растворяются и не смешиваются друг с другом, образуя ярко выраженную границу раздела фаз, синергетическое взаимодействие на этой границе придает данным материалам уникальные эксплуатационные характеристики [Ali et al., 2018].

Классификация биокomпозитных материалов в зависимости от происхождения компонентов предполагает



Рисунок 1 – Ассортимент волокнистых биокomпозитов

Figure 1 – Range of fibrous biocomposites

их разделение на две основные категории: полностью биогенные композиты, где все составляющие (армирующие элементы и матрица) биоразлагаемы и производятся из возобновляемого сырья, а также гибридные системы, содержащие как возобновляемые, так и нефтехимические компоненты (рисунок 2) [Reças, P. et al, 2018].

Такие волокна, как углеродные, стеклянные и арамидные традиционно выступали основными армирующими материалами в композитах, обеспечивая их высокие эксплуатационные характеристики. Однако их производство и утилизация сопряжены с существенными экологическими рисками, обусловленными зависимостью от невозобновляемых ресурсов, высокой энергоемкостью процессов и увеличением нагрузки на окружающую среду. Дополнительным ограничивающим фактором выступает высокая стоимость этих волокон, особенно углеродных, что актуализирует поиск более экономически эффективных и экологически безопасных альтернатив.

В качестве перспективного решения для армирования биокompозитов рассматриваются натуральные волокна (Севастьянов, Д.В. и др., 2017). Среди них особый интерес представляют лубяные волокна (лен, конопля, джут и др.), которые не только обеспечивают высокую удельную прочность и жесткость композитов, но и обладают такими преимуществами, как возобновляемость, биоразлагаемость и низкая углеродная эмиссия [Yan,

Chouw and Jayaraman, 2014]. На фоне повышенного внимания к технической конопле как к многопрофильной и экологичной сельскохозяйственной культуре (Гущина, В.А., Смирнов, А.А. и Смирнов, А.Д., 2020; Дубровин, М.С., 2022; Попов, Р.А., 2019; Руденко, В.Е. и Ашмарина, Т.И., 2023), в Республике Беларусь также осуществляется поиск возможностей ее эффективного применения, что включает как адаптацию передового зарубежного опыта, так и инициацию собственных научных исследований в области селекции и агротехники, а также разработку ресурсоэффективных технологий ее переработки для последующего использования в текстильной, медицинской и других отраслях промышленности.

Республика Беларусь обладает потенциалом для развития производства конкурентоспособных и экологически безопасных материалов на основе лубяных волокон, (Ленькова, Р.К., 2019; Алеева, Лепилова и Кокшаров, 2020). Однако недостатки лубяных волокон, такие как высокая гигроскопичность, ограниченная адгезия к полимерным матрицам, требуют разработки эффективных методов их модификации.

Модификация должна быть направлена на главные гидрофильные компоненты лубяных волокон и привести к увеличению площади контакта с гидрофобной матрицей. Существуют следующие методы модификации:

- химические: щелочная обработка (происходит удаление гемицеллюлозы, лигнина, пектина, уменьшается диаметр волокна и увеличивается шероховатость,

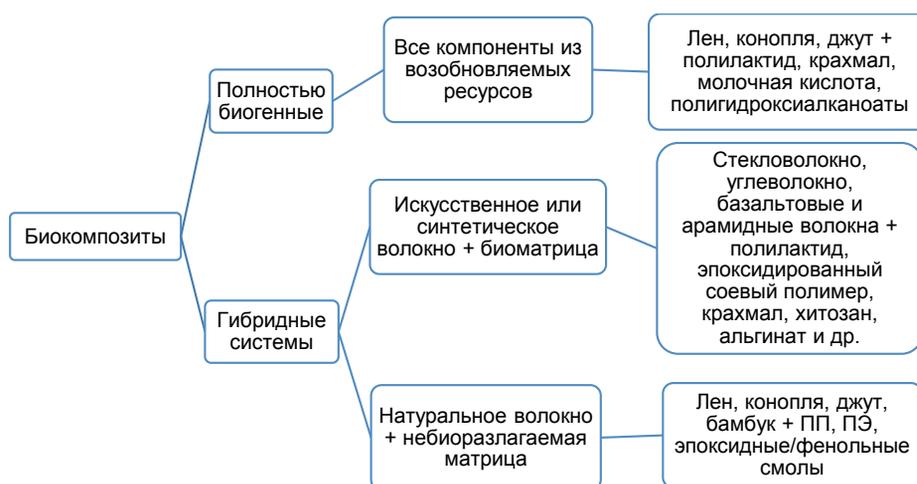


Рисунок 2 – Классификация биокompозитов
Figure 2 – Classification of biocomposites

что улучшает адгезию к матрице, но может немного увеличить доступность -ОН групп]; силенизация (обеспечивает гидрофобизацию волокон), ацелирование (ацетильные группы (-COCH₃) замещают водород в гидроксильных группах целлюлозы, значительно снижая полярность и сродство к воде) [Bledzki, Mamun and Volk, 2010; Li, Tabil and Panigrahi, 2007];

– физико-химические методы (плазменная обработка волокна) [Bledzki and Gassan, 1999];

– гидрофобные покрытия и пропитки: создают барьерный слой на поверхности волокна, предотвращающий прямой контакт воды с целлюлозой, например, пропитка водными дисперсиями с наночастицами диоксида кремния, оксида цинка (заполняют микропоры и капилляры в структуре волокна); биополимерные покрытия (полилактид (PLA) образует тонкую гидрофобную пленку, при этом сохраняя «зеленый» статус материала) [Das and Chakraborty, 2018].

