ISSN 2075-8545 (online)

Nanotechnologies in construction
Нанотехнологии в строительстве
2026; 18 (1):
82–92

Nanobuild.ru

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Научная статья / Original Article
УДК 691.15
https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-82-92

CC BY 4.0

Получение высокодисперсного наполнителя для строительных композиций из отходов производства льна

Наталья Игоревна Черкашина, Артём Юрьевич Ручий*, Дарья Васильевна Пушкарская, Анна Алексеевна Кужелева, Юлия Игоревна Литвинова

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование направлено на изучение возможности извлечения ценных соединений из растительного отхода – костры льна с целью их дальнейшего применения в качестве высокодисперсного наполнителя для строительных композиций. **Материалы и методы исследования.** Для осуществления синтеза применялись следующие химические реактивы: H_2SO_4 93,64% (ХЧ), NaOH (ХЧ), H_2O (дистиллированная), H_2O_2 ~30% (ХЧ), а также порошок костры льна, измельченной в мельнице криогенного помола. **Результаты и обсуждение.** Характеристика исходного сырья подтвердила наличие в материале полезных компонентов – целлюлозы, диоксида кремния и лигнина. Разработана технология химической обработки костры льна, благодаря которой удалось выделить из нее ценные компоненты. **Заключение.** Отработана методика получения целлюлозы, диоксида кремния и лигнина из костры льна. Дальнейшее практическое применение полученных материалов для строительных композиций возможно после применения специальных методов очистки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: костра льна, целлюлоза, диоксид кремния, лигнин, растительные отходы

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России № FZWN-2024-0001 с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Пушкарская Д.В., Кужелева А.А., Литвинова Ю.И. Получение высокодисперсного наполнителя для строительных композиций из отходов производства льна. *Нанотехнологии в строительстве.* 2026;18(1):82–92. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-82-92. – EDN: UGIZEX.

Production of a highly dispersed filler for building composites from flax processing waste

Natalia I. Cherkashina, Artem Y. Ruchiy*, Daria V. Pushkarskaya, Anna A. Kuzheleva, Yulia I. Litvinova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

* Corresponding author: e-mail: artiem.ruchii.99@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The study investigates the possibility of extracting valuable compounds from flax processing waste (flax shives) for subsequent use as a highly dispersed filler in building composites. **Materials and methods.** The following chemical reagents were used for synthesis: H_2SO_4 93.64 % (C.P.), NaOH (C.P.), H_2O (distilled), H_2O_2 ~30 % (C.P.) as well as flax shives powder crushed in a cryogenic mill. **Results and discussion.** The characteristics of the raw materials confirmed the presence of useful components in the material – cellulose, silicon dioxide and lignin. A technology for the chemical treatment of flax shives was developed, thereby

© Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Пушкарская Д.В., Кужелева А.А., Литвинова Ю.И., 2026

enabling the extraction of valuable components. **Conclusion.** A method for obtaining cellulose, silicon dioxide and lignin from flax shives has been worked out. Further practical application of the obtained materials for building compositions is possible after the use of special purification methods.

KEYWORDS: flax shives, cellulose, silicon dioxide, lignin, plant waste

ACKNOWLEDGEMENTS: The study was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of Russia No FZWN-2024-0001 using equipment based on the Center for High Technologies of BSTU named after V.G. Shukhov.

FOR CITATION:
Cherkashina N.I., Ruchiy A.Yu., Pushkarskaya D.V., Kuzheleva A.A., Litvinova Yu.I. Production of a highly dispersed filler for building composites from flax processing waste. *Nanotechnologies in Construction.* 2026; 18(1):82–92. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2026-18-1-82-92. – EDN: UGIZEX.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальной задачей современной строительной индустрии является разработка и внедрение ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий. Одним из перспективных направлений развития является использование вторичного сырья и отходов производства, что позволяет не только снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду, но и получить материалы с новыми или улучшенными свойствами [1–4]. В последние годы активно развивается концепция циркулярной экономики, которая предполагает минимизацию отходов и максимальное использование ресурсов [5]. Это требует поиска инновационных решений, позволяющих эффективно перерабатывать отходы и превращать их в ценные продукты.

Особый интерес представляют отходы переработки растительного сырья, которые образуются в значительных объемах в агропромышленном комплексе [6–9].

В связи с этим активно развиваются исследования, направленные на переработку растительных отходов в ценные продукты, ключевой задачей которых является поиск экономически выгодных и высокоэффективных решений по извлечению ценных компонентов из биомассы с использованием химических и термохимических методов [10–13]. В качестве перспективного источника такого сырья могут выступать отходы переработки льна, в частности – костра [11, 14–15], содержащая ценные компоненты, которые могут быть использованы для создания различных строительных материалов. Костра льна представляет собой одревесневшие части стебля, отделяемые при получении льняного волокна. Она состоит в основном из целлюлозы (45–60%), лигнина (20–30%), гемицеллюлозы и кремнийорганических соединений [9, 16]. Именно эти компоненты определяют основные физико-химические свойства льняной костры, делая ее перспективным компонентом для создания строительных материалов, обладающих сопоставимой прочностью, долговечностью и экологичностью.

Целлюлоза, являясь главным полисахаридом растений, находит применение не только в традиционных отраслях, таких как бумажная и текстильная промышленность [17–19], но и в производстве композиционных функциональных материалов в строительстве, а также для очистительных сорбенов [20–24] и композитного топлива [25]. Ее уникальные свойства, такие как высокая биосовместимость и способность к биоразложению, делают ее привлекательной для использования в экологически чистых строительных решениях. Кроме того, целлюлоза может быть модифицирована для придания ей новых свойств, таких как повышенная прочность [21–23].

Лигнин, второй по значимости компонент льняной костры, нашел применение в различных отраслях промышленности, включая химическую, аграрную и строительную [23, 26]. Он обладает высокой устойчивостью к биодеградации, что делает его ценным материалом для создания долговечных композитов. В последние годы лигнин также активно исследуется как основа для производства новых экологичных биоразлагаемых полимеров и композитов на его основе [27–32]. Эти материалы обладают уникальными свойствами, такими как низкая плотность, высокая прочность и устойчивость к воздействию окружающей среды.

