ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

АНАЛІТЫЧНАЯ ХІМІЯ

ANALYTICAL CHEMISTRY

УДК 543.054
https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-1-53-61

Поступила в редакцию 09.11.2021
Received 09.11.2021

Т. Н. Генарова[1,2], С. М. Лещев[2]

[1]Институт тепло- и массобмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
[2]Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПИРОЛИЗНОГО МАСЛА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН В СРЕДЕ ВОДЯНОГО ПАРА

Аннотация. Определение состава продуктов пиролиза органических соединений является весьма сложной задачей из-за их многокомпонентности [1–3]. Пиролизные масла, образующиеся из резинотехнических изделий и разнообразных органополимерных отходов, содержат различные классы органических соединений с огромным разбросом по молекулярной массе и полярности: углеводороды, амиды, фенолы, амины, сероорганические соединения и др. [1]. При этом результаты качественного и количественного хроматографического анализа пиролизных масел зачастую неоднозначны: существуют проблемы наложения пиков и неверной интерпретации полученных данных, обусловленные сложностью матрицы и многокомпонентностью состава [2–5]. Продукты пиролиза могут быть использованы в качестве ценных углеводородов или добавок к углеводородным топливам. Поэтому анализ химического состава пиролизных масел важен как для оценки степени их токсичности, так и для поиска эффективного способа их очистки.

Ключевые слова: пиролизное масло, резинотехнические отходы, экстракционная пробоподготовка

Для цитирования. Генарова, Т. Н. Комплексный анализ пиролизного масла, полученного из отработанных автомобильных шин в среде водяного пара / Т. Н. Генарова, С. М. Лещев // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2021. – Т. 58, № 1. – С. 53–61. https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-1-53-61

T. N. Henarava[1,2], S. M. Leschev[2]

[1]A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
[2]Belarusian State University, Minsk, Belarus

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF PYROLYSIS OIL OBTAINED FROM WASTE TIRE IN A WATER VAPOR ENVIRONMENT

Abstract. Determination of the composition of pyrolysis products of organic compounds is a very difficult task due to their multicomponent nature [1–3]. Pyrolysis oils formed from rubber products and organic polymer wastes contain various classes of organic compounds with a huge spread in molecular weight and polarity: hydrocarbons, amides, phenols, amines, organosulfur compounds, etc. [1]. At the same time, the results of qualitative and quantitative chromatographic analysis of pyrolysis oils are often ambiguous: there are problems of overlapping peaks and misinterpretation of the data obtained due to the complexity of the matrix and the multicomponent composition [2–5]. Pyrolysis products can be used as valuable hydrocarbons or additives to hydrocarbon fuels. Therefore, the analysis of the chemical composition of pyrolysis oils is important both for assessing the degree of their toxicity and for finding an effective method for their purification.

Keywords: pyrolysis oil, industrial rubber waste, extraction sample preparation

For citation. Henarava T. N., Leshchev S. M. Comprehensive analysis of pyrolysis oil obtained from waste tire in a water vapor environment. *Vestsi Natsyyanal`nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series,* 2022, vol. 58, no. 1, pp. 53–61 (in Russian). https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-1-53-61

Введение. Проблема переработки изношенных автомобильных шин имеет большое экологическое и экономическое значение для всех развитых стран мира. Вышедшие из эксплуатации отработанные шины являются источником длительного загрязнения окружающей среды, поскольку

© Генарова Т. Н., Лещев С. М., 2022

шины не подвергаются биологическому разложению и огнеопасны. В то же время изношенные шины могут рассматриваться как вторичное сырье для получения ценных продуктов [6]. В связи с вышеизложенным можно предположить, что корректное исследование химического состава пиролизных масел возможно после их предварительного фракционирования на группы соединений со схожими свойствами. По всей видимости, наиболее перспективным методом разделения и выделения различных классов органических веществ является жидкостная экстракция, которая имеет такие несомненные достоинства, как простота, мягкость условий проведения процесса, возможность целенаправленного выбора фаз экстракционных систем и зачастую высокую эффективность ее использования.

