



Научная статья

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 661.741.121

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.030



АНАЛИЗ СОСТАВА ФРАКЦИЙ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Айгуль Раисовна Валеева

Казанский национальный исследовательский технологический университет, кафедра «ХТД» Казань, Россия,
A8695V@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>

Аннотация. В статье представлены результаты исследования многокомпонентного состава жидкого продукта переработки древесных отходов методом пиролиза (бионефти). На основе данных газовой хроматографии авторы выявили, что жидкий продукт пиролиза (ПЖ) содержит множество соединений, включая воду и кислоты, среди которых уксусная кислота является доминирующей. В статье описан процесс разделения бионефти, состоящий из трех этапов. Сырьем для пиролиза служили древесные отходы разных пород деревьев. Выход жидкого продукта составил 54 %, из которых 85 % – водорастворимая фракция, 15 % – водонерастворимая фракция. Этапы фракционирования состояли из вакуумной перегонки, водной экстракции и экстракции *n*-гексаном. В работе описаны условия проведения всех этапов разделения. У каждой из полученных фракций был определен химический состав. Установлено, что в процессе дистилляции в конденсат, помимо воды, переходит основная часть уксусной кислоты. Дальнейшая водная экстракция позволяет выделять водорастворимые углеводные соединения, среди которых особое внимание уделяется *D*-аллозе, обладающей ингибирующим действием на некоторые злокачественные образования и применяемой как низкокалорийный подсластитель. Третий этап исследования, использующий *n*-гексан в качестве неполярного органического растворителя, привёл к обнаружению ранее не описанных высокомолекулярных соединений, таких как стигмаст-5-ен-3-ол, сквален и фенантреновое соединение. В результате исследований установлено наличие в бионефти значительного количества веществ группы фенолов, при этом фракционирование приводит к уменьшению доли кислых и высокомолекулярных конденсированных соединений в исходной бионефти, что повышает возможность использования ее в качестве фенолозамещающего и топливного сырья.

Ключевые слова: бионефть; быстрый пиролиз; древесные отходы; дистилляция бионефти, экстракция бионефти.

Благодарности: автор выражает благодарность Грачеву Андрею Николаевичу и Забелкину Сергею Андреевичу за руководство и помощь в проведении исследовательской работы.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-73-10097, <https://rscf.ru/project/22-73-10097/>.

Для цитирования: Валеева А. Р. Анализ состава фракций пиролизной жидкости растительной биомассы // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 175–180. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.030. EDN: <https://elibrary.ru/VREEAJ>.

Original article

ANALYSIS COMPOSITION FRACTIONS PYROLYSIS LIQUID PLANT BIOMASS

Aigul R. Valeeva

Kazan National Research Technological University, Department Wood Chemical Technology, Kazan, Russia,
A8695V@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>

Abstract. The article presents the results of a study on the multi-component composition of the liquid product derived from the pyrolysis of wood waste (bio-oil). Based on gas chromatography data, the authors found that the pyrolysis liquid product (PLP) contains a multitude of compounds, including water and acids, with acetic acid being the predominant one. The article describes the bio-oil separation process, which consists of three stages. The feedstock for pyrolysis was wood waste from various tree species. The yield of the liquid product was 54%, of which 85% is the water-soluble fraction and 15% is the water-insoluble fraction. Fractionation stages included vacuum distillation, water extraction, and *n*-hexane extraction. The conditions for conducting all separation stages are described. The chemical composition of each obtained fraction was determined. It was established that during distillation, the main portion of acetic acid, along with water, transitions to the condensate. Further water extraction allows for the isolation of water-soluble organic compounds, with special attention given to *D*-allulose, which exhibits inhibitory effects on certain malignant formations and is used as a low-calorie sweetener. The third stage of the study, utilizing *n*-hexane as a non-polar organic solvent, led to the discovery of previously unreported high-molecular compounds, such as stigmaterol, squalene, and phenanthrene compounds. As a result of the research, a significant amount of phenolic compounds was found in the bio-oil, while fractionation decreased the proportion of acidic and high-molecular condensed compounds in the raw bio-oil, thereby enhancing its potential use as a phenol-replacing and fuel raw material.

Keywords: bio-oil; fast pyrolysis; wood waste; bio-oil distillation, bio-oil extraction.

Financial: The research was carried out under a Russian Science Foundation grant No. 22-73-10097, <https://rscf.ru/project/22-73-10097/>.

For citation: Valeeva, A.R. (2025). Analysis composition fractions pyrolysis liquid plant biomass. Polzunovskiy vestnik, (3), 175-180. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.030. EDN: <https://elibrary.ru/VREEAJ>.

