

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

Научная статья
УДК 662.75:629.7
doi: 10.28983/asj.y2025i4pp119-126

**Технологические возможности пиролиза высокомолекулярных органических веществ
для получения жидкого моторного топлива**

**Кирилл Евгеньевич Панкин, Ольга Александровна Ивченко,
Александр Васильевич Тютин, Ольга Валериевна Карпова**

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова,
г. Саратов, Россия
e-mail: texmexium@mail.ru

Аннотация. Предпринята попытка оценки технологических возможностей пиролиза древесины и древесных отходов для получения жидкого моторного биотоплива в сравнении с переработкой нефти. Показана общность сравниваемых технологий: переработке подвергаются вещества с высоким содержанием углерода ($> 70\%$); переработка осуществляется воздействием высоких температур; продуктами переработки являются газообразные, жидкие и твердые вещества и т.п. Однако у пиролиза в сравнении с нефтепереработкой существуют неоспоримые преимущества: пиролиз является одностадийным процессом, менее чувствителен к качеству перерабатываемого сырья, т.к. специально разрабатывался для переработки нетоварных продуктов и отходов; менее чувствителен к содержанию в сырье влаги; продукты пиролиза древесины и древесных отходов практически не содержат серы, что важно с точки зрения экологии; и, самое важное, пиролиз выигрывает у нефтепереработки в энергоэффективности, т.к. нефтепереработка использует только 30–40 % выделяемой энергии, в то время как энергоэффективность пиролиза составляет 60–70 %. Энергозатраты пиролиза прямо пропорциональны влажности перерабатываемого сырья (древесины и древесных отходов), однако компенсировать затрачиваемую энергию позволяет особенность, присущая только пиролизу древесины – экзотермическая стадия разложения целлюлозы и лигнина. Проведена качественная и количественная оценка получаемых продуктов. В этом отношении технология пиролиза уступает нефтепереработке, т.е. жидкие продукты пиролиза составляют только 23–26 % (65–75 % у нефтепереработки). Показано, что полученные в результате пиролиза сырья жидкие продукты пригодны в качестве жидкого моторного топлива.

Ключевые слова: биотопливо, древесина и древесные отходы, пирогаenetическая переработка, технологические возможности пирогаenetической переработки древесины и древесных отходов

Для цитирования: Панкин К. Е., Ивченко О. А., Тютин А. В., Карпова О. В. Технологические возможности пиролиза высокомолекулярных органических веществ для получения жидкого моторного топлива // Аграрный научный журнал. 2025. № 4. С. 119–126. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2025i4pp119-126>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Technological possibilities of pyrolysis of high-molecular organic substances
for liquid engine fuel production**

Kirill E. Pankin, Olga A. Ivchenko, Aleksander V. Tiutin, Olga V. Karpova

Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russia
e-mail: texmexium@mail.ru

Abstract: An attempt to evaluate the technological capabilities of wood and wood waste pyrolysis for obtaining liquid motor biofuel in comparison with oil refining was made. It was shown that the compared technologies have much in common: substances with a high carbon content ($> 70\%$) are processed; processing is carried out using high temperatures; the processed products are gaseous, liquid and solid substances, etc. However, pyrolysis has undeniable advantages over oil refining: pyrolysis is a single-stage process; less sensitive to the quality of the





processed raw materials, since it was specially developed for processing non-marketable products and waste; less sensitive to the moisture content in the raw materials; the products of wood and wood waste pyrolysis practically do not contain sulfur, which is important from an environmental point of view; and, most importantly, pyrolysis wins over oil refining in energy efficiency, since oil refining uses only 30–40 % of the energy allocated for this, while the energy efficiency of pyrolysis is 60–70 %. Energy consumption of pyrolysis is directly proportional to the moisture content of the processed raw material (wood and wood waste), however, the energy consumption can be compensated for by a feature inherent only to wood pyrolysis, that is the exothermic stage of cellulose and lignin decomposition. A qualitative and quantitative assessment of the products obtained was carried out. In this regard, the pyrolysis technology is inferior to oil refining, i.e. liquid pyrolysis products make up only 23–26 % (65–75 % in oil refining). It was shown that the liquid products obtained as a result of raw material pyrolysis are suitable as liquid fuel.