Традиционные химические методы обработки волокна, обеспечивая высокое качество, часто являются энергоемкими и наносят ущерб окружающей среде, что противоречит концепции «зеленых» технологий [Ma, H. et al., 2023]. В этой связи разработка экологически безопасных, или «зеленых» методов подготовки лубяного волокна, таких как ферментативная обработка, представляется важным направлением научных исследований как в Беларуси, так и за рубежом [Gurunathan, Mohanty and Nayak, 2015; Li, Tabil and Panigrahi, 2007].

В настоящее время вопросы, связанные с применением ферментативных комплексов для обработки лубяных волокон, в основном, связаны с подготовкой волокна для расщепления в технологии производства пряжи для получения тканей одежного назначения, где показатель водопоглощения способствует повышению гигиенических свойств материалов [Котко, К.А., Ясинская, Н.Н. и Скобова Н.В., 2020]. Очевидно, что ферментативная обработка не снижает, а повышает водопоглощение лубяного волокна, за счет удаления липидов (воска), пектинов и аморфных полисахаридов, обнажая и делая доступными огромное количество гидроксильных (-ОН) групп целлюлозы, которые активно сорбируют воду. Поэтому ферментативную обработку следует рассматривать как подготовительную (предварительную) операцию для последующей модификации волокон [Akin, 2013].

Целью работы является оценка влияния способов предварительной подготовки конопляного волокна на

его структурно-морфологические свойства для повышения эффективности последующей модификации путем пропитки водными нанодисперсиями для гидрофобизации волокон при их использовании в качестве армирующего наполнителя в биокompозитах.

Методы и объекты исследований

Объектом исследования является длинное техническое конопляное волокно, характеризующееся высоким содержанием лигно-пектинового комплекса, воскоподобных веществ, отличается более жесткой структурой по сравнению с льняным волокном.

Ферментативная обработка – это высокоселективный процесс, каждый фермент действует на конкретный компонент волокна. Липазы, эстеразы воздействуют на жировосковые вещества, что приводит к улучшению смачиваемости, за счет удаления гидрофобного барьера, и позволяет последующим ферментам (пектиназе, целлюлазе) и реагентам эффективно проникать в структуру, а также подготавливает поверхность для адгезии к полимерной матрице в композите. Пектолитические ферменты действуют на основные межклеточные и клеящие вещества, цементирующие луб, приводят к расщеплению технического волокна на более тонкие пучки и элементарные волокна, повышая тонины и гибкость волокна, уменьшая жесткость. Эндоглюканызы, экзоглюканызы, β -глюкозидазы приводят к разъеданию аморфных прослоек внутри элементарного волокна, вызывая его расщепление на микрофибриллы, повышаются удельная поверхность, шероховатость, гибкость [Akin, 2013].

Для подготовки конопляного волокна использовались ферментные препараты целлюлазного и пектолитического действия производства ООО «Фермент» – белорусского производителя высокоэффективных ферментных препаратов для легкой и пищевой промышленности и сельского хозяйства. В качестве контрольного образца подготавливали волокна по традиционной технологии – щелочная отварка с использованием гидроксида натрия.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях кафедры экологии и химических технологий УО «ВГТУ». Предлагаются три технологические схемы обработки волокна:

– схема 1: ферментативная обработка полиферментной композицией (рисунок 3);

– схема 2: щелочная обработка водным раствором NaOH в присутствии ПАВ (рисунок 4);



