

ISSN 1561-8331 (Print)

ISSN 2524-2342 (Online)

УДК 542.61

<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-1-38-45>

Поступила в редакцию 26.06.2018

Received 26.06.2018

С. М. Лещев¹, Т. Н. Генарова^{1,2}, В. В. Грушевский², О. Г. Пенязьков², Т. А. Чернова³¹Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь³Институт биоорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ПОЛЯРНОГО РАСТВОРИТЕЛЯ НА ЭКСТРАКЦИЮ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ ГЕКСАНА И ГЕКСАНОВЫХ РАСТВОРОВ ПИРОЛИЗНЫХ ПРОДУКТОВ

Аннотация. Изучена экстракция полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), содержащих от двух до шести циклов в молекуле, как сращенных, так и изолированных, ранее не исследованными системами *n*-гексан – полярный органический растворитель: пропиленгликоль, триэтиленгликоль, тетраэтиленгликоль, сульфолан и смеси диметилформамида с водой. Исследована экстракция некоторых ранее не изученных ароматических углеводородов, часто встречающихся в пиролизных смесях: инден, 2-метилнафталин, бифенил, 2-этилнафталин, 2-этилнафталин, бифенилен, дифенилметан системами *n*-гексан–полярный органический растворитель. Найдено, что зависимости констант распределения от строения молекул ПАУ и природы полярного растворителя имеют общий характер и дополняют установленные ранее закономерности. Предложены наиболее эффективные и селективные растворители для извлечения ПАУ из пиролизных смесей.

Ключевые слова: экстракция, полициклические ароматические углеводороды, гликоли, полярный растворитель

Для цитирования. Влияние природы полярного растворителя на экстракцию полициклических ароматических углеводородов из гексана и гексановых растворов пиролизных продуктов / С. М. Лещев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 38–45. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-1-38-45>

S. M. Leschev¹, T. M. Henarava^{1,2}, U. U. Hrusheuski², O. G. Peniazkov², T. A. Chernova³¹Belarusian State University, Minsk, Belarus²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus³Institute of Bioorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

INFLUENCE OF THE POLAR SOLVENT NATURE ON THE EXTRACTION OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS FROM HEXANE AND HEXANE SOLUTIONS OF PYROLYSIS PRODUCTS

Abstract. Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) containing from two till six cycles in the molecule, both sequestered and isolated, with previously unexplored *n*-hexane – polar organic solvent systems: propylene glycol, triethylene glycol, tetraethylene glycol, sulfolane and mixtures of dimethylformamide with water has been studied. Extraction of some previously unexplored aromatic hydrocarbons often presented in pyrolysis mixtures (indene, 2-methylnaphthalene, biphenyl, 2-ethylnaphthalene, 2-ethylnaphthalene, biphenylene, diphenylmethane) in *n*-hexane-polar organic solvent systems has been studied as well. The dependences of the distribution constants on the structure of PAH molecules and the nature of the polar solvent were found to complement the previously established patterns. The most effective and selective solvents for PAHs extraction from pyrolysis mixtures have been suggested.

Keywords: extraction, polycyclic aromatic hydrocarbons, glycols, polar solvent

For citation. Leschev S. M., Henarava T. M., Hrusheuski U. U., Peniazkov O. G., Chernova T. A. Influence of the polar solvent nature on the extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from hexane and hexane solutions of pyrolysis products. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 38–45 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-1-38-45>

Введение. Ароматические углеводороды – исходное сырье для промышленного получения различных органических веществ [1]. Полициклические ароматические углеводороды образуются в результате многих высокотемпературных процессов, в частности при пиролизных процессах и неполном сгорании органических веществ и обладают высокой токсичностью [2–5]. Изучение их экстракции полярными растворителями из разных пиролизных объектов является весьма актуальным, поскольку результаты исследования позволят определить наиболее перспективные растворители для концентрирования и извлечения ПАУ из пиролизных смесей, а также для

очистки различных объектов от токсичных полиароматических углеводородов. Кроме того, предлагаемые в статье результаты исследования экстракции ПАУ полярными органическими растворителями позволят внести дополнения в существующий банк данных по их константам распределения.

