

Научная статья
УДК 674.81

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА МОДИФИКАЦИИ ГИДРОПЕРИТОМ МЕТОДОМ ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ СВЯЗУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

А. С. Ершова¹, Т. А. Захарова², А. В. Артемов³,
А. Е. Шкуро⁴, В. Г. Бурындин⁵

¹⁻⁵ Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Анна Сергеевна Ершова,
ershovaas@m.usfeu.ru

Аннотация. В исследовании с помощью метода инфракрасной спектроскопии были изучены механизмы химических преобразований лигнина модифицированной гидроперитом биомассы борщевика Сосновского. Модификация гидроперитом вызывает комбинацию эффектов пероксида водорода и карбамида.

Ключевые слова: пластик, модификатор, гидроперит, борщевик, ИК-спектры, механизм

Для цитирования: Изучение механизма модификации гидроперитом методом ИК-спектроскопии при получении композиционного материала без применения связующих веществ / А. С. Ершова, Т. А. Захарова, А. В. Артемов [и др.] // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий = Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : материалы XVII Международной научно-технической конференции. Екатеринбург : УГЛТУ, 2026. С. 450–457.

Original article

STUDY OF MODIFICATION MECHANISM BY HYDROPERITE USING IR SPECTROSCOPY DURING PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIAL WITHOUT RESINS

Anna S. Ershova¹, Tamara A. Zakharova², Artyom V. Artyomov³,
Alexey E. Shkuro⁴, Victor G. Buryndin⁵

¹⁻⁵ Ural State Forestry University, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Anna Sergeevna Ershova, ishadow104@gmail.com

Abstract. In this study, infrared spectroscopy was used to investigate the mechanisms of chemical transformations of lignin in *Heracleum sosnowskyi* biomass modified by hydroperite. Hydroperite modification causes a combination of effects from hydrogen peroxide and carbamide.

Keywords: elastic, modifier, hydroperite, heracleum (*Heracleum sosnowskyi*), IR spectra, mechanism

For citation: Ershova A. S., Zakharova T. A., Artyomov A. V., Shkuro A. E., Buryndin V. G. (2026) Izuchenie mekhanizma modifikatsii gidroperitom metodom IK-spektroskopii pri poluchenii kompozitsionnogo materiala bez primeneniya svyazuyushchikh veshchestv [Study of modification mechanism by hydroperite using ir spectroscopy during production of composite material without resins]. *Effektivnyi otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeistviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologii* [Effective reaction to modern challenges of the interaction between human and nature, human and technologies : materials of the XVII International Scientific and Technical Conference]. Ekaterinburg : USFEU, 2026. P. 450–457. (In Russ).

Ранее были выполнены работы, посвящённые изучению применения нового модификатора в форме клатрата пероксида водорода с карбамидом (мочевинной) $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$ (гидроперита) для получения композиционных материалов без применения связующих веществ (КМ-БС) на основе биомассы борщевика Сосновского [1, 2].

Установлено, что гидроперит положительно влияет на свойства получаемого материала, способствуя улучшению его физико-механических характеристик. Наибольшее улучшение наблюдается при расчете количества модификатора относительно содержания карбамида (соотношение карбамида к одному молю лигнина прессованного сырья) [1]. Было высказано предположение, что в данном случае протекают два параллельных процесса: химическая активация лигнина карбамидом посредством реакций поликонденсации и физико-химическим воздействием модификатора на лигнин в пьезотермических условиях (включая процессы диспергирования и сольватации).

При этом важно учитывать комбинированное влияние обоих компонентов клатратного соединения на лигнин. Предшествующая обработка пероксидом водорода повышает активность лигнина, делая его более восприимчивым к реакции с карбамидом.

Необходимо отметить, что в составе применяемого модификатора имелось избыточное количество карбамида. Под действием нагрева и влаги неиспользованный карбамид подвергается разложению, выделяя аммонийные ионы, которые, вступая в реакцию с формальдегидом, содержащимся в лигноцеллюлозе, образуют гексаметилентетрамин (уротропин). Известно, что уротропин применяется при синтезе фенол-

формальдегидных смол и способен формировать резитоподобные структуры в исследуемых условиях [3].

