

**АНАЛІТЫЧНАЯ ХІМІЯ**  
**ANALYTICAL CHEMISTRY**

УДК 543.054  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-178-185>

Поступила в редакцию 09.11.2021  
Received 09.11.2021

**Т. Н. Генарова<sup>1,2</sup>, С. М. Лещев<sup>2</sup>, А. А. Картузова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

**СОСТАВ ТЯЖЕЛОЙ ПАРАФИНИСТОЙ НЕФТИ РЕЧИЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ И ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

**Аннотация.** Проблема альтернативных источников углеводородных топлив в настоящее время чрезвычайно актуальна. Постоянный рост органополимерных отходов, в частности автомобильных шин, стимулировал поиск способов их переработки. Известно, что перспективным методом их переработки является пиролиз в различных режимах [1]. Комплексное изучение состава и свойств образующихся пиролизных масел, полученных из отработанных шин, позволит выяснить возможность их использования в качестве вторичного сырья для производства углеводородных топлив. В работе с использованием метода экстракционной пробоподготовки определен компонентный состав тяжелой парафинистой нефти Речицкого месторождения и пиролизного масла, полученного при термической обработке резинотехнических изделий в среде азота, методами ИК-спектроскопии, элементного и ГХ-МС анализа. Кроме того, определены их фракционный состав, плотности фракций, а также йодное число. На основании полученных результатов сделаны выводы о схожести и различиях пиролизного масла с нефтью. Высказано предположение, что жидкие продукты пиролиза после соответствующей обработки могут быть использованы в качестве добавок к нефтепродуктам, что способствует решению проблем не только как утилизации отработанных шин, так и истощения легкодоступных запасов нефти.

**Ключевые слова:** пиролиз, пиролизные масла, нефть, ГХ-МС метод

**Для цитирования.** Генарова, Т. Н. Состав тяжелой парафинистой нефти Речицкого месторождения и пиролизного масла, полученного из резинотехнических отходов / Т. М. Генарова, С. М. Лещев, А. А. Картузова // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2022. – Т. 58, № 2 – С. 178–185. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-178-185>

**T. N. Henarava<sup>1,2</sup>, S. M. Leshev<sup>2</sup>, A. A. Kartuzava<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

**COMPOSITION OF HEAVY PARAFFINIC OIL OF FROM THE RECHITSA FIELD AND PYROLYSIS OIL OBTAINED FROM RUBBER WASTE**

**Abstract.** The problem of alternative sources of hydrocarbon fuels is currently of great importance. The constant growth of organopolymer waste, in particular, automobile tires, has stimulated the search for ways to recycle them. It was found that a promising method of their processing is pyrolysis in various modes [1]. A comprehensive study of the composition and properties of the resulting pyrolysis oils obtained from used tires will make it possible to find out the possibility of their use as a secondary raw material for the production of hydrocarbon fuels. In this work, the component composition of heavy paraffinic oil from the Rechitsa field and pyrolysis oil obtained during the thermal treatment of rubber products in a nitrogen atmosphere, by methods of IR spectroscopy, elemental and GC-MS analysis, has been investigated. In addition, their fractional composition, density of fractions, as well as iodine number have been determined. Based on the results obtained, conclusions were drawn about the similarities and differences between pyrolysis oil and petroleum. It has been suggested that liquid pyrolysis products, after appropriate treatment, can be used as additives to petroleum products, which contributes not only to solving the problems of both the disposal of used tires, but also the depletion of readily available oil reserves.

**Keywords:** pyrolysis, pyrolysis oils, oil, GC-MS method

**For citation.** Henarava T. N., Leshchev S. M., Kartuzava A. A. Composition of heavy paraffinic oil from the Rechitsa field and pyrolysis oil obtained from rubber waste. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2022, vol. 58, no. 2, pp. 178–185 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-2-178-185>

**Введение.** Исследование перспективных видов топлива и одновременно переработка резинотехнических отходов актуально ввиду истощения доступных запасов нефти. Предполагается, что образующиеся пиролизные масла могут быть использованы в качестве вторичного сырья для производства углеводородного топлива [2]. Компонентный состав пиролизного масла в настоящее время изучен недостаточно, а его сравнение с нефтью до сих пор не проводился. Цель работы – сравнение компонентного состава тяжелой парафинистой нефти Речицкого месторождения и пиролизного масла, полученного из резинотехнических отходов, для возможности дальнейшего использования пиролизного масла в качестве моторного топлива.