Гемицеллюлозы могут использоваться как биоразлагаемые пленкообразователи или добавки, регулирующие свойства растворов [31, 32]. Они обладают способностью связывать воду и улучшать реологические свойства материалов, что делает их ценными компонентами для создания различных строительных композиций. Гемицеллюлозы также могут быть модифицированы для придания им новых свойств, таких как повышенная адгезия или устойчивость к внешним воздействиям.

Диоксид кремния, присутствующий в льняной костре, вызывает интерес ученых благодаря своим

уникальным свойствам. Этот материал имеет множество применений: в области строительных материалов (в производстве цемента в качестве добавки к сырьевой смеси), в электронике (производство микросхем и полупроводников), в фармацевтике (как наполнитель в лекарственных формах), для создания наноматериалов и в других областях промышленности. Диоксид кремния обладает высокой термостойкостью, химической инертностью и способностью улучшать физико-механические свойства материалов.

Использование льняной костры для получения высокодисперсных наполнителей для строительных композиций позволяет решить сразу несколько задач: утилизировать отходы, снизить себестоимость продукции за счет замены части сырья и придать материалам новые полезные свойства. Одним из методов эффективного использования в составе высококачественных материалов грубодисперсной костры является ее измельчение до высокодисперсного состояния [33]. Такой подход обеспечивает большую удельную поверхность частиц и их лучшую совместимость с матрицей композита. Для получения высокодисперсного наполнителя из костры льна применяются различные методы. Наиболее распространенными являются механическое измельчение (с использованием мельниц различного типа) и механоактивация, которая позволяет не только уменьшить размер частиц, но и повысить их физико-химическую активность [34].

Еще одним методом использования костры льна для получения высокодисперсных наполнителей является ее физико-химическое преобразование с целью извлечения полезных соединений. Этот метод позволяет максимально эффективно использовать ценные компоненты льняной костры и получать материалы с улучшенными свойствами. Физико-химическое преобразование может включать различные процессы, такие как экстракция, гидролиз, окисление и другие, которые позволяют выделить из костры ценные компоненты, такие как целлюлоза, лигнин и гемицеллюлозы [35].

Таким образом, использование льняной костры открывает широкие перспективы для создания новых строительных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками и экологической безопасностью. Исследование возможности извлечения ценных компонентов из костры льна является важным шагом на пути к развитию инновационных технологий переработки отходов и созданию материалов будущего.

Цель настоящего исследования – изучить возможность извлечения ценных компонентов из растительных отходов льна с целью их применения в области строительных материалов.

МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы

В ходе эксперимента для осуществления синтеза применялись реактивы высокой степени чистоты: серная кислота 93,64% (ХЧ), производства АО «ЭКОС-1»; гидроксид натрия (ХЧ), производства АО «ЭКОС-1»; дистиллированная вода и пероксид водорода ~30% (ХЧ), производства ООО «Лега». Использованным отходом растительного происхождения являлся мелкодисперсный порошок, полученный из костры льна, что позволило утилизировать отходы сельскохозяйственного производства.

Оборудование и методы исследования

Помол костры льна осуществлялся в криогенной мельнице 6875 Freezer/Mill (НОЛТЕХ, Россия). Параметры измельчения были следующие: предварительное охлаждение – 8 мин, время помола – 3 мин, охлаждение между циклами – 5 мин, количество циклов – 3, скорость ротора – 15 об/сек.

Определение размера частиц высокодисперсного порошка из костры льна осуществлялось на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTec plus. Область измерения Analysette 22 NanoTec plus составляет от 0,01 до 2000 мкм.

Для анализа ИК-Фурье спектров поглощения образцов исследуемых веществ применялся спектрометр Bruker Vertex 70. Измерения проводились в интервале волновых чисел 400–4000 см$^{-1}$ с высоким спектральным разрешением ($\geqslant$ 0,4 см$^{-1}$), что обеспечило получение детальной информации о структуре материалов.

Фазовый состав материалов до и после синтеза был исследован методом рентгеноструктурного анализа. Рентгенограммы веществ получали на приборе ARL X'TRA (Thermo Fisher Scientific SARL, Ecublens, Швейцария) с источником CuKα.

Для обработки и расшифровки полученных порошковых рентгеновских дифрактограмм использовали базу данных рентгенограмм PDF-2 (Powder Diffraction File-2).

Для взвешивания образцов использовали лабораторные весы марки MERTECH M-ER 122 ACF-3000. Для данных весов максимальная масса взвешивания составляла 3 кг, а точность взвешивания 0,1 г.

Сканирующие электронно-микроскопические изображения получали на приборе Tescan MIRA 3 LMU.

Термическое поведение костры льна исследовалось методом дифференциально-термического анализа (ДТА) на приборе STA 449 F1 Jupiter. Об-

разцы нагревались в диапазоне температур 20–600 °С со скоростью 10 град/мин в атмосфере, приближенной к воздушной (21% кислорода, 79% аргона).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Характеристика исходного сырья

Механоактивация – это метод физико-химической модификации твердых тел, основанный на воздействии механической энергии. В процессе механоактивации происходит измельчение частиц, увеличение удельной поверхности, образование дефектов в структуре материала и изменение его химической активности.

Традиционные методы механоактивации могут быть неэффективными для растительного сырья, такого как костра льна, из-за ее высокой прочности и эластичности. Криогенный помол, напротив, представляет собой мощный инструмент механоактивации, особенно подходящий для хрупких и термочувствительных материалов.

Криогенный помол осуществляется при низких температурах (–182 °С) с использованием жидкого азота или других хладагентов. При таких температурах материалы становятся хрупкими, что значительно облегчает процесс измельчения и повышает эффективность механоактивации [36].