Цель данной работы – исследование закономерностей экстракции ПАУ ранее не исследованными полярными растворителями и выяснение возможности селективного и эффективного извлечения аренов из модельных гексановых растворов, а также пиролизных смесей.

Материалы и методы исследования. В системах *n*-гексан–полярный растворитель определены константы распределения 23 полициклических ароматических углеводородов как модельных, так и содержащихся в пиролизных смесях. В качестве полярной фазы использовали изученные ранее этиленгликоль (ЭГ), ацетонитрил (АН), диметилсульфоксид (ДМСО), диметилформамид (ДМФА); и ранее не исследованные диэтиленгликоль (ДЭГ), триэтиленгликоль (ТрЭГ), пропиленгликоль (ПГ), тетраэтиленгликоль (ТЭГ), сульфолан (Сульф), смесь диметилформамида с 5 и 10 об.% воды (ДМФА_5, ДМФА_10).

В качестве объекта исследования использовали многокомпонентный стандартный раствор ПАУ (аценафтен, аценафтилен, антрацен, бенз(а)антрацен, бенз(г,х,и)перилен, бензо(а)пирен, бенз(б)флуорантен, бенз(к)флуорантен, дибенз(а,х)антрацен, индено(1,2,3-с,д)пирен, нафталин, пирен, фенантрен, флуорантен, флуорен, хризен), состоящий из смеси бензол : дихлорметан (50:50), который упаривали досуха и затем растворяли в гексане. Из продуктов пиролиза низкотемпературного каталитического разложения пропан-бутановой смеси на стадии синтеза углеродных наноматериалов [6] была исследована экстракция следующих ароматических соединений: инден, 2-метилнафталин, бифенил, 2-этилнафталин, 2-этилнифталин, бифенилен, дифенилметан. Вещества из пиролизных смесей поглощали *n*-гексаном. Гексановые растворы углеводородов экстрагировали полярным органическим растворителем и рассчитывали константы распределения веществ (*P*) согласно методике, описанной в работе [7].

Температура экстракции – 20 ± 1 °С, за исключением системы с использованием сульфолана, где температура была 30 ± 1 °С. Время достижения экстракционного равновесия для АН, сульфолана, ДМФА, ДМСО, смеси ДМФА с 5 и 10 об.% воды составляло 3–5 мин; для более вязких жидкостей ЭГ, ПГ, ДЭГ, ТрЭГ, ТЭГ – 10–15 мин. Погрешности результатов в величинах константы распределения не превышали ± 20 %, а сами величины *P* для изученных ранее веществ хорошо согласовывались с литературными данными [7, 8]. Инкременты метиленовой и винильной групп взяты из работы [9].

Идентификацию и количественное определение ПАУ в гексановых растворах проводили с использованием газового хроматомакс-спектрометра Agilent Technologies 7890A/5975С (США) с капиллярной колонкой DB-5MS (30 м × 0,25 мм × 0,25 мкм). Газ-носитель: гелий (скорость потока – 1 мл/мин). Объем вводимой пробы – 1 мкл. Условия хроматографирования: температура термостата с момента ввода пробы повышалась от 80 до 300 °С со скоростью 10 °С/мин, затем выдерживалась в течение 20 мин. Параметры масс-селективного детектора: ионизация электронным ударом, энергия ионизации – 70 эВ, температура ионного источника – 230 °С; температура квадруполя – 150 °С. В случае анализа ПАУ, содержащихся в пиролизных смесях, идентификацию соединений проводили по временам удерживания веществ с помощью библиотеки масс-спектров NIST98 в режиме полного сканирования масс-детектора. Для повышения избирательности и чувствительности метода при анализе модельных ПАУ хроматографирование экстрактов проводили при работе масс-селективного детектора в режиме мониторинга выбранных ионов [10, 11].

