

РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОТХОДЫ КАК ИСТОЧНИК СЫРЬЯ ДЛЯ БИОТОПЛИВА**О. А. Есякова¹, Ж. А. Кох²**

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: ¹olga-la83@mail.ru, ²jannetta-83@mail.ru

Аннотация. Перед человечеством всегда остро стоял вопрос поиска дешевых источников энергии, получение которых не требовало бы чрезмерных затрат. Большую часть 54–60 % биотоплива составляют его традиционные формы: дрова, растительные остатки и сушёный навоз для отопления домов и приготовления пищи. Топливо биологического происхождения классифицируется в зависимости от агрегатного состояния и по принадлежности сырья к одному из четырех поколений. Гидролизный лигнин, как любая органика, содержащая значительное количество кислорода, склонна к брожению независимо от условий хранения. Гидролизный лигнин характеризуется большим объемом пор, приближающимся к пористости древесного угля, высокой реакционной способностью по сравнению с традиционными углеродистыми восстановителями и в двое большим в сравнении с древесиной содержанием твердого углерода, достигающий 30 %, т. е. почти половины углерода древесного угля. Целью научного исследования являлась возможность переработки гидролизного лигнина с получением биотоплива. Пробы гидролизного лигнина (ГЛ) отбирали на промышленном шламоотвале на территории бывшего ООО «Канский БиоХимЗавод». Пробоотбор проводили в сухую погоду с соблюдением необходимых требований. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что технический гидролизный лигнин является многокомпонентным соединением, включает собственно технический лигнин (60–70 %) и сопутствующие вещества: экстрактивные вещества (7–22 %), представленные (органическая часть) моносахаридами и продуктами их распада, терпеновыми углеводородами и их кислородсодержащими производными, ароматическими соединениями, алифатическими углеводородами, высокомолекулярными кислотами; остаточные полисахариды (2–8 %). Предложен способ переработки гидролизного лигнина из отходов Канского биохимического завода, благодаря которому возможно снизить антропогенную нагрузку на атмосферный воздух, почву ликвидацией хранилища, с получением альтернативного биотоплива.

Ключевые слова: биотопливо, отходы, утилизация, технология, управление.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 75–84

PLANT WASTE AS A SOURCE OF RAW MATERIALS FOR BIO FUEL**O. A. Esyakova¹, Zh. A. Kokh²**

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: koh_za@sibsau.ru

Annotation. Humanity has always faced the challenge of finding cheap energy sources that do not require excessive costs. Traditional forms of biofuels, such as firewood, plant residues, and dried manure, account for the majority (54–60 %) and are used for home heating and cooking. Biofuels are classified by their physical state and the generation of their raw materials. Hydrolysis lignin, like any organic matter containing significant oxygen, is prone to fermentation regardless of storage conditions. Hydrolysis lignin is characterized by a large pore volume, approaching the porosity of charcoal, high reactivity compared to traditional carbonaceous reducing agents, and twice the solid carbon content compared to wood, reaching 30 %, which is almost half the carbon content of charcoal. The aim of the scientific research was the possibility of processing hydrolysis lignin to produce biofuel. Hydrolysis lignin (HL) samples were taken from an industrial sludge dump on the territory of the former Kansky BioChemFactory LLC. Sampling was carried out in dry weather in compliance with the necessary requirements. The studies allow us to conclude that technical hydrolysis lignin is a multicomponent compound, including technical lignin (60–70 %) and related substances: extractives (7–22 %), represented (organic part) by monosaccharides and their decomposition products, terpene hydrocarbons and their oxygen-containing derivatives, aromatic compounds, aliphatic hydrocarbons, high-molecular-weight acids; residual polysaccharides (2–8 %). A method for processing hydrolysis lignin from the dumps of the Kansky Biochemical Plant is proposed, which makes it possible to reduce the anthropogenic load on the atmospheric air and soil by eliminating the storage facility, while obtaining alternative biofuel.

Keywords: bio fuel, waste, recycling, technology, management.

ВВЕДЕНИЕ

Быстрый рост населения, улучшение экономической деятельности, социально-культурные тенденции и индустриализация вызвали резкий всплеск потребления энергии в последние десятилетия. Перед человечеством всегда остро стоял вопрос поиска дешевых источников энергии, получение которых не требовало бы чрезмерных затрат. Проблема использования энергоносителей особенно обострилась в XX веке, когда стало ясно, что бездумное сжигание углеводов приведет к дальнейшему снижению их запасов. Ученые пришли к выводу, что запасы нефти и газа со временем иссякнут, а затраты на разработку новых месторождений существенно возрастут, поскольку придется привлекать больше техники и производственных мощностей [1; 2; 8; 14; 20; 22; 24]. В этот период значительно ухудшилась экологическая ситуация, болезненно реагирующая на исчезающий лесной покров и продолжающееся загрязнение атмосферы, недр и водных объектов. Возросла актуальность поиска альтернативных источников тепловой энергии, которые могли бы заменить природный газ и нефть. И таким эффективным направлением, наряду с солнечной энергетикой, ветроэнергетикой стало использование энергоносителей биологического происхождения (биотопливо) [21; 23; 25]. Под топливом биологического происхождения (биотопливом) следует понимать продукт, синтезируемый из животного, либо растительного сырья, а также из биологических отходов, которые при определенном воздействии, выделяют тепловую энергию (рис. 1).

Таким образом, под биотопливом можно понимать топливо, получаемое из биомассы в результате проведения термохимической или биологической реакции. Большую часть 54–60 % биотоплива составляют его традиционные формы: дрова, растительные остатки и сушёный навоз для отопления домов и приготовления пищи [3; 11]. Их используют приблизительно 38 %

населения Земли на сегодняшний день. Биотопливо согласно ГОСТ Р 52808–2007 «Нетрадиционные технологии. Энергетика биотопливо. Термины и определения» – это твердое, жидкое или газообразное топливо, получаемое из биомассы термохимическим или биологическим способом (рис. 2) [4; 9; 10; 15; 18].