Работы, посвященные анализу пиролизных масел, показали, что жидкие продукты переработки автомобильных шин представляют собой сложную смесь многих сотен веществ. Основными классами органических соединений являются ароматические углеводороды, алкены, алканы, серо-, азот-, кислородсодержащие и даже хлорорганические соединения, включая различные спирты, органические кислоты и основания [3–6].

Многие исследования посвящены изучению возможности использования пиролизных масел в качестве моторных и других топлив. Так, в работе [6] обнаружено, что скорость горения и коэффициенты воспламенения пиролизных масел оказались практически идентичными с топочным маслом и смесью печного топлива с пиролизным маслом (5 мас.%), что указывает на практически неразличимые характеристики горения для обоих видов топлива.

Установлено [7], что плотность пиролизного масла ( $0,92 \text{ г/м}^3$ ) оказалась выше плотности дизельного топлива ( $0,85 \text{ г/м}^3$ ), взятого для смешения; кинематическая вязкость пиролизного масла немного ниже дизельного топлива. Была обнаружена также пониженная каталитическая активность дизельного катализатора окисления ввиду значительного содержания серы в пиролизном масле. В работе [8] пиролизное масло также сравнивалось с дизельным топливом и смешивалось с ним. Установлено, что температура вспышки и цетановое число пиролизного масла ниже, а плотность и вязкость выше, чем у дизельного топлива.

В работе [9] исследована фракция пиролизного масла, перегнанная от 60 до 250 °С, и обнаружено, что она имеет близкую теплотворную способность, чем у дизельного топлива, но более высокое содержание серы и более низкую вязкость. В работе [10] при перегонке пиролизного масла установлено, что фракция с температурой кипения, аналогичной автомобильному дизельному топливу (150–350 °С), соответствует стандартным техническим характеристикам топлива, но температурная фракция, аналогичная бензиновой (70–150 °С), не соответствует требуемой спецификации.

### Экспериментальная часть

*Пиролиз.* Пиролиз резинотехнических отходов проводили на лабораторной установке со шнековым термолизным реактором ШТР-10. В ходе экспериментов в реактор подавалась резиновая крошка диаметром 2 мм и газообразный азот. Время выдержки материала в реакторе – 18 мин. Температура пиролиза составила 500 °С. Схема реактора (рис. 1) и описание процесса пиролиза резиновой крошки автомобильных шин представлены в работе [11]. Анализ пиролизного масла и нефти проводили предложенными в работе классическими методами.

*Определение йодного числа.* Массовую долю непредельных углеводородов в фракциях нефти и пиролизного масла определяли согласно методике ГОСТ 2070-82.

*ИК-Фурье спектроскопия.* Образцы нефти и пиролизного масла смешивали с мелкодисперсным КВг и спрессовывали в таблетки. ИК-спектры были записаны на ИК-Фурье спектрометре Protege 460 фирмы Nicolet (США) со спектральным разрешением  $1 \text{ см}^{-1}$ .

*Элементный анализ.* Элементный анализ образцов и их фракций проводили на HCNS/O-анализаторе VarioMicroCube (Elementar, Германия).

*Фракционная перегонка.* Образцы нефти и пиролизного масла объемом 100 мл помещали в круглодонную колбу объемом 250 мл, добавляли центры кипения. Проводили фракционную перегонку и отгоняли образующиеся фракции в интервале температур 30–410 °С с использованием дефлегматора длиной 20 см. Фракционную перегонку проводили сначала при атмосферном давлении (до 250 °С), а после – при вакууме с помощью вакуумного насоса Vacuumbrand