Результаты и их обсуждение. *Экстракция модельных ПАУ.* Достаточно хорошо изучена экстракция ПАУ диметилформамидом (ДМФА), диметилсульфоксидом (ДМСО), этиленгликолем (ЭГ) и ацетонитрилом (АН) [7, 8]. В настоящей работе мы дополнили данные и провели экстракцию модельных ПАУ ранее не исследованными полярными растворителями.

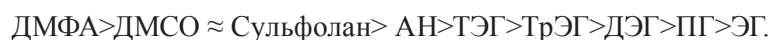
Из табл. 1 видно, что величина константы распределения существенным образом зависит и от природы ароматического углеводорода, и от типа полярного растворителя. Исходя из величин констант распределения, можно составить следующий ряд роста сродства углеводорода к полярной фазе:

Таблица 1. Значения констант распределения модельных ароматических соединений в экстракционных системах *n*-гексан – полярная фаза

Table 1. Distribution constants of model aromatic compounds in hexane – polar phase extraction systems

Вещество I_{CH_2}	ЭГ*	ПГ	ДЭГ	ТрЭГ	ТЭГ	АН*	ДМФА*	ДМФА_5	ДМФА_10	ДМСО*	Сульф
	0,30	0,25	0,23	0,21	0,18	0,13	0,11	0,15	0,19	0,20	0,21
Нафталин	9,5	6,33	1,81	1,51	1,21	0,67	0,29	0,61	0,89	0,50	0,54
Аценафтилен	4,8	3,20	0,91	0,76	0,61	0,29	0,17	0,39	0,58	0,24	0,28
Аценафтен	16	10,7	3,05	2,54	2,03	0,56	0,46	1,07	1,63	0,61	0,74
Флуорен	6,9	4,60	1,31	1,10	0,88	0,52	0,18	0,60	0,94	0,45	0,24
Фенантрен	11	7,33	2,10	1,75	1,40	0,8	0,11	0,31	0,49	0,31	0,29
Антрацен	15	10,0	2,86	2,38	1,90	1,0	0,17	0,65	0,88	0,40	0,25
Флуорантен	15	10,0	2,86	2,38	1,90	0,49	0,18	0,47	0,64	0,29	0,33
Пирен	14	9,33	2,67	2,22	1,78	0,52	0,11	0,44	0,59	0,27	0,17
Бенз(а) антрацен	10	6,67	1,90	1,59	1,27	0,62	0,09	0,29	0,39	0,18	0,19
Хризен	7,6	5,07	1,45	1,21	0,97	0,53	0,06	0,18	0,24	0,11	0,12
Бенз(б) флуорантен	8,6	5,73	1,64	1,37	1,09	0,24	0,09	0,26	0,35	0,16	0,17
Бенз(к) флуорантен	8,7	5,80	1,66	1,38	1,10	0,26	0,10	0,31	0,42	0,19	0,20
Бенз(а)пирен	8,4	5,60	1,60	1,33	1,07	0,24	0,08	0,16	0,22	0,10	0,12
Индено(1,2,3- с, d) пирен	8,2	5,47	1,56	1,30	1,04	0,26	0,08	0,23	0,31	0,14	0,15
Дибенз(а, h) антрацен	8,9	5,93	1,70	1,41	1,13	0,26	0,10	0,18	0,24	0,11	0,15
Бенз(г, h, i) перилен	8,5	5,67	1,62	1,35	1,08	0,31	0,10	0,24	0,33	0,15	0,17

Примечание. *Данные из работы [1].



Изученные растворители в соответствии с результатами работы [7] можно разделить на следующие группы: гликоли без эфирной группы – ЭГ и ПГ; гликоли с эфирной группой – ДЭГ, ТрЭГ и ТЭГ; апротонный растворитель – АН; полярные растворители с ярко выраженными электронодонорными и одновременно электроноакцепторными свойствами – ДМФА, ДМСО, сульфолан, смесь ДМФА с 5 и 10 об.% воды.