Размер частиц костры льна изначально был от 1,00 до 0,20 мм. Гранулометрический анализ используемой добавки представлен на рис. 1. Результат анализа показал, что в используемой добавке распределение размеров частиц описывается бимодальной системой с одной модой при 45,73 мкм и второй модой при 55,08 мкм. Преобладающая фракция в порошке – 63,54 мкм. Удельная поверхность материала составила 7259 см^2/см^3.

Рентгенофазовый анализ (РФА) костры льна, результаты которого представлены на рис. 2, позволил идентифицировать ряд кристаллических и аморфных фаз. Анализ полученной дифракционной картины выявил присутствие кварца, идентифицированного по характерным дифракционным отражениям при 4,263, 3,341 и 3,214 Å (эталонная карточка PDF-2: 85-1053 Quartz, syn). Наличие углерода подтверждается дифракционными отражениями при 3,040 и 2,146 Å (карточка PDF-2: 72-2091 Carbon). Кроме того, обнаружен фосфат алюминия, идентифицированный по дифракционным отражениям при 4,137 и 2,537 Å (последний с наложением, карточка PDF-2: 50-303 Aluminium Phosphate), а также корунд, характеризующийся отражениями при 2,537 (с наложением) и 1,586 Å (карточка PDF-2: 75-788 Corundum). Присутствие широкого аморфного гало с двумя вершинами в области углов 17° и 22° указывает на значительное содержание гидратированных фаз диоксида кремния.

На рис. 3 представлены данные, полученные с использованием сканирующего электронного микроскопа. На рис. 3 отображен участок порошка костры льна, отображающий многослойную карту ЭДС. Количественные результаты, полученных с помощью ЭДС карты, отображены в табл. 1 (распределение химических элементов и усредненные численные значения их концентрации).