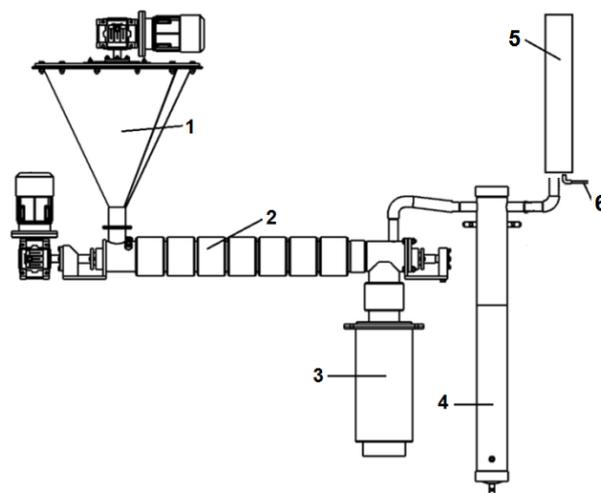


Рис. 1. Схема установки пиролиза ШТР-10: 1 – дозатор; 2 – реактор с нагревательными элементами; 3 – бункер для сброса твердого углерода; 4 – конденсатор; 5 – выхлопная труба; 6 – дожигатель

Fig. 1. Scheme of the SPR-10 pyrolysis unit: 1 – dispenser; 2 – reactor with heating elements; 3 – bunker for dumping solid carbon; 4 – capacitor; 5 – exhaust pipe; 6 – afterburner

CVC 3000 до 450 °С. Температуру вакуумной перегонки сопоставляли с реальными с помощью номограммы.

*Определение плотности.* С помощью вибрационного измерителя жидкости ВИП-2М TERMEX были измерены плотности легких и средних фракций.

*Пробоподготовка.* Навеску нефти Речицкого месторождения и пиролизного масла массой 0,90 г помещали в стеклянную колбу и добавляли 15-кратный избыток *n*-гексана, полученные смеси помещали в холодильник на 24 ч (при температуре –18 °С). После этого проводили отделение смолисто-асфальтеновых веществ путем фильтрования гексановых растворов через фильтр «Синяя лента» после декантирования гексанового растворов нефти и пиролизного масла.

Для более детального анализа природы углеводородов и других органических соединений в исследуемых образцах применяли метод газовой хромато-масс-спектрометрии с использованием разработанной в работе [15] экстракционной пробоподготовки, основанной на ступенчатой экстракции гексановых растворов исследуемых образцов водой, водными растворами соляной кислоты и гидроксида натрия, этиленгликолем, диметилсульфоксидом и олеумом.

*Газовая хромато-масс-спектрометрия.* Для качественного и количественного определения химического состава образцов использовали газовый хроматограф Agilent 7890A, снабженный масс-спектрометром Agilent 5975C MSD (Agilent Technologies, США). При исследовании использовали капиллярную колонку HP-5MS (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм). Сбор данных и обработку хроматограмм проводили с помощью программного обеспечения Mass Hunter (Agilent Technologies, США). В качестве газа-носителя использовали гелий (скорость потока – 1 мл/мин). Объем вводимой пробы – 1 мкл. Температурный градиент: 80 °С (выдержка 3 мин), от 80 до 300 °С со скоростью 10 °С /мин, 300 °С (выдержка 20 мин). Параметры масс-спектрометрического детектора: ионизация электронным ударом, энергия ионизации – 70 эВ, температура ионного источника – 230 °С, температура квадруполя – 150 °С. Идентификацию соединений проводили с помощью библиотеки масс-спектров NIST17 в режиме полного сканирования масс-детектора по времени удерживания компонентов. Суммарная площадь пиков принята за 100 %. Коэффициенты чувствительности для всех веществ были условно приняты равными единице.

**Результаты и их обсуждение.** Состав нефтей в зависимости от месторождения варьируется в широких пределах, но в них практически отсутствуют алкены, кроме месторождений вблизи урановых руд, содержащих до 10 % алкенов [12]. Пиролизное масло из отработанных автомобильных шин представляет собой темно-коричневую жидкость с неприятным запахом, состоящую из большого количества различных органических соединений с широким диапазоном по молекулярной массе и полярности.

Обнаружено, что содержание смолисто-асфальтеновых соединений при  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  в пиролизном масле составило  $6,2\pm 0,1$  мас.%, а в нефти –  $10,1\pm 0,1$  мас.% по отношению к массе исходного образца, в нефти Карачаганакского месторождения – 0,1 %. Результаты элементного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав пиролизного масла и нефти

Table 1. Elemental composition of pyrolysis oil and petroleum

Образец	C, мас.%	N, мас.%	H, мас.%	S, мас.%
Пиролизное масло в среде азота	$89\pm 0,09$	$0,62\pm 0,002$	$8,8\pm 0,001$	$0,95\pm 0,001$
Сырая нефть	$87\pm 0,08$	0	$10,5\pm 0,01$	$0,7\pm 0,001$

В работе [13] указано, что в нефти Карачаганакского месторождения содержание серы составляет 0,65 %. В пиролизном масле содержание азота объясняется наличием капролактама, анилина, бензотиазола и др. Массовое содержание непредельных углеводородов, рассчитанное по методу определения йодного числа в пересчете на стирол, для пиролизного масла составило  $27,8\pm 0,2$  %, нефти –  $1,2\pm 0,06$  %. Результаты определения йодного числа образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Йодные числа фракций нефти и пиролизного масла

Table 2. Iodine numbers of petroleum and pyrolysis oil fractions

Параметр	Нефть					Пиролизное масло				
	исходная	1 фр.	2 фр.	3 фр.	4 фр.	исходное	1 фр.	2 фр.	3 фр.	4 фр.
Йодное число	2,6	<1	–	–	–	56,7	83,5	87,2	46,2	44,0

Таблица 3. Результаты проведения фракционной перегонки нефти и пиролизного масла, плотности легких и средних фракций

Table 3. Results of fractional distillation of petroleum and pyrolysis oil, density of light and medium fractions

Вещество	Масса, г	Интервал температур, $^{\circ}\text{C}$	Массовая доля, %	Цвет	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
<i>Фракции нефти</i>					
Исходная	124,4	–	–	Черно-коричневый	0,96
Фракция 1	7,3	50–125	4,3	Бесцветный	0,71
Фракция 2	47,4	125–250	34,1	Бесцветный	0,78
Фракция 3	20,9	250–350	14,0	Желтоватый	0,84
Фракция 4	19,8	350–450	12,3	Желтый	–
Твердый остаток	47,3	–	35,1	Черно-коричневый	–
<i>Фракции пиролизного масла</i>					
Исходная	132,0	–	–	Черно-коричневый	0,91
Фракция 1	21,4	38–125	16,2	Желтоватый	0,77
Фракция 2	52,8	125–220	40,0	Желто-зеленый	0,87
Фракция 3	22,7	250–350	17,2	Темно-зеленый	0,97
Фракция 4	13,4	350–450	10,1	Желто-коричневый	–
Твердый остаток	18,8	–	14,2	Черно-коричневый	–

Содержание большого количества алкенов в пиролизном масле находится в полном согласии с химией процесса пиролиза. Выполнено отнесение полос поглощения ИК-спектров к основным классам химических соединений [14] и установлено, что пиролизное масло представляет собой сложную смесь ароматических углеводородов, алканов, алкенов и гетероциклических кислород-, серо- и азотсодержащих органических соединений. Анализ ИК-спектров сырой нефти позволил установить, что она содержит алканы, ароматические соединения.

Пиролизное масло представляет собой смесь углеводородов с интервалом температур кипения от 70 до 400 °С [4]. В результате проведения фракционной перегонки нефти и пиролизного масла при нагреве до 410 °С были получены 4 фракции (бензиновая, керасиновая, дизельная и масляная). Выход летучих фракций представлен в табл. 3.

Как и предполагалось, с увеличением диапазона температур кипения плотность растёт, при этом плотности фракций пиролизного масла оказались выше плотности фракций нефти. Согласно ГОСТ 305-82 плотность дизельного топлива при температуре 20 °С не должна превышать 0,86 г/см<sup>3</sup>, чему соответствуют три фракции нефти (бензиновая, керасиновая и дизельная), однако уже вторая фракция пиролизного масла имеет плотность, превышающую данное значение (0,87 г/см<sup>3</sup>). Плотность фракций пиролизного масла выше, чем у нефти в связи с повышенным содержанием ароматических углеводородов. Плотность нефти Карачаганакского месторождения составляет 0,85 г/см<sup>3</sup>.

Цвета фракций имеют значительные отличия. В частности, у фракций нефти цвета светлее, в то время как пиролизного масла – значительно темнее в основном ввиду большого содержания непредельных углеводородов, о чем можно судить по исходному состоянию фракций. У нефтяной фракции вакуумного газойля – желтое твердое (при комнатной температуре) вещество (похожее на воск), у фракции вакуумного газойля пиролизного масла – желто-коричневая маслянистая вязкая жидкость. Если сравнить твердые остатки (гудрон) нефти и пиролизного масла после фракционной перегонки, то можно заметить, что массовая доля гудрона в нефти больше, чем в пиролизном масле. По внешнему виду и консистенции остаток от перегонки пиролизного масла был очень схож с остатком от перегонки нефти. Цвет фракций пиролизного масла темнее, в том числе за счет окисляемости непредельных углеводородов. Предположительно, гудрон от перегонки пиролизного масла можно также смешивать с гудроном от перегонки нефти и использовать, например, для производства дорожных, кровельных материалов, строительных битумов и др.

Таким образом, пиролизное масло перегоняется в широком интервале температур, содержание летучих фракций достаточно велико, что делает пиролизное масло перспективным источником моторного топлива или добавок к нему после проведения дополнительной переработки, например гидроочистки. На рис. 2 представлены хроматограммы фракций перегонки нефти.

Результаты ГХ-МС анализа фракций нефти показали, что основными соединениями являются алканы, алкилбензолы и алкилнафталины, из них основную часть составляют: толуол, диметилбен-

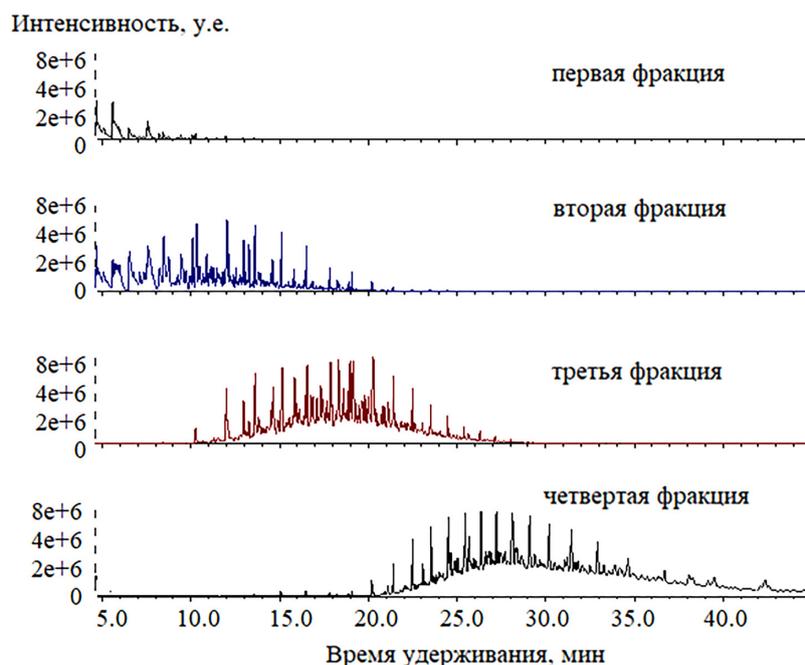


Рис. 2. Хроматограммы фракций нефти, полученных после фракционной перегонки

Fig. 2. Chromatograms of petroleum fractions obtained after fractional distillation

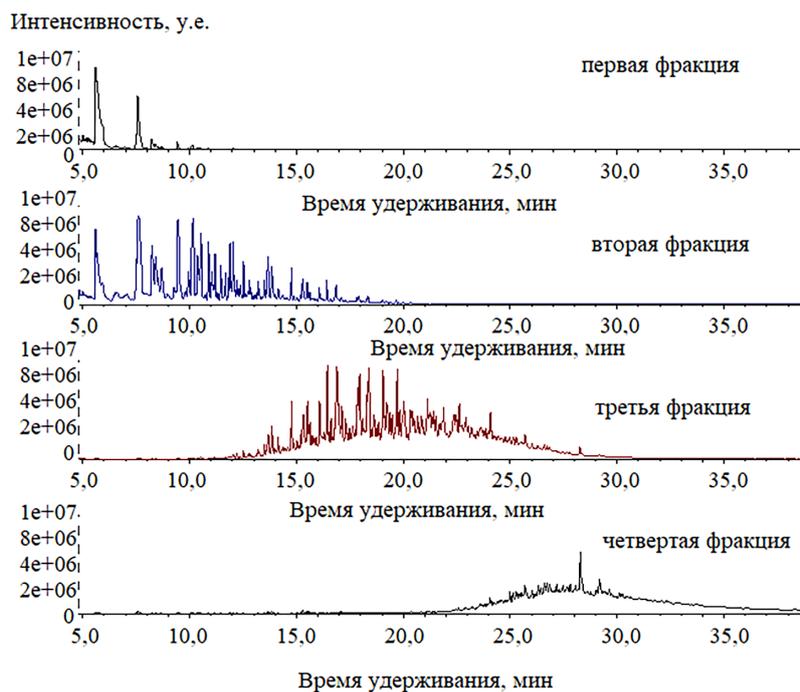


Рис. 3. Хроматограммы фракций пиролизного масла, полученных после фракционной перегонки

Fig. 3. Chromatograms of pyrolysis oil fractions obtained after fractional distillation

зол, *n*-ксилол, декан, триметилбензол, ундекан, тетраметилбензол, тридекан, тетрадекан, пентадекан, гексадекан, диметилнафталин, гептадекан, метилгептадекан, тетраметилгексадекан, триметилнафталин и эйкозан. Хроматограммы полученных фракций пиролизного масла представлены на рис. 3.

Результаты хроматографического анализа фракций пиролизного масла показывают, что основными соединениями являются: толуол, этилбензол, диметилбензол, фенол, анилин, стирол, лимонен, бензотиазол, метилстирол, *n*-цимол, триметилбензол, инден, диметилинден, капролактан, нафталин, метилнафталин, бифенил, диметилнафталин, диметилхинолин, триметилнафталин, аценафтен, флуорен, метилфлуорен, диметилфенантрен, флуорантен, пирен и метилпирен.

По четвертой фракции видно, что с ростом температуры кипения пики смещаются в сторону большего времени удерживания, т.е. происходит определенная дифференциация по молекулярной массе веществ, но количество компонентов при этом мало меняется. С ростом температуры возрастает фон хроматограммы, т.е. в процессе перегонки возможно протекание процессов полимеризации и димеризации компонентов исследуемых образцов.

При ГХ-МС анализе фракций пиролизного масла и нефти можно заметить, что во всех фракциях пиролизного масла большое содержание непредельных и ароматических углеводородов, среди которых довольно много полициклических ароматических углеводородов (нафталин, фенантрен, аннулен, флуорен, пирен и их замещенные и др.). Во фракциях нефти же наблюдается большое количество нафтенных и алканов (первичные, вторичные, третичные), непредельных и ароматических углеводородов значительно ниже, чем во фракциях пиролизного масла, или вообще отсутствуют.

Следовательно, несмотря на относительно «зеленое» производство пиролизного масла, оно более токсично по сравнению с нефтью в основном из-за высокого содержания полициклических ароматических углеводородов, которые являются канцерогенными и токсичными. Однако при должной очистке оно вполне может стать достойной заменой многим продуктам, получаемым из нефти.

С использованием методики экстракционной пробоподготовки [15] обнаружено, что нефть состоит из алканов и нафтенных (70 %), ароматических углеводородов (10 %), асфальтенов и смолистых веществ (10,1 %), алкенов в пересчете на стирол (1,2 %) и серы (0,7 %). Между тем ориен-

тировочный состав пиролизного масла, как показано в работах [15, 16], следующий: ароматические углеводороды (38 %), алкены в пересчете на стирол (28 %), алканы и нафтены (20 %), асфальтены и смолистые вещества (6,0 %), водорастворимые органические соединения (1,4 %), сера (0,95 %), полициклические ароматические углеводороды (2,1 %). Нефть Карачаганакского месторождения [13] состоит из алканов и нафтен (80,8 %), асфальтенов (0,1 %), ароматических углеводородов (17,5 %) и серы (0,65 %). Углеводородный состав пиролизного масла по сравнению с нефтью существенно отличается. В отличие от нефти пиролизное масло содержит большее количество алкенов, сероорганических соединений и полициклических ароматических углеводородов.

**Заключение.** Пиролизное масло, полученное из резинотехнических отходов, может быть потенциальным углеводородным топливом, поэтому было проведено сравнение его физико-химических свойств и компонентного состава с тяжелой парафинистой нефтью Речицкого месторождения.