ВВЕДЕНИЕ

Энергетический кризис становится все более серьезной глобальной проблемой. В связи с тенденцией к увеличению спроса на энергию, зависимость от ископаемого топлива возрастает. Однако использование ископаемого топлива приводит к значительным выбросам парниковых газов. Принятое в 2015 г. Парижское соглашение по климату ставит в качестве одной из основных целей замедление глобального потепления. В рамках данной цели требуется сократить объемы выбросов углекислого газа, метана и оксида азота, основным источником которых являются процессы сжигания нефти, угля и газа [1]. Лигноцеллюлозные материалы составляют основную часть легкодоступного природного топлива. Поскольку термохимический процесс пиролиза растительной биомассы считается углеродно-нейтральным, исследования в данной области являются актуальными [2]. Лигноцеллюлозная биомасса является удобным источником для производства ценных углеводородов из бионефти [3].

Пиролиз основных компонентов биомассы (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина) и второстепенных компонентов (экстрактивных веществ и неорганических материалов) протекает в виде серии сложных, параллельных и последовательных реакций. В результате образуется жидкость, включающая в себя множество разнообразных веществ [4]. При нагревании целлюлозы до 300–500 °C происходит процесс деполимеризации до ангидрогликозных звеньев [5]. При пиролизе целлюлозы получают смолу, содержащую различные количества 1,6-ангидро- β -D-глюкопиранозы, 1,6-ангидро- β -D-глюкофуранозы, α - и β -D-глюкозы, 3-дезоксид- β -D-эритро-гексосулозы, олиго- и полисахаридов, а также некоторых продуктов дегидратации.

Современные технологии добычи газа и нефти привели к резкому снижению ценности целлюлозосодержащих веществ в качестве топлива, но наблюдается значительное увеличение их применения в качестве промышленных и строительных материалов. Развитие деревообрабатывающей промышленности приводит к увеличению древесных отходов. В связи с этим все больше акцент смещается на проблемы глубокой переработки данного вида отходов [6]. Считается, что разработки в области процессов быстрого пиролиза биомассы и другого углеродсодержащего сырья могут дать значительные продвижения в данном вопросе [7]. Однако в сравнении с традиционными видами топлива свойства жидкого продукта быстрого пиролиза древесных отходов существенно отличаются. В качестве транспортного топлива бионефть непригодна без доработки из-за высокого содержания воды и, как следствие, низкой энергетической составляющей. Отрицательными свойствами также являются значительное содержание кислот и плохая стабильность при хранении.

Вследствие того, что древесная пиролизная жидкость (ПЖ) представляет собой смесь различных групп соединений, осложняются и процессы каталитической обработки, так как для каждой группы соединений требуются разные условия и катализаторы. Следовательно, предварительное фракционирование бионефти перед модернизацией может быть более эффективным способом получения жидкого топлива из растительного сырья.

Если говорить о технологических решениях сбора пиролизной жидкости, то группой ученых проводилось сравнение двух концепций разделения, основанных на регулировании температуры скруббера (с 36 до 66 °C) и влажности исходного сырья. Повышение температуры скруббера привело к снижению содержания воды в ПЖ, может позволить снизить затраты на предварительную сушку сырья. От-

мечается, что несмотря на снижение влажности, после конденсации происходит разделение фаз ПЖ на водорастворимую и водонерастворимую. Авторы работы приходят к выводу, что фракционирование путем разделения фаз является лучшей концепцией, если целью является производство транспортного топлива из бионефти [8].

Были также исследованы технологии крекинга и риформинга для повышения качества бионефти, такие как каталитическое гидродеоксигенирование [9, 10], каталитический крекинг [11], паровой риформинг [12] и так далее. Исследования данного направления часто указывали на высокую реакционную способность и стабильность работы катализатора при преобразовании карбоновых кислот и кетонов, в то время как фенолы трудно конвертируются. Эффективное превращение фенолов часто требовало жестких условий реакции, таких как гидродеоксигенирование под высоким давлением водорода [13], что приводило к дезактивации катализатора и удорожанию технологического процесса.

Дистилляция и экстракция растворителем являются распространенными технологиями выделения и фракционирования. Из-за термической и химической нестабильности ПЖ, а также высокого содержания в нем соединений с высокой температурой кипения традиционная дистилляция имеет низкий выход дистиллята, а остаток подвержен коксованию. Ван и др. исследовали процесс молекулярной дистилляции [14]. Согласно полученным данным, был сделан вывод, что данный метод привел к высокому выходу дистиллята без коксования, а полученные фракции были успешно модернизированы для получения более качественного топлива.

Экстракция растворителями также может рассматриваться как метод выделения компонентов бионефти. Водная экстракция позволяет разделить бионефть на водорастворимую и нерастворимую фазы для их дальнейшей разделенной обработки [15]. Водорастворимая фаза преимущественно состоит из низкомолекулярных кислот и кетонов с высокой реакционной способностью. Водонерастворимая фаза имеет более сложный состав, в основном состоящий из продуктов, полученных разложением лигнина, таких как фенол, гваякол и сирингол, а также фенольные олигомеры. Водорастворимую фазу улучшают путем каталитического крекинга и парового риформинга, а водонерастворимую фазу можно использовать для дальнейшего извлечения монофенолов и пиролизного лигнина. Монофенолы могут быть преобразованы в углеводороды путем гидродеоксигенирования, в то время как пиролизный лигнин может быть расщеплен до монофенолов и последовательно модернизирован или использован для синтеза фенольных смол [16]. Проводилось исследование многоступенчатого отделения монофенолов и пиролизного лигнина от водонерастворимой фазы с использованием растворов кислоты, щелочи и органических растворителей [17].

Стоит отметить, что ни одна технология модернизации не может обеспечить эффективную конверсию всех компонентов из-за сложности состава бионефти, и для решения данного вопроса требуется комплексный многостадийный процесс.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В качестве растительного сырья для получения бионефти использовались древесные отходы преимущественно лиственных пород. Жидкий продукт пиролиза (ПЖ) был получен на установке FPP 02 компании ООО «Энерголеспром» [18]. Сырье предварительно подвергалось процессу измельчения и сушки до влажности около 10 %. Измельчение и сортировка проводились для отбора фракции с линейными размерами древесной щепы 5–20 мм.

АНАЛИЗ СОСТАВА ФРАКЦИЙ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Для исследования в лабораторию бионефть поступила уже в разделенном на фазы виде, для дальнейших манипуляций была составлена суммарная пиролизная жидкость в соответствии с выходом каждой фракции. Водорастворимая (верхняя) часть составляет 85 %, водонерастворимая (нижняя, смолистая) часть –15%.

Основываясь на проведенных ранее [19–20] исследованиях, была принята схема фракционирования, состоящая из трех стадий: вакуумной перегонки, водной экстракции и экстракции органическим растворителем (рис. 1).

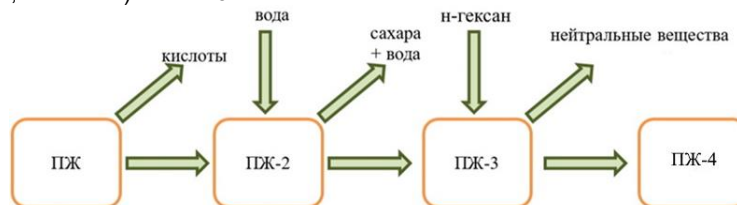


Рисунок 1 – Схема фракционирования жидких продуктов пиролиза древесных отходов
Figure 1 – Fractionation scheme of liquid pyrolysis products of wood waste

Первый этап – дистилляция суммарной ПЖ – осуществлялся при помощи ротационного испарителя ИКАНВ 10 в условиях пониженного давления (1,9 кПа) при температуре 80 °С. На данном этапе образуются две фракции: конденсат (древесный уксус) и кубовый остаток (ПЖ-2). Конденсат анализировался, фракция ПЖ-2 подвергалась дальнейшему разделению.

Второй этап фракционирования заключался в проведении процесса экстракции горячей водой кубового остатка вакуумной перегонки. Для этого фракция ПЖ-2 смешивалась с горячей водой в соотношении 1:1, интенсивно перемешивалась в течение 10 мин. Разделение смеси происходило после отстаивания в течение 12 ч. При отстаивании смесь разделялась на две фазы. Нижняя фракция, более густая, получила название ПЖ-3 согласно схеме на рисунке 1. Верхняя водная фракция с растворенными в ней углеводными компонентами пиролизной жидкости, являющаяся в данной схеме боковой, была отобрана для анализа.

Третьим этапом фракционирования является экстракция фракции ПЖ-3 органическим растворителем в соотношении 1:1. В качестве растворителя был выбран н-гексан ввиду доступности и относительной

безопасности. Рабочая фракция перемешивалась с растворителем в течение 60 минут при температуре 30–40 °С. При перемешивании происходит изменение цвета растворителя из прозрачного белого в прозрачный оранжевый. Далее смесь заливается в делительную воронку для отстаивания на 3 часа. Смесь в колбе четко разделяется на 2 фазы.

Влажность определялась методом кулонометрического титрования с помощью титратора Карла-Фишера.

Значение высшей теплоты сгорания было получено на колориметре IKA-calorimeter system мод. С 5003 control.

В ходе работы определялся химический состав фракций с помощью газовой хроматографии – массовой спектрометрии на приборе GCMS-QP2010 фирмы «Shimadzu» на колонке HP-1 MS.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные жидкие продукты пиролиза древесных отходов представляют собой двухфазную темную жидкость с резким запахом копчения, свойства двух фаз были проанализированы отдельно и представлены в таблице 1.

Содержание различных классов химических соединений в летучей части верхней и нижней фаз жидких продуктов представлено в таблице 2.

Таблица 1 – Свойства фаз жидкого продукта пиролиза древесных отходов

Table 1 – Properties of phases of the liquid pyrolysis product of wood waste

Свойства	Водорастворимая фаза	Водонерастворимая фаза
Влажность, %	54	11
Высшая теплота сгорания, кДж/кг	–	26459
Плотность, кг/м ³	1112	1145
pH	2,28	3,24

Таблица 2 – Химический состав верхней и нижней фазы жидких продуктов пиролиза лесосечных отходов

Table 2 – Chemical composition of the upper and lower phases of liquid pyrolysis products of logging waste

Класс соединений	Водорастворимая фаза	Водонерастворимая фаза
Альдегиды	1,74	0,52
Ангидросахара	–	20,63
Гетероциклические соединения	3,07	2,66
Кетоны	6,95	8,1
Карбоновые кислоты	1,09	31,98
Спирты	1,36	3,74
Фенолы	65,86	12,63
Не идентифицировано	19,93	19,74

Анализ фракции, выделенной в ходе вакуумной дистилляции

Первый этап фракционирования позволяет выделить значительную часть уксусной кислоты в конденсат. Выход конденсата составляет в среднем 54 %, кубового остатка (ПЖ-2) – 42 %.

У образцов ПЖ-2 и конденсата были определены влажность и pH, данные анализов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства фракций, полученных в ходе вакуумной разгонки ПЖ

Table 3 – Properties of fractions obtained during the vacuum distillation of pancreas

	Остаток разгонки (ПЖ-2)	Конденсат
Влажность, %	1,85	84,56
pH	2,97	2,05

Как видно из полученных данных, конденсат имеет высокое значение влажности, в связи с чем для анализа химического состава была отобрана

органическая часть путем её экстрагирования диэтиловым эфиром. На рисунке 2 представлен результат исследования химического состава органической части конденсата вакуумной разгонки ПЖ. Анализ подтвердил наличие значительного количества уксусной кислоты (58,68 % от органической части).

Помимо этого, установлено наличие фурфурола и части фенолов из пиролизной жидкости, представленными такими веществами, как гваякол и соединения метоксифенола [21].

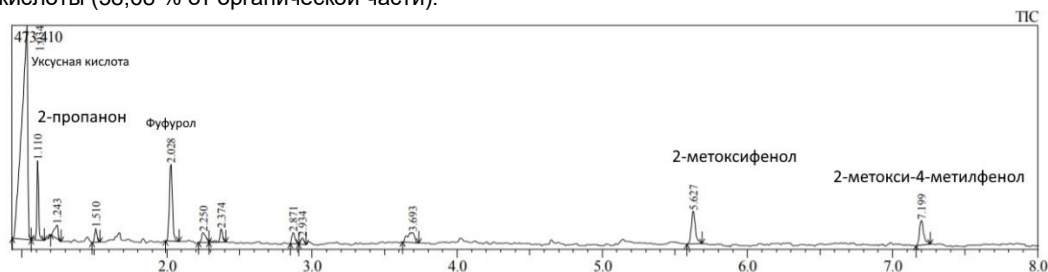


Рисунок 2 – ГХ-МС конденсата вакуумной разгонки ПЖ

Figure 2 – GC-MS of the condensate of the vacuum distillation of the pancreas

Анализ фракции водной экстракции

В ходе экстракции были получены водный экстракт (верхняя фракция) и рафинат (ПЖ-3). Свойства и выходы фракций представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Свойства фракций водной экстракции
Table 4 – Properties of water extraction fractions

	Экстракт	Рафинат ПЖ-3
Влажность, %	62,03	12,25
pH	3,11	3,64

Таблица 5 – Материальный баланс водной экстракции ПЖ-2 / Table 5 – Material balance of aqueous extraction of PJ-2

Продукт	Выход от массы ПЖ-2, %	Выход от массы исходной ПЖ, %
Рафинат (ПЖ-3)	34–38	14–15
Экстракт	144–147	70–73
Потери	15–22	12–16

Для анализа ГХ-МС экстракт предварительно высушивался до постоянной массы для получения сухого остатка. После сухой остаток растворялся в ацетоне. Анализ экстракта методами газовой хроматографии и масс-спектрометрии показал, что экстракт содержит значительное количество углеводов в виде 3,4-ангидро-Д-галактозана – 4,47 %, 2,3-ангидро-Д-

маннозана – 11,45 %, Д-аллозы- 50,28 % (рис. 3). Также в экстракте присутствуют 2,5-бис (1,1-диметилэтил)-фенол – 1,25 %, 3-ацетат, метил-бета-д-рибопираноза – 8,32 %. Содержание веществ представлено по отношению к сухому остатку водного экстракта. фазы) и кетонами (22,4 %) с примесями кислот и углеводов [21].

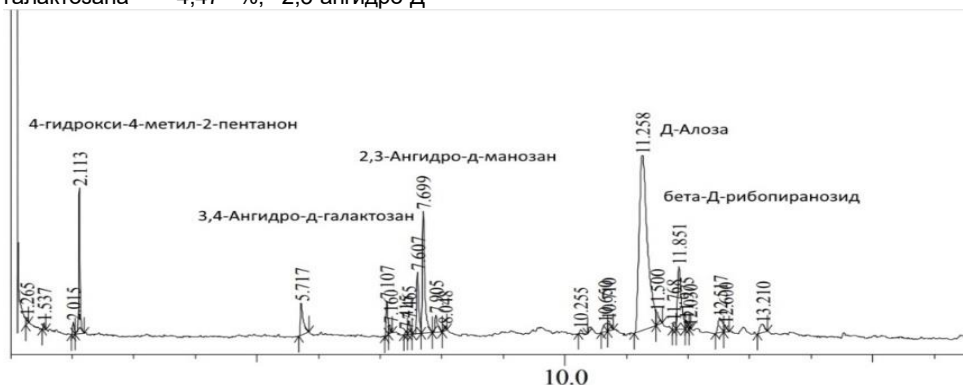


Рисунок 3 – Данные ГХ-МС водного экстракта

Figure 3 – GC-MS data of an aqueous extract

Второй этап фракционирования направлен на выделение углеводных компонентов ПЖ. Рафинат водной экстракции согласно анализу ГХ-МС преимущественно представлен фенолами (46,83 % от летучей части)

Анализ фракции полученной в процессе экстракции n-гексаном

При перемешивании экстрагент постепенно меняет цвет с прозрачного на темно-оранжевый. Граница раздела четкая. При разделении фракций в лабораторных условиях происходят значительные потери, в связи с чем материальный баланс процесса является приблизительным и не дает четкого представления для оценки весового выхода продуктов. Стоит отметить, что в среднем экстрактивные вещества в n-гексан выделяются в

незначительном количестве (около 10 %) от массы исходной фракции ПЖ-3. Выход рафината в среднем составляет 90 % от массы фракции ПЖ-3.

Полученные в ходе анализа химического состава экстракта данные показали наличие групп веществ, представленных в таблице 6.

Фенольные соединения в экстракте представлены такими веществами, как гваякол (2-метоксифенол) – 2.36 %, 4-этил-2-метокси фенол – 4.95 %, эвгенол – 2.92 %, 2-метокси-4- (проп-1-енил) фенол – 5.89 % и другие.

Анализ химического состава рафината, полученного на третьем этапе фракционирования (табл. 7), также показал наличие веществ, входящих в класс фенолов, с содержанием до 30 %.

АНАЛИЗ СОСТАВА ФРАКЦИЙ ПИРОЛИЗНОЙ ЖИДКОСТИ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

Таблица 6 – Химический состав гексанового экстракта
Table 6 – Chemical composition of hexane extract

Класс соединений	%
Циклические ароматические углеводороды	3.63
Кислоты	5.04
Кетоны	2.21
Фенолы	31.6
Алканы	4
Алкены	0.36
Терпены	1.04
Эфиры	1.33
Альдегиды	7.77
Не идентифицировано	0.23
	46,7
	5

Таблица 7 – Химический состав фракции пиролизной жидкости после трех этапов фракционирования

Table 7 – Chemical composition of the pyrolysis liquid fraction after three fractionation stages