Keywords: biofuel, wood and wood waste, pyrogenetic processing, technological possibilities of pyrogenetic processing of wood and wood waste

For citation: Pankin K. E., Ivchenko O. A., Tiutin A. V., Karpova O. V. Technological possibilities of pyrolysis of high-molecular organic substances for liquid engine fuel production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2025;(4):119–126. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2025i4pp119-126>.

Проблема истощаемости минеральных ресурсов, а также удорожание их добычи, транспортировки и переработки заставляет исследователей искать другие пути и источники для производства механической и электрической энергии, способные поддерживать в движении огромный парк машин и механизмов, обеспечивающий функционирование хозяйственной деятельности человека [2]. Энергия и доступ к ней являются основой экономики как развивающихся, так и развитых стран, причем последние, по понятным причинам, более требовательны к их качественным и количественным характеристикам. Потеря энергетических источников приведет к откату в развитии технического и технологического комплексов промышленных государств на уровень середины XIX века, а также к резкому или постепенному отказу от многих достижений современной цивилизации. Наиболее уязвим в этом отношении транспорт – наземный, воздушный и водный, который является потребителем большей части продуктов переработки нефти – бензина, керосина, дизельного топлива, мазута, вырабатываемых современной нефтехимической промышленностью.

Ограниченность легкодоступных запасов природных (минеральных) ресурсов, широко освоенных человеком в его хозяйственной деятельности, заставляет задуматься над вопросом их адекватной замены. Предпринимаются попытки поиска подобной замены сразу в нескольких направлениях. Большие надежды связывают с применением электрической энергии [13], водородного топлива [23], топливом биологического происхождения – биоэтанолом, биодизелем [27], смесями топлива минерального и биологического происхождения, к примеру, бензин марки Е-95 [21]. Широкое применение в настоящее время, получили технологии и приемы экономии минерального топлива: гибридные силовые установки на автомобилях [30], режим «старт-стоп» в городском цикле эксплуатации автомобиля [29] и т.п.

За последние три десятилетия предложено много приемов извлечения энергии из объектов окружающей среды – ветра и солнечного излучения, преобразуемых в электричество. Однако, по ряду причин, заменить выбывающие мощности солнечной и ветровой энергией не всегда представляется возможным, а использование атомной энергии содержит в себе много явных и неявных опасностей. Водородное топливо действительно перспективно, однако есть технические сложности с хранением и транспортировкой газообразного водорода: обеспечение высокого давления в сотни атмосфер и низких температур (10–17 К). Биоэтанол и биодизель получают из сельскохозяйственных злаковых и масличных растений. В настоящее время разрабатываются подходы для перевода сельскохозяйственной техники на биотопливо [22]. Однако в перспективе это может вызвать конкуренцию за сырье между ТЭК и пищевой промышленностью [14, 31]. Гибридные силовые установки, а также оснащение системами «старт-стоп» доступны не для всех типов транспортных средств, а только для легковых автомобилей.

Перспектива применения новых видов топлива заключается в соответствии их свойств техническим требованиям к топливу [8–12], применяемому в силовых установках. Кроме этого, предлагаемые технологии производства новых видов топлива должны быть экономически рентабельны, т.к. удорожание производства топлива приведет либо к сокращению его потребления, либо к удорожанию услуг за счет увеличения энергетической составляющей его стоимости.

Анализ литературных источников [2, 3, 5, 13–16, 18, 20, 25–27] показывает различное отношение и оценку возможности перевода ТЭК и транспорта на альтернативные или возобновляемые виды энергетических источников. Высказываются разные мнения: от возможности и рентабельности производства альтернативных источников энергии до невозможности и экономической нецелесообразности усилий в данном направлении. Тем не менее, такие дискуссии хороши в то время, когда есть выбор, чем заправить автомобиль (тепловоз, теплоход, самолет и пр.) – топливом нефтяного происхождения или биотопливом. В недалеком будущем такие проблемы встанут перед человечеством, и тогда все дискуссии отпадут сами собой.

Тот факт, что топливо биологического (альтернативного) происхождения будет дороже в производстве, чем нефтяное, практически никем не оспаривается, однако уже сейчас, несмотря на скептическое отношение к альтернативным источникам энергии, общее число публикаций в данном направлении продолжает расти, и сегодня предлагаются все новые и новые варианты альтернативных видов топлива [1, 3, 5, 14–16, 18, 20, 21, 25–27] и способов его производства [1, 5, 14, 16, 20, 21] как в чистом виде, так и в смеси с топливами нефтяного происхождения [21]. В связи с этим уже сейчас возникает необходимость в разработке таких технологий, которые обеспечивали бы максимальное снижение затрат на производство.