Топливо биологического происхождения классифицируется в зависимости от агрегатного состояния и по принадлежности сырья к одному из четырех поколений. С учетом агрегатного состояния, топливо биологического происхождения может быть в жидком, твердом или газообразном состоянии. Наиболее распространенной формой биотоплива, безусловно, является твердая биомасса. Твердая масса представлена в виде топливных брикетов и гранул, горючего торфа, биоугля, древесной щепы и дров. Жидкое (моторное) топливо – продукт переработки растительного сырья, который обеспечивает работу двигателей внутреннего сгорания. Сюда относится: биоэтанол, биометанол, биодизель, биобутанол, бидиметилэфир. В газообразном состоянии биотопливо представлено биогазом, биометаном и биоводородом [25–30].

Месторождения ископаемых топлив рано или поздно будут исчерпаны или их разработка станет экономически нецелесообразной. В этой связи возрастает роль альтернативных возобновляемых источников органического сырья и энергии – биомассы. Наиболее перспективно лигноцеллюлозное сырьё. На гидролизных и биохимических заводах лигниновые отходы, как правило, вывозятся в отвалы и загрязняют большие территории. Запасы гидролизного лигнина в России составляют десятки миллионов тонн и сопоставимы с отходами лесопиления и деревообработки [5; 13; 16; 17; 19]. В отличие от древесных отходов, лигнин сконцентрирован в отвалах возле гидролизных заводов. Поскольку его утилизация не организована, актуальна проблема хранения и экологического загрязнения.

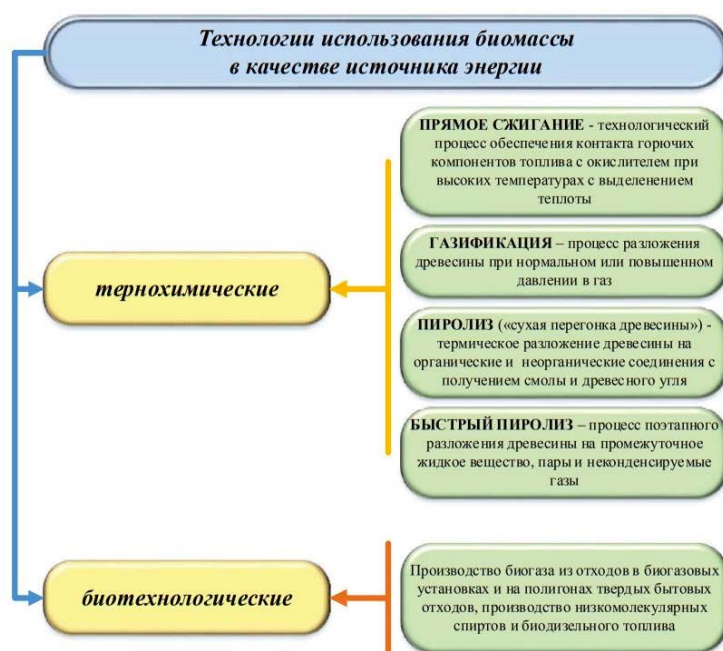


Рис. 1. Классификация технологий использования биомассы



Рис. 2. Классификация биотоплива по агрегатной форме

Гидролизный лигнин, как любая органика, содержащая значительное количество кислорода, склонна к брожению независимо от условий хранения. При сбраживании гидролизного лигнина образуются диоксид углерода, метан и выделяется тепловая энергия, что приводит к самопроизвольному возгоранию отходов. Гидролизный лигнин характеризуется большим объемом пор, приближающимся к пористости древесного угля, высокой реакционной способностью по сравнению с традиционными углеродистыми восстановителями и в двое большим в сравнении с древесиной содержанием твердого углерода, достигающий 30 %, т. е. почти половины углерода древесного угля.

Целью научного исследования являлась возможность переработки гидролизного лигнина с получением биотоплива.

Для ее достижения решались следующие задачи:

1. Изучение существующих технологий получения альтернативных источников энергии из растительного сырья.
2. Определение физико-химического состава образцов лигнина гидролизного.
3. Обоснование выбора оптимального способа получения топливных брикетов из лигнина.
4. Проведение экспериментальных исследований и обработка полученных результатов по разработанной технологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы гидролизного лигнина (ГЛ) отбирали на промышленном шламоотвале на территории бывшего ООО «Канский БиоХимЗавод». Пробоотбор проводили в сухую погоду с соблюдением необходимых тре-

бований [6]. Для данных исследований были отвалы лигнина 40-летней давности. Пробоотбор осуществляли методом квартования в четырех различных точках с глубины 2 и 4 м шламоотвала. Всего было отобрано и исследовано 8 проб ГЛ. Общая схема исследования проб гидролизного лигнина представлена на рис. 3.

С помощью методов атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС) и пиролизической хромато-масс-спектрометрии были определены составные компоненты лигнина и содержание в нем тяжелых металлов. ААС представляет собой элементный анализ вещества по атомным спектрам поглощения, которые наблюдаются при пропускании через атомный пар пробы видимого или УФ-излучения. В результате наблюдается переход электронов атомов с нижних энергетических уровней на возбужденные. Каждый переход в атомном спектре сопровождается резонансными линиями, характерными для того или иного элемента. Измерения в данном методе основаны на законе Бугера – Ламберта – Бера. Погрешность определения элементного состава с помощью ААС составляет около 2 %, чувствительность не менее 1 мкг/см^3 , в отдельных случаях до $0,005 \text{ мкг/см}^3$ [7]. Исследование состава ГЛ проводилось на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-630 «Shimadzu» (Япония), с использованием атомизации в пламени ацетилен-воздух. Обработка полученных данных осуществлялась с помощью программы Wizzard. Подготовка пробы к анализу заключалась в сжигании лигнина в муфельной печи при 500°C в течение 2 часов. Далее полученную золу растворяли в 58 %-й азотной кислоте и фильтровали. Полученный фильтрат вводили в инжектор атомно-абсорбционного спектрофотометра.