Величина константы распределения аренов в первом приближении является функцией инкремента метиленовой группы I_{CH_2} (сольвофобного эффекта растворителя [9, 12]), особенно в группе подобных растворителей. Рассмотрим системы с участием диолов (ЭГ и ПГ), у которых при переходе от первого растворителя ко второму инкремент метиленовой группы по понятным причинам уменьшается, что ведет к падению величин P . Однако значения P остаются достаточно высокими и не существует однозначной зависимости изменения величины P от числа циклов в молекуле арена. ЭГ, ПГ – растворители, наименее активно сольватирующие ароматические соединения, ввиду их сильной самоассоциации и отсутствием в их молекулах способных к π -комплексобразованию участков с молекулами ароматических соединений. Для данной группы растворителей характерно максимальное значение констант распределения, т. е. ЭГ и ПГ являются наименее эффективными растворителями для извлечения ПАУ.

Для второй ранее не изученной группы растворителей – ДЭГ, ТрЭГ и ТЭГ – характерно заметное падение величины P . Видно, что появление эфирного кислорода в молекуле гликоля приводит к заметному падению P по сравнению с ЭГ и ПГ. С ростом числа циклов в молекуле ароматического соединения здесь также нет четкой зависимости константы распределения от числа циклов в молекуле ПАУ. Для ТЭГ по сравнению с ДЭГ наблюдается падение величины P , которое является ощутимым в силу заметного падения I_{CH_2} . У данной группы растворителей эффективность

извлечения гораздо выше, чем у ЭГ и ПГ, но величина P больше 1, поэтому они недостаточно эффективны для извлечения ПАУ.

Таким образом, для группового извлечения ПАУ из углеводородных растворов гликоли использовать нерационально, поскольку их константы распределения намного выше ДМСО, ДМФА и сульфолана. В случае полярного апротонного растворителя – ацетонитрила также нет четкой зависимости между значением P и числом циклов в молекуле арена, хотя P достаточно низки в силу небольшой величины I_{CH_2} .

К четвертой группе растворителей с так называемым «обращенным» рядом экстрагируемости [8, 13, 14] относятся сульфолан, ДМСО и ДМФА, для которых P уменьшается в зависимости от числа циклов в молекуле ароматического соединения, у которых P от нафталина к бензо(g,h,i) перилену уменьшается в 3 раза. Это объясняется ярко выраженными электронодонорными и одновременно электроакцепторными свойствами растворителей, вследствие чего с участием этих растворителей могут протекать реакции π -комплексобразования с молекулами аренов. При этом электроакцепторные центры имеют большой размер и легко поляризуемы, что способствует π -комплексобразованию с π -электронной плотностью ПАУ. Интересно, что введение небольшого количества воды 5 и 10 об.% в ДМФА вызывает существенный рост инкремента метиленовой группы и определенное увеличение величины константы распределения, но зависимость P от числа циклов в молекуле арена остается прежней. Таким образом, система n -гексан – смесь ДМФА с 10 об.% воды по величинам I_{CH_2} является приближенной моделью ДМСО, хотя и заметно уступает ему по величинам P . Следует отметить, что ДМСО, сульфолан и смесь ДМФА с 10 об.% воды характеризуются высокой селективностью разделения аренов от алифатических углеводородов исходя из их I_{CH_2} [9].

Известно, что конденсированные ароматические соединения с линейным типом сочленения сольватируются полярными органическими растворителями несколько хуже, чем арены с угловым типом сочленения колец в молекуле арена. Влияние типа сочленения циклов в молекулах ароматического соединения на значение P описано в работе [8]. Данное явление согласуется с полученными данными (см. хризен – бенз(а)антрацен; нафталин – антрацен – фенантрен – бензо(а)антрацен – хризен).

Таким образом, закономерности экстракции ПАУ, установленные с применением метода газовой хроматографии, находятся в полном согласии с результатами работ [7, 8, 12], которые были получены методами фотометрии и высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектором. Поэтому они дополняют и подтверждают их.