Наиболее рациональные пути решения:

1) переход с переработки товарных продуктов на переработку отходов, а также создание технологий переработки непищевого сырья в топливо [5, 16, 20];

2) снижение технологических затрат на производство, т.е. рациональное использование энергетических ресурсов или отказ от энергоемких технологий в пользу малоэнергозатратных [34];

3) снижение транспортных расходов при производстве, т.к. известно, что отходы и непищевые ресурсы требуют затрат на сбор, складирование и сортировку перед переработкой [31, 34].

Поставленные задачи можно решать только в комплексе. Чтобы сложная система начала работать, нужно тщательно подготовить составные элементы. Одним из перспективных источников создания жидкого моторного топлива в ближайшем будущем может стать переработка природного сырья, а также отходов промышленного или бытового происхождения. Предлагаемый метод переработки – пиролиз – очень перспективен [1, 5, 16, 20]. В мире существует специальный проект «Быстрый пиролиз» (Fast Pyrolysis) [32], входящий в глобальный проект «Технология биомассы» (Biomass Technology Group) [33], который располагает актуальной информацией о технологиях переработки биомассы. Данная технология выступает альтернативой как традиционной нефтепереработки, так и некоторым топливным биотехнологиям. Отправной точкой оценки перспективности любой альтернативной технологии получения жидкого моторного топлива, включая технологию пиролиза, является технология нефтепереработки. Сравнивая их технологические возможности и выработку продукта на единицу массы сырья, можно оценить перспективу применения альтернативной технологии в настоящем и будущем, а также ее конкурентные возможности. Целью данной работы является оценка технологических возможностей пиролиза для получения жидкого моторного топлива в сравнении с традиционной переработкой нефти.

Анализ литературных источников [1–6, 14–34], а также экспериментальные исследования в области технологии пиролиза и технологии нефтепереработки показывают, что между представленными технологиями много общего. Обе технологии применяют переработку сырья в защитной атмосфере при воздействии высокой температуры. Более пристальное изучение технологических особенностей показало, что пиролиз, применяемый сейчас в качестве самостоятельной технологии, является составной частью переработки тяжелых углеводородов и называется термическим (или каталитическим) крекингом. Поэтому для дальнейшей оценки эффективности обеих технологий необходимо найти общие родственные критерии.

Критерий 1. Сырье. Сырьем для обеих технологий являются высокомолекулярные вещества с высоким содержанием углерода (выше 70 % по массе). В таблице 1 представлены требования к исходному сырью для двух сравниваемых технологий: пиролиз и нефтепереработка.

Анализ представленных в таблице 1 данных показывает, что нефтепереработка наиболее чувствительна к качеству исходного сырья – для переработки на отдельном заводе пригодна только нефть, полученная с определенного нефтяного месторождения. Пирогагенетическая переработка, в свою очередь, менее чувствительная к качеству сырья, т.к. она специально разрабатывалась для переработки низкосортного сырья, а в настоящее время все чаще применяется для переработки отходов.



Таблица 1 – Требования к исходному сырью для переработки [6, 7, 19, 27, 28]

Table 1 – Raw materials processing requirements [6, 7, 19, 27, 28]

Технология	Сырье	Примеси	Содержание примесей	Влажность, % масс.
Пирогенетическая переработка	Любой материал органического происхождения ($W(C) > 70$ % масс.)	механические	неважно	неважно, предпочтительно не более 20 (древесина); содержание воды в пластических массах < 1
		растворенные	неважно	
Нефтепереработка	Нефть	механические	песок (глина) < 1 мг/л	< 0,1
		растворенные	соли < 5 мг/л (хлориды) сера < 0,5 %	

Важную роль в переработке сырья играет его влажность. Очистка нефти от воды – это первый и обязательный этап ее переработки, для пиролиза в условиях ретортного процесса существует оптимальный уровень влажности (15–20 % – состояние суховоздушной древесины). Повышенная влажность несколько снижает количественные характеристики переработки (разбавляется пиролизат, ухудшается качество угля, расходуется больше топлива на сушку и увеличивается время на оборот реторты) [7, 28].

