

ГИДРОТЕРМАЛЬНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ КОМПОНЕНТОВ КОКОСОВОГО ВОЛОКНА В ПРИСУТСТВИИ ЭТАНОЛА И СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Н.В. Зуи — Государственный технический университет им. Ле Куи Дона, г. Ханой, Вьетнам. ORCID: 0000-0003-4110-0035. Эл. почта: nguyenvanduy@lqdtu.edu.vn

П.Ю. Цыганков — Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия. ORCID: 0000-0003-2630-3838. Эл. почта: pavel.yur.tsygankov@gmail.com (для переписки)

Н.В. Меньшутина — Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-7806-1426. Эл. почта: nmenshutina@yandex.ru.

©2025 г. Поступила в редакцию 13.10.2025 г. Прошла рецензирование 20.11.2025 г.
Принята к публикации 20.11.2025 г.

Предложен новый подход к фракционированию кокосового волокна гидротермальным методом с использованием соразтворителей — этанола и сверхкритического (СК) CO₂. Продемонстрирована эффективность метода для выделения ценных компонентов, обусловленная синергетическим эффектом гидротермальной обработки и повышенной растворимостью биомассы в системе этанол — вода — СК-CO₂. В ходе 15-минутной обработки при температуре 110 °С, давлении 12 МПа и соотношении масс волокна и этанола 1 : 20 был достигнут максимальный выход лигнина (65 %), что выше, более чем в 2 раза, нежели при гидротермальной экстракции с добавлением этанола (26 %). Методами ИК- и ЯМР-спектроскопии показано сохранение карбонильных групп и нативного соотношения структурных единиц G (гваяцил) и S (сирингил) в выделенном лигнине в соответствии с литературными данными.

К л ю ч е в ы е с л о в а : сверхкритический CO₂, гидротермальное фракционирование, лигнин, кокосовое волокно, экстракция.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение спроса на биоразлагаемую и экологически безопасную продукцию пробудило новый интерес к сельскохозяйственным и природным ресурсам. Кокосовая шелуха и другие побочные продукты, благодаря своей доступности и особым характеристикам — таким как высокий уровень лигнина и устойчивость к разложению, — становятся востребованным сырьем для различных сфер применения. Современные методы переработки растительного сырья, включая кокосовое волокно, требуют комплексного подхода, основанного на принципах безотходных технологий и системного анализа химико-технологических процессов [1, 2]. Кокосовая шелуха является цельным волокнистым материалом, окружающим плод. Ее состав может варьироваться в зависимости от вида и сорта кокосовой пальмы, а также от климатических условий и региона произрастания [3, 4]. Как любое лигноцеллюлозное сырье, она состоит преимущественно из взаимосвязанных полимеров, таких как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Эти вещества образуют

вторичную клеточную стенку растений, в которой целлюлоза формирует сетчатую структуру, а гемицеллюлоза и лигнин действуют как связующие вещества и наполнители [5].

Целлюлоза — линейный полимер, состоящий из β -D-глюкопиранозных групп, соединенных 1,4- β -гликозидной связью [6]. Гемицеллюлоза — общий термин для обозначения сложной группы полисахаридов, основными структурными единицами которой являются пентозы (D-ксилоза, L-арабиноза) и гексозы (D-глюкоза, D-манноза, D-галактоза) [7, 8]. Степень полимеризации гемицеллюлозы ниже, чем у целлюлозы, поэтому гемицеллюлоза расщепляется легче, чем целлюлоза [9]. Лигнин — трехмерный полимер, состоящий из структурных единиц фенолпропана, соединенных эфирными связями и связями C—C. Его структурные единицы в основном включают G (гваяцил), S (сирингил) и H (*n*-гидроксифенил) [10]. Наиболее распространенная эфирная связь в природном лигнине β -O-4, а другие типы связей включают β -5, α -O-4 [11].

Целлюлоза, как один из основных компонентов целлюлозных биоресурсов, — перспективная альтернатива полимерам на нефтяной основе, обладающая привлекательными свойствами для использования на растущем рынке биосовместимых, биоразлагаемых и экологичных материалов [12]. Материалы на основе целлюлозы, такие как волокна, гидрогели и аэрогели, композиты и пленки, обладают значительными преимуществами по сравнению с синтетическими полимерными аналогами [13]. За последнее десятилетие было установлено, что пористые биоматериалы на основе лигнина обладают большим потенциалом для применения в таких областях, как доставка лекарств, тканевая инженерия, перевязочные материалы, фармацевтические вспомогательные вещества, биосенсоры и медицинские устройства [14].

Лигнин, выделенный из биомассы, используют для получения пористых материалов. Он влияет на механические, термические, антиоксидантные, антибактериальные свойства, а также на биоразлагаемость и биосовместимость материалов. Размер, форма и распределение пор оказывают влияние на структуру материала и такие свойства, как пористость, удельная площадь поверхности, водорастворимость и адсорбционная способность. Эти свойства могут быть полезны в медицине, особенно в тканевой инженерии, в системах контролируемой доставки лекарств, перевязочных материалах и в других областях [15].