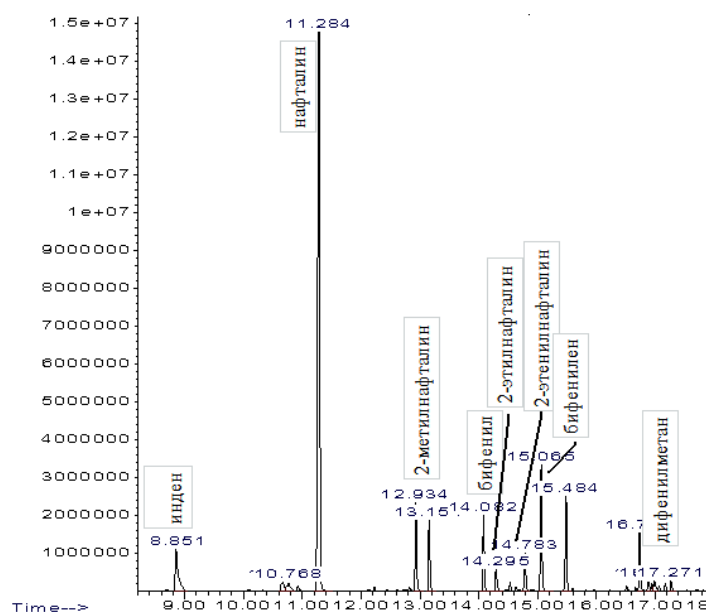


Рис. 1. Хроматограмма гексанового раствора пиролизной смеси до экстракции полярным растворителем

Fig. 1. Chromatogram of hexane solution of pyrolysis mixture before extraction with polar solvent

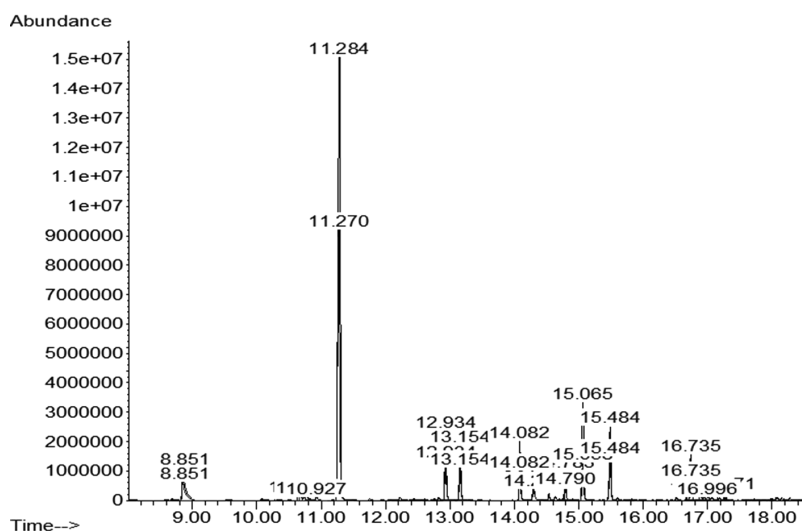


Рис. 2. Отрезок наложенных хроматограмм гексановых растворов пиролизной смеси до и после экстракции ДМСО
 Fig. 2. Segment of superposed chromatograms of hexane solutions of pyrolysis mixture before and after extraction with dimethylsulfoxide

Экстракция гексановых растворов пиролизных продуктов. Рассмотрим результаты экстракции ранее не изученных углеводов из пиролизных смесей указанными выше полярными органическими растворителями. Пиролизная смесь содержит 16 упомянутых выше углеводов и относительное содержание данных ПАУ в смеси составляет ~ 11 % от общего числа интегрированных площадей пиков веществ хроматограммы. Состав пиролизной смеси (рис. 1) следующий (%): инден (6,9), нафталин (47,2), 2-метилнафталин (10,3), бифенил (5,1), 2-этилнафталин (1,8), 2-этилнафталин (3,2), бифенилен (7,28), дифенилметан (1,9). Типичные хроматограммы гексановых растворов продуктов пиролиза пропан-бутановой смеси до и после экстракции ДМСО показаны на рис. 2. Вещества с относительным содержанием в пиролизной смеси менее 1 % нами не рассматривались.