Одним из главных требований к современному моторному топливу является низкое содержание серы в связи с законодательным ограничением выбросов в атмосферу серосодержащих веществ, а также применением каталитических систем нейтрализации выхлопных газов автомобиля. Сырая нефть содержит серу и должна быть очищена от нее. Древесина и древесные отходы в этом отношении находятся в более выгодном положении, т.к. содержат очень низкое количество серы, поскольку растения не усваивают ее из почвы.

Для сравнения технологических возможностей следует учесть, что в Российской Федерации добывают в целом около 500 млн т нефти в год, из них 52–53 % перерабатывают в различные нефтепродукты. Мировые запасы недревесного сырья, доступного для переработки, оценивают в более чем 1 млрд т/г. К тому же прирост массы промышленных и бытовых отходов, пригодных к переработке, в значительной степени превышает величину мировой добычи нефти. Именно поэтому сырьевая база пиролиза выше, чем у нефтепереработки.

Критерий 2. Технология. Обе технологии переработки заключаются в воздействии на сырье высокой температуры в условиях защитной атмосферы для предотвращения термоокислительной деструкции компонентов. Некоторые технологические параметры обеих рассматриваемых технологий представлены в таблице 2. В обеих технологиях переработку осуществляют по-разному: нефтепереработка – под давлением паров углеводородов, а пиролиз проводится в герметичной реторте (или печи). Различия технологий заключаются в принципе переработки. Так, главной стадией нефтепереработки является процесс дистилляции нефти – разделения ее на отдельные фракции, различающиеся по температуре кипения. Затем для получения товарных нефтепродуктов дополнительно применяется термический (каталитический) крекинг, термический (каталитический) реформинг, введение добавок и т.п. Применение катализаторов при нефтепереработке накладывает ограничения на состав исходного сырья и обуславливает наличие стадии предварительной подготовки. Технология переработки нефти относится к непрерывным процессам, т.к. нефть представляет собой вязкую жидкость, поэтому ее необходимо непрерывно подавать в технологическую установку.

Пиролиз может проводиться для веществ, находящихся в любых агрегатных состояниях (твердые вещества, жидкости или газы). В рассматриваемом варианте пиролиз применяется для переработки твердых веществ (древесина и древесные отходы), а это накладывает определенные ограничения. В таком виде пиролиз может проводиться только в периодическом или полупериодическом режимах. В последнем твердое сырье подается на переработку периодически, а продукты переработки (газообразные и жидкие) отбираются непрерывно. Наличие воды, серосодержащих и азотсодержащих соединений никак не влияет на технологический процесс, поскольку не подразумевает каталитическую стадию. Воздействие оказывается только на состав получаемых продуктов. Фактически пиролиз проводится в одну стадию, которая представляет собой последовательное протекание двух процессов в одном технологическом цикле: сушка сырья и пиролиз в закрытой реторте (печи). Завершение процесса переработки фиксируется по окончании



получения продуктов или по снижению скорости их поступления в приемники. Многочисленные предложения по организации непрерывного процесса пиролиза так и не нашли технической реализации [7, 28].

Все процессы термической переработки являются энергозатратными, т.к. проводятся при температурах, превышающих температуру окружающей среды. Так, на пиролиз 1 м³ древесины расходуется около 30 кг топлива в пересчете на мазут [7, 28]. Зная теплотворную способность мазута ($39,2 \cdot 10^6$ Дж/кг [6]) и среднюю плотность древесины (≈ 600 кг/м³), можно вычислить количество потраченной на переработку энергии. На дистилляцию 100 т нефти в среднем затрачивается 1,91 т условного топлива (теплотворная способность условного топлива составляет $2,93 \cdot 10^{10}$ Дж/т [6]) [7, 28]. Тогда нетрудно установить энергетические затраты в расчете на 1 т сырой нефти. Результаты оценки энергетических затрат на переработку сырья представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Энергетические характеристики процессов переработки нефти и пиролиза сырья органического происхождения [6, 7, 19, 27, 28]

Table 2 – Thermal parameters of oil refining and pyrolysis of raw materials of organic origin [6, 7, 19, 27, 28]

Процесс	Стадия	Температура процесса, °С	Энергетические затраты, Дж/т	Временные затраты, т/ч
Пирогенетическая переработка	Сушка	120–180	$1,96 \cdot 10^9$	0,6–2,1 (вертикальная реторта)
	Пиролиз	180–500*		13,5–20,2 (вагонная реторта)
Нефтепереработка	Подготовка	120–140	–	~685 (установка ЭЛОУ-АВТ-6)
	Дистилляция	140–350**	$5,6 \cdot 10^8$	
	Крекинг термический каталитический	500–540	–	
		450–500	–	
	Риформинг	480–530	–	
	Пиролиз	750–800	–	
Коксование	470–540	–		

* Пиролиз подразделяют на два основных вида: низкотемпературный (нагрев до 500 °С) и высокотемпературный (до 900 °С).