Гемицеллюлоза привлекает значительное внимание при разработке функциональных полимерных материалов благодаря своим отличительным особенностям, таким как экологичность, возобновляемость и биоразлагаемость. Недавние исследования были посвящены выделению, структурной характеристике и химической модификации гемицеллюлозы, а также получению материалов на ее основе: функциональных полимеров в форме гидрогелей, аэрогелей, наночастиц, пленок и покрытий. Их применяют при изготовлении биосенсоров, адсорбентов и катализаторов, электродов, упаковочных материалов [5].

Обилие лигноцеллюлозной биомассы способствовало разработке экономически эффективных и экологичных крупномасштабных биотехнологических производств [16, 17]. Обработка биомассы — важный этап ее преобразования в отдельные компоненты, включая целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин. Методы обработки биомассы условно делятся на физические, физико-химические, химические и биологические. Выбор оптимального метода предварительной обработки во многом зависит от цели этой операции, ее экономической оценки и воздействия на окружающую среду [18, 19].

В данном исследовании предложен процесс экстракции компонентов кокосового волокна, ориентированный на снижение экологической нагрузки. Разработанная методика направлена на минимизацию экологического воздействия, сохранение естественной структуры ключевых компонентов кокосового волокна и обеспечение экономической целесообразности процесса.

Цель данной работы — разработка и апробация экологичного метода гидротермального фракционирования кокосового волокна с использованием этанола и сверхкритического (СК) CO_2 для извлечения лигнина с высоким выходом.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данной работе в качестве сырья для экстракции лигнина использовали кокосовую койру из Вьетнама. Экстракцию компонентов кокосового волокна осуществляли методом гидротермальной обработки с использованием соразтворителей. На этапе подготовки кокосовую койру сушили на солнце; затем разрезали на части размером 2×3 см и сушили при 105°C в течение 4 ч. Высушенные частицы дополнительно измельчали и просеивали через сито с размером ячеек 0,1 мм и подвергали гидротермальной обработке.

Принципиальная схема установки для проведения процесса гидротермальной обработки в присутствии CO_2 представлена на рис. 1. Она включает реактор высокого давления (10) периодического действия с мешалкой объемом 300 мл, корпус и крышка которого изготовлены из стали AISI316Ti. Максимальная рабочая температура 500°C , максимальное рабочее давление 30 МПа.

Жидкий CO_2 вводится в реактор из сосуда (1) при температуре окружающей среды и давлении 6 МПа. Чтобы гарантировать подачу CO_2 в насос (6)

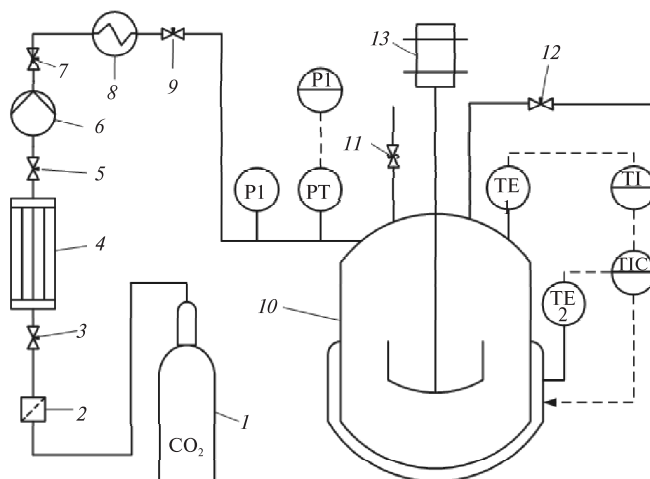


Рис. 1. Принципиальная схема установки для проведения процесса гидротермальной обработки в присутствии CO_2 :

1 — сосуд с жидким CO_2 (6 МПа); 2 — микрофильтры; 3, 5, 7, 9, 12 — игольчатые вентили; 4 — теплообменник; 6 — поршневой насос с пневмоприводом; 8 — термостат; 10 — реактор высокого давления объемом 300 мл; 11 — предохранительный клапан; 13 — регулятор скорости мешалки; PI — манометры; TIC — термометры; T1 — датчики температуры

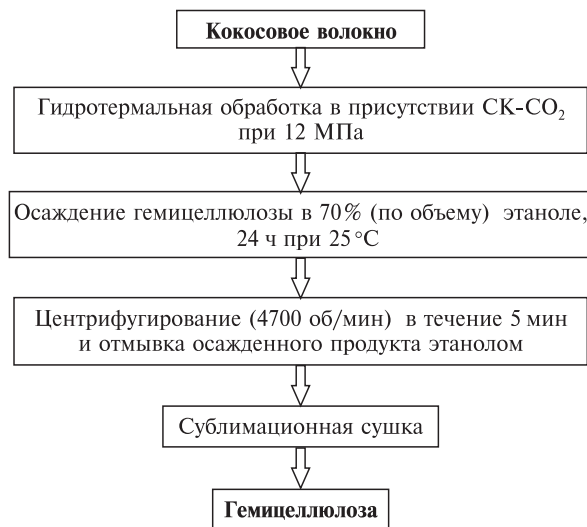


Рис. 2. Схема процесса экстракции гемицеллюлозы гидротермальным методом в присутствии СК-СО₂

в жидком состоянии, он предварительно охлаждается в теплообменнике (4) до температуры ниже 5 °С. Насос повышает давление в зависимости от поставленной задачи (до 40 МПа). Затем СО₂ нагревают в термостате (8) до температуры выше критической и подают в реактор (10). Скорость перемешивания внутри реактора устанавливают регулятором скорости (13). Система поддерживает требуемую температуру и давление, а предохранительный клапан (11) обеспечивает безопасную работу. По окончании процесса реактор охлаждают до 40 °С, давление постепенно снижают до 0,1 МПа с помощью клапана (12), после чего реактор открывают.