Сходство пиролизного масла с нефтью наблюдается в близком содержании углерода и водорода, теплотворной способности и фракционном составе. Компонентный состав пиролизного масла существенно отличается от нефти ввиду наличия реакционноспособных органических соединений (фенолов, анилина, капролактама), алкенов, высокого содержания азот-, кислород- и сероорганических соединений, ароматических углеводородов, в том числе полициклических ароматических углеводородов. Поэтому напрямую использовать пиролизное масло в качестве топлива нецелесообразно, а следует подвергать его процессу обработки, например гидроочистке. Пиролизное масло представляет собой ценное углеводородное сырье, которое может быть использовано не только в качестве топочного топлива, но и добавкой к моторному топливу.

**Благодарности.** Авторы выражают особую благодарность сотрудникам Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси кандидатам химических В. В. Грушевскому, технических В. В. Савчину и физико-математических А. И. Леончику наук за помощь в проведении экспериментов.

**Acknowledgements.** The authors are especially grateful to V. V. Grushevsky (Ph. D, Chemistry), V. V. Savchin (Ph. D, Engineering) and A. I. Leonchik (Ph. D, Physics and Mathematics) for the help with experiments.

### Список использованных источников

1. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis / Laresgoiti M. F. [et al.] // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. – 2004. – Vol. 71, N 2. – P. 917–934. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.003>
2. Wiriyaumpaiwong, S. Distillation of pyrolytic oil obtained from fast pyrolysis of plastic wastes / S. Wiriyaumpaiwong, J. Jamradloedluk // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 138. – P. 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.071>
3. Qualitative and quantitative analysis of pyrolysis oil by gas chromatography with flame ionization detection and comprehensive two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry / T. Sfetsas [et al.] // *Journal of Chromatography*. – 2011. – Vol. 1218, N 21. – P. 3317–3325. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.034>
4. Nkosi, N. A review and discussion of waste tyre pyrolysis and derived products proceedings / N. Nkosi, E. Muzenda // *The World Congress on Engineering*. – 2014. – Vol 2. – P. 979–985.
5. Lin, C. Y. Crude Oil, Oil, Gasoline and Petrol / C. Y. Lin, R. S. Tjeerdema // *Encyclopedia of Ecology*. – 2008. – P. 797–805. <https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00382-7>
6. Production and droplet combustion characteristics of waste tire pyrolysis oil / Á. Muelas [et al.] // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 196. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106149>
7. Performance and emissions of an automotive diesel engine using a tire pyrolysis liquid blend / J. D. Martínez [et al.] // *Fuel*. – 2014. – Vol. 115. – P. 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.051>
8. Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine / W.-C. Wang [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 93. – P. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.056>
9. Characteristics of pyrolysis products from waste tyres and spent foundry sand co-pyrolysis progress in rubber / D. Perondi [et al.] // *Plastics and Recycling Technology*. – 2016. – Vol. 32, N 4. – P. 213–240. <https://doi.org/10.1177/147776061603200403>
10. Kan, T. Fuel production from pyrolysis of natural and synthetic rubbers / T. Kan, V. Strezov, T. Evans // *Fuel*. – 2017. – Vol. 191. – P. 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.100>
11. Ложечник, А. В. Исследование пиролиза резины в шнековом реакторе / А. В. Ложечник, В. В. Савчин // *ИФЖ*. – 2016. – Т. 89, № 6. – С. 1504–1508.
12. Химический состав нефти Крапивинского месторождения / В. П. Сергун [и др.] // *Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328, № 7. – С. 59–66.
13. Батманов, К. Б. Исследование нефти и конденсата Карачаганакского месторождения / К. Б. Батманов // *Нефтегазовое дело*. – 2008. – С. 1–9.
14. Тарасевич, Б. Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справ. материалы / Б. Н. Тарасевич. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. – 53 с.

15. Экстракционная пробоподготовка пиролизного масла отработанных автомобильных шин при его компонентном и количественном ГХ-МС анализе / С. М. Лещев [и др.] // Аналитика и контроль. – 2019. – Т. 23, № 1. – С. 401–409. <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.004>

16. Henarava, T. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons between solid and liquid phases during deasphalting of pyrolysis oils from waste tires / T. Henarava, S. Leschew, V. Levkina // High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes). – 2020. – Vol. 24, N 4. – P. 293–304. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2020037083>

## References

1. Laresgoiti M. F., Caballero B. M., de Marco I., Torres A., Cabrero M. A., Chomón M. J. Characterization of the liquid products obtained in tyre pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2004, vol. 71, no. 2, pp. 97–934. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2003.12.003>