Рисунок 3 – Технологический режим 1
Figure 3 – Technological mode 1

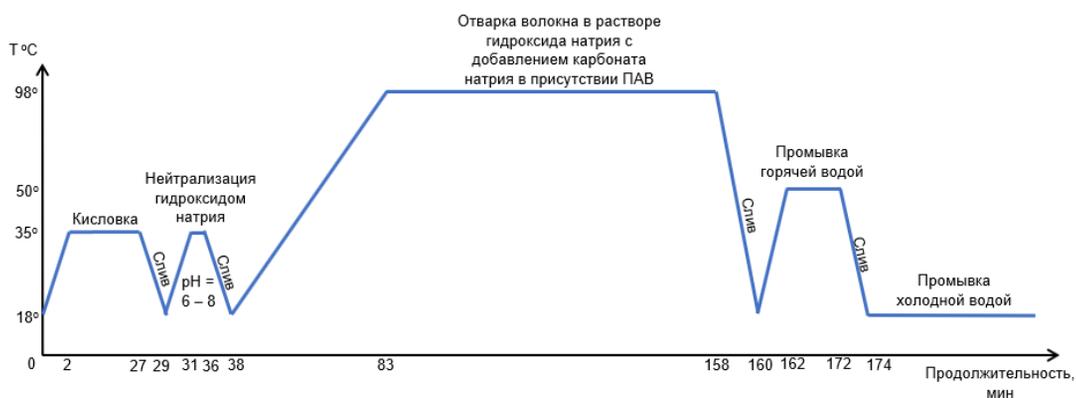


Рисунок 4 – Технологический режим 2
Figure 4 – Technological mode 2



Рисунок 5 – Технологический режим 3
Figure 5 – Technological mode 3

– схема 3: комбинированная ферментативно-щелочная обработка, (последовательно ферментативная обработка и далее щелочная в присутствии ПАВ (рисунок 5)).

Для оценки влияния процесса отварки на геометрические размеры волокон проводились измерения их диаметра с использованием микроскопа Альтами (увеличение 50x) с последующей обработкой изображений в программном обеспечении. Для анализа отбирали пробы из разных мест навески и измеряли 200 волокон для обеспечения статистической достоверности результатов.

Результаты исследований

Для оценки эффективности расщепления конопляного волокна проведен анализ влияния различных методов обработки на геометрические характеристики волокон.

Статистический анализ распределения диаметра волокон до и после отварки, представленный в виде бокс-диаграммы (рисунок 6), показал существенные изменения. После отварки наблюдается снижение среднего значения диаметра у всех образцов. Отмечается сокращение размаха и общего диапазона варибельности показателей, что свидетельствует о разделении комплексных волокон на элементарные по диаметру

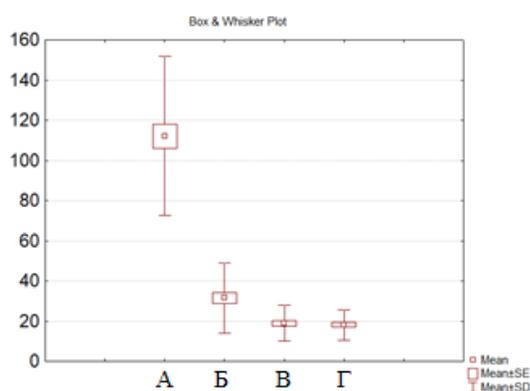


Рисунок 6 – Бокс-диаграмма средних значений диаметра волокон, где А – до обработки, Б – ферментативная обработка, В – комбинированная обработка, Г – щелочная обработка

Figure 6 – Box plot of average fiber diameter values: A – before treatment, B – enzymatic treatment, C – combined treatment, D – alkaline treatment

после обработки.

Проведен частотный анализ распределения волокон по диаметру (рисунок 7). Анализ гистограмм демонстрирует значительное возрастание доли тонких волокон в общей выборке после отварки по предложенным схемам. Наблюдается левосторонняя асимметрия столбчатых диаграмм Б, В и Г. Полученные данные указывают на выявленные изменения в структуре волокна: благодаря разрушению лигно-пектинового комплекса произошло разделение технических волокон на более тонкие и однородные элементарные волокна.

Ферментативная обработка привела к увеличению числа волокон в группе с диаметром от 11,2 до 33,6 мкм. Данный метод, являясь щадящим, обеспечивает селективное удаление в основном пектиновых веществ при минимальном воздействии на целлюлозную основу волокна, что и объясняет сохранение большего диаметра [Лисовский и Ясинская, 2022].

Высокая степень элементаризации комплексного волокна обеспечивается растворением примесей под действием щелочных агентов, о чем свидетельствует появление многочисленной группы волокон с диаметром 7–16,7 мкм (гистограмма В). Щелочная обработка конопля проводилась в мягких условиях: концентрация щелочи – не более 2 г/л длительность процесса – до 60 мин, благодаря чему не происходит гидролитическая деструкция целлюлозы, наблюдается удаление примесей из волокна [Стокозенко и др., 2017].

Комбинированный способ обработки позволил уменьшить диаметр волокон до диапазона 9–23 мкм. Предварительная ферментативная обработка подготавливает волокно, разрушает основу пектинового матрикса, что позволяет на последующей стадии использовать щелочь в более щадящем режиме. Это позволяет эффективно удалить оставшиеся связующие компоненты, избежав излишнего повреждения и утончения целлюлозных волокон, характерного для агрессивной щелочной обработки.

Внешний вид волокон до и после отварки представлен на рисунке 8.