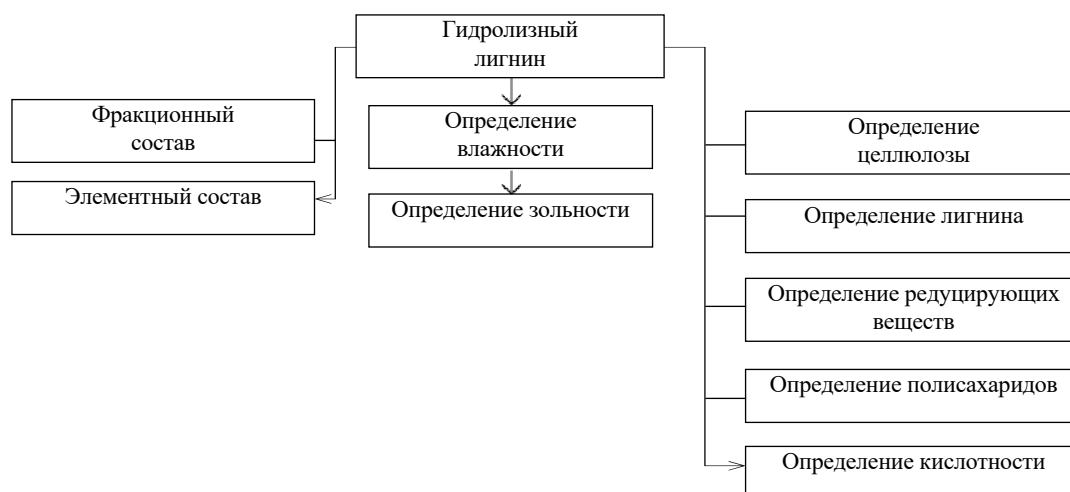


Рис. 3. Общая схема исследования проб гидролизного лигнина

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По химическому составу лигнин ближе всего к углеводам и отличается от них более высоким содержанием углерода. Элементный состав гидролизного лигнина и отвалов Канского биохимического завода представлен в табл. 1.

Дисперсность трудногидролизуемого лигнина (ТГЛ) зависит в основном от фракционного и ботанического состава перерабатываемого сырья. Она колеблется в пределах от нескольких сантиметров до нескольких микрометров. Более 60 % массы ТГЛ представляет фракция менее 1 мм (табл. 2).

Структурно-механические свойства ТГЛ существенно зависят от его влагосодержания, дисперсности, внешнего давления и других факторов. Под действием механических нагрузок происходит объемное уплотнение массы материала, увеличение числа контактов между частицами и в результате упрочнение его структурного каркаса. Наиболее существенным в процессе формирования ТГЛ является его влажность, что определяет давление прессования. Так, при гранулировании ТГЛ в фильерах, где развивается давление около 2,5–3,0 МПа, для создания максимально прочной структуры гранулы влажность должна составлять примерно 50 %, а при брикетировании на прессах высокого давления при 100–120 МПа ТГЛ должен содержать 10–18 % влаги на рабочую массу. Таким образом, учитывая физико-механические свойства ТГЛ, как полидисперсной многофазовой системы, способной к структурированию при определенных влагосодержании, давлении прессования и дисперсности, можно опреде-

лить технологию его окускования с целью получения окускованных лигнопродуктов с заданными свойствами, необходимыми потребителю.

Механо-активированный гидролизный лигнин является аморфным веществом и представляет собой порошок от светло-кремового до темно-коричневого цвета, обладает специфическим запахом. В составе гидролизного лигнина обнаруживаются: – собственно лигнин – 40–88 %; – трудногидролизуемые полисахариды – 13–45 %; – смолистые соединения и вещества лигногуминового комплекса – 5–19 %; – зольные элементы – 0,5–10 %. Отмечается, что лигнин является гигроскопичным веществом и обладает хорошей сорбционной способностью. Склонен к самовоспламенению, в составе аэрозолей способен к взрыванию. Лигнин воспламеняется при температуре 195 °С, самовоспламеняется при 425 °С, тлеет при 185 °С. Плотность лигнинного вещества составляет 1,33–1,34 г/см³, насыпная плотность – 190–220 кг/м³, размер частиц лигнина – 10–100 мкм, рН водного раствора – 6,2. Гидролизный лигнин является полимером, состоящим из фенилпропановых структурных единиц, он имеет ароматическую природу. Использование гидролизного лигнина на сегодняшний день ограничено наличием серной кислоты, однако известно, что у лигнина развитая капиллярная структура. Высказано предположение, что лигнин, пролежавший в отвалах более 40 лет, имеет низкое содержание свободной серной кислоты, поскольку за многолетнее «вылеживание» естественным путем происходит вымывание примесей атмосферными осадками.

Таблица 1
Элементный состав гидролизного лигнина

Лигнин	Содержание, % (масс.) на абсолютно сухое беззольное вещество		
	С	Н	S
Канского биохимического завода	61,52	5,92	0,50

Таблица 2
Дисперсность ТГЛ

Лигнин	Содержание фракций [% (масс.)] с размером частиц, мм				
	7–1	1–0,1	0,1–0,01	0,01–0,001	потери
Канского биохимического завода	20,7	46,3	20,0	13,0	±0,0

Возможно, снижение кислотности лигнина происходит в результате вымывания углеводных и фенольных примесей. При этом сохраняются гетерокапиллярная структура лигнина и большое количество наноразмерных пустот. Возможное использование такого вида сырья, подготовленного природой, позволит исключить стадию нейтрализации свободной кислоты и удаления низкомолекулярных продуктов, заключающуюся в промывке лигнина. После проведения механоактивации гидролизный лигнин представляет собой мелкодисперсный порошок коричневого цвета однородной консистенции. Средний размер его частиц составляет 5 мкм. Удельная поверхность лигнина до и после микронизации – 9,5 м²/г и 18,7 м²/г соответственно. Таким образом, механоактивация увеличивает удельную поверхность гидролизного лигнина и снижает количество остаточных полисахаридов, что является перспективным при его возможном использовании в технологическом процессе изготовления твердого топлива. Кроме того, при механоактивации лигнин повышает свою гидрофобность, на его поверхности появляются активные центры, что, вероятно, может положительно повлиять на его прочностные характеристики.