Методика последовательного фракционирования кокосового волокна включает два этапа.

Этап 1 — экстракция гемицеллюлозы с использованием СК-СО₂. Схема процесса приведена на рис. 2.

В реактор (10) загружают 5 г высушенной кокосовой койры и 100 мл дистиллированной воды. В процессе гидротермальной обработки смесь непрерывно перемешивают со скоростью 200 об/мин. Реактор нагревают до 120 °С, после чего в систему подают СК-СО₂ до достижения давления 12 МПа. Через 15 мин реактор охлаждают до 40 °С и давление медленно снижают. Содержимое реактора извлекают и фильтруют для отделения твердого остатка от жидкой фракции, содержащей продукты гидролиза гемицеллюлозы. Твердый остаток, обогащенный целлюлозой и лигнином, используют на этапе 2.

Для выделения гемицеллюлозы к полученному фильтрату при комнатной температуре добавляют этанол до достижения объемной доли 70%. Осажденную в течение 12 ч гемицеллюлозу отделяют от раствора центрифугированием при 4700 об/мин в течение 5 мин. Осадок последовательно промывают 80% и 100% (по объему) этанолом до получения прозрачной и бесцветной надосадочной жидкости. Очищенный продукт сушат методом сублимационной сушки.

Этап 2 — экстракция лигнина с использованием этанола и СК-СО₂. Схема процесса приведена на рис. 3.

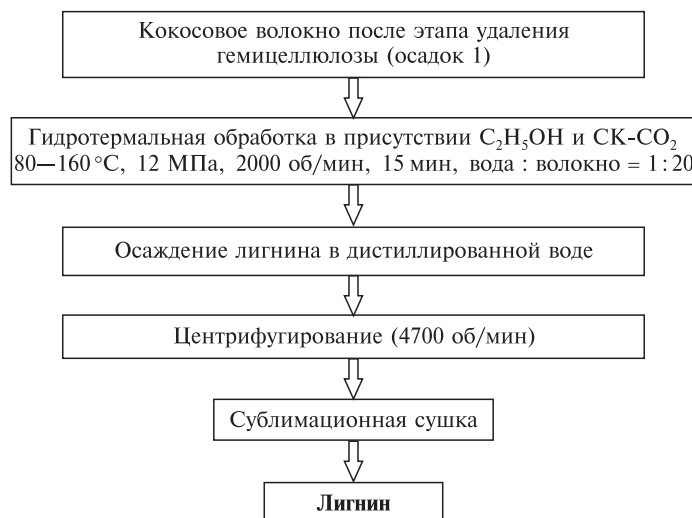


Рис. 3. Схема процесса гидротермальной экстракции лигнина с использованием этанола и СК-СО₂

Твердый остаток после фильтрации (этап 1) массой 5 г помещают в реактор (10). В реактор добавляют 100 г этанола (95 мас. %).

Реактор нагревают до заданной температуры при непрерывном перемешивании. После достижения заданной температуры в систему подают СО₂ до давления 12 МПа. После завершения процесса и охлаждения реактора до 40 °С полученную смесь извлекают, фильтруют и фильтрат выпаривают на роторном испарителе при 40 °С.

Полученную вязкую жидкость вливают в дистиллированную воду в соотношении 1 : 10 по объему для осаждения лигнина. Полученный лигнин трижды промывают водой с использованием центрифуги для удаления водорастворимых примесей. Высушивание лигнина проводят методом сублимационной сушки.

Для анализа полученных образцов лигнина использовали комплекс физико-химических методов анализа. ИК-спектры поглощения регистрировали на Фурье-ИК-спектрометре Nicolet 380 (Thermo Fisher Scientific Inc., США). Химическая структура была изучена методом ЯМР-спектроскопии на спектрометре СХР 200 (Bruker, Германия). Термическую стабильность исследовали с использованием термогравиметрического анализа (ТГА) в интервале температур от 30 до 700 °С. Дополнительно был применен метод УФ-спектроскопии [20–24]. Измерения проведены в Центре коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева.

В соответствии с литературными данными кокосовое волокно состоит из (в мас. %): 28–36 целлюлозы, 40–45 лигнина и до 17 гемицеллюлозы [25]. При расчете выхода лигнина (Y , %) его содержание в исходном кокосовом волокне принимали равным 45 мас. % от сухой массы сырья. Соответственно, величину Y рассчитывали по формуле:

$$Y = 100 \cdot m_{\text{лиг}} / (0,45 m_{\text{исх}}), \%$$

где $m_{\text{лиг}}$ — масса извлеченного лигнина, г; $m_{\text{исх}}$ — масса исходного кокосового волокна, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Внешний вид образца лигнина, полученного экстракцией из кокосовой койры, показан на рис. 4 (цв. вкладка).