Из рис. 2 видно, что после экстракции полярным растворителем убыль площадей пиков веществ находится в соответствии с их величинами констант распределения. Достоинством экстракции является то, что в спорных случаях при идентификации соединений в сложных и многокомпонентных пиролизных смесях применение экстракции позволяет по убыли вещества в углеводородной фазе в соответствии с *P* определить природу соединения и более достоверно идентифицировать вещества при близких временах удерживания. Эта пиролизная смесь состоит из небольшого числа соединений (табл. 2), поэтому данной проблемы не возникает. Значения в таблице представляют собой отношение (в %) площади пика вещества к общей площади интегрированных компонентов хроматограммы.

Таблица 2. Значения констант распределения основных соединений, содержащихся в гексановых растворах пиролизных смесей в экстракционных системах *n*-гексан – полярная фаза

Table 2. Distribution constants of basic compounds present in hexane solutions of pyrolysis mixture in hexane – polar phase extraction systems

Вещество	ЭГ	ПГ	ДЭГ	ТрЭГ	ТЭГ	АН	ДМФА	ДМФА_5	ДМФА_10	ДМСО	Сульф
Инден	5,91	3,94	1,31	1,64	1,97	0,80	0,53	0,65	0,88	0,43	0,64
2-метилнафталин	7,02	4,68	1,56	1,95	2,34	0,89	0,44	0,63	0,95	0,43	0,58
Бифенил	14	3,36	1,12	1,40	1,68	0,68	0,31	0,46	0,73	0,59	0,58
2-этилнафталин	9,72	6,48	2,16	2,70	3,24	1,13	0,52	0,85	1,47	0,55	0,76
2-этилнафталин	3,84	2,56	0,85	1,07	1,28	0,66	0,22	0,37	0,61	0,23	0,32
Бифенилен	1,53	1,02	0,34	0,43	0,51	0,56	0,19	0,27	0,41	0,18	0,22
Дифенилметан	10,1	6,74	2,25	2,81	3,37	1,75	0,68	0,90	1,08	0,53	1,23

Характер изменения P замещенных нафталинов при появлении в них заместителей находится в полном соответствии с принципом аддитивности энергии Гиббса распределения [9]. В соответствии с ним мы обнаружили, что введение заместителя в молекулу арена приводит к росту величины $\lg P$ на значение логарифма инкремента соответствующей группы: метиленовой, этильной и винильной групп (см. нафталин – 2-метилнафталин – 2-этилнафталин – 2-этилнафталин). Таким образом, в случае замещенных аренов можно с удовлетворительной точностью прогнозировать константы распределения соединений с несколькими функциональными группами. В результате полученных данных можно сделать вывод о перспективности использования экстракционных систем на основе ДМФА, ДМСО, сульфолана, смеси ДМФА с 10 об.% воды для извлечения ароматических углеводородов и их углеводородных растворов из пиролизных смесей.

Заключение. Показано, что экстракция ПАУ полярным растворителем является удобным и эффективным способом селективного извлечения токсичных многокольчатых аренов из различных объектов.

Изучен новый класс растворителей – гликоли с эфирной группой – ДЭГ, ТрЭГ и ТЭГ и выявлены закономерности экстракции ароматических углеводородов этими растворителями. В целом степень извлечения аренов ДЭГ, ТрЭГ и ТЭГ гораздо выше, чем у ЭГ и ПГ, но они остаются недостаточно эффективными для извлечения ПАУ, так как значение константы распределения выше единицы. Наиболее селективные и эффективные растворители – ДМФА, ДМСО, сульфолан можно использовать для очистки пиролизных смесей от канцерогенных ароматических углеводородов. Кроме того, ДМСО ввиду дороговизны и нестабильности можно заменить на сульфолан, смесь ДМФА с 10 об.% воды.