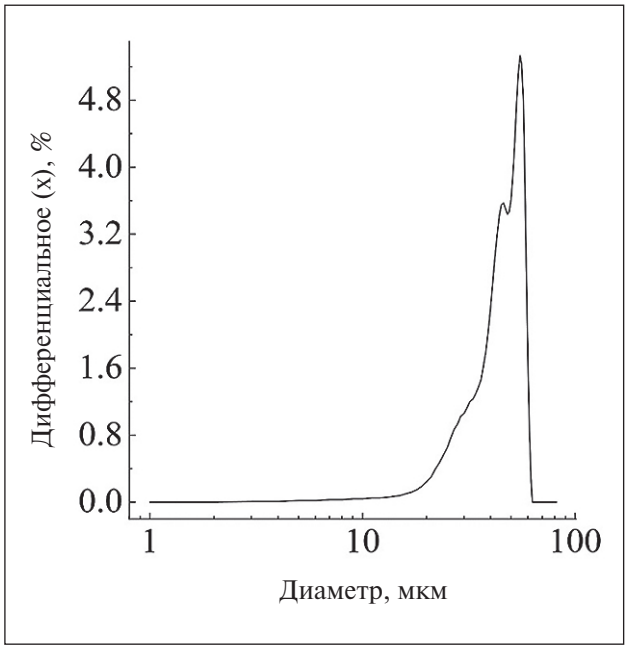

Рис. 1. Фракционный состав костры льна

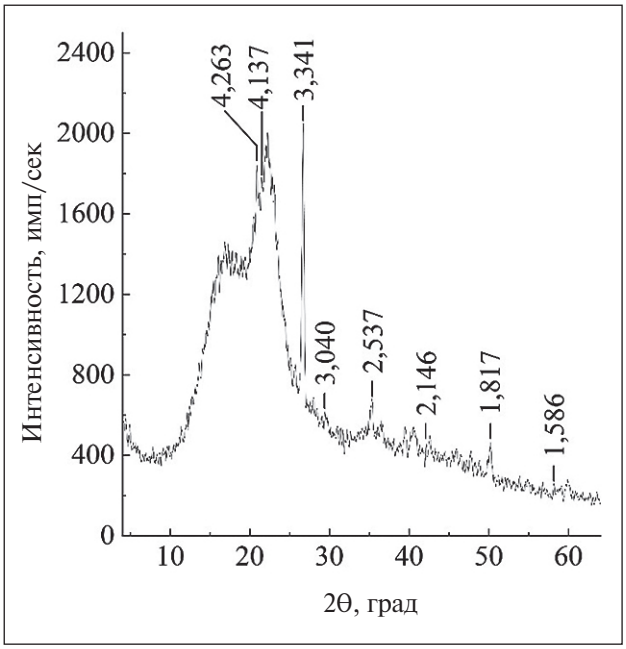

Рис. 2. Рентгенограмма костры льна

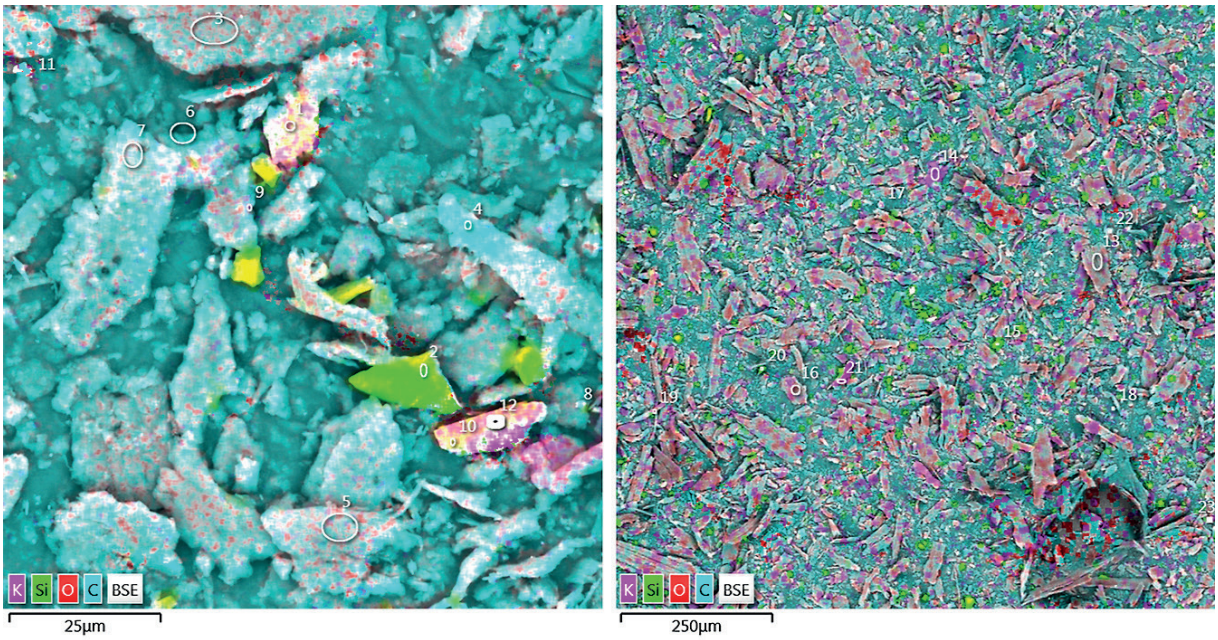

Рис. 3. Многослойная карта ЭДС костры льна

Таблица 1

Усредненный элементный состав костры льна, вес. %											
C	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Fe
50,14	29,13	0,29	0,41	2,07	11,22	0,63	0,01	2,97	1,06	2,08	0,02

Анализ данных табл. 1 показал, что в костре льна присутствует большое количество C (50,14%), O (29,13%), Si (11,22%), K (2,97%). Кроме того, заметно наличие Al (2,07%), Ti (2,08%), Ca (1,06%), но в гораздо меньшем количестве. И в минимальном соотношении зафиксированы Na, Mg, P, S, Fe.

На рис. 4 представлен ИК-Фурье-спектр поглощения исходного порошка костры льна. Расшиф-

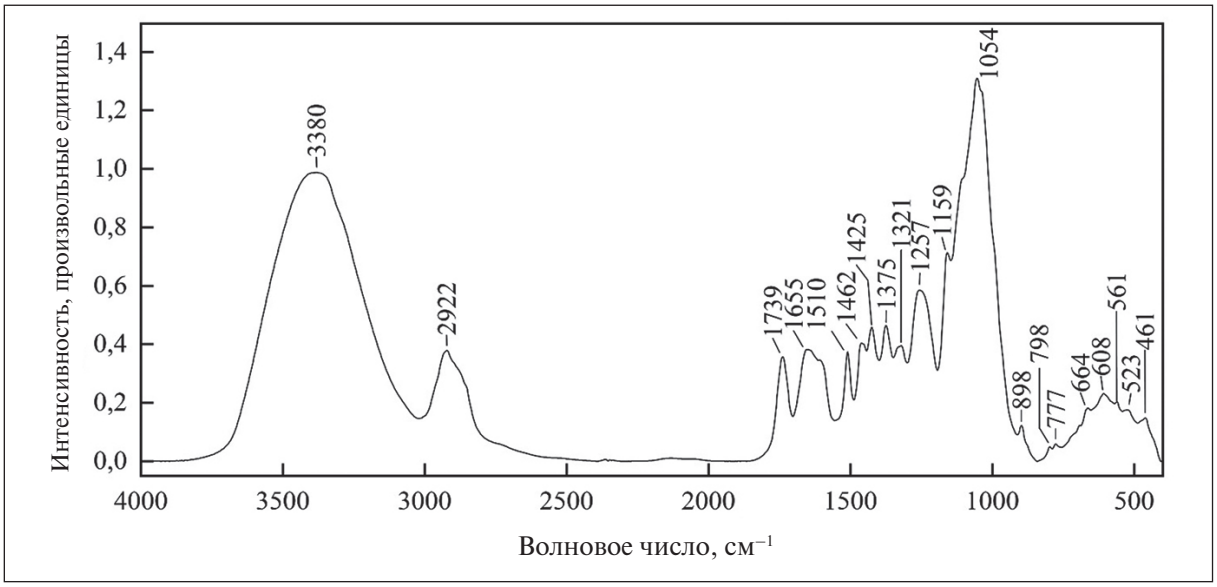

Рис. 4. ИК Фурье-спектр поглощения исходной костры льна

ровка ИК-Фурье спектра и соотнесение полос представлены в табл. 2.

Таким образом, ИК-Фурье спектр свидетельствует о сложной химической структуре костры льна – наличии функциональных групп, присущих спиртам и фенолам, пентозанам, карбонильных соединений, ароматических и алифатических фрагментов, а также наличии кремнийорганических компонентов [1].

Анализ дериватограммы костры льна (рис. 5) выявил несколько последовательных термических стадий, каждая из которых сопровождается характерными энергетическими эффектами и потерей массы (табл. 3).

Подведя итог, можно сказать, что табличные данные свидетельствуют о высоком содержании минеральных веществ в костре льна.

2. Характеристика продуктов синтеза

Извлечение ценных соединений из костры льна осуществляли по технологии, представленной на рис. 6.

На рис. 7 и в табл. 4 представлены детальные характеристики микроструктуры, элементного распределения и усредненного состава целлюлозы, диоксида кремния и лигнина, полученных из костры льна.

Анализ данных табл. 4 показал, что в полученной целлюлозе присутствует большое количество C (41,09%) и O (38,16%), что характерно для природной целлюлозы. В меньшем количестве в цел-

Таблица 2. Расшифровка полос поглощения на ИК-Фурье спектре порошка костры льна

Характеристика	Область поглощения, $см^{-1}$
ν-колебания –OH (индекс симметрии ≈ 1,04)	3380
ν-колебания C–H	2922
ν-колебания карбонильной группы (CHX–COOH)	1739
δ-колебания H_2O	1655
наложение ν-колебаний C=C	1620
δ-колебания CH и CH_2OH в алифатических группах	1465–1410
R–SO_2–OR	1375
δ-колебания –COH	1321
–$SiCH_3$	1245
δ-колебания –OH и –CH_2	1159
ν-колебания C–O	1150–950
$ν_{as}$-колебания Si–O–Si	1080
ν-колебания связи C–O–C	1054
δ-колебания C=C, δ-колебания Si–C	898
ароматические соединения, δ-колебания C–H в ароматических кольцах	850–560
δ-колебания Si–O–Si	664, 608
Si–OH	461