В работе [7] изучается химический состав пиролизных масел с использованием экстракционной пробоподготовки. Данный способ основан на последовательном экстрагировании из гексанового раствора пиролизного масла, содержащихся в нем соединений с помощью ряда селективных растворителей и реагентов с последующим выделением компонентов из экстрактов и последующего ГХ-МС анализа. Пиролизное масло и смолисто-асфальтеновые вещества могут быть разделены на водорастворимые полярные органические соединения сравнительно небольшой молекулярной массы, в том числе органические кислоты и основания; водонерастворимые органические соединения с полярными функциональными группами в молекуле; многоядерные ароматические углеводороды конденсированного строения; алифатические и нафтеновые углеводороды, не содержащие других классов органических соединений.

Материалы и методы исследования. Пиролиз резиновой крошки отработанных автомобильных шин проводили на лабораторной установке со шнековым термолизным реактором ШТР-10. В ходе экспериментов в реактор подавалась резиновая крошка и водяной пар. 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 [8].

Определение содержания непредельных углеводородов. Массовую долю непредельных углеводородов в пиролизных маслах в пересчете на стирол определяли по методике [9] с использованием бромида йода.

Элементный анализ. Элементный анализ пиролизных масел и смолисто-асфальтеновых фракций проводили на HCNS/O-анализаторе VarioMicroCube (Elementar, Германия).

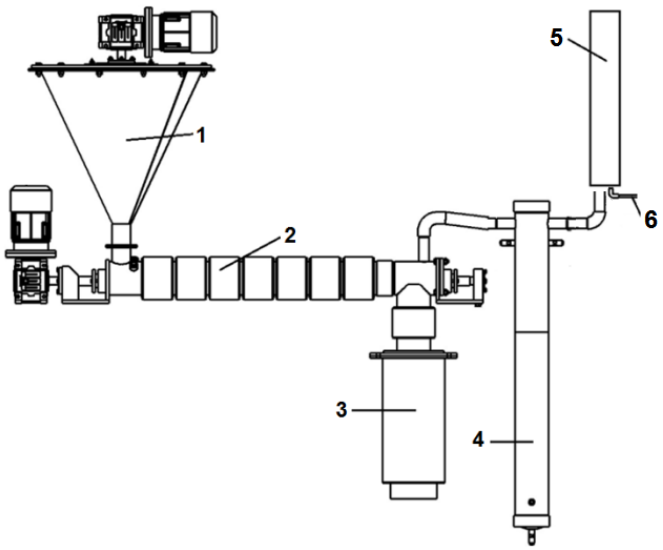

Рис. 1. Схема установки пиролиза ШТР-10: *1* – дозатор; *2* – реактор с нагревательными элементами; *3* – бункер для сброса твердого углерода; *4* – конденсатор; *5* – выхлопная труба; *6* – дожигатель

Fig. 1. Scheme of a pyrolysis unit with a screw thermolysis reactor STR-10: *1* – dispenser; *2* – reactor with heating elements; *3* – bunker for solid carbon discharge; *4* – capacitor; *5* – an exhaust pipe; *6* – afterburner

ИК-Фурье спектроскопия. Образцы пиролизных масел смешивали с мелкодисперсным KBr и спрессовывали в таблетки. ИК-спектры были записаны на ИК-Фурье спектрометре «Protege 460» фирмы «Nicolet» (США) со спектральным разрешением 1 $см^{-1}$.

Газовая хромато-масс-спектрометрия. Для качественного и количественного анализа образцов пиролизных масел использовали ГХ-МС метод. Температурный градиент: 80 °С (выдержка 3 мин), от 80 до 300 °С со скоростью 10°С/мин, 300 °С (выдержка 20 мин). Идентификацию соединений проводили с помощью библиотеки масс-спектров NIST17 в режиме полного сканирования масс-детектора (SCAN) по временам удерживания компонентов.

Пробоподготовка пиролизного масла представлена в работе [7]. Навеску пиролизного масла массой 0,90 г помещали в стеклянную колбу и добавляли 15-кратный избыток н-гексана, полученную смесь помещали в холодильник на 24 ч (при температуре –18 и –70 °С). После этого проводили отделение смолистых веществ, в том числе асфальтенов путем фильтрования гексанового раствора через фильтр «синяя лента» после декантирования гексанового раствора пиролизного масла. Пиролизное масло нестабильно при хранении, поэтому для предотвращения его окисления и полимеризации добавляли гидрохинон (0,1 мас.%). Количественный анализ ряда идентифицированных веществ пиролизного масла, природа которых дополнительно подтверждена хромато-распределительным методом, был проведен с использованием метода абсолютной калибровки по модельным веществам и стандартам.