На рис. 5 представлены результаты исследования влияния температуры на гидротермальную экстракцию лигнина с использованием этанола и СК-СО₂ в качестве соразтворителей при параметрах процесса, приведенных на рис. 3.

Эти данные показывают, что эффективность экстракции лигнина увеличивается с ростом температуры до 110 °С, после чего она постепенно снижается. Этот факт объясняется частичным разрушением структуры лигнина при высоких температурах. Кроме того, при увеличении температуры растворимость СК-СО₂ в воде снижается.

Влияние СК-СО₂ на экстракцию лигнина оценено по результатам двух экспериментов — с использованием этанола и СО₂ и, в аналогичных условиях без добавления СО₂, — гидротермальной обработкой в присутствии этанола. Более чем двукратное возрастание выхода лигнина в присутствии СО₂ (с 26 до 65 %) предположительно связано с интенсификацией процесса диффузии растворителя в структуру кокосового волокна и разрушением связи между лигнином и другими компонентами. Присутствие соразтворителей в реакционной среде также усиливает потенциал СК-СО₂. Они играют ключевую роль в повышении сольватационных способностей и полярности. Кроме того, сложная физическая структура кокосового волокна изменяется при обработке растворителями при высоком давлении и температуре. Это вызывает расширение волокнистых микропор и увеличивает пористость волокон, обеспечивая, тем самым, лучшее проникновение растворителя в структуру кокосового волокна, что также согласуется с опубликованными данными [19].

На рис. 6 (см. цв. вкладку) представлены УФ-спектры полученного лигнина и коммерческого лигнина (Sigma Aldrich) в диапазоне длин волн от 190 до 500 нм. Лигнин, выделенный из кокосового волокна, имеет характерные полосы поглощения, аналогичные коммерческому лигнину, при длинах волн $\lambda = 218$ и 280–290 нм.

На рис. 7 (цв. вкладка) представлены ИК-спектры полученного лигнина и коммерческого лигнина (Sigma Aldrich).

Сравнение ИК-спектров (рис. 7) экстрагированного и коммерческого лигнина выявило как сходства, так и существенные различия. В обоих спектрах

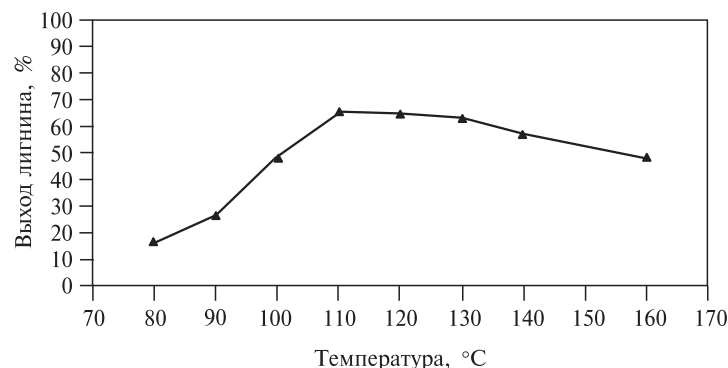


Рис. 5. Зависимость эффективности экстракции лигнина от температуры

Вкладка к статье Н.В. Зуи, П.Ю. Цыганкова, Н.В. Меньшутиной «Гидротермальная экстракция компонентов кокосового волокна в присутствии этанола и сверхкритического диоксида углерода»



Рис. 4. Внешний вид лигнина:
a — осажденного в воде; *b* — после сушки

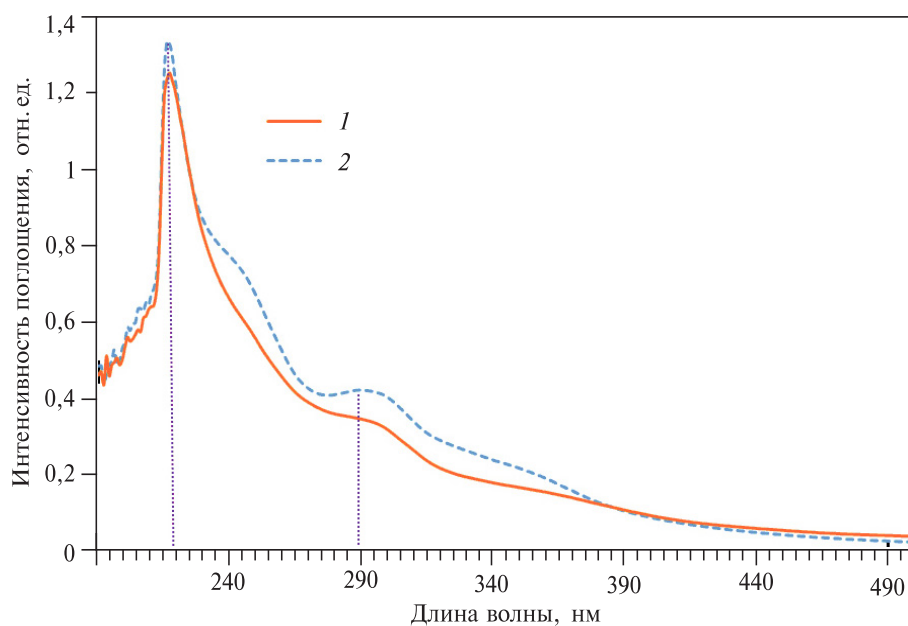


Рис. 6. УФ-спектры образца лигнина, полученного методом гидротермальной обработки в сочетании с соразтворителями (1) и коммерческого лигнина производства Sigma Aldrich (2)