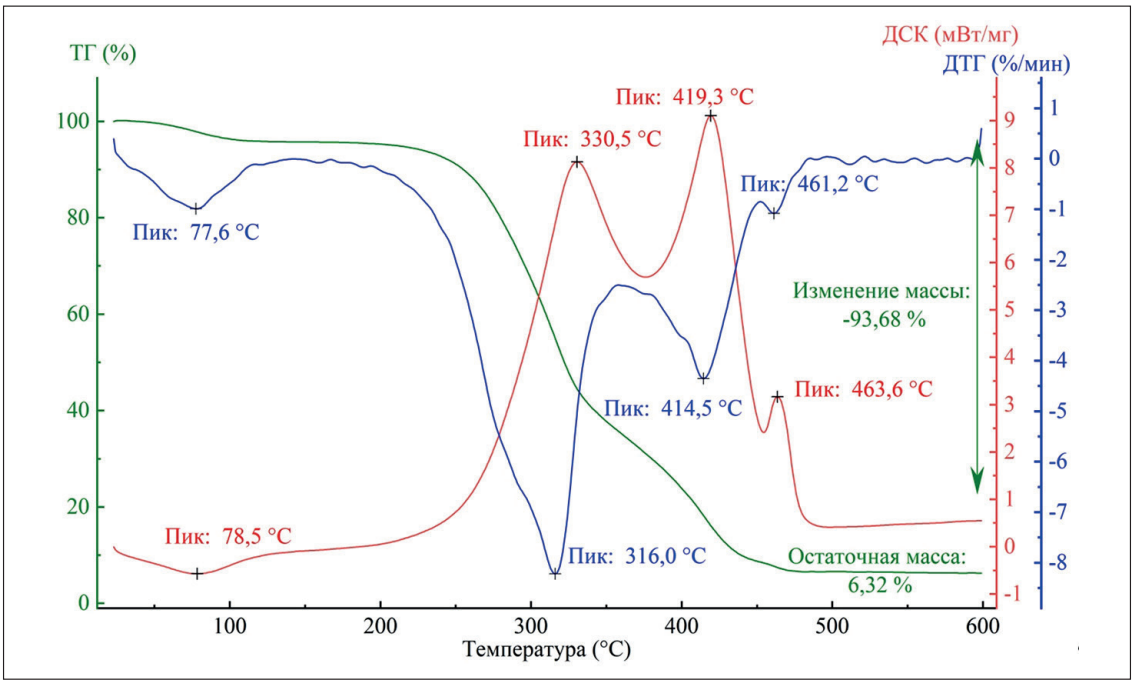

Рис. 5. Дериватограмма костры льна

Таблица 3. Расшифровка термических эффектов порошка костры льна

T, °C	Эффект	Объяснение эффекта
78,5	эндотермический, потеря массы	удаление физически и химически связанной воды из образца
330,5	экзотермический, значительная потеря массы	разложение органической части костры и окисление продуктов этого разложения (горение)
375,0	эндотермический	плавление и разложение минеральных компонентов
419,3	экзотермический, потеря массы	интенсивное сгорание углерода
419,3–455,0	эндотермический	образование низкотемпературного твердофазного расплава
463,6	экзотермический	кристаллизацией новых минеральных фаз из образца
461,2	экзотермический, потеря массы	разложение карбонатов с выделением CO_2, образовавшихся из расплава
490,0	–	завершение всех термических процессов (остаточная масса ~6,32 %)

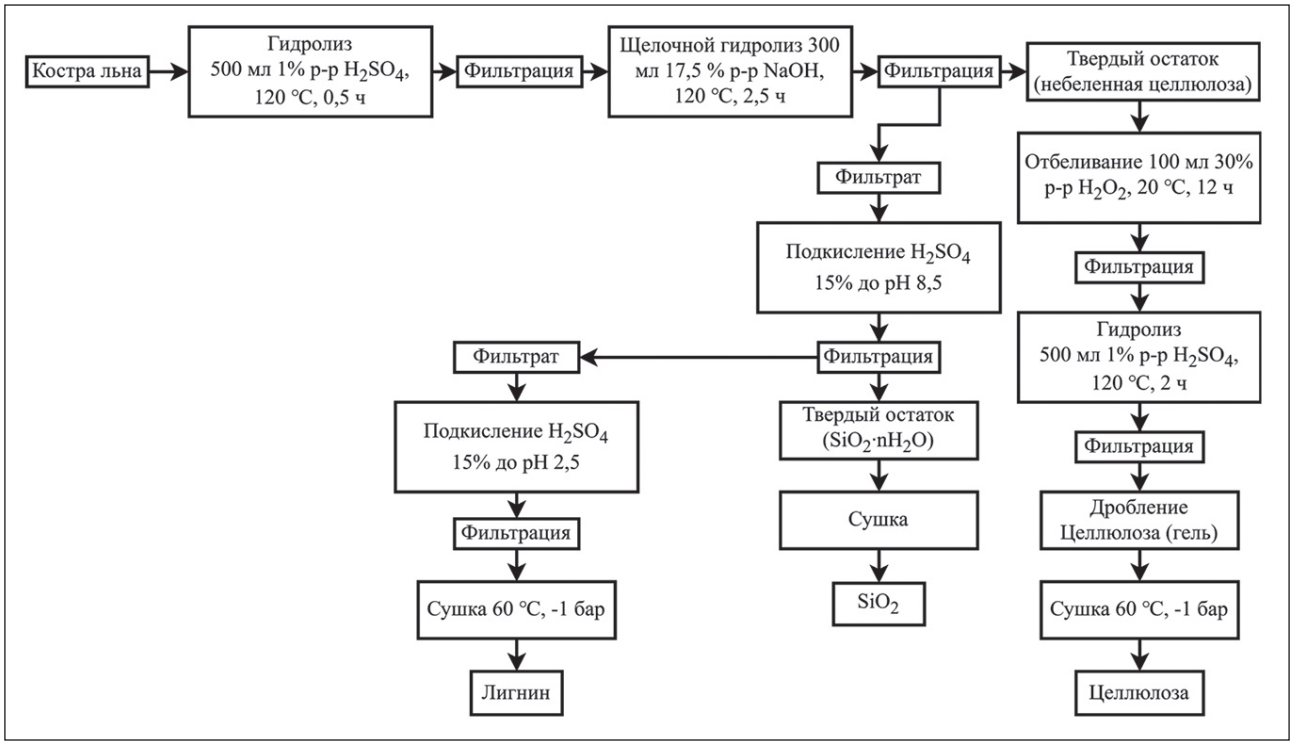

Рис. 6. Схема извлечения из костры льна лигнина, диоксида кремния и целлюлозы [37]