Последовательная экстракционная пробоподготовка пиролизного масла описана в работе [7], она представляет собой экстракцию гексанового раствора пиролизного масла водой; 0,1 М водным раствором соляной кислоты; затем 0,1 М водным раствором гидроксида натрия; затем этиленгликолем; диметилсульфоксидом и олеумом.

Содержание алканов и нафтенов определяли по массе остатка от выпаривания гексанового экстракта, водорастворимых веществ – по методу абсолютной калибровки, алкенов – по методу определения йодного числа, смолисто-асфальтеновой фракции – по массе, ПАУ – по методу абсолютной калибровки, ароматических углеводородов – по разности от общей массы масла и суммой масс других компонентов.

Результаты и их обсуждение. Пиролизное масло из отработанных автомобильных шин представляет собой темно-коричневую жидкость с неприятным запахом, состоящую из большого количества различных органических соединений с широким диапазоном молекулярных масс и полярности. Массовое содержание непредельных углеводородов, рассчитанное по методу определения йодного числа в пересчете на стирол, для пиролизного масла составило 24,3±0,2 %. Результаты элементного анализа представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. **Элементный состав (мас.%) пиролизных масел**

T a b l e 1. **Elemental composition (wt.%) of pyrolysis oils**

Образец	C, %	N, %	H, %	S, %
Пиролизное масло	88±0,8	0,34±0,01	10,8±0,01	0,96±0,01

Выполнено отнесение полос поглощения ИК-спектров к основным классам химических соединений [10] и установлено, что пиролизные масла представляют собой сложную смесь ароматических углеводородов, алканов, алкенов и предположительно фенолов и гетероциклических кислород-, серо- и азотсодержащих органических соединений. ИК-спектр масла характеризуется низкой интенсивностью полос поглощения неуглеводородных компонентов, причем после экстракции водой они отделяются и уже легко могут быть определены. Таким образом, метод ИК-спектроскопии для многокомпонентных пиролизных смесей носит оценочный характер и не позволяет получить корректной информации не только о количестве, но и о природе органических соединений.

Пиролизное масло содержит смолисто-асфальтеновые соединения, представляющие собой высокомолекулярные ненасыщенные ароматические углеводороды, способные к формированию трехмерной структуры [11]. Данные соединения необходимо удалять из пиролизных масел, по-

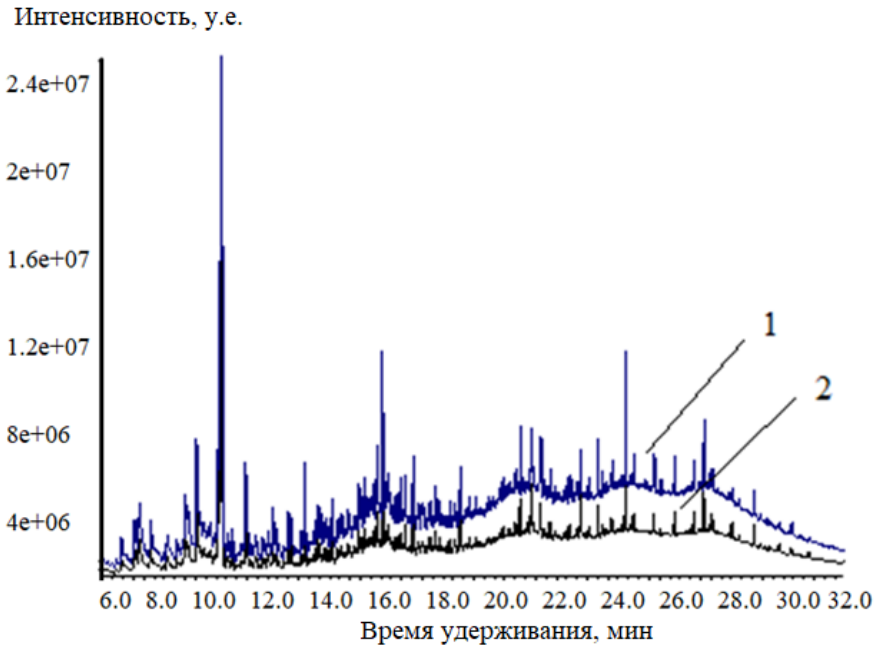

Рис. 2. Хроматограммы гексановых растворов пиролизного масла после экстракционной деасфальтизации при разных температурах: *1* – –18 °С; *2* – –70°С