Список использованных источников

1. Химическая энциклопедия: в 5 т. / редкол.: М. Кнунянц. – М.: Сов. Энцикл. – 1988. – Т. 1. – 519 с.
2. Ровинский, Ф. Я. Фоновый мониторинг полициклических ароматических углеводородов / Ф. Я. Ровинский, Т. Я. Теплицкая, Т. А. Алексеева. – Л.: Гидрометеоиздат. – 1988 – 224 с.
3. Комплексный характер влияния полициклических ароматических углеводородов на метаболические процессы как важный фактор, определяющий особенности их канцерогенной активации / А. Г. Сыса [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2014. – Т. 58, № 1. – С. 53–56.
4. Benzo(a)pyrene, benzo(a)anthracene, and dibenzo(a, h)anthracene emissions from coal and waste tire energy generation at atmospheric fluidized bed combustion (AFBC) / A. Mastral [et al.] // *Env. Sci. & Tech.* – 2001. – Vol. 35, N 13. – P. 2645–2649. <https://doi.org/10.1021/es0015850>
5. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in environmental samples: a critical review of gas chromatographic (GC) methods / D. Poster [et al.] // *Anal. Bioanal. Chem.* – 2006. – Vol. 386, N 4. – P. 859–881. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0771-0>
6. Состав отходящих газов при каталитическом синтезе углеродных наноматериалов при пиролизном разложении пропан-бутановой смеси / Т. Н. Генарова [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 685–693. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-685-693>
7. Экстракция полициклических ароматических углеводородов полярными органическими растворителями и ионными жидкостями / С. М. Лещев [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2013. – № 3. – С. 45–49.
8. Лещев, С. М. Сравнительная оценка сольватирующей способности растворителей различной природы по отношению к конденсированным ароматическим углеводородам / С. М. Лещев, А. В. Синькевич // Журн. прикл. хим. – 2003. – Т. 76. – С. 1522–1527.
9. Лещев С. М. О количественном критерии прочности пространственной структуры растворителей / С. М. Лещев, Е. М. Рахманько // ЖСХ. – 1990. – Т. 31, № 6. – С. 136–138.
10. Охрана окружающей среды и природопользование. Мониторинг окружающей среды. Выбросы от стационарных источников. «Определение полициклических ароматических углеводородов в газах и на частицах»: СТБ 17.13.05-04-2008 / ISO 11338-2:2003 – Минск : Стандарт-информ, 2008. – 19 с.
11. Quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) found in gas and particle phases from pyrolytic processes using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) / N. E. Sánchez [et al.] // *Fuel.* – 2013. – Vol. 107. – P. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.065>
12. Экстракционные системы на основе полярных неводных растворителей и их применение для разделения, концентрирования и последующего определения органических соединений / С. М. Лещев [и др.] // Журн. аналит. химии. – 1991. – Т. 46, № 7. – С. 1286–1292.

13. Лещев, С. М. Сравнительная оценка эффективностей структурообразования и дисперсионных взаимодействий в органических растворителях различной природы и полярности / С. М. Лещев, Н. П. Новик // Журн. структур. химии. – 1999. – Т. 40, № 3. – С. 514–519.

14. Leschev, S. M. Regularities of extraction in systems on the basis of polar organic solvents and use of such systems for separation of important hydrophobic substances / S. M. Leschev // Ion exchange and solvent extraction. – 2001. – Vol. 15. – P. 295–330.

References

1. Knunyanc M. (ed.). *Encyclopedia of chemistry. Vol. 1.* Moscow, Sovetskaya Encyclopedia Publ., 1988. 519 p. (in Russian).

2. Rovinskii F. Ya., Teplitskaya T. Ya., Alekseeva T. A. *Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons.* Leningrad, Gidrometioizdat Publ., 1988. 224 p. (in Russian).

3. Sysa A. G., Panibrat O. V., Babenko A. S., Shabunya P. S. The complex nature of the polycyclic aromatic hydrocarbon influence on metabolic processes as an important factor determining the characteristics of their carcinogenic activation. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2014, vol. 58, no. 1, pp. 53–56 (in Russian).