** Фракции нефти, кипящие при температурах свыше 350 °С, называются мазутом и подвергаются дальнейшей переработке только под вакуумом или с помощью крекинга.

К сожалению, в открытой печати не удалось найти информации об оценке удельных энергетических затрат на такие стадии нефтепереработки, как подготовка сырой нефти, крекинг, риформинг, пиролиз и коксование. Как следует из таблицы 2, технологические параметры главной стадии обоих методов переработки довольно близки (энергетические затраты на стадию дистилляции нефти составляют около 1/3 энергии, затрачиваемой на весь процесс пирогенетической переработки сырья), однако из-за большого числа стадий при нефтепереработке удельные энергетические затраты будут выше, чем при одностадийном пиролизе. При этом на нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах вся получаемая тепловая энергия используется лишь на 30–35 %, а остальная часть с низкопотенциальной тепловой энергией становится нерекуперативно способной. Например, около 36 % энергии, поступающей на завод, уходит с охлаждающей водой или воздухом, до 16 % выделяется в атмосферу вместе с дымовыми газами технологических печей, а 12–14 % энергии рассеивается в окружающую среду в виде тепла, отдаваемого горячими поверхностями оборудования [4].

Обе технологии в значительной степени различаются по скорости переработки сырья (таблица 2). Абсолютным лидером является нефтепереработка, а вот пиролиз из-за особенностей своей технологии в значительной степени уступает по этому параметру. Однако большое число стадий переработки нефти в значительной степени усложняет технологию, реализовать которую возможно только на больших заводах со сложноорганизованной системой управления и отсутствием гибкости в технологии при переходе от одного источника сырья к другому. В этом направлении бесспорным лидером является пирогенетическая переработка, организовать которую можно даже на передвижных установках.





Критерий 3. Технологические продукты. Обе рассматриваемые технологии позволяют перерабатывать 100 % исходного сырья в продукты (таблица 3). Тем не менее, есть определенные ограничения на востребованность и сбыт данной продукции. Обе технологии являются конкурирующими, но из-за высокой мощности нефтепереработки технология пиролиза в значительной степени была вытеснена с рынка товарной продукции. Однако возрастающая заинтересованность в переработке отходов и гибкость технологии пиролиза позволяют ей вновь конкурировать с нефтехимической промышленностью.

Таблица 3 – Продукты переработки [6, 7, 19, 27, 28]

Table 3 – Processing products [6, 7, 19, 27, 28]

Технология	Глубина переработки	Продукты	Количественные характеристики переработки, % масс.
Пирогенетическая переработка	100 % (74 % при исключении воды)	горючие газы	20
		смола пиролиза	50, из них 18–26 воды
		уголь	30
Нефтепереработка	90–95 %	светлые нефтепродукты	72
		В том числе	
		бензин	23–24
		соляр	30
		керосин	11
		горючий газ	7–8
мазут	20–23		

Анализ данных, представленных в таблице 3, показывает, что при 100%-й переработке сырья набор продуктов у обеих технологий различается. Так, товарный набор продуктов нефтепереработки однозначно выше, чем у пиролиза. Практически все продукты представляют собой топливо для транспортных средств, и лишь 7–8 % горючего газа, производимого нефтеперерабатывающей промышленностью, идет на синтез других веществ. С изобретением крекинга и введением его в нефтепереработку глубина нефтепереработки увеличилась с 72 до 90–95 %. Выход светлых составляющих, из которых затем можно изготовить бензин, керосин, соляр, повысился с 40–45 до 55–60 %. Но главное даже не в этом. Новая технология позволяет поменять отношение к мазуту и использовать его в качестве сырья для производства масел [6, 27].

Возможности пиролиза в получении товарных продуктов ограничены. Сбыту подлежат только уголь (30 % масс.) и смола пиролиза (23–26 % масс.). Горючие газы, получаемые в ходе технологического процесса, имеют нестабильный химический состав и чаще всего расходуются на внутренние нужды производства, снижая зависимость от внешних энергоносителей. Таким образом, полезность в продуктах пиролиза составляет лишь 50–53 %, полезность продуктов нефтепереработки составляет 75–90 %. Тем не менее, практически все жидкие продукты пиролиза пригодны к применению в качестве моторного топлива, т.к. их теплотворная способность немногим меньше, чем у нефтепродуктов, а наличие ароматических соединений свидетельствует о высоком октановом числе [17].

Таким образом, всесторонний анализ технологических возможностей пиролиза в сравнении с переработкой нефти показал однозначную картину перспективы применения пиролиза в качестве технологии получения моторного топлива. Пиролиз в сравнении с нефтепереработкой обладает как преимуществами, так и недостатками, однако недостатки в разнообразии продуктов пиролиза компенсируются энергетической эффективностью их получения. Это позволяет считать, что в ближайшем будущем пиролиз займет достойное место среди технологий, представляющих альтернативу получения традиционных источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов М., Багаутдинов В. Е., Спицын А. А. Биотопливо, полученное путем быстрого пиролиза биомассы // Научный аспект. 2024. Т. 39. № 4. С. 5155–5163.
2. Белобородов С. С., Гашо Е. Г., Ненашев А. В. Возобновляемые источники энергии и водород в энергосистеме: проблемы и преимущества. СПб.: Научное издание, 2022. 154 с.
3. Биотопливо пока не может конкурировать с нефтяным // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2021. Т. 20. № 4. С. 191.

4. Бурдыгина Е. В. Повышение энергоэффективности теплотехнического оборудования установок первичной переработки нефти: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Уфа, 2003. 23 с.
5. Высокотемпературная переработка пищевых отходов / Р. И. Кузьмина [и др.] // Пищевая промышленность. 2010. № 7. С. 20–22.
6. Глубокая переработка нефтяного сырья и физико-химические анализы нефтепродуктов всех стадий переработки нефти / А. Ф. Ахметов [и др.]. Нижний Новгород: Типография Кузнецов И. В. 2013. 287 с.
7. Гордон Л. В., Скворцов С. О., Лисов В. И. Технология и оборудование лесохимических производств. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 360 с.
8. ГОСТ 1667-68. Топливо моторное для среднеоборотных и малооборотных дизелей. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1967. IV. 15 с.
9. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1981. IV. 8 с.
10. ГОСТ Р 51105-2020. Топлива для двигателей внутреннего сгорания. Неэтилированный бензин. М.: Изд-во стандартов, 1996. IV. 11 с.
11. ГОСТ Р 51866-2002 (ЕН 228-2004). Топлива моторные. Бензин неэтилированный. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2001. IV. 12 с.
12. ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2004). Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004. IV. 9 с.
13. Машин А. И. Электромобили – перспективный вид транспортного средства // Интернаука. 2023. № 25-2(295). С. 39–40.
14. Милованов Л. В. Перегонять корма в биотопливо – палка о двух концах // Кролиководство и звероводство. 2007. № 5. С. 9.
15. Набатов Н. С. Биотопливо – альтернатива углеводородному авиационному топливу // Авиационные системы. 2020. № 6. С. 28–32.
16. Оценка теплоты сгорания биотоплива на основе экстракционных веществ из древесных отходов / Р. И. Кузьмина [и др.] // Химия и технология топлив и масел. 2009. № 6. С. 40–42.
17. Панкин К. Е. Оценка теплоты сгорания биотоплива на основе продуктов пиролиза древесины – древесных отходов // Химия и технология топлив и масел. 2016. № 4(596). С. 27–30.
18. Пашута А. О., Воронцова Е. В., Бредихин А. Н. Биотопливо как импульс для развития органического сельского хозяйства // Научное обозрение: теория и практика. 2024. Т. 14. № 5(105). С. 866–875.
19. Переработка нефти: теоретические и технологические аспекты / Т. В. Бухаркина [и др.]. М.: Техника, 2012. 495 с.
20. Пирогенетическая переработка некоторых древесных отходов и отходов лущения семян / Р. И. Кузьмина [и др.] // Химия растительного сырья. 2010. № 3. С. 61–65.
21. Рассказчикова Т. В., Капустин В. М., Карпов С. А. Этанол как высокооктановая добавка к автомобильным бензинам. Производство и применение в России и за рубежом // Химия и технология топлив и масел. 2004. Т. 40. № 4. С. 3–8.
22. Рекомендации по производству по переводу автотракторных дизелей на альтернативное моторное топливо (метан, биотопливо): научно-практические рекомендации / И. И. Габитов [и др.]. Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2021. 110 с.
23. Сафин Р. Г., Сотников В. Г., Гурьянов Д. А. Установка термической переработки растительных отходов в биотопливо. Казань: Школа, 2023. 108 с.
24. Соломенник С. Ф., Белоусов М. Ю. Водородное топливо – основа глобальной энергоэкологической революции XXI века // Вологдинские чтения. 2007. № 64. С. 3–5.
25. Трудко А. В. Биотопливо как один из методов повышения технико-экономических показателей сельскохозяйственных предприятий // Научный журнал молодых ученых. 2023. № 4(34). С. 38–42.
26. Уханов А. П., Уханов Д. А. Биотопливо из альтернативных масличных культур. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. 174 с.
27. Филатова Е. А. Органические материалы: древесина, биотопливо, мочевина. Ростов-н/Д.; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2022. 134 с.
28. Химическая технология древесины / А. К. Славянский [и др.]. М.: ГОСЛЕСБУМИЗДАТ, 1962. 577 с.
29. Щеголев И. В., Старков Е. В., Хрипченко М. С. Система «Старт-стоп» и ее эффективность // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3. № 4. Ч. 1. С. 153–155.
30. Электромобильный и гибридный транспорт: силовые схемы, оборудование, проблемы и перспективы развития / Е. З. Амангалиев [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 19–28.
31. Dale B. Biofuels: Thinking Clearly about the Issues // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2008. Vol. 56. No. 11. P. 3885–3891.
32. Sørensen B. Renewable Energy (Third Edition). Elsevier Inc., 2004. 930 p.
33. Sørensen B. Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage. Elsevier Inc., 2007. 330 p.
34. Waste-to-Energy (Second Edition). Elsevier Inc., 2011. 475 p.

REFERENCES

1. Akulov M., Bagautdinov V. E., Spitsyn A. A. Biofuel obtained by fast pyrolysis of biomass. *Scientific Aspect*. 2024;39(4):5155–5163. (In Russ.).
2. Beloborodov S. S., Gasho E. G., Nenashev A. V. Renewable energy sources and hydrogen in the energy system: problems and advantages. Saint Petersburg, 2022. 154 p. (In Russ.).



3. Biofuel cannot yet compete with oil. *AvtoGazoZapravochny Complex + Alternative Fuel*. 2021;20(4):191. (In Russ.).
4. Burdygina E. V. Improving the energy efficiency of heat engineering equipment of primary oil refining units: abstract of thesis of Candidate of Technical Sciences: 05.02.13. Ufa, 2003. 23 p. (In Russ.).
5. High-temperature processing of food waste / R. I. Kuzmina, S. N. Shtykov, Y. V. Ivanova, K. E. Pankin. *Food Industry*. 2010;(7):20–22. (In Russ.).
6. Deep processing of petroleum feedstock and physicochemical analysis of petroleum products at all stages of oil refining / A. F. Akhmetov, O. A. Baulin, Yu. V. Krasilnikova. Nizhny Novgorod, 2013. 287 p. (In Russ.).
7. Gordon L. V., Skvortsov S. O., Lisov V. I. Technology and equipment for forest chemical production. Moscow, 1988. 360 p. (In Russ.).
8. GOST 1667-68. Motor fuel for medium-speed and low-speed diesel engines. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards, 1967. 15 p. (In Russ.).
9. GOST 305-2013. Diesel fuel. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards, 1981. 8 p. (In Russ.).
10. GOST R 51105-2020. Fuels for internal combustion engines. Unleaded gasoline. Moscow: Publishing House of Standards, 1996. 11 p. (In Russ.).
11. GOST R 51866-2002 (EN 228-2004). Motor fuels. Unleaded gasoline. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards, 2001. 12 p. (In Russ.).
12. GOST R 52368-2005 (EN 590:2004). EURO diesel fuel. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards, 2004. 9 p. (In Russ.).
13. Mashin A. I. Electric vehicles are a promising type of transport. *Internauka*. 2023;25–2(295):39–40. (In Russ.).
14. Milovanov L. V. Distilling feed into biofuel is a double-edged sword. *Rabbit Breeding and Fur-Bearing Animal Breeding*. 2007;(5):9–14. (In Russ.).
15. Nabatov N. S. Biofuel is an alternative to hydrocarbon aviation fuel. *Aviation Systems*. 2020;(6):28–32. (In Russ.).
16. Estimation of the Combustion Value of Biofuel Based on Extractive Substances from a Wood Waste / R. I. Kuzmin, S. N. Shtykov, Yu. V. Ivanov, K. E. Pankin. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2009. No. 6. P. 40–42. (In Russ.).
17. Pankin K. E. Estimation of the heat of combustion of biofuels based on wood pyrolysis products – wood waste. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2016;4(596):27–30. (In Russ.).
18. Pashuta A. O., Vorontsova E. V., Bredikhin A. N. Biofuels as an impetus for the development of organic agriculture. *Science Review: Theory and Practice*. 2024;14–5(105):866–875. (In Russ.).