люлозе присутствуют Na (12,17%) и S (8,38%). Также в полученном продукте присутствуют Al, Si, K и Ca в минимальном соотношении.

В полученном диоксиде кремния преобладают C (49,88%) и O (42,0%). Также заметно наличие S (6,65%). В минимальном количестве зафиксированы атомы K (0,08%). Содержание атомов Si составило 1,00%.

В полученном лигнине в большом количестве содержатся C (56,95%) и O (33,25%). Также заметно наличие Na (5,42%) и S (4,21%). В качестве примесей в продукте присутствуют Si и Ca.

Наличие Na и S в полученных продуктах обусловлено тем, что Na_2SO_4 является сопутствующим продуктом синтеза. После несложных методов очистки и промывки целлюлозы можно получить материал высокой степени чистоты. Для получения более чистого диоксида кремния необходимо применить прокаливание и промывку материала. Для очистки лигнина подойдут такие же методы очистки, как для целлюлозы.

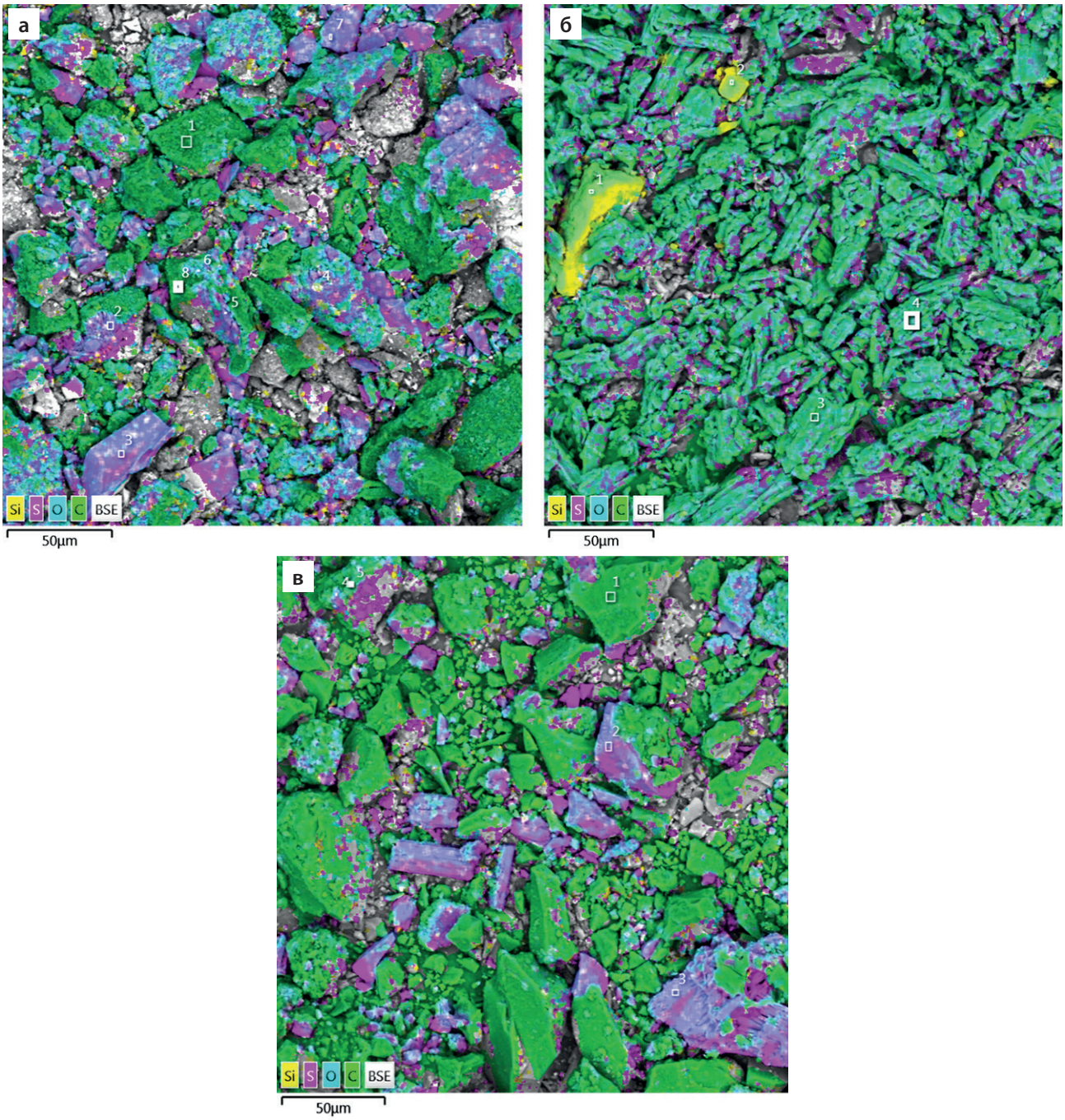

Рис. 7. Многослойная карта ЭДС: а) целлюлозы; б) диоксида кремния; в) лигнина

Таблица 4. Усредненный элементный состав целлюлозы, вес. %

Материал	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca
Целлюлоза	41,09	38,16	12,17	–	0,04	0,05	8,38	0,05	0,06
Диоксид кремния	49,88	42,02	0,36	–	–	1,00	6,65	0,08	–
Лигнин	56,95	33,25	5,42	–	–	0,09	4,21	–	0,07