Для оценки гидрофильных свойств модифицированного волокна применены два метода оценки. Метод 1 реализован в соответствии с ГОСТ 5556–2022 «Вата медицинская гигроскопическая» и предполагал измерение водопоглощения за 10 минут. Метод 2 – в соответствии с ГОСТ 4598–2018 «Плиты древесно-волоконистые мокрого способа производства», образцы выдерживались в ди-

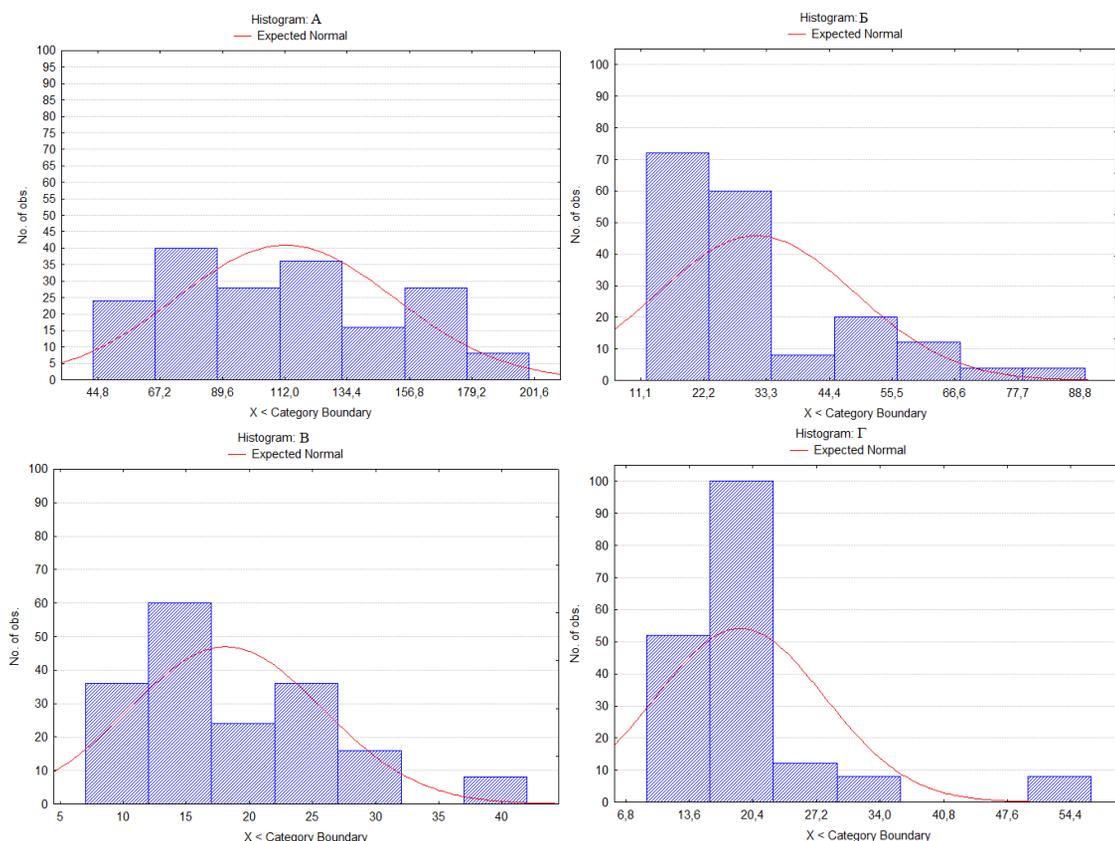


Рисунок 7 – Частотный анализ распределения волокон по диаметру до и после обработки: гистограмма А – до обработки, гистограмма Б – ферментативная обработка, гистограмма В – щелочная обработка, гистограмма Г – комбинированная обработка
 Figure 7 – Frequency analysis of fiber distribution by diameter before and after treatment: histogram A – before treatment, histogram B – enzymatic treatment, histogram C – alkaline treatment, histogram D – combined treatment

стиллированной воде 120 минут, после чего избыточная влага стекла в течение 10 минут перед взвешиванием. Количество повторных испытаний $n = 5$. Водопоглощение (W) модифицированного волокна рассчитывали по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m}{m}, \quad (1)$$

где m_1 , m – масса образца после выдержки в воде и масса сухого образца соответственно, г.

Результаты исследований представлены в таблице 1.

Установлено, что все виды обработки оказывают заметное влияние на способность волокна поглощать воду, значительно превышая исходные показатели. Мак-

симальный эффект водопоглощения достигается после щелочной обработки, что обусловлено удалением гидрофобных компонентов и увеличением доступной поверхности волокна (Arguzanova, N.B. and Kakhramanov, N.T., 2021). Комбинированная ферментативно-щелочная обработка также демонстрирует высокий результат (привес на 74 % и 81 % по отношению к суровому волокну для методов 1 и 2 соответственно), однако уступает по абсолютным значениям щелочной обработке.