19. Oil refining: theoretical and technological aspects / T. V. Bukharkina, S. V. Verzhichinskaya, N. G. Digurov, A. Yu. Naletov, S. A. Sinitsin. Moscow: Tekhnika, 2012. 495 p. (In Russ.).
20. Pyrogenetic processing of some wood waste and seed peeling waste / R. I. Kuzmina, S. N. Shtykov, K. E. Pankin, Yu. V. Ivanova, T. G. Panina. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2010;(3):61–65. (In Russ.).
21. Rasskazchikova T. V., Kapustin V. M., Karpov S. A. Ethanol as a high-octane additive to motor gasoline. Production and application in Russia and abroad. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2004;40(4):3–8. (In Russ.).
22. Recommendations for the production of converting automotive and tractor diesel engines to alternative motor fuel (methane, biofuel): scientific and practical recommendations / I. I. Gabitov A. V. Negovora, K. V. Kostarev, A. A. Kozeev, M. M. Razyapov, A. R. Valiev, A. F. Akhmetov. Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2021. 110 p. (In Russ.).
23. Safin R. G., Sotnikov V. G., Guryanov D. A. Installation for thermal processing of plant waste into biofuel. Kazan, 2023. 108 p. (In Russ.).
24. Solomennik S. F., Belousov M. Yu. Hydrogen fuel – the basis of the global energy-ecological revolution of the 21st century. *Vologdinskie Čteniâ*. 2007;(64):3–5. (In Russ.).
25. Trudko A. V. Biofuel as one of the methods for improving the technical and economic indicators of agricultural enterprises. *Scientific Journal of Young Scientists*. 2023;4(34):38–42. (In Russ.).
26. Ukhanov A. P., Ukhanov D. A. Biofuel from alternative oilseeds. Penza: Penza State Agrarian University, 2022. 174 p. (In Russ.).
27. Filatova E. A. Organic materials: wood, biofuel, urea. Rostov-on-Don; Taganrog: Publishing House of the Southern Federal University, 2022. 134 p. (In Russ.).
28. Chemical technology of wood / A. K. Slavyansky, V. I. Sharkov, A. A. Liverovsky, A. V. Buevskoy, F. A. Mednikov. Moscow: GOSLESBUMIZDAT, 1962. 577 p. (In Russ.).
29. Shchegolev I. V., Starkov E. V., Khripchenko M. S. Start-stop system and its efficiency. *Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice*. 2015;3(4–1):153–155. (In Russ.).
30. Electric and hybrid transport: power circuits, equipment, problems and development prospects / E. Z. Amangaliev, A. S. Sarvarov, V. I. Kosmatov, M. Yu. Petushkov, E. Ya. Omelchenko. *Electricotechnical Systems and Complexes*. 2022;1(54):19–28. (In Russ.).
31. Dale B. Biofuels: Thinking Clearly about the Issues. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2008;56(11):3885–3891.
32. Sørensen B. Renewable Energy (Third Edition). Elsevier Inc., 2004. 930 p.
33. Sørensen B. Renewable Energy Conversion, Transmission and Storage. Elsevier Inc., 2007. 330 p.
34. Waste-to-Energy (Second Edition). Elsevier Inc., 2011. 475 p.

Статья поступила в редакцию 20.04.2024; одобрена после рецензирования 20.05.2024; принята к публикации 28.05.2024.
The article was submitted 20.04.2024; approved after reviewing 20.05.2024; accepted for publication 28.05.2024.