Следовательно, при пьезотермической обработке биомассы борщевика Сосновского, предварительно обработанной гидроперитом, протекают комплексные химические преобразования. Благодаря своим индивидуальным механизмам взаимодействия с лигнином, компоненты модификатора обеспечивают получение композита с уникальными эксплуатационными характеристиками.

Для полного понимания происходящих химических процессов, протекающих при образовании КМ-БС из лигноцеллюзосодержащей биомассы в присутствии гидроперита, необходимо проведение детального исследования с использованием современных методов, таких, как метод инфракрасной спектроскопии (FTIR-анализа).

Цель настоящей работы: изучение химического механизма формирования композиционного материала на основе биомассы борщевика Сосновского с применением метода FTIR-спектроскопии.

Были получены образцы КМ-БС согласно вариантам, рассмотренным в работе [1]:

- вариант №1 «Расчет по пероксиду водорода». В расчете принималось количество пероксида водорода по количеству лигнина в пресс-сырье: 5 %;
- вариант №2 «Расчет по карбамиду». В расчете принималось количество карбамида на реакцию 1 молям лигнина пресс-сырья: 0,006 моль.

Полученные образцы подвергались измельчению до состояния пыли и просеивались через сито с диаметром отверстий 0,125 мм.

ИК-спектры регистрировались на ИК-спектрометре Bruker Alpha (Германия) FTIR с помощью приставки однократного нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с алмазной призмой. Условия записи спектров:

- диапазон от 4000 до 500 см^{-1} ;
- разрешение – 4 см^{-1} ;
- параллельные сканирования образца – 128.

На рис. 1–2 представлены ИК-спектры полученных образцов КМ-БС.

Стоит отметить, что спектры материалов КМ-БС, полученные по варианту № 1 («расчет по пероксиду водорода») и варианту № 2 («расчет по карбамиду»), оказались практически идентичными. Это свидетельствует о том, что оба подхода приводят к формированию аналогичных структурных изменений в материале, несмотря на различия в исходных расчетах концентрации реагентов.

Такое сходство спектральных характеристик позволяет сделать вывод, что решающим фактором является не столько концентрация конкретного компонента (пероксида водорода или карбамида), сколько общее

состояние системы и условия ее обработки. Вероятно, оба пути модификации инициируют схожие механизмы образования новых функциональных групп и межмолекулярных связей, приводящие к одинаковым изменениям спектра поглощения.

Поскольку спектры обоих вариантов показали высокую степень совпадения, дальнейшее обсуждение целесообразно вести на примере спектра, зарегистрированного для образца варианта № 2 («расчет по карбамиду»).

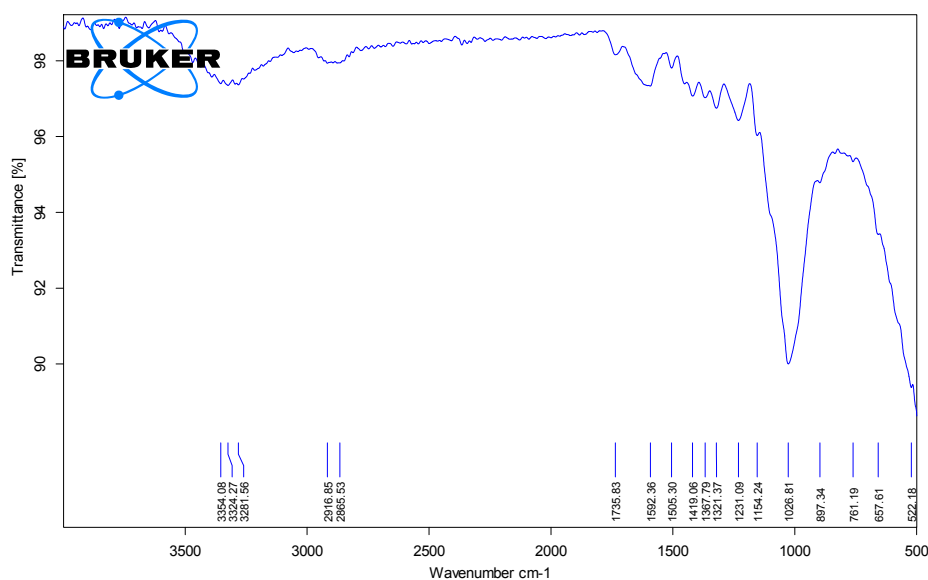


Рис. 1. ИК-спектр образца КМ-БС (контроль)