2. Wiriyaumpaiwong S., Jamradloedluk J. Distillation of pyrolytic oil obtained from fast pyrolysis of plastic wastes. *Energy Procedia*, 2017, vol. 138, pp. 11–115. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.071>

3. Sfetsas T., Michailof C., Lappas A., Li Q., Kneale B. Qualitative and quantitative analysis of pyrolysis oil by gas chromatography with flame ionization detection and comprehensive two-dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometry. *Journal of Chromatography*, 2011, vol. 1218, no. 21, pp. 3317–3325. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.10.034>

4. Nkosi N., Muzenda E. A review and discussion of waste tyre pyrolysis and derived products proceedings. *The World Congress on Engineering*, 2014, vol 2, pp. 979–985.

5. Lin C. Y., Tjeerdema R. S. Crude Oil, Oil, Gasoline and Petrol. *Encyclopedia of Ecology*, 2008, pp. 797–805. <https://doi.org/10.1016/b978-008045405-4.00382-7>

6. Muelas Á., Callén M. S., Murillo R., Ballester J. Production and droplet combustion characteristics of waste tire pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 2019, vol. 196, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106149>

7. Martínez J. D., Rodríguez-Fernández J., Sánchez-Valdepeñas J., Murillo R., García T. Performance and emissions of an automotive diesel engine using a tire pyrolysis liquid blend. *Fuel*, 2014, vol. 115, pp. 490–499. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.051>

8. Wang W.-C., Bai C.-J., Lin C.-T., Prakash S. Alternative fuel produced from thermal pyrolysis of waste tires and its use in a DI diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 93, pp. 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.09.056>

9. Perondi D., Scopel B. S., Collazzo G. C., Silva J. P., Botomé M. L., Dettmer A., Godinho M., Faria Vilela A. C. Characteristics of pyrolysis products from waste tyres and spent foundry sand co-pyrolysis progress in rubber. *Plastics and Recycling Technology*, 2016, vol. 32, no. 4, pp. 213–240. <https://doi.org/10.1177/147776061603200403>

10. Kan T., Strezov V., Evans T. Fuel production from pyrolysis of natural and synthetic rubbers. *Fuel*, 2017, vol. 191, pp. 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.100>

11. Lozhechnik A. V., Savchin V. V. Pyrolysis of rubber in a screw reactor. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 6, pp. 1482–1486. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1517-2>

12. Sergyn V. P., Cheshkova T. V., Sagachenko T. A., Min R. S. Chemical composition of petroleum from the Krapivinskoye oilfield. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 59–66 (in Russian).

13. Batmanov K. B. Research of oil and condensate of the Karachaganak field. *Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering*, 2008, pp. 1–9 (in Russian).

14. Tarasevich B. N. *IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials*. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2012. 53 p. (in Russian).

15. Leshchew S., Henarava T., Savchin V., Levkina V. Extraction sample preparation of pyrolysis oil of waste automobile tyres at its qualitative and quantitative GC-MS analysis. *Analitika i kontrol' = Analytics and control*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 401–409 (in Russian). <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.004>

16. Henarava T., Leschew S., Levkina V. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons between solid and liquid phases during deasphalting of pyrolysis oils from waste tires. *High Temperature Material Processes (An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes)*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 293–304. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2020037083>

## Информация об авторах

Генарова Татьяна Николаевна – канд. хим. наук, научный секретарь. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь); ст. преподаватель. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 4, 220000, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [tatiana-susliako@mail.ru](mailto:tatiana-susliako@mail.ru)

Лещев Сергей Михайлович – д-р. хим. наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [leschew.sergey54@gmail.com](mailto:leschew.sergey54@gmail.com)

Картузова Аlesia Александровна – студентка. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 4, 220000, Минск, Республика Беларусь).

## Information about the authors

Henarava Tatsiana M. – Ph. D. (Chemistry), Scientific Secretary. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, P. Brovka str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Senior Lecturer. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [tatiana-susliako@mail.ru](mailto:tatiana-susliako@mail.ru)

Leschew Sergey M. – D. Sc. (Chemistry), Professor. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [leschew.sergey54@gmail.com](mailto:leschew.sergey54@gmail.com)

Kartuzava Alesya A. – Student. Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus).