



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11147

### **Новая неподвижная фаза на основе ионной жидкости для двумерной газовой хроматографии с высокой селективностью к ароматическим анализам**

**Михаил Вадимович Шашков<sup>1</sup>✉, Павел Алексеевич Долгушев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова» СО РАН, Новосибирск, Россия, shashkov@catalysis.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** Ионные жидкости являются уникальным классом веществ объединяющие свойства органической и неорганической материи. Они проявляют свойства органических полярных растворителей, и благодаря ионной структуре молекулы обладают такими свойствами как высокая вязкость и низкое давление насыщенных паров, что обычно свойственно неорганическим соединениям. Недавно было показано, что ряд ионных жидкостей обладает характеристиками, позволяющими использовать их в качестве неподвижных жидких фаз для капиллярной газовой хроматографии. В частности, одним из направлений в разработке новых колонок стало создание неподвижной жидкой фазы на основе ионной жидкости, которая демонстрирует повышенное разрешение при разделении ароматических и кислородсодержащих соединений. Проводя исследования в данном направлении, была создана данная работа, которая посвящена созданию и исследованию новой высокополярной капиллярной колонки с неподвижной жидкой фазой на основе бензил-акридиниевой ионной жидкости. Показано, что данная колонка обладает высокими показателями водородной связи и  $\pi$ - $\pi$  взаимодействий с точки зрения модели Абрахама. При этом, акридиниевая ионная жидкость являясь, как и аналогичные фазы на основе ионных жидкостей, высокополярной, проявляет повышенную селективность в удержании ароматических соединений (ароматические углеводороды, фенолы и подобные соединения) и большинству кислородсодержащих соединений и оснований в сравнении с алифатическими углеводородами. Это позволяет проводить разделения сложных смесей, включающих ароматические углеводороды и кислородсодержащие соединения. Также показана высокая термическая стабильность разработанной колонки, сравнимая с аналогами на основе хинолиниевых ионных жидкостей, но в отличие от них имеющая другую селективность, обусловленную более высокими значениями  $\pi$ - $\pi$  взаимодействий и водородной связи по донорному механизму. Это открывает новые перспективы для использования этой колонки и, вероятно, её аналогов, для разделения сложных смесей, содержащих полярные ароматические и кислородсодержащие соединения, особенно в двумерной хроматографии. Данные особенности были показаны на примере разделения сложной смеси методом двумерной газовой хроматографии, где данная колонка выступала в качестве второй колонки.

**Ключевые слова:** ионные жидкости, капиллярная хроматография, двумерная хроматография

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания института катализа СО РАН

**Для цитирования:** Шашков М.В., Долгушев П.А. Новая неподвижная фаза на основе ионной жидкости для двумерной газовой хроматографии с высокой селективностью к ароматическим анализам // *Сорбционные и хроматографические процессы. 2023. Т. 23, № 2. С. 236-243.* <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11147>

Original article

### **New ionic liquid based stationary phase for 2D gas chromatography with high selectivity to aromatic analytes**

**Mikhail V. Shashkov<sup>1</sup>✉, Pavel A. Dolgushev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Boreskov Institute of Catalysis, Novosibirsk, Russian Federation, shashkov@catalysis.ru<sup>✉</sup>



**Abstract.** Ionic liquids are a unique class of substances that combine the properties of organic and inorganic matter. They exhibit the properties of organic polar solvents, and due to the ionic structure of the molecules, they have such properties as high viscosity and low vapour pressure, which are usually characteristic of inorganic compounds. Recently, a number of ionic liquids have been shown to have characteristics that allow them to be used as stationary liquid phases for capillary gas chromatography. In particular, one of the directions in the development of new columns was the creation of a stationary liquid phase based on an ionic liquid, which demonstrates increased resolution in the separation of aromatic and oxygen-containing compounds. This study was performed by conducting research devoted to the creation and study of a new high-polarity capillary column with a stationary liquid phase based on benzyl-acridinium ionic liquid. It was shown that this column has high rates of hydrogen bonding and  $\pi$ - $\pi$  interactions in terms of the Abraham model. At the same time, acridinium ionic liquid, which is, like similar phases based on ionic liquids, highly polar, exhibits increased selectivity in retaining aromatic compounds (aromatic hydrocarbons, phenols and similar compounds) and most oxygen-containing compounds and bases in comparison with aliphatic hydrocarbons. This allows the separation of complex mixtures, including aromatic hydrocarbons, and oxygen-containing compounds. The high thermal stability of the developed column was also shown, comparable to analogues based on quinolinium ionic liquids, but unlike them, it has a different selectivity due to higher values of  $\pi$ - $\pi$  interactions and hydrogen bonding according to the donor mechanism. This opens up new prospects for the use of this column and, probably, its analogues, for the separation of complex mixtures containing polar aromatic and oxygen-containing compounds, especially in two-dimensional chromatography. These features were shown based on the example of the separation of a complex mixture by two-dimensional gas chromatography, where this column acted as the second column.