Как видно из рис. 1 (контроль), основные полосы: С–Н ($\sim 2900\text{ см}^{-1}$), С–О ($\sim 1100\text{ см}^{-1}$), широкий ОН-пик ($\sim 3300\text{ см}^{-1}$) представляют собой исходный материал без признаков сильной химической модификации. Отсутствуют полосы, характерные для карбонильных и амидных групп.

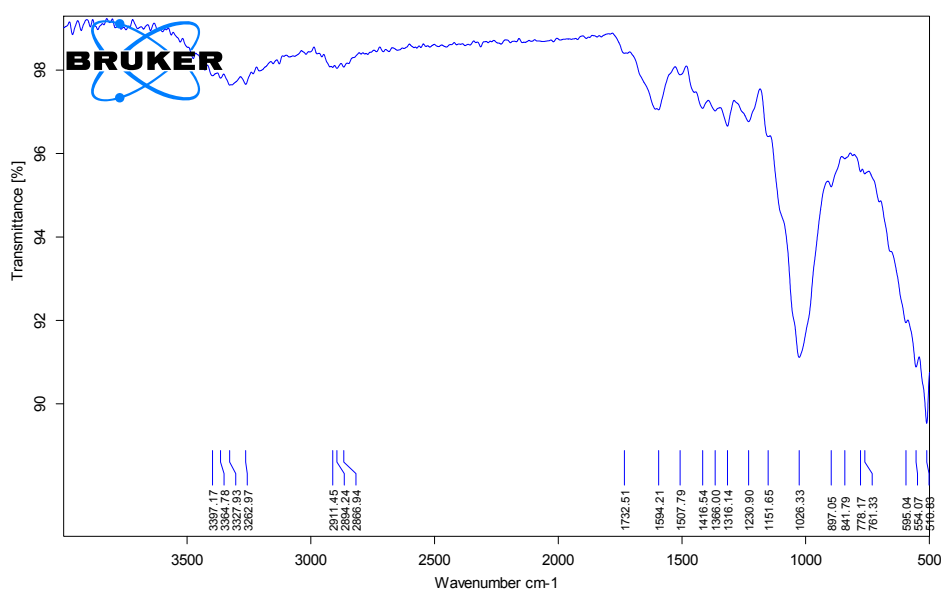


Рис. 2. ИК-спектр образца КМ-БС (вариант № 2)

Для ИК-спектра для образцов варианта № 2 (рис. 2) выделены спектры: ОН/НН растяжение ($\sim 3300 \text{ см}^{-1}$), C=O ($\sim 1700 \text{ см}^{-1}$), C–O и пероксидные группы ($\sim 1000\text{--}1200 \text{ см}^{-1}$). Признаки взаимодействия с пероксидом водорода выражены умеренно.

Основные особенности спектров и обобщённые результаты приведены в таблице ниже.

Результаты FTIR-анализа

Образец	$\approx 3300 \text{ см}^{-1}$ (ОН/НН)	$\approx 2900 \text{ см}^{-1}$ (C–H)	$\approx 1700 \text{ см}^{-1}$ (C=O)	$\approx 1550 \text{ см}^{-1}$ (N–H изгибание)	$\approx 1100\text{--}1000 \text{ см}^{-1}$ (C–O / C–N)	Особенности
Контроль	+	+	–	–	+	Базовая структура, алифатические структуры
Вариант № 1	+	+	+	+	+	Смешанный профиль (окисление + амиды), гидрат/производное мочевины
Вариант № 2	+	+	+	+	+	Схожий спектр

Модификация гидроперитом по обоим вариантам дает комплексное изменение спектра и структуры. Объединяет признаки как окисления (наличие C=O), так и амидной природы (N–H изгибания). Это подтверждает, что гидроперит участвует в двойственном взаимодействии: пероксид водорода окисляет, а мочевины модифицирует структуру амидными группами. Сравнительный вывод: гидроперит вызывает комбинацию эффектов пероксида и карбамида.

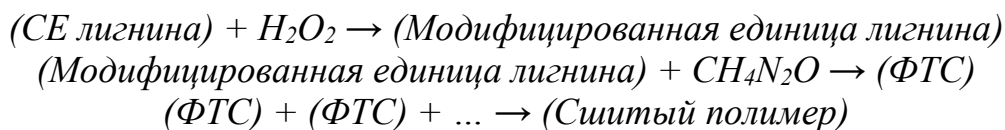
Также наблюдения подтверждают участие основных компонентов растительного сырья (лигнин, целлюлоза) в формировании конечного продукта и позволяют заключить, что структура полученного композита обладает сложной сетью внутримолекулярных и межмолекулярных взаимодействий, определяющих его уникальные характеристики.

Исходя из анализа полученных и литературных данных, возможно предположить схемы реакций, объясняющие механизм формирования композиции КМ-БС с участием гидроперита:

1. Схема 1 «Последовательное воздействие пероксида водорода и карбамида»

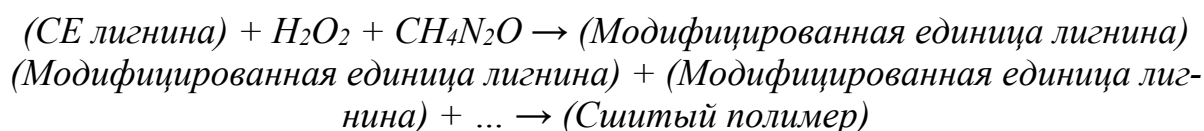
Пероксид водорода (H_2O_2) первоначально окисляет структурные единицы (СЕ) лигнина в кислой среде (в условиях пьезотермической обработки растительного сырья создается кислая среда в процессе термогидролиза), раскрывая активные группы (центры). Затем карбамид ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$)

вступает в реакцию с этими группами, формируя фрагменты терморезистивной смолы (ФТС), способные далее объединяться в сшитый полимер:



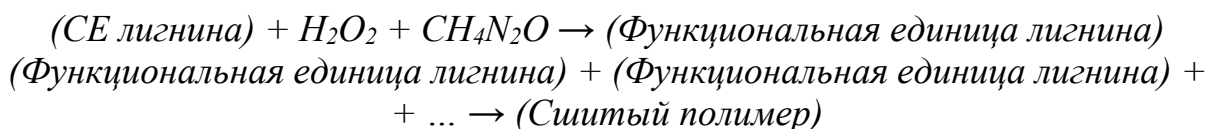
2. Схема 2 «Одновременное воздействие пероксида и карбамида на разные участки лигнина»

Пероксид и карбамид реагируют с разными функциональными группами лигнина параллельно, образуя промежуточные продукты, которые впоследствии сшиваются в единый сетчатый полимер:



3. Схема 3 «Совместное воздействие пероксида и карбамида на общую единицу лигнина»

Пероксид и карбамид совместно участвуют в одной и той же реакции с одним участком лигнина, вызывая создание единого функционального фрагмента, который далее формирует соединения путем объединения аналогичных фрагментов в единый сетчатый полимер:



Каждая схема модификации обладает своей значимостью и может реализовываться как по отдельности, так и в комбинации с другими в зависимости от условий пьезотермической обработки и вида растительного сырья. Выбор варианта модификации гидроперитом биомассы борщевика не является решающим для получения композитного материала КМ-БС, поскольку ключевыми факторами остаются общие принципы взаимодействия ее основных компонентов [4].

Исследование показало, что метод модификации путем добавления гидроперита, независимо от выбранного способа расчёта дозировки (варианты № 1 и № 2), приводит к формированию аналогичного состава активированных функциональных групп и особенностей внутренней структуры лигноуглеводного комплекса. Следовательно, выбор варианта модификации гидроперитом биомассы растительного сырья должен определяться путем оптимизации основных параметров технологического процесса получения КМ-БС (влажность сырья, температура прессования и проч.) [5].

Список источников

1. Ершова А. С., Артемов А. В., Буриндин В. Г. Новый химический модификатор для получения композиционного материала без применения связующих веществ // Древесные плиты и фанера: теория и практика: XXVIII Всероссийская научно-практическая конференция, Санкт-Петербург, 12–13 марта 2025 года. СПб. : Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова, 2025. С. 80–84.

2. Ершова А. С., Артемов А. В. Перспективные химические модификаторы для получения композиционного материала без применения связующих веществ на основе биомассы борщевика Сосновского // XXVIII Всероссийская конференция молодых учёных-химиков (с международным участием): тезисы докладов, Нижний Новгород, 15–17 апреля 2025 года. Нижний Новгород : Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2025. С. 592.

3. Нетоксичные древесно-полимерные композиции на основе модифицированных аминокформальдегидных смол / В. Е. Цветков, О. П. Мачнева, М. Ю. Екимова, А. Е. Шкуро // Клеи. Герметики. Технологии. 2025. № 7. С. 36–40. DOI 10.31044/1813-7008-2025-0-7-36-40.

4. Исследование превращений содержащегося в растительном сырье лигнина как естественного связующего при получении пластика в закрытых пресс-формах / А. В. Артемов, В. Г. Буриндин, П. С. Кривоногов [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 9. С. 8–15. DOI 10.31044/1813-7008-2022-9-8-15.

5. Определение и оптимизация технологических параметров прессования реактопластов : Учебно-методическое пособие / Н. М. Мухин, А. Е. Шкуро, А. В. Артемов, О. Ф. Шишлов. Екатеринбург : УГЛТУ, 2024. 70 с.

References

1. Ershova A. S., Artemov A. V., Buryndin V. G. New chemical modifier for obtaining composite material without the use of binder substances // Wood-based panels and plywood: theory and practice: Proceedings of the XXVIII All-Russian Scientific-Practical Conference, St. Petersburg, March 12–13, 2025. St. Petersburg : Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov, 2025. P. 80–84.

2. Ershova A. S., Artemov A. V. Prospective chemical modifiers for obtaining composite materials based on *Heracleum sosnowskyi* biomass without using binders // Theses of Reports of the XXVIII All-Russian Conference of Young Chemists with International Participation, Nizhny Novgorod, April

15–17, 2025. Nizhny Novgorod : National Research Nizhny Novgorod State University named after N. I. Lobachevsky, 2025. P. 592.

3. Non-toxic wood-polymer compositions based on modified amino-formaldehyde resins / V. E. Tsvetkov, O. P. Machneva, M. Yu. Ekimova, A. E. Shkuro // Adhesives. Sealants. Technologies. 2025. № 7. P. 36–40. DOI 10.31044/1813-7008-2025-0-7-36-40.

4. Study of transformations of lignin contained in plant raw materials as a natural binder when producing plastic in closed molds / A. V. Artemov, V. G. Buryndin, P. S. Krivonogov [et al.] // Adhesives. Sealants. Technologies. 2022. № 9. P. 8–15. DOI 10.31044/1813-7008-2022-9-8-15.

5. Determination and optimization of technological parameters of reaktoplast pressing: Tutorial / N. M. Mukhin, A. E. Shkuro, A. V. Artemov, O. F. Shishlov. Ekaterinburg : Ural State Forestry Engineering University, 2024. 70 p.

Сведения об авторах

Анна Сергеевна Еришова – ассистент, ershovaas@m.usfeu.ru;

Тамара Андреевна Захарова – аспирант, marazaratamara@gmail.com;

Артем Вячеславович Артёмов – кандидат технических наук, доцент, artemovav@m.usfeu.ru;

Алексей Евгеньевич Шкуро – доктор технических наук, профессор, shkuroae@m.usfeu.ru;

Виктор Гаврилович Буриндин – доктор технических наук, профессор, buryndinvg@m.usfeu.ru.

Information about the authors

Anna S. Ershova – Assistant, ershovaas@m.usfeu.ru;

Tamara A. Zakharova – Graduate Student, marazaratamara@gmail.com;

Artyom V. Artyomov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, artemovav@m.usfeu.ru;

Aleksey E. Shkuro – Doctor of Technical Sciences, Professor, shkuro-ae@m.usfeu.ru;

Viktor G. Buryndin – Doctor of Technical Sciences, Professor, buryndinvg@m.usfeu.ru.