Вкладка к статье Н.В. Зуи, П.Ю. Цыганкова, Н.В. Меньшутиной «Гидротермальная экстракция компонентов кокосового волокна в присутствии этанола и сверхкритического диоксида углерода»

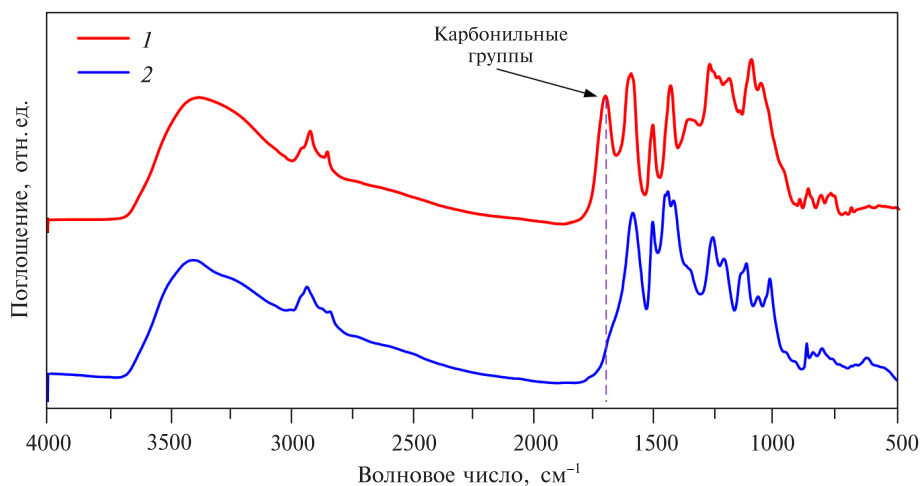


Рис. 7. ИК-спектры образца лигнина, полученного методом гидротермальной обработки в сочетании с соразтворителями (1) и коммерческого лигнина производства Sigma Aldrich (2)

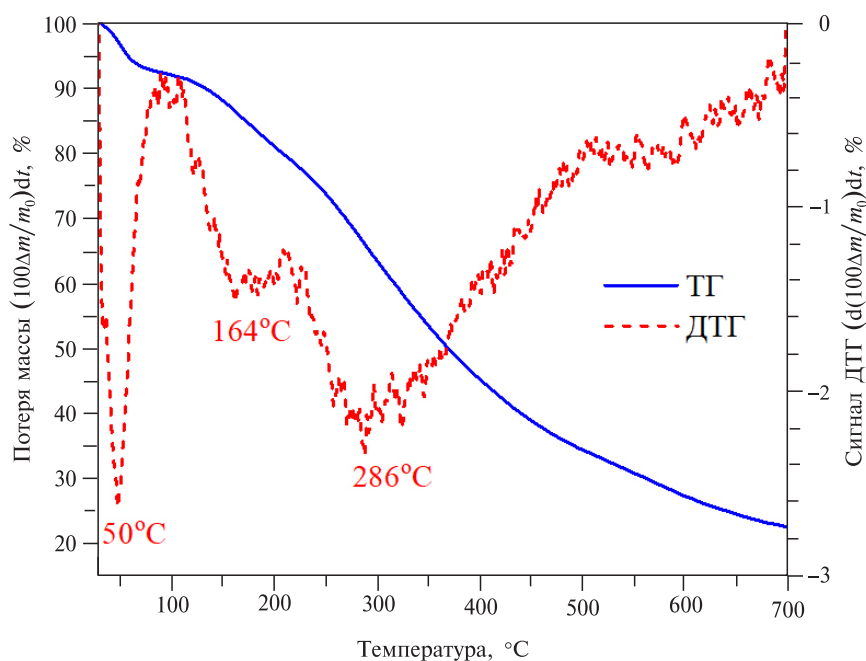


Рис. 9. Кривые ТГ и ДТГ лигнина, экстрагированного гидротермальным методом в сочетании с соразтворителем