4. Mastral A., Callén M., García T., Lopez M. Benzo(a)pyrene, benzo(a)anthracene, and dibenzo(a, h)anthracene emissions from coal and waste tire energy generation at atmospheric fluidized bed combustion (AFBC). *Environmental Science & Technology*, 2001, vol. 35, no. 13, pp. 2645–2649. <https://doi.org/10.1021/es0015850>

5. Poster D. L., Schantz M. M., Sander L. C., Wise S. A. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in environmental samples: a critical review of gas chromatographic (GC) methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006, vol. 386, no. 4, pp. 859–881. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0771-0>

6. Henarava T. M., Hrusheuski U. U., Krivosheev P. M., Penyazkov O. G., Buiakov I. F., Dmitrenko Yu. M., Zhdanok S. A., Chernukho A. P. The composition of the exhaust gases in catalytic synthesis during pyrolytic decomposition of propane-butane mixture. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 6, pp. 685–693 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-685-693>

7. Leshchev S. M., Antonchik V. V., Okaev E. B., Furs S. F. Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons by polar organic solvents and ionic liquids. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2013, no. 3, pp. 45–49 (in Russian).

8. Leshchev S. M., Sin'kevich A. V. Comparative evaluation of solvating ability of solvents of different nature with respect to condensed aromatic hydrocarbons. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2003, vol. 76, pp. 1483–1488. <https://doi.org/10.1023/b:rjac.0000012672.20129.30>

9. Leshchev S. M., Rahman'ko E. M. Quantitative criterion for the strength of a three-dimensional structure, in solvents. *Journal of Structural Chemistry*, 1990, vol. 31, no. 6, pp. 970–972. <https://doi.org/10.1007/bf00752176>

10. STB 17.13.05-04-2008 / ISO 11338-2:2003. *Environmental protection and nature management. Environmental monitoring. Emissions from stationary sources. "Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in gases and on particles"*. Minsk, Standart-inform Publ. 2008. 19 p. (in Russian).

11. Sánchez N. E., Salafrañca J., Callejas A., Millera A., Bilbao R., Alzueta M. Quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) found in gas and particle phases from pyrolytic processes using gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS). *Fuel*, 2013, vol. 107, pp. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.065>

12. Leshchev S. M., Rahman'ko E. M., Furs S. F., Romyancev I. Yu. Extraction systems based on polar non-aqueous solvents and their application for separation, concentration and subsequent determination of organic compounds. *Zhurnal analiticheskoi khimii = Journal of Analytical Chemistry*, 1991, vol. 46, no. 7, pp. 1286–1292 (in Russian).

13. Leshchev S. M., Novik N. P. Comparative estimation of the efficiency of structure formation and dispersion interactions in organic solvents of varying nature and polarity. *Journal of structural chemistry*, 1999, vol. 40, no. 3, pp. 424–427. <https://doi.org/10.1007/bf02700639>

14. Leschev S. M. Regularities of extraction in systems on the basis of polar organic solvents and use of such systems for separation of important hydrophobic substances. *Ion exchange and solvent extraction*, 2001, vol. 15, pp. 295–330.

Информация об авторах

Лещев Сергей Михайлович – д-р хим. наук, профессор, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 4, 220030, 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). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru

Information about the authors

Sergey M. Leschev – D. Sc. (Chemistry), Professor, Belarusian State University (4, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Leschev.sergey54@gmail.com

Tatsiana M. Henarava – Researcher, A. V. Luitkov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Science of Belarus (15, Brovki Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tatiana-susliako@mail.ru

Грушевский Владимир Владиславович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, ул. П. Бровки, 15, г. Минск, Республика Беларусь).

Пенязьков Олег Глебович – академик, д-р физ.-мат. наук, директор Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, Национальная академия наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Чернова Татьяна Андреевна – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник, Институт биоорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Купревича, 5/2, 220141, Минск, Республика Беларусь).

Uladzimir U. Hrusheuski – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Science of Belarus (15, Brovki Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Oleg G. Penyazkov – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director of the A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Science of Belarus (15, Brovki Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Tatiana A. Chernova – Ph. D. (Biology), Leading Researcher, Institute of Bioorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (5/2, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus).