

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

АНАЛІТЫЧНАЯ ХІМІЯ ANALYTICAL CHEMISTRY

УДК 543.054
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-415-421>

Поступила в редакцию 20.02.2019
Received 20.02.2019

С. М. Лешёв², Т. Н. Генарова^{1,2}, В. В. Савчин¹, А. И. Леончик¹

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА ПИРОЛИЗНОЙ ВОДЫ, ОБРАЗУЮЩЕЙСЯ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Аннотация. Предложен способ определения химического состава пиролизной воды, получаемой при пиролизе изношенных автомобильных шин в шнековом термолизном реакторе в среде азота и водяного пара. Способ количественного определения веществ основан на предварительной экстракции компонентов пиролизной воды хлороформом в присутствии сульфата аммония с последующим хромато-масс-спектрометрическим анализом с использованием метода абсолютной калибровки. Показано, что общее содержание основных компонентов, сумма площадей пиков которых на хроматограмме составила не менее 95 % от общей площади идентифицированных пиков компонентов и 65 % от общей суммы всех пиков хроматограммы, равно 0,90 г/дм³, из них капролактама – 46 %, анилина – 17, бензонитрила – 6, циклогексанона – 5, бензотиазола – 4,9, 2,4-диметилхинолина – 4,6, *o*-крезола – 2,8, *n*-крезола – 2,6, фталимида – 2,5 %. На хроматограмме регистрируется 93 пика, из них идентифицированы 27 пиков, включая 9 упомянутых основных компонентов. Методом ИК Фурье-спектроскопии подтверждена природа функциональных групп указанных соединений. В системе гексан–вода определены константы распределения 12 компонентов пиролизной воды: циклогексанона, анилина, бензонитрила, *o*- и *n*-крезола, 2,5-диметилфенола, бензойной кислоты, бензотиазола, капролактама, 1-метил-изохинолина, 2,4-диметилхинолина, фталимида. С использованием диссоциативной экстракции показано, что на хроматографические пики некоторых компонентов могут накладываться пики минорных компонентов.

Ключевые слова: пиролизная вода, пиролиз автомобильных шин, хромато-распределительный метод, диссоциативная экстракция

Для цитирования. Определение состава пиролизной воды, образующейся в процессе термической переработки автомобильных шин / С. М. Лешёв [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2019. – Т. 55, № 4. С. 415–421. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-415-421>

S. M. Leshev², T. M. Henarava^{1,2}, V. V. Sauchyn¹, A. I. Liavonchyk¹

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

DETERMINATION OF PYROLYTIC WATER COMPOSITION FORMING DURING THERMAL PROCESSING OF AUTOMOBILE TYRES

Abstract. The study of the chemical composition of water formed during pyrolysis of waste tyres was made. The obtained pyrolytic water was characterized by FT-IR techniques, gas chromatography-mass spectrometry, dissociation extraction and a distribution chromatography method. It was found out that pyrolytic water consists of about 93 compounds, from which 27 compounds were identified by GC-MS method. Quantitative analysis established that total content of compounds is up 0.90 g/dm³, from which caprolactam – 46 %, cyclohexanone – 5, aniline – 17, benzonitrile – 6, *o*-cresol – 2,6, *p*-cresol – 2,8, benzothiazole – 4,9, 2,4-dimethylquinoline – 4,6, phthalimide – 2,5 %. By dissociative extraction of organic acids and bases it was shown that peaks of some components of chromatogram contain minor components. Distribution coefficients in hexane-water system of cyclohexanone, aniline, benzonitrile, *o*-cresol, *p*-cresol, 2,5-dimethylphenol, benzoic acid, benzothiazole, caprolactam, 1-methyl-isoquinoline, 2,4-dimethylquinoline and phthalimide were defined.

Keywords: pyrolytic water, pyrolysis of automobile tyres, distribution chromatography method, dissociation extraction

For citation. Leshev S. M., Henarava T. M., Sauchyn V. V., Liavonchyk A. I. Determination of pyrolytic water composition forming during thermal processing of automobile tyres. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 415–421 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-4-415-421>

Введение. Изношенные автомобильные шины могут быть перспективным ресурсом для получения жидких углеводородов и других ценных химических соединений [1, 2]. Поэтому исследование процессов их пиролиза в настоящее время привлекает внимание ученых как в Беларуси, так и за рубежом [3, 4]. Пиролизные масла являются сложной многокомпонентной системой, состоящей из нескольких сотен органических алифатических, непредельных и ароматических соединений, преимущественно углеводородов. Однако отсутствуют сведения о химическом составе воды, являющейся основным отходом пиролиза автомобильных шин, и которая может содержать высокотоксичные компоненты. Поэтому зная химический состав пиролизной воды, можно предложить наиболее рациональные способы ее утилизации. Следует отметить, что утилизация и обезвреживание пиролизных вод составляет одну из важных экологических проблем настоящего времени [5]. Исходя из химического состава пиролизной воды, можно предложить наиболее эффективный и экономически выгодный физико-химический или биохимический метод ее утилизации.

Цель работы – определение компонентного и количественного состава пиролизной воды, образующейся в процессе пиролиза изношенных автомобильных шин в среде водяного пара, с использованием методов газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС метод), ИК Фурье-спектроскопии и межфазного распределения молекулярных форм органических веществ, а также диссоциативной экстракции содержащихся в смесях органических кислот и оснований.

Материалы и методы исследования. В ходе работы использовали следующие реактивы: н-гексан (Ranгeас AppliChem, Германия, > 95 %), сульфат аммония, деионизованную воду, соляную кислоту, аммиачный буфер, гидроксид натрия, образцы пиролизной воды. Для фильтрации образцов использовали фильтр «Синяя лента». Взвешивание точных навесок проводили на весах Ohaus Pioneer (Ohaus Corporation, США), точность которых составляла 0,0001 г. Для определения кислотности среды применяли рН-метр HANNA HI 9321.

Пиролиз. Пиролиз проводили на лабораторной установке со шнековым термолизным реактором ШТР-10, разработанной сотрудниками Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Схема реактора и описание процесса пиролиза резиновой крошки в присутствии водяного пара представлены в работе [6].

ИК Фурье-спектроскопия. Пиролизную воду экстрагировали хлороформом, полученный экстракт обезвоживали безводным сульфатом натрия и упаривали, затем сухой остаток смешивали с мелкодисперсным KBr и спрессовывали в таблетки. ИК спектры были записаны на ИК Фурье-спектрометре «Protégé 460» фирмы «Nicolet» (США) со спектральным разрешением 4 см^{-1} .

ГХ-МС метод. Для качественного и количественного определения компонентного состава пиролизной воды использовали газовый хроматограф Agilent 7890A, снабженный автоматическим устройством ввода пробы Agilent Autosampler G4513A, масс-спектрометром Agilent 5975C MSD (Agilent Technologies, США). В ходе работы использовали капиллярную колонку HP-5MS ($30\text{ м} \times 0,25\text{ мм} \times 0,25\text{ мкм}$). Сбор данных и обработку хроматограмм проводили с помощью программного обеспечения Mass Hunter (Agilent Technologies, США). *Условия хроматографирования:* газ-носитель – гелий (скорость потока – 1 мл/мин); объем вводимой пробы – 1 мкл; температурный градиент – $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3 мин), от 80 до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (20 мин); температура источника $230\text{ }^{\circ}\text{C}$. Параметры масс-спектрометрического детектора: ионизация электронным ударом, энергия ионизации – 70 эВ, температура ионного источника – $230\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура квадруполя – $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Идентификацию соединений проводили по временам удерживания веществ с помощью библиотеки масс-спектров NIST98 в режиме полного сканирования масс-детектора. Для определения компонентов пиролизной воды использовали их предварительное экстракционное извлечение из пиролизной воды хлороформом после ее насыщения сульфатом аммония. Согласно данным работ [7, 8], в указанной экстракционной системе хлороформ количественно извлекает подавляющее большинство содержащихся в пиролизной смеси компонентов. Количественный анализ был проведен с использованием метода абсолютной калибровки.

Исследование экстракции компонентов пиролизной воды в системе гексан–вода при различных условиях. Хлороформный экстракт пиролизной воды упаривали, остаток растворяли в гексане. Полученный гексановый раствор фильтровали, затем экстрагировали деионизованной водой [8].

Хроматографическое определение гексановых фракций проводили до и после экстракции водой. В системах *n*-гексан–вода определяли константы распределения 12 химических соединений, содержащихся в пиролизной воде: циклогексанон, анилин, бензонитрил, *o*- и *n*-крезол, 2,5-диметилфенол, бензойная кислота, бензотиазол, капролактан, 1-метил-изохинолин, 2,4-диметилхинолин и фталимид. Константы распределения веществ (*P*) рассчитывали согласно методике, описанной в работе [9]. Температура экстракции – 20±1 °С. Время достижения экстракционного равновесия составляло 3–5 мин. Погрешности результатов в величинах константы распределения не превышали ±10 %. Диссоциативная экстракция была проведена при значениях pH 0, 2, 4, 9, 12 и 14, которые задавались добавками соляной кислоты, аммиачного буфера и гидроксида натрия. Для фенолов использовали систему хлороформ–вода, для бензотиазола – гексан–вода.

Результаты и их обсуждение. Известно, что пиролизные воды, образующиеся из различных продуктов, содержат различные классы органических соединений и в первую очередь фенолы, органические кислоты, органические основания и неэлектролиты [10]. В них в отличие от пиролизных масел не содержатся углеводороды и другие водонерастворимые компоненты.

Результаты ИК Фурье-спектроскопии. В результате анализа ИК Фурье-спектров установлено, что пиролизная вода содержит фенолы, амиды, амины, ароматические соединения, пиридины, простые эфиры и кетоны (табл. 1).

Таблица 1. Результаты анализа ИК спектров

Table 1. Results of FT-IR spectroscopy

Ключевые полосы, см ⁻¹	Функциональная группа	Класс соединений
627,11	O=C-N	Амиды
669,27	δO-H	Фенолы
1215,3	νC-O	
3683,79	νO-H	
757,57	1,3-замещен. C-H	Ароматические соединения
1521,8	C=C колеб. кольца	
1602,5	νC=C	
928,94	-C-O-C-	Простые эфиры
1650,03	δN-H	Амины
1715	-C-C=O	Кетоны
3471,18	νN-H	Пиридины

Результаты ГХ-МС метода. Основным методом количественного определения жидких продуктов пиролиза является метод газовой хромато-масс-спектрометрии. Однако результаты ГХ-МС метода сложных многокомпонентных смесей зачастую не однозначны и приводят к неверной интерпретации полученных данных. В работе [11] отмечается проблема идентификации хроматографических пиков, в частности наличие на хроматограмме пиролизного масла изношенных автошин двух пиков, регистрируемых масс-детектором как лимонен. Причина такого явления неизвестна и, вероятно, состоит в том, что пики представляют собой не индивидуальные вещества, а их смеси.

Известно, что метод экстракционной пробоподготовки при анализе сложных смесей органических веществ, предусматривающий предварительное разделение компонентов, позволяет увеличить селективность анализа, а также существенно снизить влияние матрицы [12], в результате которого повышается достоверность анализа такого рода смесей. Обнаружено, что пиролизная вода состоит из 93 компонентов, из которых 27 идентифицировано, из них 9 являются основными (рис. 1).

Основными компонентами пиролизной воды являются: капролактан, циклогексанон, анилин, *n*- и *o*-крезол, бензонитрил, бензотиазол, 2,4-диметилхинолин и фталимид. Результаты количественного анализа основных соединений пиролизной воды, сумма площадей пиков которых на хроматограмме составила не менее 95 % от общей площади идентифицированных пиков компонентов и 65 % от общей суммы всех пиков хроматограммы, представлены в табл. 2. Погрешность в определении концентрации компонентов составила 5–10 %.

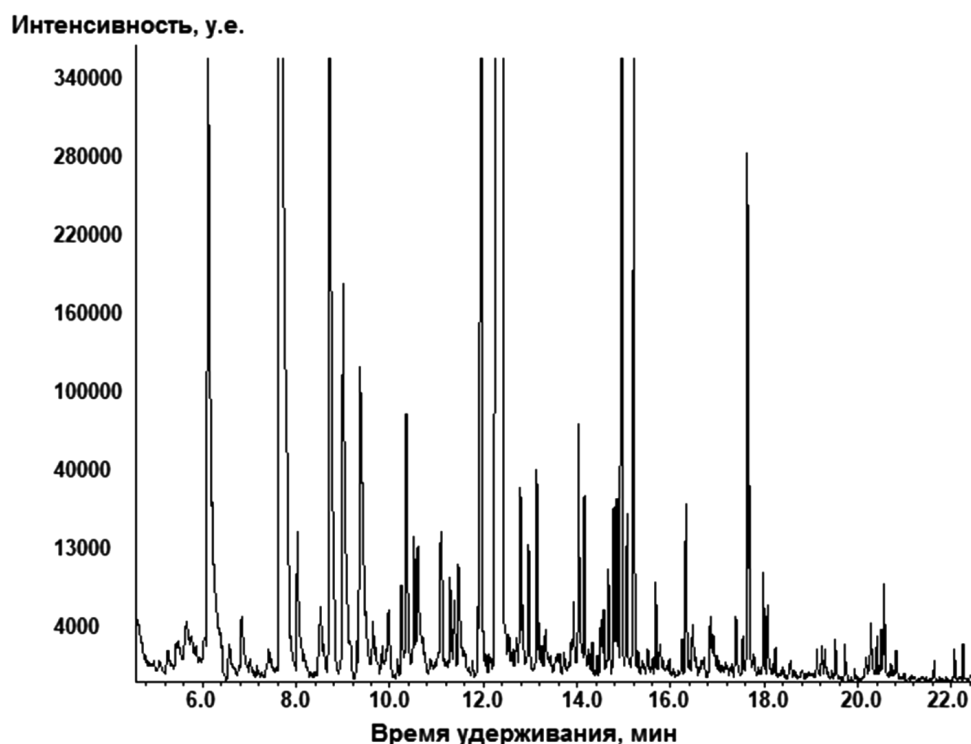


Рис. 1. Типичная хроматограмма хлороформного экстракта пиролизной воды

Fig. 1. Typical chromatogram of chloroform extract of pyrolytic water

Таблица 2. Значения концентраций основных компонентов пиролизной воды, определенных с использованием метода абсолютной калибровки

Table 2. Concentrations of the main components of pyrolytic water, determined using the method of the absolute calibration

Соединение	Время удерживания, мин	Концентрация, мг/дм ³
Циклогексанон	6,09	51
Анилин	7,73	170
Бензонитрил	8,71	51
<i>o</i> -Крезол	8,99	29
<i>l</i> -Крезол	9,36	30
Бензотиазол	11,94	48
Капролактam	12,37	450
2,4-Диметилхинолин	14,94	45
Фталимид	15,21	25

Обнаружено, что общая концентрация основных компонентов, содержащихся в пиролизной воде, составляет 900 мг/дм³.

Использование хромато-распределительного метода для дополнительной идентификации компонентов пиролизной воды. Сущность хромато-распределительного метода заключается в сопоставлении константы межфазного распределения вещества, содержащегося в сложной смеси, с существующим табличным ее значением [9]. Для водорастворимых веществ наиболее эффективной в плане использования хромато-распределительного метода является система гексан–вода, в которой константы распределения органических веществ (P) максимально дифференцированы [7]. В табл. 3 приведены полученные величины P компонентов пиролизной воды в системе гексан–вода, погрешность измерений составила 10 %. Полученные величины P хорошо согласуются с литературными данными (в пределах ошибки опыта).

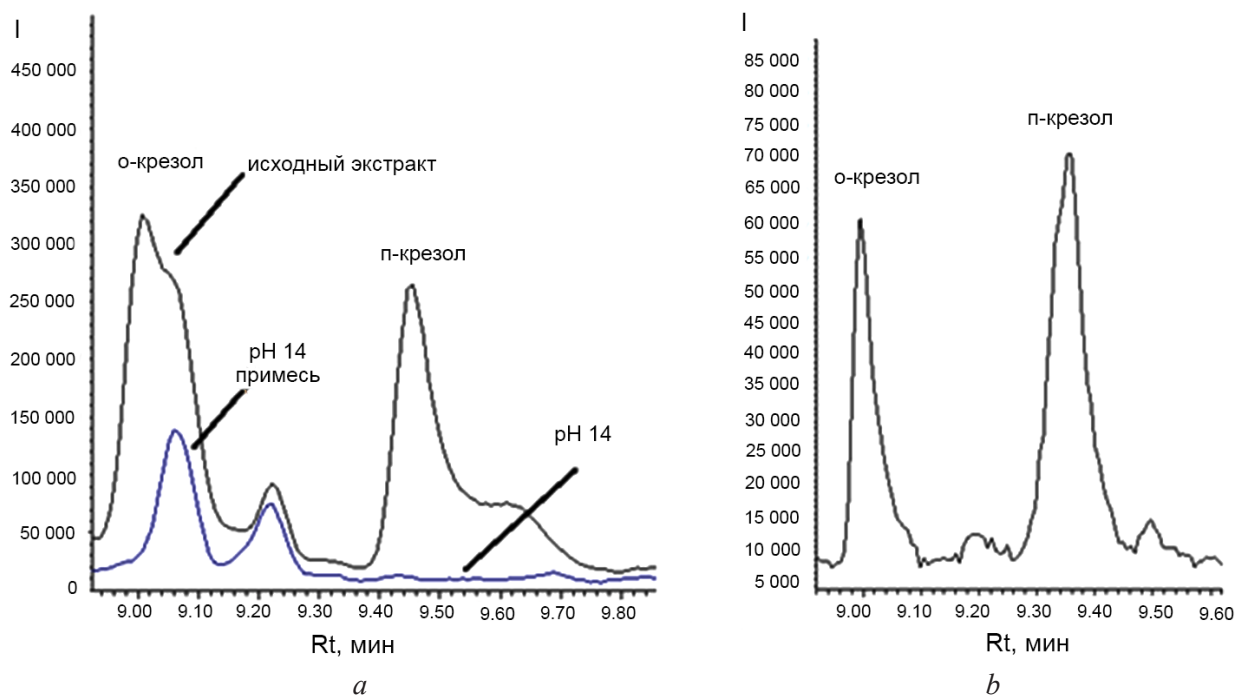
Таблица 3. Значения констант распределения компонентов пиролизной воды в экстракционных системах н-гексан–вода

Table 3. Distribution constants of pyrolytic water components in hexane–water extraction systems

Соединение	Время удерживания, мин	P
Циклогексанон	6,02	0,82
Анилин	7,61	0,73
Бензонитрил	7,77	3,7
о-Крезол	9,03	0,53
п-Крезол	9,52	0,62
2,5-Диметилфенол	10,59	2,4
Бензойная кислота	10,92	0,07
Бензотиазол	11,93	6,8
Капролактam	12,42	0,00091
1-Метил-изо-хинолин	13,13	35
2,4-Диметилхинолин	14,93	140
Фталимид	15,19	0,063

Использование диссоциативной экстракции для подтверждения природы и «чистоты» хроматографических пиков органических кислот и оснований. С целью дополнительного подтверждения природы и количественного содержания органических кислот и оснований была использована диссоциативная экстракция при значениях pH 0, 2, 4, 9, 12 и 14. Для экстракции фенолов использовали систему хлороформ–вода, а для бензотиазола применяли систему гексан–вода. Нами установлено, что органические кислоты и фенолы находятся в фазе хлороформа при pH 0, 2, 4, 9, а при pH 14 переходят из экстракта в водную фазу, в то время как сильные органические основания присутствуют в экстракте при pH 9, 12, 14, но при pH 2 и ниже количественно переходят в водную фазу.

Бензотиазол, являясь слабым основанием, при pH 2 находится в гексановом экстракте, при pH 0 его содержание уменьшается в 3–4 раза (рис. 2).

Рис. 2. Отрезок хроматограммы хлороформного экстракта пиролизной воды, где *a* – *o*- и *p*-крезол в исходном экстракте и примеси при pH 14; *b* – *o*- и *p*-крезол после его реэкстракции при подкислении экстракта до pH 6Fig. 2. Segment of chromatogram of chloroform solutions of pyrolytic water, where *a* – *o*-cresol and *p*-cresol in initial extract and impurity at pH 14; *b* – *o*-cresol and *p*-cresol after reextraction at acidulation of extract to 6 pH

Нами обнаружено, что пики органических оснований за исключением бензотиазола при pH 0 полностью исчезают из экстракта. Однако для крезолов видно, что на их пики накладываются пики неидентифицированных компонентов.

Расчеты показывают, что при pH 14 коэффициент распределения в системе хлороформ–вода *o*-крезола составляет $2 \cdot 10^{-3}$ и его пик должен отсутствовать, но остаются неизвестные примесные компоненты. Пик *o*-крезола в исходном экстракте ассиметричный и размытый, а пик *n*-крезола имеет «хвост». После отделения водного экстракта, подкисления до pH 6 и реэкстракции хлороформом пики крезолов становятся симметричными и четкими, а «хвост» для *n*-крезола исчезает. При этом важно, что примеси к *o*- и *n*-крезолам остаются в хлороформном растворе и практически не видны в хлороформном реэкстракте. Таким образом, применение диссоциативной экстракции повышает достоверность и точность метода ГХ, поскольку крезолы полностью экстрагируются хлороформом из водного экстракта (степень извлечения более 95 %) и практически полностью реэкстрагируются из водного экстракта хлороформом при подкислении водного раствора [7]. Ориентировочное содержание примесных неидентифицированных компонентов для *o*-крезола составляет около 15 %.

Из вышесказанного следует, что при использовании ГХ-МС метода при анализе сложных смесей и в первую очередь пиролизных продуктов весьма вероятны ошибки в идентификации пиков веществ на хроматограмме и при определении их количественного содержания. Метод предварительной экстракционной пробоподготовки, как следует из полученных результатов, позволит избежать указанных ошибок и повысить достоверность и точность определения химического состава пиролизных вод.

Заключение. Методами ИК Фурье-спектроскопии и газовой хромато-масс-спектрометрии проведен анализ состава воды, образующейся в процессе пиролиза автомобильных шин. Для подтверждения природы химических соединений и повышения достоверности результатов ГХ-МС метода проведены межфазное распределение и диссоциативная экстракция органических кислот, оснований и целевых компонентов в системах хлороформ–вода и гексан–вода. Хромато-распределительный метод органических кислот и оснований позволил дополнительно подтвердить химический состав пиролизной воды и определить, что некоторые пики хроматограммы содержат примеси неизвестной природы.

Список использованных источников

1. 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>
2. Nkosi, N. A review and discussion of waste tyre pyrolysis and derived products proceedings / N. Nkosi, E. Muzenda // The World Congress on Engineering–2014. – July 2014. – London, U.K. – Vol. II. – P. 979–985.
3. Kalitko, U. Tire scrap pyrolysis recycling by steaming way: heat-mass balance solutions and developments / U. Kalitko, M. Chun Yao Wu // Pyrolysis: Types, Processes. Pyrolysis: Types, Processes, Industrial Sources and Products. – NY: Nova Science Publishers, 2009. – P. 79–115.
4. Петренко, Т. В. Пиролиз резиновой крошки / Т. В. Петренко, Ю. А. Новичков // Твердые бытовые отходы. – 2007. – Т. 4, № 10. – С. 6–9.
5. Anku, W. Phenolic Compounds in Water: Sources, Reactivity, Toxicity and Treatment Methods / W. Anku, M. Mamo, P. Govender // Phenolic Compounds – Natural Sources, Importance and Applications. – 2017. – P. 419–443. <https://doi.org/10.5772/66927>
6. Ложечник, А. В. Исследование пиролиза резины в шнековом реакторе / А. В. Ложечник, В. В. Савчин // ИФЖ. – 2016. – Т. 89, № 6. – С. 1504–1508.
7. Лещев, С. М. Метод групповых инкрементов как способ обогащения данных по экстракции органических веществ и оценки влияния внутримолекулярных эффектов на их экстракцию из водных растворов / Лещев С. М., Зайцель А. В., Заяц М. Ф. // Химия новых материалов и биологически активных веществ: под ред. Д. В. Свиридова. Минск : ИЦ БГУ. – 2016. – С. 135–151.
8. Экстракция органических неэлектролитов *n*-гексаном из водных растворов гидрофосфата и ацетата калия / С. М. Лещев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 149–155. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-149-155>
9. Лещев, С. М. Константы распределения низших спиртов, ацетона и этилацетата в системах *n*-гексан–водные растворы неорганических солей и природа эффекта высаливания / С. М. Лещев, М. Ф. Заяц // Журн. физ. химии. – 2012. – Т. 86, № 6. – С. 1072–1076.
10. Pyrolytic oil on the basis of wood and the antioxidant properties of its water-soluble and -insoluble fraction / G. Dobeles [et al.] // J. Anal. Appl. Pyrolysis. – 2009. – Vol. 85. – P. 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.12.006>

11. Rofiqul, M. Innovation in Pyrolysis Technology for Management of Scrap Tire: Solution of Energy and Environment / M. Rofiqul Islam, M. Parveen, H. Haniu, M. R. Islam Sarker International // J. of Environmental Science and Development. – 2010. – Vol. 1, N 1. – P. 89–96. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2010.v1.18>
12. Заяц, М. Ф. Хромато-распределительный метод идентификации пестицидов в их смесях и сельскохозяйственной продукции / М. Ф. Заяц, С. М. Лещев // Журн. аналит. химии. – 2018. – Т. 73, № 5. – С. 377–388.

References

1. 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>
2. Nkosi N., Muzenda E. A review and discussion of waste tyre pyrolysis and derived products proceedings. *The World Congress on Engineering–2014. Vol. II*. London, U.K., July 2014, pp. 979–985.
3. Kalitko U., Chun Yao Wu M. Tire scrap pyrolysis recycling by steaming way: heat-mass balance solutions and developments. Pyrolysis: Types, Processes. *Pyrolysis: Types, Processes, Industrial Sources and Products*. NY, Nova Science Publishers, 2009, pp. 79–115.
4. Petrenko T. V., Novichkov Yu. A. Pyrolysis of rubber crumb. *Tverdye bytovye othody* [Municipal Solid Waste], 2007, vol. 4, no. 10, pp. 6–9 (in Russian).
5. Anku W., Mamo M., Govender P. Phenolic Compounds in Water: Sources, Reactivity, Toxicity and Treatment Methods. *Phenolic Compounds – Natural Sources, Importance and Applications*, 2017, pp. 419–443. <https://doi.org/10.5772/66927>
6. 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>
7. Leshchev S. M., Zajdel' A. V., Zayats M. F. Group increment method as a way of enriching data on the extraction of organic substances and assessing the effect of intramolecular effects on their extraction from aqueous solutions. *Himiya novykh materialov i biologicheskii aktivnykh veshchestv* [Chemistry of new materials and biologically active substances]. Minsk, BSU Publishing Center, 2016, pp. 135–151 (in Russian).
8. Leshchev S. M., Mikhniuk O. N., Nemkevich A.V., Furs S. F. Extraction of organic non-electrolytes with n-hexane from aqueous solutions of dipotassium phosphate and potassium acetate. *Vestsi Natsyional'noi akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 149–155 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-149-155>
9. Leshchev S. M., Zayats M. F. Distribution constants of lower alcohols, acetone, and ethyl acetate in n-hexane-aqueous solutions of inorganic salt systems and the nature of the salting-out effect. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2012, vol. 86, no. 6, pp. 1072–1076. <https://doi.org/10.1134/s0036024412060167>
10. Dobelev G., Dizhbite T., Urbanovich I., Andersone A., Ponomarenko J., Telysheva G. Pyrolytic oil on the basis of wood and the antioxidant properties of its water-soluble and -insoluble fraction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2009, vol. 85, pp. 81–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.12.006>
11. Rofiqul Islam M., Parveen M., Haniu H., Islam Sarker M. R. Innovation in Pyrolysis Technology for Management of Scrap Tire: Solution of Energy and Environment. *Journal of Environmental Science and Development*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 89–96. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2010.v1.18>
12. Zayats M. F. Leshchev S. M. A Distribution Chromatography Method for the Identification of Pesticides in Their Mixtures and Agricultural Products. *Journal of analytical chemistry*. 2018, vol. 73, no. 5, pp. 486–496. <https://doi.org/10.1134/s1061934818050143>

Информация об авторах

Лещёв Сергей Михайлович – д-р хим. наук, профессор. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 4, 220000, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Leschev.sergey54@gmail.com

Генарова Татьяна Николаевна – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, Национальная академия наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь); аспирант Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская, 4, 220000, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru

Савчин Василий Васильевич – канд. техн. наук, зав. лаб. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, Национальная академия наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sauchyn@itmo.by

Леончик Александр Игоревич – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, Национальная академия наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Ital661@mail.ru

Information about the authors

Sergei M. Leschev – D. Sc. (Chemistry), Professor. Belarusian State University (4, Leningradskaya Str., 220000, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Leschev.sergey54@gmail.com

Tatsiana M. Henarava – Researcher. A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Science of Belarus (15, Brovki Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). Postgraduate Student, Belarusian State University (4, Leningradskaya Str., 220000, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru

Vasili V. Sauchyn – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Science of Belarus (15, Brovki Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sauchyn@itmo.by

Aleksandr I. Liavonchyk – Researcher. A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Science of Belarus (15, Brovki Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Ital661@mail.ru