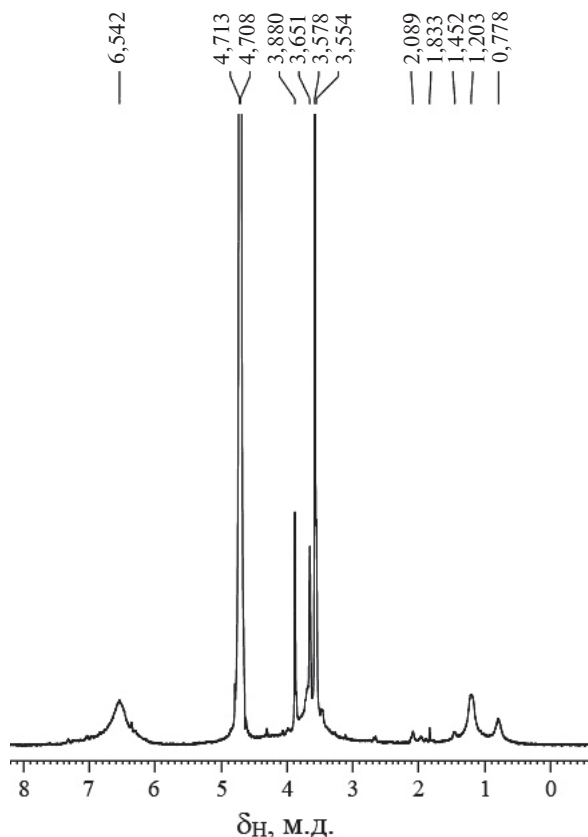


Рис. 8. ^1H ЯМР-спектры экстрагированного лигнина

присутствуют характерные для лигнина полосы: валентные колебания связей O—H ($3400\text{—}3350\text{ см}^{-1}$), C—H ($2935, 2840\text{ см}^{-1}$), C—O ($1215, 1125\text{ см}^{-1}$) и ароматических колец ($1600, 1510, 1420\text{ см}^{-1}$). Ключевое различие наблюдается в области карбонильных групп (1715 см^{-1}), где интенсивный пик у полученного лигнина контрастирует со слабым плечом у коммерческого образца. Данное различие указывает на то, что при использовании предложенного метода экстракции сохраняется исходное содержание карбонильных групп в структуре лигнина.

Дополнительные данные о химической структуре полученного лигнина и присутствующих в нем функциональных групп были получены на основании спектра ^1H ЯМР, приведенного на рис. 8. Сигналы в диапазоне от 0,8 до 2,0 м.д. соответствуют алифатическим углеводородам, в основном содержащим первичные, вторичные и третичные алкильные группы. Сигналы в диапазоне от 1,4 до 2,2 м.д. соответствуют протонам алифатических ацетатов, а в диапазоне от 2,2 до 2,5 м.д. — протонам ароматических ацетатов. Протонные сигналы метоксигруппы, которые связаны с соотношением единиц G и S , наблюдаются в диапазоне от 3,1 до 4,0 м.д. Сигнал в районе 4,7 м.д. может быть вызван наличием воды (в растворителе D_2O или в образце). Сигналы, соответствующие наличию ароматических протонов в лигнине, появляются в диапазоне от 6,5 до 8,5 м.д. Сигналы, соответствующие ароматическим протонам в синрингильном (S) пропане, появляются в диапазоне от 6,1 до 6,7 м.д. Сигналы, наблюдаемые в диапазоне от 6,5 до 7,5 м.д., могут быть отнесены к ароматическим протонам,

включающим гваяциловый, сирингиловый и *n*-гидроксифениловый компоненты [26, 27]. В целом, большинство функциональных групп, характерных для структуры лигнина, сохранились и были обнаружены в полученном продукте. Это свидетельствует о том, что процесс экстракции не привел к значительным изменениям исходной структуры лигнина, позволив сохранить основные функциональные группы и соотношение структурных единиц (G/S).

Термическая стабильность и процессы деградации полученного лигнина были исследованы методом термогравиметрического анализа (ТГА). На рис. 9 (цв. вкладка) представлены кривые ТГ (потеря массы) и ДТГ (скорость потери массы), которые позволяют идентифицировать основные стадии термического разложения образца.

Анализ кривых выявил три характерные стадии потери массы. Первая стадия (50—130 °С) связана главным образом с удалением адсорбированной влаги и легколетучих соединений. Основная стадия разложения наблюдается в интервале 140—400 °С с четким максимумом на кривой ДТГ при 286 °С. Потери массы в этой области в первую очередь обусловлены пиролизом структуры лигнина: разрывом лабильных β -O-4 связей и деструкцией ароматических колец с образованием фенольных соединений [26, 27]. В этом же температурном диапазоне протекают процессы деградации пропеновых боковых цепей и конденсации ароматических структур. Третья стадия (выше 500 °С) соответствует медленной карбонизации образовавшегося углеродистого остатка и его дальнейшему упорядочиванию. Широкий температурный диапазон разложения лигнина (100—900 °С) подтверждает сложность и гетерогенность его структуры [28].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе описан новый подход к разделению кокосового волокна на компоненты гидротермальным методом с использованием сорастворителей. Результаты продемонстрировали эффективность этого метода в выделении ценных компонентов кокосового волокна, таких как лигнин. Предложенный метод вызывает значительный интерес благодаря экологичности, высокой эффективности и потенциалу для применения в промышленных масштабах.

Использование СК-СО₂ совместно с этанолом при реализации гидротермального метода увеличило эффективность экстракции лигнина; в присутствии СО₂ выход лигнина при аналогичных условиях возрастает с 26 до 65 %. Улучшение показателей обусловлено совокупным воздействием гидротермального процесса и повышенной растворимостью биомассы в гетерогенной системе вода — сверхкритический СО₂.