**Keywords:** ionic liquids, capillary chromatography, two-dimensional chromatography

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Catalysis of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Shashkov M.V., Dolgushev P.A. New ionic liquid based stationary phase for 2D gas chromatography with high selectivity to aromatic analytes. *Sorbtionnyye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(2): 236-243. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11147>

## Введение

Ионные жидкости (ИЖ) являются уникальным классом веществ, демонстрирующим свойства присущие органическим и неорганическим соединениям. Как правило, они состоят из органического катиона (например, алкил-имидазолий, алкил-аммоний, алкил-фосфоний) и органического или неорганического аниона ( $\text{NTf}_2^-$ ,  $\text{TfO}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{PF}_6^-$ ,  $\text{BF}_4^-$ , и др.) [1]. По этой причине, с одной стороны, ИЖ проявляют свойства органических полярных растворителей. С другой стороны, благодаря ионной структуре ИЖ обладают такими свойствами как высокая вязкость и низкое давление насыщенных паров, что характерно для неорганических соединений. Благодаря этим свойствам они нашли применение в областях, которые относятся к органическому синтезу, электрохимии (в основном в качестве электролитов для аккумуляторов), а также для процессов разделения, включая экстракцию и хроматографию [1-3]. Кроме того, некоторые из ИЖ нашли промышленное

применение. Недавно было показано, что ИЖ возможно использовать в качестве неподвижных жидких фаз (НЖФ) для капиллярной газовой хроматографии [4]. Кроме того, ИЖ обладают уникальными по сравнению с традиционными НЖФ разделительными свойствами, которые можно изменять в широких пределах путем варьирования структуры катионов и использования различных анионов [5].

Одним из направлений такого направленного изменения свойств является создание НЖФ на основе ИЖ, которые демонстрируют высокое разрешение ароматических соединений. Было показано, что новый класс катионов с конденсированной ароматической системой – алкил-хинолиниевые [6], по сравнению неконденсированными аналогами – пиридиновыми [5] позволяют значительно улучшить разделение ароматических соединений, к примеру, сложных продуктов пиролиза и автомобильного бензина. Такие свойства фаз могут быть перспективными при решении аналитических задач экологии,

в анализе пищевых продуктов, а также задач, связанных с анализом продуктов пиролиза, где необходимо разделение фенольных соединений в сложных полярных матрицах.

В настоящей работе реализуется подход, позволяющей далее эти преимущества углубить и достигнуть еще большего разрешения ароматических соединений. Для этого предложено использовать акридиновую систему. Акридиниевый катион, в отличие от хинолиниевых содержит не одно, а два бензольных кольца, что должно существенно увеличить  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействия. Кроме того, предлагается вместо алкильного использовать бензильный заместитель, который даст дополнительный вклад в увеличении разрешения ароматических соединений.

Данная работа посвящена исследованию свойств капиллярной колонки с новой неподвижной фазой на основе бензилакридиниевой ИЖ с бистрифлимидным анионом. Колонка охарактеризована с точки зрения полярности, селективности и термостабильности. Показана возможность колонки с данной фазой для решения задачи разделений сложной смеси методом двумерной хроматографии (ГХ×ГХ).

### Экспериментальная часть

**Реактивы.** Реактивы для синтеза: литий бис(трифторметилсульфонил)имид (LiNTf<sub>2</sub>) (99%, Acros), остальные AlfaAesar: акридин (98%), бромистый бензил (98%), 1,6-дибромгексан (97%),

1,9-дибромнонан (97%), 1,4-дибромбутан (97%). Растворители особой чистоты для синтезов и нанесения фазы: дихлорметан, этилацетат.

**Синтез ионных жидкостей.** ИЖ бензилакридиний бис(трифторметилсульфонил)имид (рис. 1) была синтезирована согласно процедуре, аналогичной описанной для алкилхинолиниевой ИЖ [6]. Синтезированная ИЖ охарактеризована с помощью <sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C ЯМР, что подтвердило целевую структуру и чистоту 97%.

<sup>1</sup>H NMR: 9.94 (s, 1H, H-9), 8.58 (d 8.4 Hz, 2H, H-1,8), 8.30 (pseudo-d 4Hz, 4H, H-3,4,5,6), 7.94 (m, 2H, H-2,7), 7.36 (m, 3H, meta-Ph, para-Ph), 7.08 (m, 2H, ortho-Ph), 6.58 (s, 2H, CH<sub>2</sub>);

<sup>13</sup>CNMR: 152.15 (CH,1C, C-9), 141.62 (C,2C, C-11,14), 140.28 (CH,2C, C-3,6), 132.48 (CH,2C, C-1,8), 132.40 (C,1C, Ph), 129.71 (CH,2C, meta-Ph), 129.04 (CH,1C, para-Ph), 128.24 (CH,2C, C-2,7), 126.82 (C,2C, C-12,13), 125.40 (CH,2C, ortho-Ph), 119.71 (CF<sub>3</sub>, q 321 Hz,2C), 117.91 (CH,2C, C-4,5), 54.42 (CH<sub>2</sub>,1C).

**Приготовление капиллярных колонок.** Колонки готовили с использованием статического метода низкого давления. Фазу наносили на капилляр из плавленного кварца с внутренним диаметром 0.25 мм, в качестве растворителя для ИЖ использовали дихлорметан [6]. Полярность и селективность оценивали на колонке с толщиной пленки 0.2 мкм и длиной 10 м. Тестирование колонок и измерение хроматографических характеристик проводили с помощью хроматографа Agilent 7890A с масс-

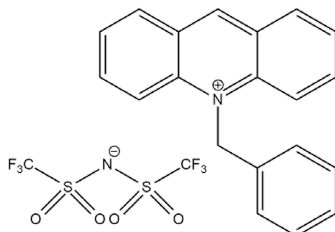


Рис. 1 Структурная формула бензилакридиний бис(трифторметилсульфонил)имид  
Fig. 1 Structural formula of Benzylacridinium bis(trifluoromethylsulfonyl)imide

спектрометрическим детектором (Agilent 7000B), температура детектора 250°C, электронная ионизация, режим сканирования 40-400 m/z, в качестве газ-носителя использовался гелий. Для получения разделения методом двумерной хроматографии приготовлена колонка с толщиной пленки 0.2  $\mu\text{m}$  и длиной 25 м

Измерение полярности и параметров модели Абрахама. Для измерений индекса полярности по Мак-Рейнольдсу проводили хроматографирование смеси тестовых веществ Мак-Рейнольдса при температуре 120°C: бензол, бутанол-1, пентанон-2, нитропропан-1, пиридин. Рефером мертвого времени служил n-пентан, для вычисления индексов Ковача измеряли удерживание нормальных углеводородов C<sub>10</sub>-C<sub>16</sub>. Значения полярности определяли в соответствии со шкалой полярности, использованной в [7], где за нулевое значение полярности принимается сквалан, за 100 – фаза SPB-IL100 (Supelco). Для расчета параметров модели Абрахама получали данные удерживания для 35 тестовых веществ, дескрипторы (E, S, A, B, L) для которых взяты из [8]. Температуры измерений: 100°C, 120°C, 140°C. Для расчета параметров модели (e, s, a, b, l) применялся метод множественной линейной регрессии с использованием ПО STATISTICA-10.0.228.8.

Исследование термической стабильности и получение разделений. Исследование термостабильности и получение примеров разделений проводили на хромато-масс-спектрометре Agilent 7000B с детектором на основе тройного квадруполя. Во всех случаях, скорость потока (He) составляла 0.8 см<sup>3</sup>/мин. Детектирование проводили в режиме сканирования в диапазоне масс 40-500 m/z. Энергия ионизации 70 эВ.

Для исследования термостабильности термостат колонок нагревали по программе 200°C (10 мин) – далее 3°C/мин до

250°C (10 мин), далее до 300°C (15 мин). Температура испарителя 300°C.

ГХ×ГХ – разделение газойля каталитического крекинга проведено при следующих условиях: первая колонка акридиниевая ИЖ 25 м x 0.25мм x 0.2  $\mu\text{m}$  вторая колонка – HP-5 5м x 0.25мм x 0.25 $\mu\text{m}$ . Температурная программа термостата колонок: 90°C (0мин), далее программирование со скоростью 3°C/мин до конечной температуры 300°C. Температура испарителя 300°C. Скорость потока через первую колонку 0.7 см<sup>3</sup>/мин, через вторую – 40 см<sup>3</sup>/мин.

### Обсуждение результатов

Чтобы произвести оценку разделительных свойства новых НЖФ, требуется их характеристика с точки зрения полярности и селективности. Система Мак-Рейнольдса [9] является наиболее распространенным и простым способом для оценки полярности фазы. Данная система позволяет сравнить полярность новой фазы с уже известными. При решении задач хроматографического анализа использование данного подхода оказывается очень удобным, особенно благодаря скорости его использования.

Для изучаемой в работе акридиниевой ИЖ полярность по Мак-Рейнольдсу оказалось равной 83 единицы. Это означает, что данная колонка является высокополярной. При этом, как оказалось, полярность данной ИЖ выше, чем для всех изученных ранее 6-метилхинолиниевых ИЖ (табл.1, последний столбец). Таким образом, можно сделать вывод, что данная фаза будет перспективна для создания колонок предназначенных для ряда задач, где требуется достигнуть высокой селективности среди полярных соединений.

Тем не менее, система Мак-Рейнольдса является сравнительной. Такой подход не обеспечивает достоверной оценки всех типов

Таблица 1. Параметры модели Абрахама (e, s, a, b, l) и полярность по Мак-Рейнольдсу бензил-акридиниевой ИЖ с сравнением с хинолиниевыми

Table 1. Abraham model parameters (e, s, a, b, l) and McReynolds polarity of benzyl-acridinium IL compared with quinolinium

Ионная жидкость	Температура (°C)	Параметры модели					Статистика		Полярность (P)
		e	s	a	b	l	k	F	
6MQHex [6]	100	0.12	1.65	1.32	0.33	0.50	0.999	4165	64
	120	0.09	1.62	1.18	0.23	0.45	0.999	3315	
	140	0.09	1.61	1.09	0.09	0.41	0.999	4057	
6MQBu [6]	100	0.26	1.59	1.29	0.45	0.47	0.999	2891	77
	120	0.23	1.58	1.15	0.41	0.42	0.999	2842	
	140	0.22	1.56	1.04	0.11	0.38	0.998	2575	
6MQPr [6]	100	0.36	1.60	1.39	0.63	0.47	0.999	4164	79
	120	0.27	1.70	1.28	0.59	0.37	0.999	3344	
	140	0.25	1.61	1.14	0.49	0.32	0.999	3034	
Benzyl Acrydine	100	0.41	1.19	1.40	0.90	0.43	0.999	2015	83
	120	0.39	1.17	1.25	0.80	0.39	0.999	1876	
	140	0.32	1.21	1.05	0.74	0.37	0.999	2023	

межмолекулярных взаимодействий со стороны фазы, отвечающих за удерживание различных классов веществ, что может приводить к некорректным оценкам. Исходя из этого, Михаелем Абрахамом была предложена модель линейной зависимости свободной энергии (ЛЗСЭ), которая учитывает индивидуальные вклады всех типов взаимодействий со стороны фазы в удерживание вещества [10].

В основе модели лежит предположение, что свободная энергия взаимодействия между веществом и фазой зависит линейно от набора индивидуальных типов взаимодействий. При заданной температуре вместо энергии используют логарифм константы распределения ( $K_L$ ):

$lgK_L = c + eE + sS + aA + bB + lL(1)$   
 где  $K_L$  – коэффициент распределения между подвижной и неподвижной фазой,  $c$  – модельная константа. Заглавные буквы (E, S, A, B, L), называемые дескрипторами, являются коэффициентами, учитывающие вклад в межмолекулярные взаимодействия со стороны аналитов. Маленькие буквы – параметры модели (учитывают вклад неподвижной фазы). Параметр (e)

отвечает за  $\pi$ - $\pi$  и  $n$ - $\pi$  взаимодействия, (s) – за диполь-дипольные (в том числе и индукционные). (a) и (b) являются оценкой вклада фазы в образование обратимой водородной связи, причем (a) отвечает за силы, где фаза выступает в качестве акцептора водорода, а (b) – в качестве донора. (l) учитывает дисперсионную составляющую межмолекулярных взаимодействий.

Данная система удобна не только как способ характеристики неподвижных фаз с точки зрения селективности к определенным классам соединений, но она также удобна как способ оценки различных типов взаимодействий, возникающих между ИЖ и взаимодействующими с ней молекулами. Результаты оценки бензил-акридинового ИЖ по Абрахаму в сравнении с ранее изученными хинолиниевыми представлены в табл. 1, где при температурах 100, 120, 140°C приведены параметры различных типов межмолекулярных взаимодействий, характерных для изученных ИЖ. Из таблицы 1 видно, что наибольшие значения имеют параметры дипольных взаимодействий (s) и водородной связи (a, b). Также значителен вклад  $\pi$ - $\pi$

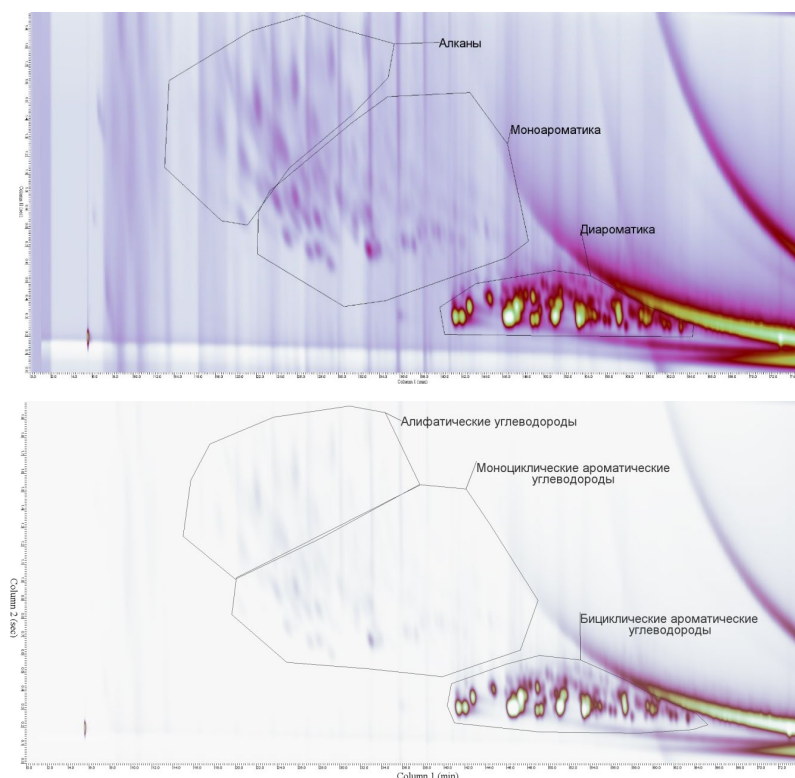


Рис. 2. Разделение газойля каталитического крекинга на колонке с бензил-акридиниевой ИЖ.  
Fig. 2. Separation of catalytic cracking gas oil on a column with benzyl-acridinium IL

взаимодействий (e). Можно наблюдать ряд важных отличий при сравнении изучаемой акридиниевой ИЖ с хинолиниевыми. В первую очередь более высокое разрешение ароматических соединений (e) и параметры водородной связи донорного типа (b). При этом для дипольных взаимодействий (s) характерны значительно более низкие значения. Из выше сказанного можно сделать вывод, что акридиниевая ИЖ являясь, как и аналоги высокополярной НЖФ, будет проявлять повышенную селективность при разделении ароматических соединений (ароматические углеводороды, фенолы и пр.), а также к большинству кислородсодержащих соединений и основаниям.

**Термостабильность.** Были проведены измерения уровня фонового тока колонки при нагреве её в диапазоне 200-250-300°C, чтобы сравнить свойства термостабильности исследуемой ИЖ с известными НЖФ. Были получены результаты, что при нагреве до 300°C не наблюдается

значительного увеличения фонового тока. Абсолютный уровень фонового тока при нагреве оказался сопоставим с 6-метилхинолиниевой ИЖ [6], для которой ранее было показано, что она является заведомо термостабильной до 300°C и пригодна для решения практических задач высокотемпературного разделения.

Подобная термическая стабильность необходима для разделения смесей нефтепродуктов, содержащих различные классы углеводородов. Пример такого разделения до максимальной температуры 300°C приведен на рис. 2. Можно увидеть, что использование в качестве первой колонки с бензил-акридиниевой ИЖ приводит к достижению хорошей селективности при разделении ароматических углеводородов, в частности бициклических ароматических углеводородов, которая составляет максимальную долю в данной смеси (табл. 2). К сожалению, эффективность для неароматических углеводородов, оказалась не столь высокой,

Таблица 2. Фракционный состав образца представленного на рис. 2.

Table 2. The fractional composition of the sample shown in Fig. 2.

Фракция	Алифатические УВ	Моноциклические ароматические УВ	Бициклические ароматические УВ
Бензиновая	0.00	0.00	0.00
Дизельная	15.85	19.04	58.77
ВГО	1.08	0.72	4.54
Общее содержание	16.93	19.75	63.31

что проявляется в виде размытия алифатических углеводородов. Вероятно, данную проблему можно решить более тщательным подбором условий, тем более что потенциал селективности позволяет значительно увеличить начальную температуру и скорость программирования.

### Заключение

Представленная ИЖ, синтезированная на основе бензил-акридиниевого катиона, является еще одной новой ступенью на пути разработки новых классов неподвижных фаз на основе ИЖ. Как и свои предшественники она обладает высокой полярностью, высокой термической стабильностью (до 300°C), но в отличие от них имеют другую

### Список литературы

1. Han X., Armstrong D.W. Ionic liquids in separations // *Acc. Chem. Res.* 2007. Vol. 40, no 11. P. 1079-1086.
2. Shashkov M.V., Sidelnikov V.N. A capillary gas chromatographic analysis of the characteristics of ionic liquid films // *J. Struct. Chem.* 2014. Vol. 55, no 5. P. 980-985.
3. Kolobova E., Kartsova L., Kravchenko A., Bessonova E. Imidazolium ionic liquids as dynamic and covalent modifiers of electrophoretic systems for determination of catecholamines // *Talanta.* 2018. Vol. 188, no May. P. 183-191.
4. Yao C., Anderson J.L. Retention characteristics of organic compounds on molten salt and ionic liquid-based gas chromatography stationary phases // *J. Chromatogr. A.* 2009. Vol. 1216, no 10. P. 1658-1712.
5. Шашков М.В., Сидельников В.Н.,

селективность, обусловленную более высокими значениями  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействий и водородной связи по донорному механизму. Это открывает новые перспективы для использования этой колонки и, вероятно, её аналогов, для разделения сложных смесей, содержащих полярные ароматические и кислородсодержащие соединения, особенно в двумерной хроматографии.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Заикин П.А. Селективность неподвижных фаз на основе пиридиниевых ионных жидкостей для капиллярной газовой хроматографии // *Журнал Физической Химии.* 2014. Т. 88, № 4. С. 714-719.

6. Shashkov M.V., Sidelnikov V.N., Bratchikova A.A. New Stationary Ionic Liquid Phases with Quinolinium Cations for Capillary Gas Chromatography // *Anal. Lett. Taylor&Francis.* 2019. Vol. 53, no 1. P. 84-101.

7. Supelco; Sigma-Aldrich. Supelco Ionic Liquid GC Columns: Introduction to the Technology // *Supelco Ion. Liq. GC Columns.* 2014. P. 42.

8. Ulrich S., Brown T.N., Watanabe N., Bronner G., Abraham M.H., Goss, K.-U. N. E. UFZ-LSER database v 3.2 [Internet]. Leipzig, Deutschland, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, 2017.



9. McReynolds W.O. Characterization of Some Liquid Phases // *J. Chromatogr. Sci.* 1970. Vol. 8, no 12. P. 685-691.

10. Abraham M.H., Poole C.F., Poole S.K. Classification of stationary phases and other materials by gas chromatography // *J. Chromatogr. A.* 1999. Vol. 842, no 1-2. P. 79-114.

### References

1. Han X., Armstrong D.W. Ionic liquids in separations. *Acc. Chem. Res.* 2007; 40(11): 1079-1086. <https://doi.org/10.1021/ar700044y>

2. Shashkov M.V., Sidelnikov V.N. A capillary gas chromatographic analysis of the characteristics of ionic liquid films. *J. Struct. Chem.* 2014; 55(5): 980-985 <https://doi.org/10.1134/S002247661405028X>

3. Kolobova E., Kartsova L., Kravchenko A., Bessonova E. Imidazolium ionic liquids as dynamic and covalent modifiers of electrophoretic systems for determination of catecholamines. *Talanta.* 2018; 188: 183-191. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.05.057>

4. Yao C., Anderson J.L. Retention characteristics of organic compounds on molten salt and ionic liquid-based gas chromatography stationary phases. *J. Chromatogr. A.* 2009; 1216(10): 1658-1712. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2008.12.001>

5. Shashkov M.V., Sidelnikov V.N.,

Zaikin P.A. Selectivity of stationary phases based on pyridinium ionic liquids for capillary gas chromatography. *Russian Journal of Physical Chemistry A.* 2014; 88: 717-721.

<https://doi.org/10.1134/S0036024414040268>

6. Shashkov M.V., Sidelnikov V.N., Bratchikova A.A. New Stationary Ionic Liquid Phases with Quinolinium Cations for Capillary Gas Chromatography. *Anal. Lett. Taylor&Francis.* 2019. 53(1): 84-101. <https://doi.org/10.1080/00032719.2019.1638393>

7. Supelco; Sigma-Aldrich. Supelco Ionic Liquid GC Columns: Introduction to the Technology. *Supelco Ion. Liq. GC Columns.* 2014; 42.

8. Ulrich S., Brown T.N., Watanabe N., Bronner G., Abraham M.H., Goss K.-U. N., E. UFZ-LSER database v 3.2 [Internet]. Leipzig, Deutschland, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung UFZ, 2017.

9. McReynolds W.O. Characterization of Some Liquid Phases // *J. Chromatogr. Sci.* 1970. Vol. 8, № 12. P. 685-691. <https://doi.org/10.1093/chromsci/8.12.685>

10. Abraham M.H., Poole C.F., Poole S.K. Classification of stationary phases and other materials by gas chromatography. *J. Chromatogr. A.* 1999; 842(1-2): 79-114. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(98\)00930-3](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00930-3)

### Информация об авторах / Information about the authors

**М.В. Шашков** – к.х.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова» СО РАН, Новосибирск, Россия

**П.А. Долгушев** – аспирант ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт катализа им. Г.К. Борескова» СО РАН, Новосибирск, Россия

**M.V. Shashkov** – Candidate of Chemical Sciences, Senior Scientist of Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center Institute of Catalysis. G.K. Boreskov SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: shashkov@catalysis.ru, ORCID: 0000-0001-9022-1525

**P.A. Dolgushev** – Ph.D. student of Federal State Budgetary Institution of Science "Federal Research Center Institute of Catalysis. G.K. Boreskov SB RAS Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: Dolgushevpa@catalysis.ru, ORCID: 0000-0002-7129-6254

Статья поступила в редакцию 1.06.2022; поступила после доработки 19.01.2023; одобрена после рецензирования 24.01.2023; принята к публикации 25.01.2023.  
The article was submitted 11.12.2022; received after revision on 19.01.2023; approved after reviewing 24.01.2023; accepted for publication 25.01.2023.