Ферментативная обработка увеличивает водопоглощение волокна на 14 % по методу 1 и на 22 % по методу 2. Это позволяет предположить, что ферментативное воздействие в выбранных условиях в большей степени



Рисунок 8 – Изображение волокон до (а) и после ферментативной (б), щелочной (в), комбинированной (г) обработки
Figure 8 – Image of fibers before (a) and after enzymatic (b), alkaline (c), combined (d) treatment

Таблица 1 – Показатель водопоглощения модифицированного волокна
Table 1 – Water absorption index of modified fiber

Показатель	Ферментативная обработка	Щелочная обработка	Комбинированная обработка
По методу 1			
Среднее	2,182	3,846	3,316
Среднеквадратическое отклонение	0,251	0,173	0,228
Дисперсия	0,063	0,030	0,052
Водопоглощение волокна до обработки	1,891		
По методу 2			
Среднее	2,325	3,999	3,446
Среднеквадратическое отклонение	0,216	0,251	0,389
Дисперсия	0,047	0,063	0,151
Водопоглощение волокна до обработки	1,908		

направлено на специфическую модификацию. Для улучшения сорбционных характеристик конопляного волокна необходимо удалить из него гидрофобные вещества, к которым относятся лигнин и воскообразные вещества, затрудняющие адсорбцию воды и замедляющие скорость ее проникновения в глубь волокна. Применение композиции ферментов, включающих целлюлазы

и пектиназы, приводит к удалению лигнина, благодаря нарушению стабильной системы межмолекулярных связей системы «целлюлоза – лигнин – полисахариды» в результате гидролитического распада пектиновых веществ и гемицеллюлоз (пектиновые вещества через боковые цепочки соединены с гемицеллюлозами, а затем – с волокнами целлюлозы). При этом увеличение гид-

рофильности волокна обеспечивается, во-первых, частичным удалением гидрофобных компонентов (лигнин, гемицеллюлозы), содержащихся в срединных пластинках, во-вторых, увеличением его пористости как за счет вымывания лигнина, так и в результате селективного гидролиза пектиновых веществ, в-третьих, освобождением активных групп целлюлозы для связывания воды [Никифорова, Козлов и Багровская, 2005].

Сравнительный анализ двух методов измерения водопоглощения показал близкие по значению показатели. Поэтому, в целях снижения трудоемкости процесса рекомендуется применять метод 1, т. к. на проведение испытания затрачивается 10 минут, по истечении которого уже можно судить о поведении образца, что подтверждается в дальнейшем при более длительном контакте с влагой.

Анализ полученных результатов

Способ обработки волокна связан с механизмами воздействия применяемых препаратов на структурные компоненты клеточной стенки растительного волокна.

Анализируя полученные закономерности, с точки зрения водопоглощения, ферментативная обработка способствует умеренному росту водопоглощения (на 14 % за 10 минут и на 22 % за 120 минут) по сравнению с суровым волокном. Это связано с тем, что основные гидрофобные компоненты – воск и лигнин – остаются частично сохранными на поверхности волокна, ограничивая доступ воды к гидроксильным группам целлюлозы. Тем не менее, частичное освобождение поверхности от пектинов способствует улучшению смачиваемости, что положительно влияет на адгезию к полимерным матрицам.

Воздействие гидроксида натрия на волокно является классическим примером химической модификации. Щелочь активно проникает в аморфные области волокна, вызывая деакилирование лигнина, гидролиз эфирных и гликозидных связей, а также растворение пектинов и гемицеллюлоз. Этот процесс сопровождается интенсивным набуханием волокна, разрыхлением его структуры и последующим разделением пучков на тонкие элементарные волокна [Антонова, Н.М., Симонов, А.И. и Линьков, И.С., 2024]. Именно это объясняет наиболее значительное снижение диаметра – до диапазона 7–16,7 мкм.

Удаление лигнина и других компонентов приводит к резкому увеличению количества свободных гидроксильных групп (-ОН) на поверхности волокна. Кроме

того, утончение волокон многократно увеличивает их удельную поверхность [Праджапати, Х., Тевати, А. и Диксит, А., 2022; Arzumanova, N.B. and Kakhrmanov, N.T., 2021]. Оба фактора в совокупности обуславливают максимальное водопоглощение среди всех исследуемых методов. Высокая гидрофильность благоприятствует сильному взаимодействию с полимерными матрицами, что важно для формирования прочного межфазного слоя в биокомпозите.

Однако следует учитывать, что щелочная обработка может привести к частичному разрушению β -1,4-гликозидных связей целлюлозы, особенно при длительном времени или высокой концентрации NaOH, что снижает механическую прочность волокна [Праджапати, Х., Тевати, А. и Диксит, А., 2022]. Кроме того, экологическая нагрузка от использования щелочных растворов и необходимость их нейтрализации делают данный метод менее соответствующим принципам устойчивого развития. Однако в данном исследовании применялись щадящие режимы обработки, что позволит сохранить прочностные характеристики волокна.

Комбинированная ферментативно-щелочная схема обработки реализует многоступенчатый подход, в котором каждый этап дополняет предыдущий. Первоначальная ферментативная стадия разрушает пектиновый матрикс, ослабляя структурную целостность пучка и создавая «подготовленную» поверхность для последующего воздействия щелочи. Это позволяет проводить щелочную обработку в более мягких условиях, что снижает риск повреждения целлюлозы. Результаты показывают, что комбинированный метод обеспечивает средние значения диаметра (9–23 мкм) и высокое водопоглощение (3,32–3,45 г), что свидетельствует о хорошем сочетании эффективности очистки и сохранения структурной целостности. Этот этап требует более тщательной оптимизации параметров процесса – очередности стадий, времени, температуры и состава растворов, для достижения эффекта, близкого к щелочной обработке, при одновременном снижении расхода химических препаратов, энергозатрат и экологической нагрузки на сточные воды.

Ферментативная обработка относится к «зелёной» технологии, основанной на использовании специфических белковых катализаторов – полиферментных композиций целлюлазного и пектолитического действия. Эти ферменты действуют избирательно, преимущественно гидролизуют пектиновые вещества, локализованные в

срединной пластинке между элементарными волокнами. Пектины выполняют роль природного «клея», обеспечивающего объединение отдельных волокон в технические пучки. Их удаление приводит к ослаблению межволоконных связей и частичному разделению пучков, однако процесс не затрагивает значительную часть лигнина и не разрушает глубоко упакованную целлюлозную основу. Именно этот механизм объясняет сохранение относительно крупных диаметров волокон (11,2–33,6 мкм) [Лисовский Д.Л. и Ясинская Н.Н., 2022].

Выводы

На основе комплекса исследований свойств волокон установлено:

- примененные способы химической и биохимической подготовки конопляных волокон способствуют изменению структуры волокна: происходит расщепление технического волокна до элементарных волокон, что подтверждается снижением среднего значения диаметра и левосторонним смещением максимума распределения в область меньших значений;
- предварительная обработка способствовала удалению гидрофобных примесей волокна, повысилась удельная поверхность волокон, благодаря чему показатель водопоглощения увеличился;

– щелочной и комбинированный способ обработки привели к увеличению доступности -ОН групп, что подтверждается максимальным показателем водопоглощения;

– ферментативная обработка волокна проводилась согласно базовому принципу построения композиции: пектиназа в сочетании с липазой, с последующей обработкой целлюлазой, благодаря этому максимально разрушен межклеточный матрикс с минимальным воздействием на само волокно, удалены жировосковые вещества. Минимальная концентрация целлюлаз привела к легкой очистке поверхности волокна, к увеличению адгезионной площади. Комплексная обработка волокна, являясь более экологичным вариантом обработки в «мягких» условиях, позволила увеличить водопоглощение волокна, но в наименьшей степени из сравниваемых, без их чрезмерного повреждения;

– примененные способы предварительной обработки конопляного волокна позволили изменить морфологию поверхности волокна, что может повысить эффективность последующей модификации волокон путем пропитки водными нанодисперсиями для гидрофобизации волокон.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Алеева, С.В., Лепилова, О.В. и Кокшаров, С.А. (2020). Метод получения высокопротеиновых фитокомпозигов с использованием вторичных продуктов льнопереработки. *Материалы и технологии*, 5 (1), pp. 19–25. <https://doi.org/10.24412/2617-149X-2020-1-19-25>.

Антонова, Н.М., Симонов, А.И. и Линьков, И.С. (2024). Влияние щелочной обработки целлюлозы на ее структуру и морфологию. *Инженерный вестник Дона*, 4 (112), с. 51.

Гущина, В.А., Смирнов, А.А. и Смирнов, А.Д. (2020). Семенная продуктивность конопляной посевной среднерусского экотипа сорта сурская при выращивании в годы с различными гидротермическими условиями. *Нива Поволжья*, 2 (55), с. 34–39.

Дубровин, М.С. (2022). Развитие современного производства продукции из технической конопля. *Международный научно-исследовательский журнал*, 4-4 (118), с. 120–124.

Котко, К.А., Ясинская, Н.Н. и Скобова, Н.В. (2020). Нетрадиционный способ придания мягкости хлопкольным махровым изделиям. *Материалы и технологии*, 5 (1), с. 7–10. doi: 10.24412/2617-149X-2020-1-7-10.

Ленькова, Р.К. (2019). Совершенствование направлений развития льноводства в республике Беларусь. *Проблемы экономики*, 2 (29), pp. 114–120.

Лисовский Д.Л., Ясинская Н.Н. (2022). Влияние ферментной обработки на свойства льняного котонина. *Вестник Витебского государственного технологического университета*, 2(43), pp. 94–103. <https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-2-94-103>.

Никифорова, Т.Е., Козлов, В.А. и Багровская, Н.А. (2005). Изучение влияния ферментативной обработки короткого льняного волокна на его сорбционную способность. *Химия растительного сырья*, (4), С. 45–52.

Попов, Р.А. (2019). Состояние, проблемы и возможности для развития отечественного коноплеводства. *Агротехника и энергообеспечение*, 4 (25), С. 42–52.

Праджапати, Х., Тевати, А. и Диксит, А. (2022). Достижения в композитах, армированных натуральными волокнами. Тематический обзор. *Механика композитных материалов*, 58 (3), С. 455–504.

Руденко, В.Е., Ашмарина, Т.И. (2023). Современное состояние отрасли коноплеводства в России. *Естественно-гуманитарные исследования*, 6 (50), С. 414–417.

Севастьянов, Д.В., Сутубалов, И.В., Дасковский, М.И. и Шеин, Е.А. (2017). Полимерные биокompозиты на основе био-разлагаемых связующих, армированных натуральными волокнами (обзор). *Авиационные материалы и технологии*, 4 (49), pp. 42–50.

Стокозенко, В.Г., Морыганов, А.П., Ларин, И.Ю. и Воронина, Е.Р. (2017). Исследование влияния щелочной обработки на состав и свойства элементаризованного льняного волокна. *Химия растительного сырья*, (2), С. 143–148.

Akin, D.E. (2013). Linen most useful: perspectives on structure, chemistry, and enzymes for retting flax. *ISRN Biotechnology*, (4), p. 23.

Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabbar, M., Hussain, T., Militky, J. and Baheti, V. (2018). Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites – A review. *Journal of Industrial Textiles*, 48(1), pp. 215–273. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>.

Arzumanova, N.B. and Kakhramanov, N.T. (2021). Polymer biocomposites based on agro waste: Part I. source, classification, chemical composition and treatment methods of lignocellulosic natural fibers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 4 (64), pp. 4–14.

Bledzki, A.K. and Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), pp. 221–274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).

Bledzki, A.K., Mamun, A.A. and Volk, J. (2010). Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties. *Composites Science and Technology*, 70(5), pp. 840–846.

Das, S. and Chakraborty, P. (2018). Influence of nanoclay on the hydrothermal behaviour of flax fibre-reinforced polylactic acid composites. *Journal of Polymer Research*, 25(7), p. 150.

Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P. and Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), pp. 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.

Gurunathan, T., Mohanty, S. and Nayak, S.K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>.

Li, X., Tabil, L.G. and Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), pp. 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.

Ma, H., Guna, V., Raju, T., Murthy, A.N. and Reddy, N. (2023). Converting flax processing waste into value added biocomposites. *Industrial Crops and Products*, vol. 195. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116434>.

Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., and Leite, M. (2018). Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 2(4), pp. 66. <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>.

Yan, L., Chouw, N. and Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering*, 56, pp. 296–317. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>.

REFERENCES

Aleeva, S.V., Lepilova, O.V. and Koksharov, S.A. (2020). Method for producing high-protein phytocomposites using secondary flax processing products [Metod poluchenija vysokoproteinykh fitokompозитov s ispol'zovaniem vtorichnykh produktov l'noперerabotki]. *Materialy i tehnologii = Materials and Technologies*. 5 (1), pp. 19–25 URL: <https://doi.org/10.24412/2617-149X-2020-1-19-25> (In Russian).

Antonova, N.M., Simonov, A.I. and Linkov, I.S. (2024). The Effect of Alkaline Treatment of Cellulose on its Structure and Morphology [Vliyanie shhelochnoj obrabotki celljulozy na ee strukturu i morfologiju]. *Inzhenernyj vestnik Dona = Engineering Herald of the Don*. 4 (112), p. 51 (In Russian).

Gushchina, V.A., Smirnov, A.A. and Smirnov, A.D. (2020). Seed Productivity of Hemp of the Central Russian Ecotype of the Surskaya Variety Grown in Years with Different Hydrothermal Conditions [Semennaja produktivnost' konopli posevnoj srednerusskogo jekotipa sorta surskaja pri vyrashivanii v gody s razlichnymi gidrotermicheskimi uslovijami]. *Niva Povolzh'ja = Niva Povolzhya*. 2 (55), P. 34–39 (In Russian).

Dubrovin, M.S. (2022). Development of Modern Production of Industrial Hemp Products. [Razvitie sovremennogo proizvodstva produkcii iz tehniceskoy konopli]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal = International Research Journal*, 4-4 (118), P. 120–124 (In Russian).

Kotko, K.A., Yasinskaya, N.N. and Skobova, N.V. (2020). An Unconventional Method of Imparting Softness to Cotton-Linen Terry Products [Netradicijonnyj sposob pridaniya mjagkosti hlopkol'njanym mahrovym izdelijam]. *Materialy i tehnologii = Materials and Technologies*, 5 (1), p. 7–10. doi: 10.24412/2617-149X-2020-1-7-10 (In Russian).

Lenkova, R.K. (2019). Improving the Development Directions of Flax Growing in the Republic of Belarus [Sovershenstvovanie napravlenij razvitiya l'novodstva v respublike Belarus']. *Problemy jekonomiki = Problems of Economics*, 2 (29), pp. 114–120 (In Russian).

Lisovsky, D.L., Yasinskaya, N.N. (2022). The Effect of Enzyme Treatment on the Properties of Flax Cottonin. [UniversityVliyanie fermentnoj obrabotki na svojstva l'nanogo kotonina]. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of the Vitebsk State Technological*, 2(43), pp. 94–103. <https://doi.org/10.24412/2079-7958-2022-2-94-103> (In Russian).

Nikiforova, T.E., Kozlov, V.A. and Bagrovskaya, N.A. (2005). Study of the effect of enzymatic treatment of short flax fiber on its sorption capacity. [Izuchenie vlijaniya fermentativnoj obrabotki korotkogo l'nanogo volokna na ego sorbcionnuju sposobnost']. *Himija rastitel'nogo syr'ja = Chemistry of plant raw materials*. (4), pp. 45–52 (In Russian).

Popov, R.A. (2019). Status, problems and opportunities for the development of domestic hemp cultivation. [Sostojanie, problemy i vozmozhnosti dlja razvitiya otechestvennogo konoplevodstva]. *Agrotehnika i jenergoobespechenie = Agrotechnics and energy supply*. 4 (25), p. 42–52 (In Russian).

Prajapati, H., Tevati, A. and Dixit, A. (2022). Advances in natural fiber-reinforced composites. Thematic review [Dostizhenija v kompozitah, armirovannyh natural'nymi voloknami. Tematicheskij obzor]. *Mehanika kompozitnyh materialov = Mechanics of Composite Materials*. 58 (3), P. 455–504 (In Russian).

Rudenko, V.E., Ashmarina, T.I. (2023). Current State of the Hemp Cultivation Industry in Russia [Sovremennoe sostojanie otrasli konoplevodstva v Rossii]. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya = Research in Natural Sciences and Humanities*. 6 (50), P. 414–417 (In Russian).

Sevastyanov, D.V., Sutubalov, I.V., Daskovsky, M.I. and Shein, E.A. (2017). Polymer Biocomposites Based on Biodegradable Binders Reinforced with Natural Fibers [Review]. [Polimernye biokompozity na osnove biorazlagaemyh svjazujushhih, armirovannyh natural'nymi voloknami (obzor)]. *Aviacionnye materialy i tehnologii = Aviation Materials and Technologies*. 4 (49), pp. 42–50 (In Russian).

Stokozenko, V.G., Moryganov, A.P., Larin, I.Yu. and Voronina, E.R. (2017). Study of the Effect of Alkaline Treatment on the Composition and Properties of Elementarized Flax Fiber [Issledovanie vlijaniya shhelochnoj obrabotki na sostav i svojstva jelementarizovannogo l'nanogo volokna]. *Himija rastitel'nogo syr'ja = Chemistry of Plant Raw Materials*. (2), p. 143–148 (In Russian).

Akin, D.E. (2013). Linen most useful: perspectives on structure, chemistry, and enzymes for retting flax. *ISRN Biotechnology*, (4), p. 23.

Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabbar, M., Hussain, T., Militky, J. and Baheti, V. (2018). Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites – A review. *Journal of Industrial Textiles*, 48(1), pp. 215–273. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>.

Arzumanova, N.B., Kakhramanov, N.T. (2021). Polymer biocomposites based on agro waste: Part I. source, classification, chemical composition and treatment methods of lignocellulosic natural fibers. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 4 (64), pp. 4–14.

Bledzki, A.K. and Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), pp. 221–274. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(98\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(98)00018-5).

Bledzki, A.K., Mamun, A.A. and Volk, J. (2010). Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties. *Composites Science and Technology*, 70(5), pp. 840–846.

Das, S. and Chakraborty, P. (2018). Influence of nanoclay on the hydrothermal behaviour of flax fibre-reinforced polylactic acid composites. *Journal of Polymer Research*, 25(7), p. 150.

Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P. and Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), pp. 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.

Gurunathan, T., Mohanty, S. and Nayak, S.K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, pp. 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.06.007>.

Li, X., Tabil, L.G. and Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), pp. 25–33. <https://doi.org/10.1007/s10924-006-0042-3>.

Ma, H., Guna, V., Raju, T., Murthy, A.N. and Reddy, N. (2023). Converting flax processing waste into value added biocomposites. *Industrial Crops and Products*, vol. 195. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116434>.

Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., and Leite, M. (2018). Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 2(4), pp. 66. <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>.

Yan, L., Chouh, N. and Jayaraman, K. (2014). Flax fibre and its composites – A review. *Composites Part B: Engineering*, 56, pp. 296–317. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>.

Информация об авторах

Information about the authors

Иванова Валерия Викторовна

Аспирант, Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: fomchenko31v@mail.ru

Скобова Наталья Викторовна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Экология и химические технологии», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: skobova-nv@mail.ru

Valeriya V. Ivanova

Postgraduate Student, Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: fomchenko31v@mail.ru

Natallia V. Skobova

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor at the Department "Environmental Science and Chemical Technologies", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: skobova-nv@mail.ru