В ИК-спектре гидролизного лигнина идентифицированы следующие функциональные группы (рис. 4): свободные гидроксильные группы (3696,64 см⁻¹ и 3620,45 см⁻¹); гидроксильные фенольные группы (3696,64 см⁻¹ и 3620,45 см⁻¹); группы -CO- и группы -СН двойной связи (1418,67 см⁻¹); – метиленовые -СН₂- связи (2921,24 см⁻¹, 2851,8 см⁻¹); связанные гидроксильные группы во внутрикомплексных соединениях (2514,25 см⁻¹); галогенангидриды насыщенных и ненасыщенных кислот и карбонильные группы С=О (1795,76 см⁻¹); колебания ароматического кольца (1626,98 см⁻¹); колебания ацеталей -С-ОН (950,92 см⁻¹); симметричные колебания кольца (913,31 см⁻¹); колебания -С-Н в производных бензола (873,77 см⁻¹, 798,54 см⁻¹ и 778,29 см⁻¹); деформационные колеба-

ния связей С-Н и С-О (873,77 см⁻¹); – маятниковые СН₂ колебания (778,29 см⁻¹).

Анализируя химический состав лигнина по ИК-спектру, можно увидеть, что в его спектре есть только ангидриды кислот и нет свободной серной кислоты, что подтверждается также измерением водородного показателя его водного раствора (рН = 6,2). Процесс снижения кислотности, вероятно, связан с блокировкой гидроксильных групп фенольной природы и декарбоксилированием карбоксильных групп. Эти группы гидрофильны, и в результате, после вымывания осадками, вероятно, в лигнине происходит конденсация простых эфирных связей, которые являются гидрофобными.

Отличительной особенностью является способность лигнина возможность его переходить в вязкопластическое состояние при воздействии высокого давления – порядка 100 МПа. Это обстоятельство способствовало развитию одного из перспективных направлений переработки ТГЛ – брикетированию. Исследовательские и опытно-промышленные разработки, показали, что лигнобрикеты являются высококалорийным бездымным бытовым топливом, качественным восстановителем в черной и цветной металлургии, способным заменить кокс, полукокс и древесный уголь, а также могут служить для производства угля типа древесного и изготовления из лигнобрикетов углеродистых сорбентов. Брикетирование – окускование при давлениях прессования от 15,0 до 150,0 МПа – менее чувствительно к свойствам исходного материала, и поэтому применяется для переработки разнообразных зернистых материалов дисперсностью до 10 мм (для грануляции требуются куски крупностью менее 74 мкм). Кроме того, достаточно разработано аппаратное оформление процесса, так как имеется многолетний практический опыт при производстве угле- и торфобрикетов.

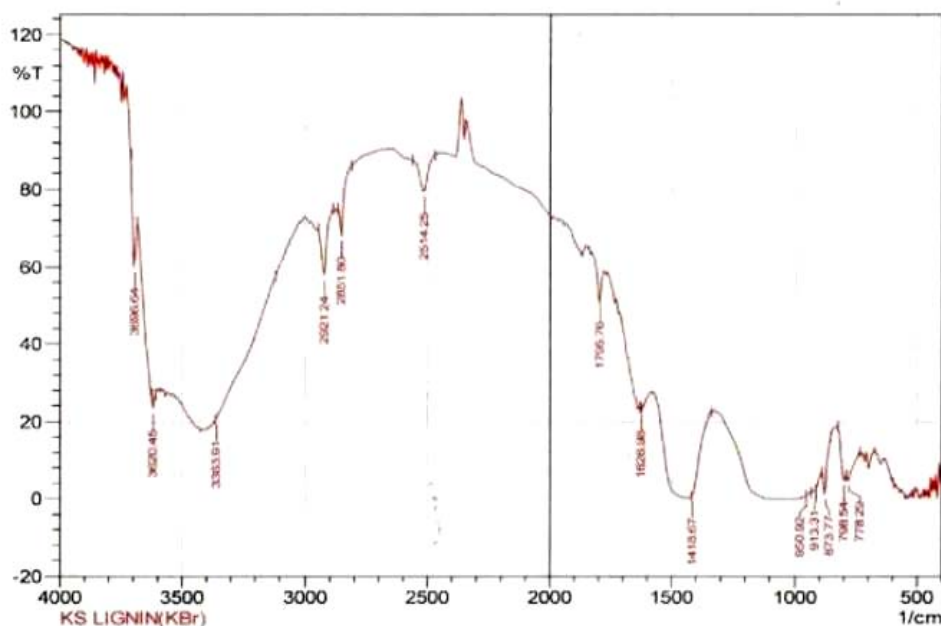


Рис. 4. ИК-спектр гидролизного лигнина

С точки зрения переработки вторичных ресурсов и рационального использования сырья брикетирование позволяет:

- 1) использовать мелкозернистые и слабоструктурные минеральные ресурсы;
- 2) утилизировать отходы, полученные в процессе добычи и переработки сырья, превращая их в товарный продукт;
- 3) расширить сырьевую базу за счет вовлечения в технологические процессы ранее не используемые материалы;
- 4) повысить производительность агрегатов, перерабатывающих брикеты, за счет однородности брикетов и наличия необходимых для процесса компонентов в одном куске (брикете);
- 5) перевести технологические схемы предприятий на замкнутый цикл за счет комплексного использования сырья и отходов;
- 6) снизить, а в некоторых случаях и исключить, загрязнение окружающей среды (рек, полей, воздушного бассейна);
- 7) сократить вырубку лесов, расходуемых на производство угля, за счет окускования отходов деревообработки.

К основным параметрам процесса брикетирования лигнина с целью получения прочных, без связующих веществ, сырых и пиролизированных брикетов следует отнести давление прессования и влажность лигнина. Установлено, что для ТГЛ определенной влажности существует свое оптимальное давление, которое возрастает с уменьшением содержания влаги. Так, при влажности 24 % оптимальное давление равно 100 МПа, а при влажности 15, 10 и 6 % – соответственно 250, 350, 400 МПа. Установлено, что скорость прессования, гранулометрический состав, крупность, химический состав материала не оказывают существенного влияния на прочность брикетов из ТГЛ. Причем влияние этих параметров компенсируется высоким давлением прессования (порядка 100 МПа), необходимым для получения прочных брикетов. Брикетированность лигнина в значительной степени зависит от температуры. При увеличении температуры подсушенного лигнина и прессформы до 150 °С пластические свойства лигнина улучшаются, что позволяет получать прочные и водостойчивые брикеты без трещин при значительно более низких давлениях прессования, чем при «холодном» брикетировании.

На основании полученных экспериментальных данных и анализа литературных источников предлагается следующие схемы получения лигнобрикетов.

Комплекс состоит из двух параллельных технологических линий. Товарная продукция – топливные брикеты. Сырой лигнин отбирается экскаватором, доставляется автотранспортом к месту переработки, складывается на открытой площадке, рассчитанной на трехдневный запас сырья. Технологический процесс начинается с сушки лигнина (насыпная масса сырого лигнина примерно 100 кг/м³) в сушильном барабане производительностью 15 т/ч. Время сушки 15 мин. Теплоносителем служат газообразные продукты сгорания: 180–250 °С. Производительность барабана по сухому лигнину не менее 10 т/ч. Лигнин с содержа-

ем влаги не выше 5 % при 120 °С поступает без промежуточного хранения в подогреватель винтового типа с тепловой рубашкой, по которой циркулирует газообразный теплоноситель (500 °С). Разогретый до 320–350 °С лигнин теряет до 7,5 % массы (5 % – испарение остаточной физической воды, 2,5 % – бертенирование) и затем загружается по 1,5 т в контейнеры-реторты объемом 15 м³, где происходит пиролиз за счет экзотермических реакций. Газообразные и жидкие (жижка) продукты термического распада отводятся, а полученный твердый обугленный продукт, раскаленный до 800 °С, выгружается в винтовой охладитель, служащий еще и смесителем, где орошается водосмоляным конденсатом. За счет тепловой энергии обугленного продукта вода испаряется, а смолистые компоненты и вещества, растворенные в водосмоляном конденсате, адсорбируются на его частичках. Из смесителя обугленная масса при 60–80 °С немедленно подается в пресс-формы гидравлического прессы СМ-301 Б или СМ-1085 для брикетирования. Формованные брикеты хранятся на складе готовой продукции при температуре не выше 40 °С и во избежание случайного возгорания продуваются воздухом с повышенным содержанием влаги. Упакованная в бигбэги продукция отправляется потребителю. В результате охлаждения пиролизного газа до температуры окружающей среды пары воды и смол конденсируются с образованием неконденсирующегося газа (выход примерно 37,3 %), и водосмоляного конденсата (примерно 62,7 %). Плотность неконденсирующегося газа 1,22 кг/м³, теплотворная способность 4215 ккал/кг. Водосмоляной конденсат состоит из воды, смолы и водорастворенных кислородных соединений. Плотность топливного брикета 1250–1300 кг/м³, теплотворная способность 7750 ккал/кг. Из 2,7 млн т лигнина в Канском хранилище можно получить до 1 млн т обугленного углеродного продукта. Мощность технологической линии принимается из расчета ликвидации хранилища за 10 лет, то есть получения 100 тыс. т обугленного продукта в год. Затем линия будет работать на отходах деревообрабатывающих предприятий Канского района. Спрос на экологически чистое топливо обеспечивается требованиями охраны воздушного пространства г. Красноярска и других городов края. Данное решение позволит: – ликвидировать отходы Канского БХЗ; – создать новое производство и востребованный продукт; – создать новых рабочие места. Побочные продукты технологического процесса: – тепловая энергия ~ 2 млн Гкал/год; – электроэнергия ~ 1+ млн квт/ч. Персонал нового предприятия составит от 40 до 120 человек; объем инвестиций ориентировочно составит 500 млн руб.

Качественные характеристики полученного брикета топливного лигнина удовлетворяют показателям, представленным в табл. 3.

Результаты исследования состава золы от сжигания лигнинного брикета представлены в табл. 4.

Лигнобрикеты представляют собой высококачественное топливо с низким содержанием золы. При сжигании брикеты лигнина горят бесцветным пламенем, не выделяя коптящего дымового факела.