Класс соединений	%
Амины	8,83
Кислоты	3,44
Алканы	0,18
Ароматические соединения	1,29
Спирты	0,56
Альдегиды	2,71
Алкены	1,44
Кетоны	4,58
Фенолы	29,64
Углеводы /сахара	0,13
Не идентифицировано	47,18

При этом были выявлены как чистый фенол, так и его замещённые гомологи в виде креозола (5,32 %), эвгенола (1,64%) и алоценина (0,66 %). Помимо фенолов значительное содержание имеют соединения, входящие в класс кетонов, представленные 2 (5Н)-фураноном – 1,08 %, 2-ацетилфураном 0,14 %, циклопентандионом – 1,56 %, ацетофеноном – 0,48 % и др. Альдегид представлен соединением 3-(4-гидрокси-2-метоксифенил)-2-пропеналь – 2,71 %. Также анализ показал наличие кислот до 3,44 %, представленных в основном уксусной кислотой, содержание которой составляет 2,67 %. Вследствие сложного состава пиролизной жидкости в процессе анализа остается значительный процент не идентифицированных веществ, среди которых также могут быть представители указанных классов.

Стоит отметить, что наличие соединения группы аминов (триметиламин) вызывает вопросы, так как ранее они не были обнаружены. Возможно, это связано с нарушением отбора и хранения пробы. Данный вопрос требует проведения дополнительного ряда анализов для подтверждения или опровержения.

ВЫВОДЫ

Жидкий продукт пиролиза древесных отходов имеет очень сложный многокомпонентный состав, включающий в себя различные группы соединений. На основании данных газовой хроматографии можно сделать вывод, что методом дистилляции из ПЖ можно выделить основную часть воды и кислот, что позволяет повысить энергетическую плотность и предотвратить расслоение. Установлено, что основной кислотой в жидких продуктах пиролиза является уксусная кислота. Удаление кислот из ПЖ также является положительным аспектом при дальнейшем использовании ее в качестве топлива и фенолозамещающего сырья. Конденсат, полученный при дистилляции, имеет потенциал для использования в сельском хозяйстве [22, 23].

Водная экстракция ПЖ приводит к выделению в экстракт водорастворимых углеводных соединений

основным, из которых является D-аллоза. Согласно современным исследованиям, данный редкий сахар может оказывать ингибирующее действие на некоторые виды злокачественных новообразований [24, 25]. Кроме того, данный вид сахара нашел применение в качестве низкокалорийного подсластителя, что также говорит о потенциале ПЖ как сырьевого ресурса [26].

Третий этап интересен с точки зрения селективности неполярного органического растворителя н-гексана по отношению к компонентам ПЖ. Анализ экстракта выявил наличие ранее неустановленных высокомолекулярных соединений, таких как стигмат-5-ен-3-ол, олеат – 7,7 %, сквален – 1,33 %, 1-метил-7-(1-метилэтил) фенантрен – 0,89 %, 1-нонадецен – 1,04.

Полученные данные подтверждают сложный состав жидкого продукта пиролиза биомассы и актуальность работ, направленных на его разделение.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-73-10097, <https://rscf.ru/project/22-73-10097/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Ковалев Ю.Ю. Пять лет Парижскому соглашению: прошлое, настоящее и будущее глобального климатического договора // История и современное мировоззрение. 2021. № 1. С. 20–29.
2. Oochit D., Selvarajoo A., Arumugasamy S.K. Pyrolysis of biomass // Waste biomass management-a holistic approach. 2017. С. 215–229.
3. Dhyani V., Bhaskar T. Pyrolysis of biomass // Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels. Academic Press, 2019. С. 217–244.
4. Neves D. [et al.]. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products // Progress in energy and combustion Science. 2011. Т. 37. № 5. С. 611–630.
5. Shafizadeh F. Introduction to pyrolysis of biomass // Journal of analytical and applied pyrolysis. 1982. Т. 3. № 4. С. 283–305.
6. Shafizadeh F. Pyrolysis and combustion of cellulosic materials // Advances in carbohydrate chemistry. Academic press, 1968. Т. 23. С. 419–474.
7. Graham R.G., Bergougrou M.A., Overend R.P. Fast pyrolysis of biomass // Journal of analytical and applied pyrolysis. 1984. Т. 6. № 2. С. 95–135.
8. Lindfors C. [et al.]. Fractionation of bio-oil // Energy & fuels. 2014. Т. 28. № 9. С. 5785–5791.
9. Kwon K.C. [et al.]. Catalytic deoxygenation of liquid biomass for hydrocarbon fuels // Renewable Energy. 2011. Т. 36. № 3. С. 907–915.
10. Choudhary T.V., Phillips C.B. Renewable fuels via catalytic hydride oxygenation // Applied Catalysis A: General. 2011. Т. 397. № 1–2. С. 1–12.
11. Wang S. [et al.]. Bio-gasoline production from co-cracking of hydroxypropanone and ethanol // Fuel processing technology. 2013. Т. 111. С. 86–93.
12. Trane R. [et al.]. Catalytic steam reforming of bio-oil // International journal of hydrogen energy. 2012. Т. 37. № 8. С. 6447–6472.
13. Zhao C. [et al.]. Hydrodeoxygenation of bio-derived phenols to hydrocarbons using RANEY® Ni and Nafion/SiO₂ catalysts // Chemical Communications. 2010. Т. 46. № 3. С. 412–414.
14. Guo Z. [et al.]. Separation characteristics of biomass pyrolysis oil in molecular distillation // Separation and Purification Technology. 2010. Т. 76. № 1. С. 52–57.
15. Vitasari C.R., Meindersma G.W., De Haan A.B. Water extraction of pyrolysis oil: The first step for the recovery of renewable chemicals // Bioresource technology. 2011. Т. 102. № 14. С. 7204–7210.
16. Toledano A. [et al.]. Lignin separation and fractionation by ultrafiltration // Separation and Purification Technology. 2010. Т. 71. № 1. С. 38–43.
17. Wang S. [et al.]. Multi-step separation of monophenols