Структурные характеристики выделенного лигнина были проанализированы и сопоставлены с литературными данными и коммерческим образцом для оценки их качества. Результаты показывают, что полученный лигнин имеет структурное сходство с образцами, описанными в научной литературе.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной тематики FSSM-2025-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. М.: Мир, 1985. 251 с.
2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Марков Е.П. Системный анализ процессов химической технологии: Применение метода нечетких множеств: монография. М.: Наука, 1986, 359 с.
3. Bledzki A.K., Matun A.A., Volk J. // *Composites Science and Technology*. 2010. Vol. 70, No 5. P. 840.
4. Goncalves F.A., Ruiz H.A., da Costa Nogueira C., dos Santos E.S., Teixeira J.A., de Macedo G.R. // *Fuel*. 2014. Vol. 131. P. 66.
5. Rao J., Lv Z., Chen G., Peng F. // *Progress in Polymer Science*. 2023. Vol. 140. P. 101675.
6. Алешина Л.А., Глазкова С.В., Луговская Л.А., Подойникова М.В., Фофанов А.Д., Силуна Е.В. // *Химия растительного сырья*. 2001. № 1. С. 5.
7. Hsieh Y., Harris P. // *Polymers*. 2019. Vol. 11. No 2. P. 354.
8. Meshitsuka G., Isogai A. *Routledge*. Chemical modification of lignocellulosic materials. Chemical structures of cellulose, hemicelluloses, and lignin, 2017. New York. 384 p.
9. Grisel M., Aguni Y., Renou F., Malhiac C. // *Food Hydrocolloids*. 2015. Vol. 51. P. 449.
10. Феофилова Е.П., Мысякина И.С. // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2016. Т. 52. № 6. С. 559.
11. Li C., Zhao X., Wang A., Huber G. W., Zhang T. // *Chem. Rev.* 2015. Vol. 115. No 21. P. 11559.
12. Ioelovich M. // *BioResources*. 2008. Vol. 3. No 4. P. 1403.
13. Wang S., Lu A., Zhang L. // *Progress in Polymer Science*. 2016. Vol. 53. P. 169.
14. Кузнецов Б.Н., Чесноков Н.В. // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2018. Т. 6. № 3. С. 305.
15. Nan N., Hu W., Wang J. // *Biomedicines*. 2022. Vol. 10. No 4. P. 747.
16. Ожумкова Е.В., Ушаповский И.В. Современные методы переработки растительной биомассы. Тверской гос. техн. ун-т, 2023. 164 с.
17. Куликова М.В., Крылова А.Ю., Жагфаров Ф.Г., Крысанова К.О., Ланидус А.Л. // *Химия и технология топлив и масел*. 2022. № 1. С. 50.
18. Ranjan A., Moholkar V.S. // *Fuel*. 2013. Vol. 112. P. 567.
19. Mankar A.R., Pandey A., Modak A., Pant K. // *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 334. P. 125235.
20. Lee R.A., Bédard C., Berberi V., Beauchet R., Lavoie J.-M. // *Bioresource Technology*, 2013. Vol. 144. P. 658.
21. Luo Q., Peng H., Zhou M., Lin D., Ruyn R., Wang Y., Zhang J., Liu Y. // *BioResources*. 2012. Vol. 7. No 4. P. 5817.
22. Zhang H., Wang X., Wang J., Chen Q., Huang H., Huang L., Cao S., Ma X. // *Wood Science and Technology*. 2020. Vol. 54. P. 837.
23. Wu F., Jia X., Yin L., Cheng Y., Miao Y., Zhang X. // *Molecules*. 2019. Vol. 24. No 9. P. 1834.
24. Shukla S., Nidhi S., Pooja N., Charu A., Silvi M., Rizwana A.B., Dubey G., Tiwari A. // *Adv. Mater Lett*. 2013. Vol. 4. No 9. P. 714.
25. Martinelli F.R.B., Pariz M.G., de Andrade R., Ferreira S.R., Marques F.A., Monteiro S.N., de Azevedo A.R. // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No 1. P. 6421.
26. Abd Latif N.H., Brosse N., Ziegler-Devin I., Chrusiel L., Hashim R., Hussin M.H. // *Intern. J. Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 253. P. 127210.
27. Solihat N.N., Santoso E.B., Karimah A., Madyaratri E.W., Sari F.P., Falah F., Iswanto A.H., Ismayati M., Lubis M.A.R., Fatriasari W. // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No 3. P. 491.
28. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. // *Fuel*. 2007. Vol. 86. No 12–13. P. 17818.

HYDROTHERMAL EXTRACTION OF COCONUT FIBER COMPONENTS IN THE PRESENCE OF ETHANOL AND SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

N.V. Duy — Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam. ORCID: 0000-0003-4110-0035. E-mail: nguyenvanduy@lqdtu.edu.vn

P.Yu. Tsygankov — D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0003-2630-3838. E-mail: pavel.yur.tsygankov@gmail.com (*for correspondence*)

N.V. Menshutina — D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-7806-1426. E-mail: nmenshutina@yandex.ru.

A new approach to fractionation of coconut fiber by the hydrothermal method using ethanol and supercritical (SC) CO₂ as co-solvents is proposed. The efficiency of the method for isolating valuable components due to the synergistic effect of hydrothermal treatment and increased solubility of biomass in the ethanol–water–SC CO₂ system is demonstrated. During the 15 minute treatment at 110 °C, 12 MPa, and a fiber-to-ethanol mass ratio of 1:20, the maximum lignin yield (65 %) was reached, which is more than 2 times higher than during hydrothermal extraction with ethanol addition (26 %). The conservation of carbonyl groups and the native ratio of G (guaiacil) and S (syringyl) structural units in isolated lignin in accordance with the literature data has been shown by IR- and NMRspectroscopy.

Key words: supercritical CO₂, hydrothermal fractionation, lignin, coconut fiber, extraction.

This research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of scientific topic FSSM-2025-0007.

REFERENCES

1. *Kafarov V.V.* Principles of Developing Waste-Free Chemical Production. 1985, Moscow: Mir. 251 p.
2. *Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Markov E.P.* System Analysis of Chemical Engineering Processes: Application of the Fuzzy Sets Method (monograph), 1986. Moscow: Nauka. 359 p.
3. *Bledzki A.K., Mamun A.A., Volk J.* // Composites Science and Technology. 2010. Vol. 70, No 5. P. 840.
4. *Goncalves F.A., Ruiz H.A., da Costa Nogueira C., dos Santos E.S., Teixeira J.A., de Macedo G.R.* // Fuel. 2014. Vol. 131. P. 66.
5. *Rao J., Lv Z., Chen G., Peng F.* // Progress in Polymer Science. 2023. Vol. 140. P. 101675.
6. *Aleshina L.A., Glazkova S.V., Lugovskaya L.A., Podoinikova M.V., Fofanov A.D., Silina E.V.* // Chem. Plant Raw Material. 2001. No 1. P. 5.
7. *Hsieh Y., Harris P.* // Polymers. 2019. Vol. 11. No 2. P. 354.
8. *Meshitsuka G., Isogai A.* Routledge. Chemical modification of lignocellulosic materials. Chemical structures of cellulose, hemicelluloses, and lignin, 2017. New York. 384 p.
9. *Grisel M., Aguni Y., Renou F., Malhiac C.* // Food Hydrocolloids. 2015. Vol. 51. P. 449.
10. *Feofilova E.P., Mysyakina I.S.* // Appl. Biochemistry and Microbiology. 2016. Vol. 52. No 6. P. 559.
11. *Li C., Zhao X., Wang A., Huber G. W., Zhang T.* // Chem. Rev. 2015. Vol. 115. No 21. P. 11559.
12. *Ioelovich M.* // BioResources. 2008. Vol. 3. No 4. P. 1403.
13. *Wang S., Lu A., Zhang L.* // Progress in Polymer Science. 2016. Vol. 53. P. 169.
14. *Kuznetsov B.N., Chesnokov N.V.* // Chemistry for Sustainable Development. 2018. Vol. 6. No 3. P. 305.
15. *Nan N., Hu W., Wang J.* // Biomedicines. 2022. Vol. 10. No 4. P. 747.
16. *Ozhimkova E.V., Ushchapovsky I.V.* Modern Methods of Processing Plant Biomass, 2023. Tver State Technical University. 164 p.
17. *Kulikova M.V., Krylova A.Yu., Zhagfarov F.G., Krysanova K.O., Lapidus A.L.* // Chemistry and technology of fuels and oils. 2022. No 1. P. 50.
18. *Ranjan A., Moholkar V.S.* // Fuel. 2013. Vol. 112. P. 567.

*Гидротермальная экстракция компонентов
кокосового волокна в присутствии этанола и сверхкритического диоксида углерода*

19. Mankar A.R., Pandey A., Modak A., Pant K. // *Bioresource Technology*. 2021. Vol. 334. P. 125235.
 20. Lee R.A., Bédard C., Berberi V., Beauchet R., Lavoie J.-M. // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 144. P. 658.
 21. Luo Q., Peng H., Zhou M., Lin D., Ruyn R., Wang Y., Zhang J., Liu Y. // *BioResources*. 2012. Vol. 7. No 4. P. 5817.
 22. Zhang H., Wang X., Wang J., Chen Q., Huang H., Huang L., Cao S., Ma X. // *Wood Science and Technology*. 2020. Vol. 54. P. 837.
 23. Wu F., Jia X., Yin L., Cheng Y., Miao Y., Zhang X. // *Molecules*. 2019. Vol. 24. No 9. P. 1834.
 24. Shukla S., Nidhi S., Pooja N., Charu A., Silvi M., Rizwana A.B., Dubey G., Tiwari A. // *Adv. Mater Lett*. 2013. Vol. 4. No 9. P. 714.
 25. Martinelli F.R.B., Pariz M.G., de Andrade R., Ferreira S.R., Marques F.A., Monteiro S.N., de Azevedo A.R. // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. No 1. P. 6421.
 26. Abd Latif N.H., Brosse N., Ziegler-Devin I., Chrusiel L., Hashim R., Hussin M.H. // *Intern. J. Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 253. P. 127210.
 27. Solihat N.N., Santoso E.B., Karimah A., Madyaratri E.W., Sari F.P., Falah F., Iswanto A.H., Ismayati M., Lubis M.A.R., Fatriasari W. // *Polymers*. 2022. Vol. 14. No 3. P. 491.
 28. Yang H., Yan R., Chen H., Lee D.H., Zheng C. // *Fuel*. 2007. Vol. 86. No 12–13. P. 17818.
-
-