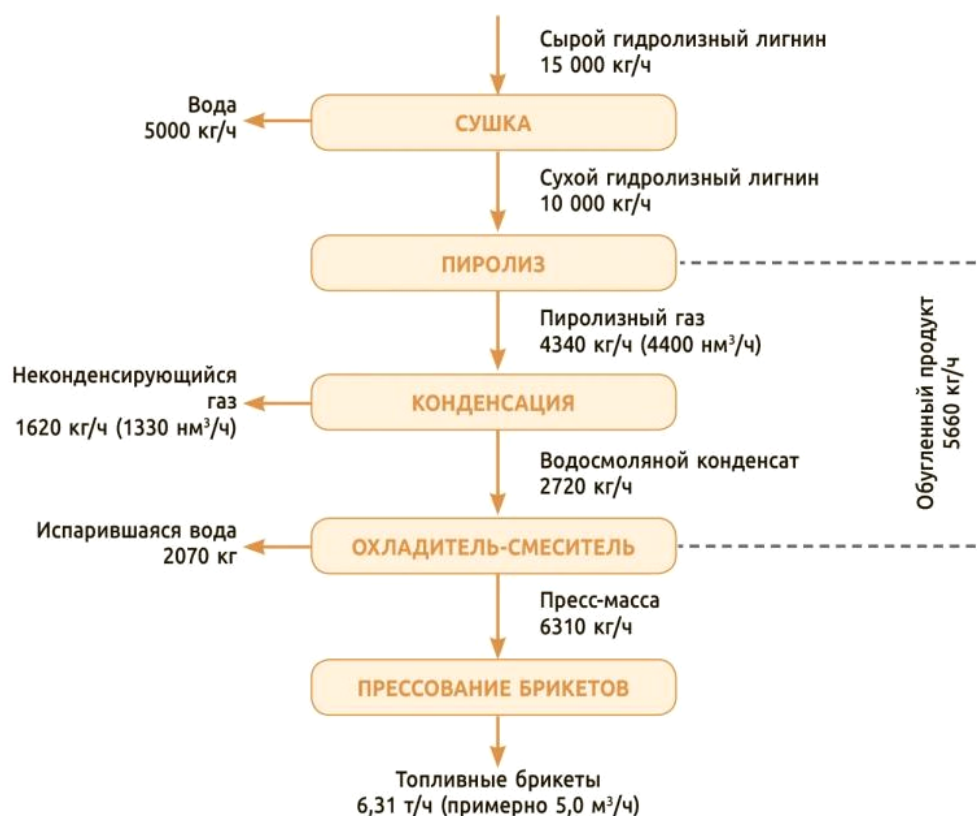


Рис. 5. Принципиальная схема получения топливных брикетов из обугленного лигнина

Таблица 3
Качественная характеристика топливного брикета

Показатель	Значение показателя
Массовая доля общей влаги (W _г) в рабочем состоянии топлива не более, %	22
Зольность (Ad) не более, %	20
Массовая доля мелочи (куски размером менее 25 мм) не более, %	8
Содержание серы (Sr) не более, %	0,4
Теплотворная способность, не менее, ккал/кг	7750

Таблица 4
Состав золы от сжигания лигнинного брикета

Соединение	Содержание, %
Al ₂ O ₃	4,7
SiO ₂	91,3
P ₂ O ₅	1,9
CaO	0,5
Na ₂ O	0,5
K ₂ O	0,3
MgO	0,4
TiO ₂	0,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что технический гидролизный лигнин является многокомпонентным соединением, включает собственно технический лигнин (60–70 %) и сопутствующие вещества: экстрактивные вещества (7–22 %), представленные (органическая часть) моносахаридами и продуктами их распада, терпеновыми углеводородами и их кислородсодержащими производными, ароматическими соединениями, алифатическими углеводородами, высокомолекулярными кислотами; остаточные полисахариды (2–8 %).

В ходе исследования структурно-механических свойств, фракционного состава, физико-химических характеристик установлена возможность переработки гидролизного лигнина с получением высококачественного биотоплива.

Предварительная обработка в форме механоактивации способствует стабилизации гранулометрического состава и усреднению влажности исследуемого лигнина. Механоактивация увеличивает удельную поверхность гидролизного лигнина и снижает количество остаточных полисахаридов, что является перспективным при его возможном использовании

в технологическом процессе изготовления твердого топлива. Кроме того, при механоактивации лигнин повышает свою гидрофобность, на его поверхности появляются активные центры, что, вероятно, может положительно повлиять на его прочностные характеристики.

Предложен способ переработки гидролизного лигнина из отвалов Канского биохимического завода, благодаря которому возможно снизить антропогенную нагрузку на атмосферный воздух, почву ликвидацией хранилища, с получением альтернативного биотоплива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Муслимов Р. Х., Плотнокова И. Н. Возобновляются ли запасы нефти? // ЭКО. 2012. № 1 (451). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozobnovlyayutsya-li-zapasy-nefti> (дата обращения: 14.07.2025).
2. О проблеме истощения мировых запасов нефти / Д. Л. Рахманкулов, С. В. Николаева, Ф. Н. Латыпова, Ф. Ш. Вильданов // Баш. хим. ж. 2008. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-probleme-istoscheniya-mirovyh-zaparov-nefti> (дата обращения: 14.07.2025).
3. Иванов И. С. Получение газообразного и жидкого биотоплива // Материалы XIII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум». URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018027488> (дата обращения: 14.07.2025).
4. ГОСТ Р 52808–2007. Нетрадиционные технологии. Энергетика биоотходов. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2008. 8 с.
5. Возможности использования гидролизного лигнина как восстановителя металлов из пыли дуговых электропечей / Л. Ю. Коваленко, А. П. Анзулевиц, Д. А. Калганов, Л. Н. Бутько, Д. А. Захаревич // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-ispolzovaniya-gidroliznogo-lignina-kak-vozstanovitelya-metallov-iz-pyli-dugovyh-elektropetchey> (дата обращения: 14.07.2025).
6. ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. Москва : Стандартинформ, 2018. 10 с.
7. Алемасова А. С., Рокун А. Н., Шевчук И. А. Аналитическая атомно-абсорбционная спектроскопия. Севастополь : Вебер, 2003. 327 с.
8. Сердюкова А. Ф., Барабанщиков Д. А. Загрязнение окружающей среды отходами производств // Молодой ученый. 2018. № 25. 211 с.
9. Булаткин Г. А. Производство биотоплива второго поколения из растительного сырья // Вестник Российской Академии наук. 2010. Т. 80, № 5–6. С. 522–532.
10. Орси́к Л. С., Сорокин Н. Т., Федоренко В. Ф. Биоэнергетика: мировой опыт и прогнозы развития. Москва : Росинформагротех, 2008. 404 с.
11. Севастьянов С. Н. Биоэнергетика. Древесные (топливные) гранулы // Вестник ОГУ. 2009. № 10 (104). С. 133–138.
12. Гелес И. С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007. 499 с.
13. Пугин К. Г. Промышленная экология. Утилизация крупнотоннажных отходов производства : учебное пособие. Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2016. 95 с.
14. Варфоломеев С. Д., Моисеев И. И., Мясоедов Б. Ф. Энергоносители из возобновляемого сырья. Химические аспекты // Вестник РАН. 2009. Т. 79, № 7. С. 595–604.
15. Энергоемкость прессования древесного сырья при производстве биотоплива / М. А. Михеевская, В. П. Друзьянова, Д. Д. Бурмистрова [и др.] // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. № 241. С. 207–217. DOI 10.21266/2079-4304.2022.241.207-217.
16. Теоретический анализ процесса брикетирования измельченных древесных материалов в условиях лесного терминала / О. А. Куницкая, А. В. Помигуев, Д. Д. Бурмистрова, Е. А. Тихонов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 9. С. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-9-25-33.
17. Определение оптимального состава биотоплива / Р. И. Тагиров, Е. В. Мыльникова, А. Д. Байгилина, Д. Р. Хинкиладзе // Вестник науки. 2020. Т. 2, № 3(24). С. 95–99.
18. Басуматорова Е. А., Норматов Ш. Ш. Перспективы использования биотоплива и альтернативных источников энергии // АгроЭкоИнфо. 2023. № 5(59). DOI 10.51419/202135538.
19. Исраилова Э. А., Д Личковаха. В. Рынок твердого биотоплива Российской Федерации // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). 2022. № 3(79). С. 152–158. DOI 10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.79.3.020.
20. Вопросы структурной организации лигнина и перспективы его переработки / А. Ю. Кожевников, С. Л. Шестаков, Ю. А. Сыпалова // Химия растительного сырья. 2023. № 2. С. 5–26. DOI 10.14258/jcprn.20230211737.
21. Paone E., Mauriello F., Tabanelli T. The rise of lignin biorefinery // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2020. Vol. 24. P. 1–6. DOI 10.1016/j.cogsc.2019.11.004.
22. Кузминых Ю. В. Анализ развития мирового рынка твердого биотоплива в современных условиях // Актуальные проблемы экономики и управления. 2023. № 1(12). С. 217–224. DOI 10.52899/978-5-88303-660-5_217.
23. Сыпалова Ю. А., Покрышкин С. А., Кожевников А. Ю. Исследование мономерного состава лигнинов при пиролизическом разложении // Химия и технология растительных веществ : тезисы докладов XIII Международной научной конференции со школой молодых ученых, Сыктывкар, 28.05–01.06.2024. Киров : ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024. С. 179.
24. Optimization of Approaches to Analysis of Lignin by Thermal Decomposition / S. Pokryshkin, Yu. Syalova, A. Ivahnov, A. Kozhevnikov // Polymers. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 2861. DOI 10.3390/polym15132861.
25. Использование органических отходов в качестве сырья для различных методов получения биотоплива (обзор) / А. Д. Горбенко, М. А. Каплан, А. В. Квитко, М. А. Севастьянов // Достижения науки

и техники АПК. 2023. Т. 37, № 4. С. 61–68. DOI 10.53859/02352451_2023_37_4_61.

26. Линник В. Ю., Линник Ю. Н. Состояние и перспективы развития биоэнергетики // Вестник университета. 2019. № 10. С. 59–66. DOI 10.26425/1816-4277-2019-10-59-66.

27. Кравченко Р. В. Состояние и тенденции развития рынка биотоплива // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2013. № 4. С. 188–196.

28. Любов В. К., Цыпнятов И. И. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023. № 1(391). С. 172–185. DOI 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185.

29. Мохирев А. П., Безруких Ю. А., Медведев С. О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона. 2015. № 2-2(36). С. 81.

30. Покрышкин С. А., Сыпалова Ю. А., Кожевников А. Ю. Исследование мономерного состава лигнинов с использованием диаграмм RDBE и Ван-Кревелена // Химия и технология растительных веществ : тезисы докладов XIII Международной научной конференции со школой молодых ученых, Сыктывкар, 28.05–01.06.2024. Киров : ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2024.

REFERENCES

1. Muslimov R. H., Plotnikova I. N. Vozobnovlyayutsya li zapasy nefti? // EKO. 2012. № 1 (451). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozobnovlyayutsya-li-zapasy-nefti> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

2. O probleme istoshcheniya mirovyh zapasov nefti / D. L. Rahmankulov, S. V. Nikolaeva, F. N. Latypova, F. Sh. Vil'danov // Bash. him. zh. 2008. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-probleme-istoscheniya-mirovyh-zapasov-nefti> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

3. Ivanov I. S. Poluchenie gazoobraznogo i zhidkogo biotopliva // Materialy XIII Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Studencheskij nauchnyj forum» URL: <https://scienceforum.ru/2021/article/2018027488> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

4. GOST R 52808–2007. Netradicionnye tekhnologii. Energetika biootvodov. Terminy i opredeleniya. Moskva : Standartinform, 2008. 8 s.

5. Vozmozhnosti ispol'zovaniya gidroliznogo lignina kak vosstanovitelya metallov iz pyli dugovyh elektropechej / L. Yu. Kovalenko, A. P. Anzulevich, D. A. Kalganov, L. N. But'ko, D. A. Zahar'evich // Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2023. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vozmozhnosti-ispolzovaniya-gidroliznogo-lignina-kak-vosstanovitelya-metallov-iz-pyli-dugovyh-elektropechej> (data obrashcheniya: 14.07.2025).

6. GOST 17.4.4.02–2017. Ohrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza. Moskva : Standartinform, 2018. 10 s.

7. Alemasova A. S., Rokun A. N., Shevchuk I. A. Analiticheskaya atomno-absorbcionnaya spektroskopiya. Sevastopol' : Veber, 2003. 327 s.

8. Serdyukova A. F., Barabanshchikov D. A. Zagryaznenie okruzhayushchej sredy othodami proizvodstv // Molodoy uchenyj. 2018. № 25. 211 s.

9. Bulatkin G. A. Proizvodstvo biotopliva vtorogo pokoleniya iz rastitel'nogo syr'ya // Vestnik Rossijskoj Akademii nauk, 2010. T. 80, № 5–6. S. 522–532.

10. Orsik L. S., Sorokin N. T., Fedorenko V. F. Bioenergetika: mirovoj opyt i prognozy razvitiya. Moskva : Rosinformagrotekh, 2008. 404 s.

11. Sevast'yanov S. N. Bioenergetika. Drevesnye (toplivnye) granuly // Vestnik OGU. 2009. № 10 (104). S. 133–138.

12. Geles I. S. Drevesnoe syr'e – strategicheskaya osnova i rezerv civilizacii. Petrozavodsk : Karel'skij nauchnyj centr RAN, 2007. 499 s.

13. Pugin K. G. Promyshlennaya ekologiya. Utilizaciya krupnotonnazhnyh othodov proizvodstva: uchebnoe posobie. Perm' : Izd-vo PNIPU, 2016. 95 s.

14. Varfolomeev S. D., Moiseev I. I., Myasoedov B. F. Energonositeli iz vozobnovlyаемого syr'ya. Himicheskije aspekty // Vestnik RAN. 2009. T. 7, № 7. S. 595–604.

15. Energoemkost' pressovaniya drevesnogo syr'ya pri proizvodstve biotopliva / M. A. Miheevskaya, V. P. Druz'yanova, D. D. Burmistrova [i dr.] // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. 2022. № 241. S. 207–217. DOI 10.21266/2079-4304.2022.241.207-217.

16. Teoreticheskij analiz processa briketirovaniya izmel'chennyh drevesnyh materialov v usloviyah lesnogo terminala / O. A. Kunickaya, A. V. Pomiguyev, D. D. Burmistrova, E. A. Tihonov // Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya. 2021. № 9. S. 25–33. DOI 10.31044/1684-2561-2021-0-9-25-33.

17. Opredelenie optimal'nogo sostava biotopliva / R. I. Tagirov, E. V. Myl'nikova, A. D. Bajgil'dina, D. R. Hinkiladze // Vestnik nauki. 2020. T. 2, № 3(24). S. 95–99.

18. Basumatorova E. A., Normatov Sh. Sh. Perspektivy ispol'zovaniya biotopliva i al'ternativnyh istochnikov energii // AgroEkoInfo. 2023. № 5(59). DOI 10.51419/202135538.

19. Israilova E. A., Lichkovaha D. V. Rynok tverdogo biotopliva Rossijskoj Federacii // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINH). 2022. № 3(79). S. 152–158. DOI 10.54220/v.rsue.1991-0533.2022.79.3.020.

20. Kozhevnikov A. Yu., Shestakov S. L., Syalova Yu. A. Voprosy strukturnoj organizacii lignina i perspektivy ego pererabotki // Himiya rastitel'nogo syr'ya. 2023. № 2. S. 5–26. DOI 10.14258/jcpm.20230211737.

21. Paone E., Mauriello F., Tabanelli T. The rise of lignin biorefinery // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2020. Vol. 24. P. 1–6. DOI 10.1016/j.cogsc.2019.11.004.

22. Kuzminyh Yu. V. Analiz razvitiya mirovogo rynka tverdogo biotopliva v sovremennyh usloviyah // Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya. 2023. № 1(12). S. 217–224. DOI 10.52899/978-5-88303-660-5_217.

23. Syalova Yu. A., Pokryshkin S. A., Kozhevnikov A. Yu. Issledovanie monomernogo sostava ligninov pri piroliticheskom razlozhenii // Himiya i tekhnologiya rastitel'nyh veshchestv : tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii so shkoloj molodyh

uchenyh, Syktyvkar, 28.05–01.06.2024. Kirov : FIC Komi NC UrO RAN, 2024. S. 179.

24. Optimization of Approaches to Analysis of Lignin by Thermal Decomposition / S. Pokryshkin, Yu. Sypalova, A. Ivahnov, A. Kozhevnikov // *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 13. P. 2861. DOI 10.3390/polym15132861.

25. Ispol'zovanie organicheskikh othodov v kachestve syr'ya dlya razlichnykh metodov polucheniya biotopliva (obzor) / A. D. Gorbenko, M. A. Kaplan, A. V. Kvitko, M. A. Sevost'yanov // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2023. T. 37, № 4. S. 61–68. DOI 10.53859/02352451_2023_37_4_61.

26. Linnik V. Yu., Linnik Yu. N. Sostoyanie i perspektivy razvitiya bioenergetiki // *Vestnik universiteta*. 2019. № 10. S. 59–66. DOI 10.26425/1816-4277-2019-10-59-66.

27. Kravchenko R. V. Sostoyanie i tendencii razvitiya rynka biotopliva // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik*. 2013. № 4. S. 188–196.

28. Lyubov V. K., Cypnyatov I. I. Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniya biotopliva // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Lesnoj zhurnal*. 2023. № 1(391). S. 172–185. DOI 10.37482/0536-1036-2023-1-172-185.

29. Mohirev A. P., Bezrukih Yu. A., Medvedev S. O. Pererabotka drevesnykh othodov predpriyatij lesopromyshlennogo kompleksa, kak faktor ustojchivogo prirodopol'zovaniya // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2015. № 2-2(36). S. 81.

30. Pokryshkin S. A., Sypalova Yu. A., Kozhevnikov A. Yu. Issledovanie monomernogo sostava ligninov s ispol'zovaniem diagramm RDBE i Van-Krevelena // *Himiya i tekhnologiya rastitel'nykh veshchestv : tezisy dokladov XIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii so shkoloy molodykh uchenykh, Syktyvkar, 28.05–01.06.2024. Kirov : FIC Komi NC UrO RAN, 2024.*

© Есякова О. А., Кох Ж. А., 2025

Поступила в редакцию 20.05.2025
Принята к печати 04.08.2025