Fig. 2. Chromatograms of hexane solutions of pyrolysis oil after extraction deasphalting at different temperatures: *1* – at –18 ° C; *2* – at –70 ° C

скольку они не летучи и при ГХ-МС анализе происходит порча оборудования (испарителя и капиллярной колонки). Экстракционная деасфальтизация пиролизного масла гексаном была проведена при –18 и –70 °С (рис. 2). Из рисунка видно, что фон базовой линии хроматограммы при деасфальтизации –70 °С уменьшился по сравнению с температурой –18 °С, т.е. при более низкой температуре деасфальтизации выделяется большее количество асфальтенов и смолистых веществ, которые увеличивают фон базовой линии хроматограммы. Результаты метода элементного анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Элементный состав (мас.%) пиролизного масла при разных температурах деасфальтизации**
Table 2. **Elemental composition (wt.%) of pyrolysis oil at different temperatures of deasphalting**

Температура деасфальтизации, °С	С, %	Н, %	N, %	S, %
–18°С	87,1±0,8	11,1±1	0,24±0,02	0,80±0,08
–70°С	85,3±0,8	13,2±1	0,28±0,02	0,78±0,08

После экстракционной деасфальтизации пиролизного масла при –18 °С в нем обнаружено ~10,0±0,5 %, после деасфальтизации при –70 °С – ~ 12,0±0,9 % смолисто-асфальтеновых веществ. На рис. 3 представлена хроматограмма гексанового раствора пиролизного масла, полученного в среде водяного пара после экстракционной деасфальтизации при –18 ºС.

Исследование химического состава пиролизного масла без предварительной экстракционной пробоподготовки показало, что в пиролизном масле детектируется 200 органических соединений, из которых только 24 компонента идентифицируются с достоверностью идентификации не менее 95 % по совпадению с библиотекой масс-спектров NIST17 (табл. 3).

По результатам ГХ-МС определения видно, что в пиролизных маслах идентифицируются ароматические углеводороды, алкены и примесные количества азот- и сероорганических соединений, а также органические кислоты.

Таким образом, в результате определения состава пиролизного масла методами элементного анализа, ИК-спектроскопии, титрования и ГХ-МС было обнаружено, что оно содержит аромати-

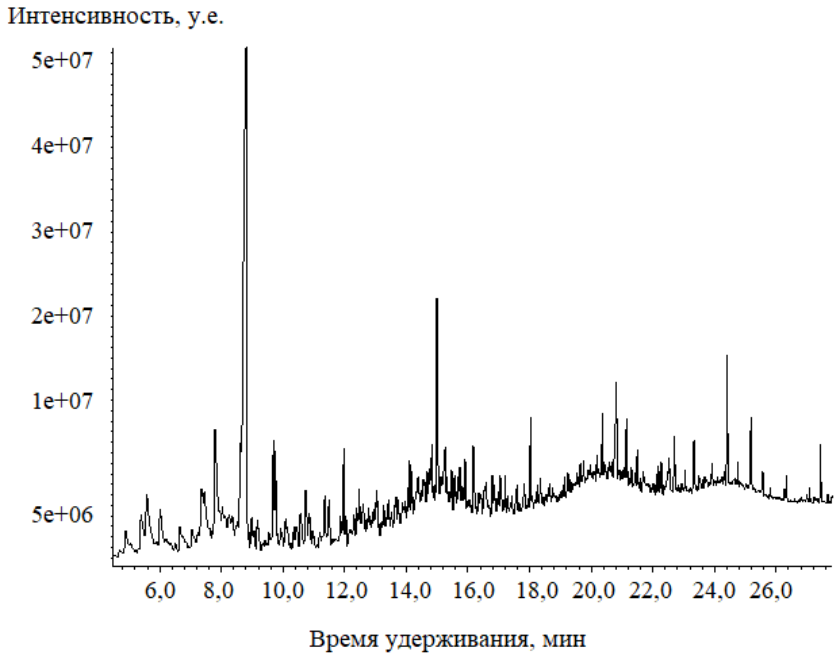

Рис. 3. Хроматограмма гексанового раствора пиролизного масла

Fig. 3. Chromatogram of a hexane solution of pyrolysis oil

Т а б л и ц а 3. **Химический состав пиролизного масла после деасфальтизации с достоверностью идентификации не менее 95 %**

T a b l e 3. **Chemical composition of pyrolysis oil after deasphalting with identification reliability of at least 95%**

Соединение	Относительное содержание по методу нормировки, %
4-этенилциклогексен	1,3±0,1
п-ксилол	1,97±0,1
Лимонен	28,2±2,5
1-этил-3-метилбензол	0,95±0,09
α-метилстирол	2,1±0,2
4-этил-1,2-диметилбензол	2,67±0,2
Инден	2,04±0,2
1-метил-4-метилэтил-1,3-циклогексадиен	1,98±0,1
1-метил-4-(1-метилэтенил)бензол	1,1±0,1
2-метилинден	0,97±0,09
1-метилинден	0,98±0,09
4,7-диметилинден	0,81±0,08
1,3-диметилинден	0,93±0,09
Бензотиазол	1,6±0,1
2,3-диметилинден	0,63±0,06
Нафталин	1,0±0,1
2-метилнафталин	1,4±0,1
1-метилнафталин	0,62±0,06
1,2,3-триметилинден	0,78±0,07
2,7-диметилнафталин	1,1±0,1
2,2,4-триметилхинолин	4,7±0,4
1,6,7-триметилнафталин	1,3±0,1
н-гексадекановая кислота	2,9±0,2
н-октадекановая кислота	2,3±0,2

ческие, непредельные углеводороды и примесные количества азот-, серо- и кислородсодержащие органические соединения. Тем не менее результаты остаются недостоверными и сомнительными, поэтому без предварительной экстракционной пробоподготовки, по всей видимости, не удастся обеспечить эффективного разделения компонентов пиролизного масла и достичь досто-

верности его ГХ-МС определения. Использование экстракционной пробоподготовки позволило разделить масло на следующие фракции.

Извлечение водорастворимой фракции. Гексановый раствор пиролизного масла экстрагировали водой, водными растворами минеральной кислоты и основания. Затем компоненты из водного раствора после доведения его pH до 8 и добавления высаливателя извлекали хлороформом (рис. 4). В водном экстракте обнаружено 338 соединений, идентифицированных с достоверностью более 95 % – 23 компонента.

Содержание основных водорастворимых компонентов в пересчете на пиролизное масло составило, мг/дм^3: капролактама – 1620, бензотиазола – 6435, фенола – 275, анилина – 20, 2,4-диметилхинолина – 160, *n*-крезола – 95, *m*-крезола – 70, что составляет не менее 95 % общей площади идентифицированных пиков и 67 % суммы всех пиков хроматограммы. Концентрация основных идентифицированных водорастворимых компонентов, содержащихся в пиролизном масле по данным трех параллельных измерений, составляет 9,0 ± 0,8 г/дм^3. Общее содержание гидрофильных соединений, в том числе не идентифицированных, невелико и в пересчете на масло составляет 1,5 %.

Извлечение гликоль-растворимых веществ. Гексановый раствор пиролизного масла экстрагировали этиленгликолем с добавкой минеральной кислоты, затем основания. Хроматограмма хлороформного экстракта пиролизного масла после экстракции ЭГ с добавками HCl и NaOH представлена на рис. 5.

В подкисленном этиленгликолевом экстракте после разбавления водой, подщелачивания и реэкстракции гексаном обнаружена основная масса бензотиазола, образующего при подкислении соль, в виде которой он переходил в этиленгликоль (ЭГ). Заметных количеств полярных органических соединений, аналогичных по функциональным группам соединениям, найденных в водном экстракте, кроме стеариновой кислоты, обнаружено не было. Разумеется, что ЭГ экстракт содержит небольшое количество углеводородов, перешедших в ЭГ в соответствии с их величиной константы распределения (P), которые, как известно, весьма высоки [12]. Поэтому информация об экстракции компонентов пиролизного масла этиленгликолем в соответствии с концепцией хромато-распределительного метода может быть использована для дополнительного подтверждения природы углеводородов пиролизного масла.

В результате после последовательной экстракции гексанового раствора пиролизного масла водой и ЭГ, содержащими кислоты и щелочи, в образце остаются исключительно углеводороды и гидрофобные сероорганические соединения.