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования продемонстрировали возможность эффективного извлечения из льняной костры ценных высокодисперсных материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами. Применение комплекса специализированных методов очистки и промывки, включая фильтрацию и центрифугирование, позволяет достичь высокой степени чистоты данных материалов, что существенно расширяет спектр их потенциального практического применения в строительной индустрии. Полученные результаты представляют собой значимый вклад в развитие материаловедения и технологий переработки вторичного сырья, открывая новые перспективы для создания экологически чистых и инновационных строительных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Усов Б.А., Окольникова Г.А., Акимов С.Ю. К вопросу состояния инновационных направлений развития производства строительных материалов из отходов промышленности. *Экология и строительство*. 2017;1:14–25. EDN: ZNHTSR

2. Пичугин А.П., Смирнова О.Е., Хританков В.Ф. Композиционные прессованные материалы на основе органического сырья. *Эксперт: теория и практика*. 2023;2(21):75–81. https://doi.org/10.51608/26867818_2023_2_75 EDN: WOYXHI

3. Савенко А.А., Столярова Ю. В., Шадрина О. М. Ресурсосбережение в современном строительстве. *Научные труды КубГТУ*. 2017;11:112–122. EDN: XMRKVF

4. Rautela R., Kumar S., Bhatt M., Kaur J., Prakash N., Gupta V. Role of Energy-Efficient Technology to Build Sustainable Cities. *Advanced Technologies for Realizing Sustainable Development Goals: 5G, AI, Big Data, Blockchain, and Industry 4.0 Application*. 2024; 1–9. https://doi.org/10.2174/9789815256680124010004

5. Мочалова Л.А. Циркулярная экономика в контексте реализации концепции устойчивого развития. *Journal of New Economy*. 2020; 21(4):5–27. https://doi.org/10.29141/2658-5081-2020-21-4-1 EDN: DWBMIT

6. Смирнова О.Е. Теплоизоляционные материалы на основе костры льна: *автореферат дис. канд. техн. наук*: 05.23.05 / О.Е. Смирнова; науч. рук. А.Ф. Бернацкий. Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). 2007. EDN: NJCFJL

7. Пичугин А.П., Хританков В.Ф., Смирнова О.Е. *Эффективные технологии при использовании растительного сырья в строительстве: монография*. 2020. ISBN: 978-5-7795-0922-0. EDN: RHZMDF

8. Черкашина Н.И., Павленко З.В., Домарев С.Н., Ручий А.Ю., Солгалов В.В. Создание композиционного материала на основе растительных компонентов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2024;1(16):67–76. https://doi.org/10.15828/2075-85452024-16-1-67-76 EDN: QNOAYS

9. Сусоева И.В., Вахнина Т.Н., Свиридов А.Б.. Химический состав и способ утилизации отходов производства хлопковых и льняных волокон. *Химия растительного сырья*. 2017;3:211–220. https://doi.org/10.14258/jcprm.2017031492 EDN: ZFLOCR

10. Луговой Ю.В., Чалов К.В., Степачева А.А., Косивцов Ю.Ю., Сульман Э.М. Исследование кинетики процесса термической деструкции костры льна. *Бюллетень науки и практики*. 2017;12:76–83. https://doi.org/10.5281/zenodo.1101163 EDN: ZWSMRP

11. Комарова Н.Г., Храбровская В.А. Разработка метода физико-химической переработки отходов производства льна. *Ползуновский вестник*. 2011;4(1):246–250. EDN: OIKHEB

12. Прищенко Н.А., Заболотная А.М., Руденко А.А., Ярыгин Д.В., Дорожкин В.П., Гулая Ю.В., Дворницин А.А., Лим Л.А. Перспективы применения отходов сельскохозяйственных культур в производстве полимерных композитов. *Молодой ученый*. 2017;2.1(136.1):27–30. EDN: XRVHIN

13. Yu B., Fan G., Zhao S., Lu Y., He Q., Cheng Q., Yan J., Chai B., Song G. Simultaneous isolation of cellulose and lignin from wheat straw and catalytic conversion to valuable chemical products. *Applied Biological Chemistry*. 2021; 64:1–13. https://doi.org/10.1186/s13765-020-00579-x EDN: HDFOTK

14. Захарчук Д.Д. Костра льна: состав и перспективы переработки для получения пищевых волокон. *74-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: тезисы докладов*. 2023;92–93. https://elib.belstu.by/handle/123456789/63450

15. Sachan N., Yadav D., Chandra P. Ethnomedicinal Uses, Phytochemistry, Pharmacological Effects, Pre-clinical and Clinical Studies on Flaxseed: A Spice with Culinary Herbbased Formulations and its Constituents. *Science of*

Spices and Culinary Herbs - Latest Laboratory, Pre-clinical, and Clinical Studies. 2021;28–53. https://doi.org/10.2174/9789814998123121040004

16. Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., Титунин А.А. Оценка влияния структуры и химического состава растительного наполнителя на свойства композитов теплоизоляционного назначения. *Лесной вестник*. 2019; 23(1):94–101. https://doi.org/10.18698/2542-1468-2019-1-94-101 EDN: ZABAUP

17. Чендылова Л.В., Каретникова Н.В., Марченко Р.А., Алашкевич Ю.Д. О возможности использования отходов льна в целлюлозно-бумажной промышленности. *Решетневские чтения*. 2016;322–323. EDN: YHZRAL

18. Патент А. с. 931872 СССР, МКЛ{3} D 21 C 3/02. Способ получения целлюлозы: № 3008057/29-12: заявл. 21.11.1980: опубл. 30.05.1982 / А. Д. Алексеев, И. И. Савина, В. М. Резников [и др.]; патентообладатель Белорусский технологический институт им. С. М. Кирова. 3 с.

19. Prosvirnikov D.B., Safin R.G., Zakirov S.R. Microcrystalline Cellulose Based on Cellulose Containing Raw Material Modified by Steam Explosion Treatment. Solid State Phenomena. *Trans Tech Publications*. 2018; 284:773–778. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.773 EDN: XZWCDR (in Russ.)

20. Угрюмов С.А. Применение костры льна в производстве клееных материалов. *Лесной вестник*. 2002;2:186–188. EDN: HVSFOT

21. Вильданов Ф.Ш., Латыпова Ф.Н., Красуцкий П.А., Чанышев Р.Р. Биоразлагаемые полимеры современное состояние и перспективы использования. *Башкирский химический журнал*. 2012;19(1):135–139. EDN: NLJRBV

22. Тасекеев М.С., Ермеева Л.М. *Производство биополимеров как один из путей решения проблем экологии и АПК: аналитический обзор*. 2009; 7.

23. Мазитова А.К., Аминова Г.К., Зарипов И.И., Вихарева И.Н. Биоразлагаемые полимерные материалы и модифицирующие добавки: современное состояние. Часть II. *Нанотехнологии в строительстве*. 2021;13(1):32–38. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-1-32-38 EDN: VPHHVP

24. Сырцова М.Ю., Максимова М.Г. Полилактид – как основа развития технологии в области биоразлагаемых полимеров. *Вестник магистратуры*. 2019;2-2(89):12–13. EDN: YVSTTV

25. Зеленухо Е.В., Скуратович И.В., Лаптенок С.А., Красовская Е.А. Использование костры льна для получения композитного топлива. *Научные горизонты*. 2023;8(72):41–50. EDN: FLMRNE

26. Федосенко И.Г., Жарская П., Дубоделова Е.В., Веретиков И.И. Использование отходов переработки льна для получения топливных гранул. *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн*. 2024;215–217. EDN: ATZYXL

27. Фомин В.А., Гузеев В.В. Биоразлагаемые полимеры, состояние и перспективы использования. *Пластические массы*. 2001;2:32.

28. Ilyas R.A., Sapuan S.M. Biopolymers and Biocomposites: Chemistry and Technology. *Current Analytical Chemistry*. 2020; 16(5): 500–503. (in Russ.) https://doi.org/10.2174/1573411016052006030953 11 EDN: JAFELB

29. Pattanayak S., Priyadarsini P., Singh Y.D. Cellulose and Nanocellulose Productions from Lignocellulosic Biomass for Biofuel Production for Biofuel Production. *Current Analytical Chemistry*. 2021;4. https://doi.org/10.2174/2405463104999201231195628 (in Russ.)

30. Hasan M.S., Sardar M.R., Shafin A.A., Rahman M.S., Mahmud M., Hossen M.M. A Brief Review on Applications of Lignin. *Journal of Chemical Reviews*. 2023; 5(1):56–82. https://doi.org/10.22034/jcr.2023.359861.1186

31. Шарков В.И., Куйбина Н.И. *Химия гемицеллюлоз*. 1972; 440.

32. Bourakadi K.E., Semlali F.Z., Hammi M., Achaby M.E. A review on natural cellulose fiber applications: Empowering industry with sustainable solutions. *International journal of biological macromolecules*. 2024; 281(2):135773. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135773

33. Патент RU 2313502 C1 Российская Федерация, МПК C04B 18/24, C04B 40/00. Способ получения органического строительного материала на основе льняной костры: № 2006119092/03: заявл. 31.05.2006: опубл. 27.12.2007 / А.Н. Стеблин, Н.А. Стеблин; патентообладатель ГНУ ВНИПТИМЛ Россельхозакадемия. 9.

34. Ошкордин О.В., Лаврова Л.Ю., Усов Г.А. Теоретические исследования интенсификации процесса механоактивации органопорошков из растительного сырья. *Казанская наука*. 2011;2:34–36. EDN: NYGZTH

35. Питель Т.С., Золотарев А.С. Исследование проблем создания без клеевого композитного строительного материала на основе рециклинга растительных отходов растительных отходов. *Научные исследования – сельскохозяйственному производству*. 2023;379–384. EDN: GRJHUF

36. Подгорбунских Е.М. Исследование механоферментативных превращений полимеров труднопереработываемого растительного сырья: *автореферат дис. канд. хим. наук*: 02.00.21 / Е.М. Подгорбунских; науч. рук. А.Л. Бычков; Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии. 2018. EDN: PFWAKV

37. Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Синебок Д.А., Самойлова Ю.М., Баринов Р.А. Получение, состав и свойства кремний- и углеродсодержащих продуктов переработки шелухи гречихи. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2025;6:95–106. https://doi.org/10.34031/2071-7318-2025-10-6-95-106 EDN: KCZRGK

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Черкашина Наталья Игоревна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник-руководитель научно-исследовательской лаборатории «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» УНИР, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, natalipv13@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-0161-3266

Ручий Артём Юрьевич – инженер-исследователь НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, artiem.ruchii.99@mail.ru, https://orcid.org/0009-0000-2617-5624

Пушкарская Дарья Васильевна – младший научный сотрудник НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» УНИР, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, dashamenzhulina@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-1583-7992

Кужелева Анна Алексеевна – младший научный сотрудник НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» УНИР, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, akujeleva@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0009-7115-6866

Литвинова Юлия Игоревна – младший научный сотрудник НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья» УНИР, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, litwinova.julija@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0007-9132-1203

ВКЛАД АВТОРОВ

Черкашина Н.И. – научное руководство; постановка целей и задач исследования; анализ результатов исследования; доработка текста статьи.

Ручий А.Ю. – разработка методологии исследования; анализ результатов исследования; выводы статьи.

Пушкарская Д.В. – проведение экспериментальной части исследования; графическое и табличное представление результатов.

Кужелева А.А. – проведение экспериментальной части исследования; анализ результатов исследований; написание первоначального текста статьи.

Литвинова Ю.И. – проведение литературного обзора; проведение экспериментальной части исследования.

Автор заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 19.11.2025; одобрена после рецензирования 04.02.2026; принята к публикации 12.02.2026.