and pyrolytic lignins from the water-insoluble phase of bio-oil // Separation and Purification Technology, 2014. T. 122. C. 248–255.

18. Электронный ресурс. <https://energolesprom.ru/tehnologiya/> (дата обращения 20.08.2024).

19. Neutrals influence on the water resistance coefficient of phenol-formaldehyde resin modified by wood pyrolysis liquid products / S. Zabelkin, A. Valeeva, A. Sabirzyanova [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. 2020. DOI: 10.1007/s13399-020-01025-0. EDNQLOXXE.

20. Синтез и свойства фенолоформальдегидных смол из продуктов термической переработки древесины / А.И. Валиуллина, А.Н. Грачев, А.П. Валеева [и др.] // Клеи. Герметики. Технологии. 2022. № 5. С. 2–11. DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-5-2-111. EDN MWDHDK.

21. Валеева, А.П. Применение жидких продуктов быстрого пиролиза древесных отходов в качестве компонента фенолоформальдегидных смол : специальность 05.21.03 "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины" : дис. ... на соискание ученой степени кандидата технических наук / Валеева Айгуль Раисовна, 2022. 155 с. EDN KNFXVS.

22. Валеева А.П. [и др.]. Влияние способов предпосевной обработки семян пшеницы уксусной фракцией жидких продуктов пиролиза древесины на всхожесть, длину корней и интенсивность роста // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. № 245. С. 275–292.

23. Koltsova T.G. [et al.]. Phytotesting of Liquid Products of Wood Pyrolysis on Seeds of Higher Plants // Waste and Biomass Valorization. 2024. C. 1–13.

24. Kanaji N. [et al.]. Additive antitumour effect of D allose in combination with cisplatin in non-small cell lung cancer cells // Oncology Reports. 2018. T. 39. № 3. C. 1292–1298.

25. Yamaguchi F. [et al.]. Rare sugar D-allose enhances anti-tumor effect of 5-fluorouracil on the human hepatocellular carcinoma cell line HuH-7 // Journal of bioscience and bioengineering. 2008. T. 106. № 3. C. 248–252.

26. Mu W. [et al.]. Recent advances on applications and biotechnological production of D-psicose // Applied Microbiology and Biotechnology. 2012. T. 94. C. 1461–1467.

Информация об авторах

А. П. Валеева – кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая переработка древесины», Казанского национального исследовательского технологического университета.

REFERENCES

1. Kovalev, Yu.Yu. (2021). Five Years of the Paris Agreement: Past, Present and Future of the Global Climate Treaty. History and Contemporary Worldview, no1, pp. 20-29 (In Russ.).

2. Oochit, D., Selvarajoo, A. & Arumugasamy, S.K. (2017). Pyrolysis of biomass. Waste biomass management-a holistic approach, pp. 215-229.

3. Dhyan, V., Bhaskar, T. (2019). Pyrolysis of biomass. Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes for the production of liquid and gaseous biofuels. Academic Press, pp. 217-244.

4. Neves, D. [et al.] (2011). Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. Progress in energy and combustion Science, vol. 37, no. 5, pp. 611-630.

5. Shafizadeh, F. (1982). Introduction to pyrolysis of biomass. Journal of analytical and applied pyrolysis, vol. 3, no. 4, pp. 283-305.

6. Shafizadeh, F. (1963). Pyrolysis and combustion of cellulosic materials. Advances in carbohydrate chemistry. Academic press, vol. 23, pp. 419-474.

7. Graham, R.G., Bergougnou, M.A., Overend, R.P. (1984). Fast pyrolysis of biomass. Journal of analytical and applied pyrolysis, vol 6, no2, pp. 95-135.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 18 Nov 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.

8. Lindfors, C. [et al.]. (2014). Fractionation of bio-oil. Energy & fuels, vol. 28, no 9, pp. 5785-5791.

9. Kwon, K.C. [et al.]. (2011). Catalytic deoxygenation of liquid biomass for hydrocarbon fuels. Renewable Energy, vol. 36. no. 3, pp. 907-915.

10. Choudhary, T.V., Phillips, C.B. (2011). Renewable fuels via catalytic hydrodeoxygenation. Applied Catalysis A: General, vol. 397, pp. 1-12.

11. Wang, S. [et al.]. (2013). Bio-gasoline production from co-cracking of hydroxypropanone and ethanol. Fuel processing technology, no. 111, pp. 86-93.

12. Trane, R. [et al.]. (2012). Catalytic steam reforming of bio-oil. International journal of hydrogen energy, vol. 37, no. 8, pp. 6447-6472.

13. Zhao, C. [et al.]. (2010). Hydrodeoxygenation of bio-derived phenols to hydrocarbons using RANEY® Ni and Nafion/SiO₂ catalysts. Chemical Communications, vol. 46. no. 3. pp. 412-414.

14. Guo, Z. [et al.]. (2010). Separation characteristics of biomass pyrolysis oil in molecular distillation. Separation and Purification Technology, vol. 76, no 1, pp. 52-57.

15. Vitasari, C.R., Meindersma, G.W., De Haan, A.B. (2011). Water extraction of pyrolysis oil: The first step for the recovery of renewable chemicals. Bioresource technology, vol. 102, pp. 7204-7210.

16. Toledano, A. [et al.]. (2010). Lignin separation and fractionation by ultrafiltration. Separation and Purification Technology, vol. 71, no. 1, pp. 38-43.

17. Wang, S. [et al.]. (2014). Multi-step separation of monophenols and pyrolytic lignins from the water-insoluble phase of bio-oil. Separation and Purification Technology, vol. 122, pp. 248-255.

18. ELP Group LLC. Pyrolysis technology: <https://energolesprom.ru/tehnologiya/> (Accessed 20.08.2024).

19. Zabelkin, S. [et al.]. (2020). Neutrals influence on the water resistance coefficient of phenol-formaldehyde resin modified by wood pyrolysis liquid products. Biomass Conversion and Biorefinery. DOI: 10.1007/s13399-020-01025-0.

20. Valiullina, A.I. [et al.]. (2022). Synthesis and properties of phenol-formaldehyde resins from products of thermal processing of wood. Adhesives. Sealants. Technologies, no 5, pp. 2-11, DOI: 10.31044/1813-7008-2022-0-5-2-111. (In Russ.).

21. Valeeva, A.R. (2022). Application of liquid products of rapid pyrolysis of wood waste as a component of phenol-formaldehyde resins, Ph.D. Thesis, Kazan National Research Technological University, Russia. (In Russ.).

22. Valeeva, A.R. (2024). The effect of methods of pre-sowing treatment of wheat seeds with acetic fraction of liquid wood pyrolysis products on germination, root length and growth intensity. Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy, no 245, pp. 275-292. (In Russ.).

23. Koltsova, T.G. [et al.]. (2024). Phytotesting of Liquid Products of Wood Pyrolysis on Seeds of Higher Plants. Waste and Biomass Valorization, pp. 1-13.

24. Kanaji, N. [et al.]. (2018). Additive antitumour effect of D allose in combination with cisplatin in non-small cell lung cancer cells. Oncology Reports, vol. 39, no. 3, pp. 1292-1298.

25. Yamaguchi, F. [et al.]. (2008). Rare sugar D-allose enhances anti-tumor effect of 5-fluorouracil on the human hepatocellular carcinoma cell line HuH-7. Journal of bioscience and bioengineering, vol. 106, no 3, pp. 248-252.

26. Mu, W. [et al.]. (2012). Recent advances on applications and biotechnological production of D-psicose. Applied Microbiology and Biotechnology, vol. 94, pp. 1461-1467.

Information about the authors

A.P. Valeeva - PhD (technical sciences), associate professor of the Department of 'Chemical processing of wood', of Kazan National Research Technological University.