Rt, мин

Рис. 4. Хроматограмма объединенного гексанового экстракта пиролизного масла после экстракции водой, водными растворами соляной кислоты и гидроксида натрия

Fig. 4. Chromatogram of the combined hexane extract of pyrolysis oil after extraction with water, aqueous solutions of hydrochloric acid and sodium hydroxide

Rt, мин

Рис. 5. Хроматограмма хлороформного экстракта пиролизного масла после экстракции этиленгликолем

Fig. 5. Chromatogram of the chloroform extract of pyrolysis oil after extraction with ethylene glycol

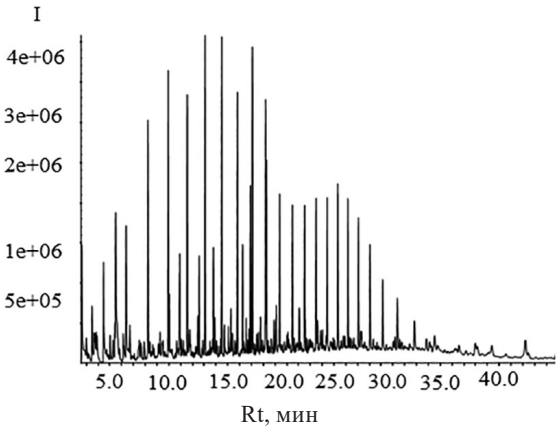

Рис. 7. Хроматограмма сконцентрированного гексанового раствора пиролизного масла после обработки олеумом

Fig. 7. Chromatogram of a concentrated hexane solution of pyrolysis oil after treatment with oleum

гидрофильные органические основания и кислоты. В ЭГ экстракте значительных количеств умеренно гидрофобных соединений за исключением бензотиазола и стеариновой кислоты не оказалось. Применение ДМСО позволило извлечь конденсированные многоядерные ароматические углеводороды из пиролизного масла, а олеум удалил из гексанового раствора пиролизного масла непредельные и ароматические углеводороды.

Ориентировочный состав пиролизного масла следующий (%): ароматические углеводороды (46), алкены в пересчете на стирол (24), алканы и нафтены (12), асфальтены и смолистые вещества (10,0), водорастворимые органические соединения (1,5), сера (0,96), полициклические ароматические углеводороды с учетом смолисто-асфальтеновой фракции (4,5).

Заключение. Полученные в работе результаты имеют несомненное значение для химии пиролиза органических соединений. В частности, на основании данных видно, что пиролиз резинотехнических изделий сопровождается как очевидным образованием наиболее стабильных при высоких температурах ароматических углеводородов, так и установленным в работе образованием алифатических и нафтеновых углеводородов. В исходном растворе пиролизного масла идентифицировано 200 соединений, при экстракционной пробоподготовке дополнительно были выявлены около 1000 соединений. Водная экстракция раствора пиролизного масла позволила идентифицировать капролактам, пиридин, фенол, *п*-крезол, анилин, 2,4-диметилхинолин, фенилформамид, которые в данном исходном растворе не были обнаружены. В исходном растворе пиролизного масла обнаружено 27 ПАУ, а после экстракционной пробоподготовки их количество увеличилось до 64. В исходном гексановом растворе пиролизного масла идентифицирован только пендадекан, а экстракционная пробоподготовка позволила обнаружить еще 72 алкана и нафтена.

Список использованных источников

1. 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.

2. Kalitko, U. Tire scrap pyrolysis recycling by steaming way: heat-mass balance solutions and developments / U. Kalitko, M. Chun Yao Wu // Pyrolysis: Types, Processes. – 2009. – P. 1–37.

3. Петренко, Т. В. Пиролиз резиновой крошки / Т. В. Петренко, Ю. А. Новичков // Твердые бытовые отходы. – 2007. – Т. 4, № 10. – С. 6–9.

4. Quek, A. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals – a review / A. Quek, R. Balasubramanian // J. Anal. Appl. Pyrolysis. – 2013. – Vol. 101. – P. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.016

5. 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

6. Гулевич, А. Л. Экстракционная фотометрия нестероидных анальгетиков / А. Л. Гулевич, В. А. Ковалевич, Т. Н. Кийко // Аналитика РБ – 2010: Республ. науч. конф. по аналит. химии с междунар. участием, Минск, 14–15 мая 2010 г. : тез. докл. / Белорус. гос. ун-т; отв. за вып. В. В. Егоров, А. Л. Гулевич, В. А. Назаров. – Минск, 2010. – С. 111.

7. 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, № 3. – С. 401–409.

8. Ложечник, А. В. Исследование пиролиза резины в шнековом реакторе / А. В Ложечник, В. В. Савчин // ИФЖ. – 2016. – Т. 89, № 6. – С. 1504–1508.

9. Нефтепродукты светлые. Методы определения йодных чисел и содержания непредельных углеводородов: ГОСТ 2070-82. – Введ. 01.07.1983. – Минск: Стандартинформ, 2008. – Ч. 2. – 14 с.

10. Тарасевич, Б. Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы / Б. Н. Тарасевич. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. – 53 с.

11. Asphaltene adsorption on functionalized solids / Henri-Louis Girard [et al.] // Langmuir. – 2020. – Vol. 36, N 14. – P. 3894–3902.https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00029

12. Гайле, А. А. Электронодонорная способность углеводородов и электроноакцепторная характеристики полярных растворителей / А. А. Гайле, Л. В. Семенов // Журн. прикл. химии. – 1986. – Т. 59, № 4. – С. 2669–2675.

13. Лещев, С. М. Метод групповых инкрементов как способ обобщения данных по экстракции органических веществ и оценки влияния внутримолекулярных эффектов на их экстракцию из водных растворов / С. М. Лещев, А. В. Зайдель, М. Ф. Заяц // Химия новых материалов и биологически активных веществ / под общ. ред. Д. В. Свиридова. – Минск, 2016. – С. 135–151.

References

1. 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.

2. Kalitko U., Chun Yao Wu M. Tire scrap pyrolysis recycling by steaming way: heat-mass balance solutions and developments. *Pyrolysis: Types, Processes,* 2009, pp. 1–37.

3. Petrenko T. V., Novichkov Yu. A. Pyrolysis of rubber crumb. *Tverdyebytovyeotkhody= Municipal solid waste*, 2007, vol. 4, no. 10, pp. 6–9(in Russian).

4. Quek A., Balasubramanian R. Liquefaction of waste tires by pyrolysis for oil and chemicals – a review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, vol. 101, pp. 1–16. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.016

5. Perondi D., Scopel B. S., Collazzo G. C., Silva J. P., Botomé M. L., Dettmer A., Godinho M., Vilela A. C. F. 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

6. Gulevich A. L., Kovalevich V. A., Kiyko T. N. Extraction photometry of non-steroidal analgesics. *Analitika RB – 2010: Respubl. nauch. konf. po analit. khimii s mezhdunar. uchastiem, Minsk, 14–15 maya 2010 g.: tez. dokl.* [Analytics RB - 2010: Republ. scientific. conf. on analytical chemistry with the international participation, Minsk, May 14–15, 2010: Book of abstracts]. Minsk, 2010, pp. 111 (in Russian).

7. Leshchev S. M., Genarova T. N., Savchin V. V., Levkina V. V. Extraction sample preparation of pyrolysis oil of waste automobile tires with its component and quantitative GC-MS analysis. *Analitika I kontrol' = Analytics and control*, 2019, vol. 23, no. 3, pp. 401–409 (in Russian).

8. Lozhechnik A. V., Savchin 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

9. State standart 2070-82. *Light oil products. Methods for determining iodine numbers and the content of unsaturated hydrocarbons*. Minsk, Standartinform, 2008, part 2. 14 p. (in Russian).

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

11. Girard H-L., Bourrianne P., Chen D., Jaishankar A., Vreeland J. L., Cohen R. E., Varanasi K. K., McKinley G. H. Asphaltene adsorption on functionalized solids. *Langmuir*, 2020, vol. 36, no. 14, pp. 3894–3902. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00029

12. Gaile A. A., Semenov L. V. Electron-donor ability of hydrocarbons and electron-acceptor characteristics of polar solvents. *Zhurnal Prikladnoi Khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 1986, vol. 59, no. 4, pp. 2669–2675 (in Russian).

13. Leshchev S. M., Seidel A. V., Zayats M. F. Method of group increments as a method of generalizing data on the extraction of organic substances and assessing the influence of intramolecular effects on their extraction from aqueous solutions. *Khimiya novykh materialov I biologicheski aktivnykh veshchestv* [Chemistry of new materials and biologically active substances]. Minsk, 2016, pp. 135–151 (in Russian).

Информация об авторах

Генарова Татьяна Николаевна – канд. хим. наук, ученый секретарь. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки,15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru

Лещев Сергей Михайлович – д-р. хим. наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leschev.sergey54@gmail.com

Information about the authors

Henarava Tatsiana M. – Ph. D. (Chemistry), Scientific Secretary. A. V. Luikov Head and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, P. Brovka str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru

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