



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 543.544

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13050

Новые термостойкие пористые полимерные сорбенты – полинафтаilenбензимидазолы для газохроматографического разделения и концентрирования летучих веществ

Виктор Борисович Хабаров¹✉, Лариса Ивановна Панина²

¹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия,

Victor.khabarov2013@yandex.ru✉

²НИОКО «Биоэкомониторинг», Москва, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследования полимеров полинафтаilenбензимидазолов, синтезированных взаимодействием диангидрида 1, 4, 5, 8-нафтилентетракарбоновой кислоты с 3, 3', 4, 4'-тетрааминодифенилоксидом (ПНБИ-1), 3, 3', 4, 4'-тетрааминодифенилом (ПНБИ-2), 3, 3', 4, 4'-тетрааминодифенилсульфоном (ПНБИ-3) и 3, 3', 4, 4'-тетрааминобензофенононом (ПНБИ-4) в качестве термостойких пористых полимерных сорбентов для газохроматографического разделения и концентрирования летучих органических и неорганических соединений с температурой кипения от -56 до +400 °C. Температурный предел использования сорбентов ПНБИ-1-4 480-500 °C, удельная поверхность 20-30 м²/г.

Целесообразно использовать ПНБИ-1-4 для газохроматографического разделения органических соединений. Они характеризуются повышенной селективностью к разделению изомерных, циклических и линейных соединений, ненасыщенных и насыщенных соединений с равным числом атомов углерода в молекуле. Селективность ПНБИ к разделению пар изомерных или циклических соединений в 3-17 раз выше селективности сорбента тенакса GC, а селективность ПНБИ к разделению пар ненасыщенных и насыщенных соединений в 2-25 раз выше селективности сорбента тенакса GC и сорбента полисорбимида-1.

ПНБИ-1-4 могут использоваться для разделения смесей изомерных соединений, циклических и линейных соединений. Более раннее элюирование циклических соединений по сравнению с соединениями нормального строения отличает исследуемые сорбенты ПНБИ от большинства известных сорбентов и позволяет определять примеси циклических соединений в соединениях нормального строения.

Вода элюирует на ПНБИ узким симметричным пиком, что позволяет использовать эти сорбенты для определения примесей воды в различных смесях. На данных сорбентах наблюдается полное разделение воздуха, CO и CO₂ в газовых смесях.

Термостойкие ПНБИ-1-4 являются перспективными сорбентами для разработки новых методик газохроматографического анализа и концентрирования микропримесей органических веществ, выделяющихся при проведении санитарно-химической оценки в натурных и моделированных условиях эксплуатации древесных и композиционных материалов, полимерных строительных и композиционных материалов на основе поливинилхлорида, полистирола, карбамидо-, меламино- и фенолоформальдегидных смол.

Хроматографический анализ микропримесей формальдегида, метанола и фенола показывает, что при концентрировании их на ПНБИ-3 формальдегид не вступает в химическое взаимодействие с фенолом и оба вещества определяются на одной хроматографической колонке; это сокращает время анализа в 2-3 раза по сравнению с раздельным концентрированием на сорбенте полихроме-3 фенола, а на сорбенте полифенилхиноксалине формальдегида и метанола.

Ключевые слова: газовая хроматография, термостойкие полимерные сорбенты, полинафтаilenбензимидазолы, органические и неорганические соединения, полимерные строительные и композиционные материалы.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.



Для цитирования: Хабаров В.Б., Панина Л.И. Новые термостойкие пористые полимерные сорбенты – полинафтаиленбензимидазолы для газохроматографического разделения и концентрирования летучих веществ // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 3. С. 409-424. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13050>

Original article

New heat-resistant porous polymer sorbents – polynaphthalenebenzimidazoles for gas chromatographic separation and concentration of volatile substances

Victor B. Khabarov¹✉, Larisa I. Panina²

¹Institute of Physical chemistry and electrochemistry RAS, Moscow, Russian,

Victor.khabarov2013@yandex.ru✉

²NIOKO «Bioecomonitoring», Moscow, Russian

Annotation. The results of a study of polymers of polynaphthalenebenzimidazoles synthesized by the interaction of 1,4,5,8-naphthalene tetracarboxylic acid dianhydride with 3, 3', 4, 4'- tetraaminodiphenyloxide (PNBI-1), 3, 3', 4, 4'- tetraaminodiphenyl (PNBI-2), 3, 3', 4,4',-tetraaminodiphenylsulfone (PNBI-3) and 3, 3', 4, 4',-tetraaminobenzophenone (PNBI-4) as heat-resistant porous polymer sorbents for gas chromatographic separation and concentration of volatile organic and inorganic compounds with a boiling point from -56 to +400°C. Temperature limit for the use of PNBI sorbents-1-4 480-500°C, specific surface area 20-30 m²/g.

It is advisable to use PNBI-1-4 for gas chromatographic separation of organic compounds. They are characterized by increased selectivity for the separation of isomeric, cyclic and linear compounds, unsaturated and saturated compounds with an equal number of carbon atoms in the molecule. The selectivity of PNBI for the separation of pairs of isomeric or cyclic compounds is 3-17 times higher than the selectivity of tenax GC sorbent, and the selectivity of PNBI for the separation of pairs of unsaturated and saturated compounds is 2-25 times higher than the selectivity of tenax GC sorbent and polysorbimide-1 sorbent. PNBI-1-4 can be used to separate mixtures of isomeric compounds, cyclic and linear compounds. The earlier elution of cyclic compounds in comparison with compounds of normal structure distinguishes the studied PNBI sorbents from most known sorbents and makes it possible to determine the impurities of cyclic compounds in compounds of normal structure.

Water elutes on the PNBI with a narrow symmetrical peak, which makes it possible to use these sorbents to determine water impurities in various mixtures. Complete separation of air, CO and CO₂ in gas mixtures is observed on these sorbents.

Heat-resistant PNBI-1-4 are promising sorbents for the development of new methods for gas chromatographic analysis and concentration of trace amounts of organic substances released during sanitary and chemical assessment in natural and simulated operating conditions of wood and composite materials, polymer building and composite materials based on polyvinyl chloride, polystyrene, carbamide, melamine- and phenol-formaldehyde resins. Chromatographic analysis of trace amounts of formaldehyde, methanol, and phenol shows that when concentrated on PNBI-3, formaldehyde does not chemically interact with phenol and both substances are detected on the same chromatographic column; this reduces the analysis time by 2-3 times compared with separate concentration on the sorbent polychrome-3 phenol, and on the sorbent is polyphenylquinoxaline of formaldehyde and methanol.

Keywords: gas chromatography, heat-resistant polymer sorbents, polynaphthalenebenzimidazoles, organic and inorganic compounds, polymer building and composite materials.

Acknowledgements: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Khabarov V.B., Panina L.I. New heat-resistant porous polymer sorbents – polynaphthalenebenzimidazoles for gas chromatographic separation and concentration of volatile substances. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(3): 409-424. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13050>

Введение

В практике молекулярной хроматографии наряду с газо-жидкостным все большее применение находит адсорбционный

вариант [1-11]. Это обусловлено созданием, разработкой и внедрением ряда высокоеффективных сорбентов с достаточно однородными и разнообразными



по химическому составу поверхностями, развитием различных методов направленного синтеза сорбентов с заданным комплексом свойств и разнообразных приемов модификации их поверхностей.

Развитие газо-адсорбционного варианта молекулярной хроматографии, существенное расширение его аналитических возможностей для концентрирования и разделения микропримесей органических и неорганических веществ во многом связаны с использованием в последнее время пористых полимерных сорбентов (ППС). Эти сорбенты нашли широкое применение для решения различных аналитических и препаративных задач благодаря своей универсальности, возможности регулирования их геометрической и химической структуры в процессе синтеза и достаточно высокой термостойкости [1-11].

Одно из ведущих мест занимает хроматографический анализ в производственном контроле сложных продуктов и материалов. Обеспечение нормального функционирования хроматографических приборов в существенной мере зависит, прежде всего, от наличия сорбентов для хроматографических колонок и патронов-концентраторов [1-11].

Наибольшее распространение в газовой и жидкостной хроматографии среди ППС получили сорбенты на основе сополимеров стирола и дивинилбензола, полимеризация которых осуществляется в присутствии инертных неполимеризующихся разбавителей.

Полисорб-1 – полисорб-9 – это сорбенты на основе сополимеров стирола и дивинилбензола, полимеризация которых осуществляется в присутствии изооктана; при этом получаются сетчатые полимеры с развитой поверхностью, матрица которых после удаления разбавителя сохраняет пористую структуру. Меняя условия полимеризации и состав полимеризационных смесей можно регулировать в достаточно широком диапазоне

объем и размер пор получаемых сорбентов, величину их удельной поверхности от 40 до 300 м²/г. Полисорб-10 макропористый полидивинилбензол с развитой удельной поверхностью до 300 м²/г [2, 6]. Сорбенты полисорб-1-полисорб-10 выпускались НПО «Биолар» как для задач газовой хроматографии, так и для ВЭЖХ, что значительно расширяет возможности хроматографического метода, в частности для контроля и получения биологическим активных веществ [11-14].

Среди ППС для газовой и жидкостной хроматографии следует отметить стиросорбы, сфероны и сепароны, обладающие развитой удельной поверхностью до 1500 м²/г, достаточно большим объемом пор, механической прочностью [8, 15-20].

Стиросорбы – полистирольные сорбенты, получаемые сшиванием линейных цепей полистирола в органическом растворителе (дихлорэтане, циклогексане и др.) бифункциональными соединениями (п-ксилилендихлоридом,monoхлордиметиловым эфиром) в присутствии катализатора Фриделя-Крафтса [8, 15, 16]. Степень сшивки может достигать 100%.

Задача концентрирования микропримесей летучих органических соединений из газовых сред состоит в том, чтобы накапливать их в патронах-концентраторах для последующего газохроматографического определения. Сконцентрированные микропримеси вводят в аналитическую колонку методом термической десорбции.

Оценка сорбентов проводится по их сорбционной емкости по отношению к определяемым веществам при температуре концентрирования, по проценту улавливания определяемых веществ, по коэффициенту обогащения и по термостойкости. Обязательным требованием к сорбентам является неизменность состава определяемых веществ при концентрировании и термической десорбции, которая должна осуществляться при температуре, при которой не происходит разложение определяемых веществ.



Патрон-концентратор с сорбентом рассматривается как хроматографическая колонка, в которую поступает газ-носитель воздух, содержащий органические вещества постоянной концентрации [21-25]. В этом случае органические вещества количественно удерживаются сорбентом до тех пор, пока объем газовой пробы не достигнет максимально допустимого значения $V_{\text{доз}}^{\text{max}}$. Способ определения величины $V_{\text{доз}}^{\text{max}}$ как функции эффективности колонки, предложен Кроппером и Каминским [21].

Коэффициент обогащения при концентрировании микропримесей на сорбентах определяется отношением исправленных объемов удерживания анализируемых веществ при температурах адсорбции и десорбции и является основным при выборе сорбента для концентрирования [26]. Коэффициент обогащения тем больше, чем больше теплота сорбции данного вещества на сорбенте [26].

В [24] изучались хроматографические характеристики пористых полимерных сорбентов (тенакс GC, хромосорбы-101, -102, порапаки P, Q, R, T), используемых для концентрирования примесей органических веществ. Показано, что порапаки имеют самые высокие значения удельных объемов удерживания сорбатов – ацетонитрила, бутанола, метилэтилкетона и бензола.

Стиросорбы [8] были применены для концентрирования микропримесей летучих органических соединений из газовой среды, в частности, фреонов разного состава.

В [10] использовали термостойкий ППС полифенилхиноксалин (ПФХ) для концентрирования и газохроматографического определения микропримесей летучих органических соединений в поликарбонитрильном волокне методом парофазного анализа.

В [9, 27-30] исследовали патроны-концентраторы с термостойкими ППС полихромом-3, ПФХ, цезийсорбом, полисор-

базолом-40, полисорбазолом-60 для концентрирования микропримесей органических веществ, выделяющихся в натурных и моделированных условиях эксплуатации из полимерных и композиционных строительных материалов (КСМ) на основе поливинилхлорида, карбамидо-, меламино- и фенолоформальдегидных смол.

Патроны-концентраторы с полихромом-3 использовали для раздельного концентрирования фенолов (фенола, о-, м-, п-крезолов), а с ПФХ и цезийсорбом для концентрирования формальдегида, метанола, выделяющихся из композиционных древесных материалов (КДМ) на основе фенолоформальдегидных смол (фанера, ДСП, ОСП, ДВП), стеклопластиков [9, 27, 28, 29], тепловой изоляции строительных конструкций [30], композиционных материалов на основе целлюлозы, а также подгузников (памперсов) [31, 32]. Колонки с термостойкими ПФХ и цезийсорбом применены для газохроматографического разделения формальдегида, метанола, воды и метилаля.

В [33] использовали патроны-концентраторы с полихромом-3 и ПФХ для раздельного концентрирования удельных выбросов органических веществ, выделяющихся при производстве обоев на основе поливинилхлорида.

В [30, 32, 34, 35] использовали патроны-концентраторы с термостойкими ППС – полихромом-3, ПФХ и цезийсорбом для концентрирования микропримесей летучих органических веществ, выделяющихся из полимерных строительных материалов (ПСМ) и композиционных древесных материалов (КДМ); колонку с полифенилхиноксалином для газохроматографического определения формальдегида и метанола и колонку с 2 % полиэтиленгликольадипината на полихроме-1 для газохроматографического разделения фенола и крезолов при разработке инновационных методик санитарно-химической оценки КДМ, мебели, тепловой изоляции строительных конструкций на



основе карбамидо-, меламино-, фено-лоформальдегидных смол, композиционных материалов на основе целлюлозы, а также и подгузников (памперсов) для разработки девяти межгосударственных стандартов Евразийского экономического союза.

В патенте [36] применяли новое устройство для парофазного анализа [37] и колонку с ПФХ для газохроматографического определения санитарно-химических характеристик лущеного шпона по формальдегиду и метанолу при гидротермической обработке заготовок древесины берёзы, а также определения удельных выбросов формальдегида и метанола в окружающую среду в процессе сушки шпона в паровой и газовой сушилках при производстве фанеры.

Цель настоящего исследования – изучить сорбционно-хроматографические свойства термостойких ППС – полинафтаilenбензимидазолов (ПНБИ-1-4) для газохроматографического разделения и концентрирования летучих органических и неорганических соединения с температурой кипения от -56 до +400°C и показать, что ПНБИ-1-4 являются перспективными сорбентами для разработки новых газохроматографических методик оценки санитарно-химических характеристик древесных, полимерных строительных и композиционных материалов.

Исследуемые термостойкие ППС – полинафтаilenбензимидазолы (ПНБИ-1-4) до настоящего времени не использовались в газовой хроматографии для концентрирования микропримесей летучих органических и неорганических соединений из газовых сред, для анализа смесей соединений разной геометрической структуры [38, 39].

В [40] полинафтаilenбензимидазолы использованы для высокотемпературного мембранныго разделения газов. Гомогенные пленки полинафтоilenбензимидазола (ПНБИ-σ) получены двухстадийным синтезом из преполимерных пленок термической циклизацией при 350°C.

Наличие микропор в пленках ПНБИ-σ показано методом сорбции CO₂, удельная поверхность микропор составляет 285 м²/г. Методом дифференциальной газовой хроматографии в диапазоне температур 50-250°C изучена газопроницаемость He, H₂, CO₂, CH₄, O₂ и N₂, определены энергии активации проницаемости. Полученные экспериментальные данные демонстрируют возможности ПНБИ-σ для высокотемпературных процессов разделения, в том числе для разделения промышленных водородсодержащих смесей при получении водорода.

Экспериментальная часть

В работе использовали оборудование и расходные материалы: многофункциональный газовый хроматограф «Модель 3700 с ПИД и катарометром, включённый в Госреестр (Россия) [41]; устройство для ввода проб микропримесей органических веществ из патрона-концентратора в аналитическую колонку методом термической десорбции [9, 42]; электрическую печь из латуни, обеспечивающую температуру от 50 до 400°C с погрешностью ±1.5°C, для десорбции органических веществ из патрона-концентратора; патроны-концентраторы из нержавеющей стали (12 x 0,4 см), заполненные ПНБИ-1-4, фр. 0.1-0.25 мм (вес 0.4-0.6 г) [38], закреплённые с двух сторон стекловатой, снабжённые полой иглой; стекловолокно из стеклоткани (ГОСТ 10146-74); термостат суховоздушный марки ТС-2Ц-450М (ТС80), обеспечивающий температуру от 20 до 70±0.1°C для терmostатирования фторопластовых ячеек и камер с исследуемыми образцами материалов (Россия); ампулы фторопластовые Ф-4МБ (13 x 1.5 см; 8 x 1 см) калиброванные (ТУ 95-766-80) [43]; стеклянные ячейки из боросиликатного стекла для терmostатирования фторопластовых ампул с метанолом, фенолом, крезолом, бензолом, толуолом, этилбензолом, кумолом, псевдокумолом; регуляторы расхода из комплекта газового хроматографа для создания потока



азота через диффузионные стеклянные ячейки и в камерах с исследуемыми образцами материалов; камеры из боросиликатного стекла объёмом 200-1000 см³ (внутренним диаметром 46 мм) со шлифом № 45 и объёмом 3000 см³ (внутренним диаметром 125 мм) со шлифом № 60 для моделирования условий эксплуатации исследуемых образцов материалов; аналитическую колонку из нержавеющей стали (1 м x 3 мм), заполненную сорбентом ПНБИ-1, фр. 0.10-0.25 мм [38]; аналитическую колонку из стекла (2 м x 4 мм), с 5 % трикрезилфосфата и 10 % 1,2,3-три(цианэтоксипропана) на динамике Н, фр. 0.16-0.20 мм; аналитическую колонку из стекла (2 м x 3, 3 мм) с полифенилхиноксалином, фр. 0.25-0.40 мм; реактор для конверсии метанола в формальдегид – трубку из кварцевого стекла, внутрь которой впаяна спираль из никрома марки Х20Н80 [44]; набор индивидуальных веществ: метанол, фенол, крезол, бензол, толуол, этилбензол, кумол, псевдокумол (х.ч.); клей силикатный; алюминиевую фольгу.

Устройство для введения проб органических веществ, сконцентрированных на сорбente, в насадочную аналитическую колонку методом термической десорбции. Устройство [9, 42] монтировали на газовом хроматографе; оно содержит два регулятора расхода в канале газа-носителя газового хроматографа и кран-переключатель потока. Устройство исключает размывание и сорбцию на силиконовой мемbrane испарителя газового хроматографа определяемых органических веществ.

Динамический метод создания в потоке азота градуировочных смесей летучих веществ при газохроматографическом анализе. В [45] впервые разработан метод градуировки, основанный на диффузии газа органических и неорганических соединений через ампулу, изготовленную из фторированного сополимера этилена и пропилена (ФЭП-тэфлон). Скорость диффузии веществ из проницаемой

ампулы описывается законом Фика и зависит от температуры; ампулу необходимо термостатировать в течение всего процесса градуировки с точностью ±0.1°C, поскольку изменение температуры на 1°C приводит к изменению скорости диффузии почти на 10%. Градуировку ампулы осуществляют по потери ее массы в течение достаточно длительного периода работы.

Учитывая, что скорость диффузии градуируемых веществ через стенки полимерных ампул остается постоянной в течение всего времени работы диффузионных ампул, этот способ является наилучшим из всех разработанных до сих пор динамических способов приготовления градуировочных смесей органических и неорганических веществ [45].

Динамический метод создания в потоке азота градуировочных смесей фенола и крезола [42]. Для этого использовали ампулы из фторопласта Ф-4МБ (13 x 1.5 см) [43]. В ампулы вводят фенол и м-крезол, запаивают и помещают в стеклянную ячейку, через которую при температуре 60°C подают от регулятора расхода поток азота со скоростью 10 см³/мин.

Динамический метод создания в потоке азота градуировочных смесей метанола и формальдегида [44]. На первом этапе создают градуировочную смесь метанола с помощью ампулы из фторопласта Ф-4МБ (13 x 1.5 см) в потоке азота. Ампулу с метанолом запаивают и помещают в стеклянную ячейку при 67°C и через нее подают от регулятора расхода азот со скоростью 5-20 см³/мин. На втором этапе поток азота, содержащий метанол, направляют в реактор с катализатором, содержащим 20% хрома и 80% никеля, и при температуре 550°C метанол на 100% конвертируется в формальдегид без образования побочных органических соединений.

Динамический метод создания в потоке азота градуировочных смесей бензола, толуола, этилбензола, кумола, псев

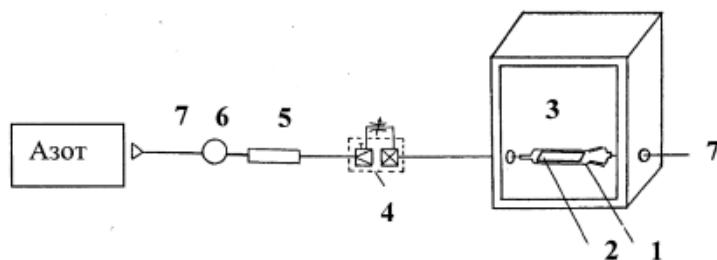


Рис. 1. Установка для моделирования условий эксплуатации композиционных строительных и полимерных материалов.

1 – камера из стекла объёмом: 200-1000 см³ и 3000 см³; 2 – исследуемый образец материала; 3 – термостат; 4 – регулятор расхода; 5 – фильтр; 6 – клапан; 7 – трубка из нержавеющей стали диаметром 2 мм

Fig. 1. Installation for modeling the operating conditions of composite building and polymer materials

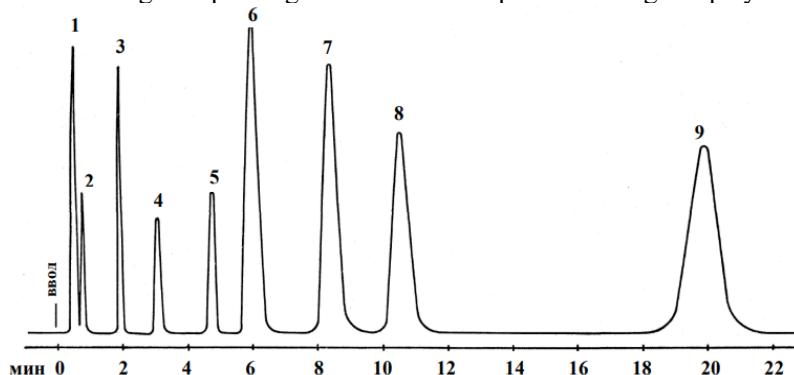


Рис. 2. Хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из поливинилхлоридного линолеума, при десорбции с ПНБИ-1.

Колонка из стекла (2 м x 4 мм) с 5 % трикрезилфосфата и 10 % 1, 2, 3-трикс (цианэтоксипропана) на динахроме Н, фр. 0.16-0.20 мм. Температура: колонки 90 °C, испарителя 130 °C, ПИД 150 °C, десорбции 220 °C; время десорбции 10 мин. Объёмная скорость газа-носителя азота через патрон-концентриатор 27 см³/мин, через канал испарителя 3 см³/мин, исключает объём между иглой патрона-концентратора и мембранный испарителя. Скорость диаграммной ленты 1 см/мин, шкала измерения на ИМТ-05 50 x 10⁻¹² А. 1 – гексен, 2 – винилхлорид, 3 – бензол, 4 – толуол, 5 – этилбензол, 6 – кумол, 7 – мезитилен, 8 – псевдокумол, 9 – циклогексанон.

Fig. 2. Chromatogram of volatile substances released from polyvinyl chloride linoleum upon desorption with PNBI-1.

документа. Для этого использовали ампулы из фторопласта Ф-4МБ [43] (8 x 1 см), содержащие бензол, толуол, этилбензол, кумол и псевдокумол. Ампулы запаивали и помещали в стеклянные ячейки при температуре 60 °C и через них от регулятора расхода подавали поток азота при расходе 10 см³/мин.

Санитарно-химическую оценку ПСМ и КСМ проводят в моделированных условиях эксплуатации в соответствии с МУК [46] с использованием установки на рис. 1. Концентрирование микропримесей летучих веществ, выделяющихся из ПСМ и КСМ в моделированных условиях экс-

плуатации осуществляют путем прокачивания через патрон-концентратор с исследуемыми полимерными сорбентами ПНБИ-1-4 необходимого количества парогазовой смеси, содержащей примеси летучих органических веществ.

На хроматограммах 2-7 приведены результаты анализа различных смесей веществ: На рис. 2 – хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из поливинилхлоридного линолеума, при десорбции с ПНБИ-1; на рис. 3 – хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из стеклопластика ЛБС-1 на основе фенолоформальдегидной смолы, при десорбции с

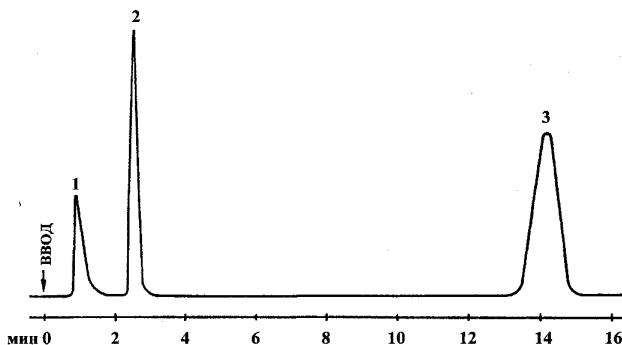


Рис. 3. Хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из стеклопластика ЛБС-1 на основе фенолоформальдегидной смолы, при десорбции с ПНБИ-3.

Колонка из стекла (2 м x 3 мм) с полифенилхиноксалином, фр. 0.25-0.40 мм. Температура: колонки при программировании от 130 до 230 °C со скоростью 15°/мин, испарителя 230 °C, детектора - катарометра 230 °C, десорбции 200 °C; время десорбции 10 мин. Объёмная скорость газа-носителя азота через патрон-концентратор 27 см³/мин, через канал испарителя 3 см³/мин, исключает объём между иглой патрона-концентратора и мембранный испарителя. Скорость диаграммной ленты 1 см/мин, шкала измерения 2 x 10⁻¹¹/16 А. 1 – формальдегид, 2 – метиловый спирт, 3 - фенол.

Fig. 3. Chromatogram of volatile substances released from fibreglass LBS-1 based on phenol-formaldehyde resin during desorption with PNBI-3.

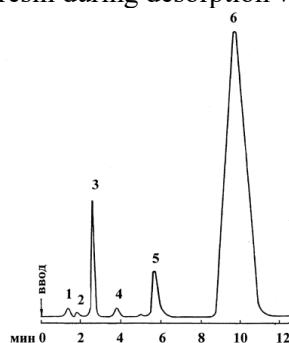


Рис. 4. Хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из мастичных покрытий полов, при десорбции с ПНБИ-1.

Колонка из стекла (2 м x 4 мм) с 5 % трикрезилфосфата и 10 % 1, 2, 3-триэ (цианэтоксипропана) на динахроме Н, фр. 0.16-0.20 мм. Температура: колонки 110 °C, испарителя 130 °C, ПИД 150 °C, десорбции 240 °C; время десорбции 10 мин. Объёмная скорость газа-носителя азота через патрон-концентратор 27 см³/мин, через канал испарителя 3 см³/мин, что обеспечивает поддув между иглой патрона-концентратора и мембранный испарителя. Скорость диаграммной ленты 1 см/мин, шкала измерения 50 x 10⁻¹² А.

1 – гептен, 2 – не идентифицирован, 3 – бензол, 4 - толуол, 5 – этилбензол, 6 – стирол.

Fig. 4. Chromatogram of volatile substances released from mastic coatings of floors during desorption with PNBI-1.

ПНБИ-3; на рис. 4 – хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из мастичных покрытий полов, при десорбции с ПНБИ-1; на рис. 5 – хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из полистирольной плитки, при десорбции с ПНБИ-2; на рис. 6 а – хроматограмма примеси воды в этиловом спирте для хроматографии; на рис. 6 б – хроматограмма примеси воды в этиловом спирте ректификате; на рис. 7 – хроматограмма воздуха, CO и CO₂

Санитарно-химическая оценка поливинилхлоридного линолеума. Образец поливинилхлоридного линолеума площадью 12 см² с тыльной стороны и боков изолируют алюминиевой фольгой с помощью силикатного клея и помещают в камеру из боросиликатного стекла объемом 3000 см³, что соответствует реальной насыщенности – 0.4 м²/м³ и моделируют условия эксплуатации при температуре 20°C, газообмене 0.5 объема/ч азотом особой чистоты с объемной скоростью

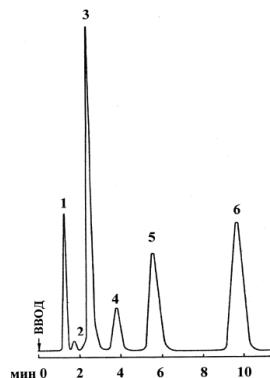


Рис. 5. Хроматограмма летучих веществ, выделяющихся из полистирольной плитки, при десорбции с ПНБИ-2.

Колонка из стекла (2 м x 4 мм) с 5% трикрезилфосфата и 10 % 1, 2, 3-три(цианэтоксипропана) на динахроме Н, фр. 0.16-0.20 мм. Температура: колонки 110°C, испарителя 130°C, ПИД 150°C, десорбции 240°C; время десорбции 10 мин. Объёмная скорость газа-носителя азота через патрон-концентратор 27 см³/мин, через канал испарителя 3 см³/мин, что обеспечивает поддув между иглой патрона-концентратора и мембранный испарителя. Скорость диаграммной ленты 1 см/мин, шкала измерения 50 x 10⁻¹² А. 1 – гептен, 2 – не идентифицирован, 3 – бензол, 4 - толуол, 5 – этилбензол, 6 – стирол.

Fig. 5. Chromatogram of volatile substances released from polystyrene tiles during desorption with PNBI-2.

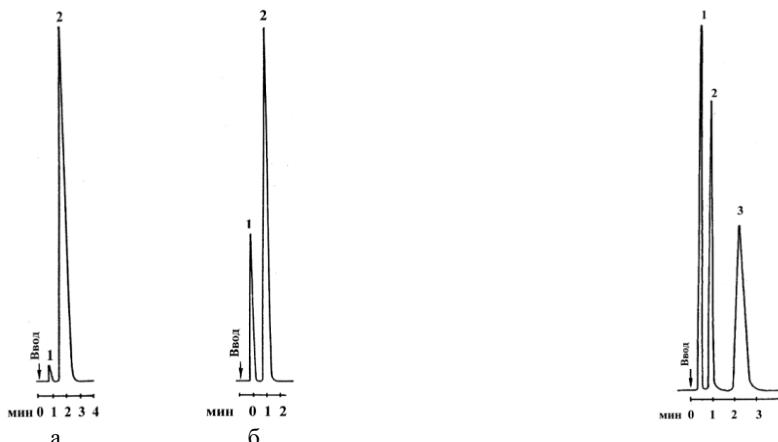


Рис. 6. Хроматограмма примеси воды 1 в этаноле 2 для хроматографии (а) и ректификации (б).

Колонка из нержавеющей стали (1 м x 3 мм) с ПНБИ-2, фр. 0.10-0.25 мм. Температура: колонки 210 °C, испарителя 250 °C, детектора – катарометра 250 °C. Объёмная скорость газа-носителя гелия 30 см³/мин. Скорость диаграммной ленты 1 см/мин. 1 – вода, 2 – этанол.

Fig. 6. Chromatogram of water impurity 1 in ethanol 2 for chromatography (a) and rectification (b).

25 см³/мин. По истечении 3 суток кондиционирования линолеума к выходу камеры с исследуемым образцом линолеума присоединяют патрон-концентратор

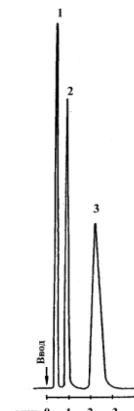


Рис. 7. Хроматограмма смеси: воздух 1, CO 2, CO₂ 3

Колонка из нержавеющей стали (1 м x 3 мм) с ПНБИ-2, фр. 0.10-0.25 мм. Температура: колонки 61 °C, испарителя 250 °C, детектора – катарометра 250 °C. Объёмная скорость газа-носителя гелия 30 см³/мин. Скорость диаграммной ленты 1 см/мин. 1 – воздух, 2 – CO, 3 – CO₂.

Fig. 7. Chromatogram of the mixture: air 1, CO 2, CO₂ 3

с ПНБИ-1 и прокачивают 1000 см³ парогазовой смеси. По окончании концентрирования проводят десорбцию микропримесей органических соединений. На рис.



Таблица 1. Физические свойства полимерных сорбентов полинафталенбензимидазолов 1ПНБИ-1-4

Table 1. Physical properties of polymer sorbents of polynaphthalenebenzimidazoles 1PNBI-1-4

| Сорбент | Удельная поверхность ² , м ² /г | Насыпная масса, г/см ³ | Температурный предел использования, °С |
|---------|---|-----------------------------------|--|
| ПНБИ-1 | 20 | 0.37* | 480 |
| ПНБИ-2 | 25 | 0.30 | 480 |
| ПНБИ-3 | 30 | 0.32 | 500 |
| ПНБИ-4 | 30 | 0.35 | 500 |

2 приведена хроматограмма летучих органических веществ, выделяющихся из поливинилхлоридного линолеума, при десорбции с ПНБИ-1 и указаны условия проведения анализа.

Санитарно-химическая оценка стеклопластика на основе фенолформальдегидной смолы. Образец стеклопластика ЛБС-1 площадью 12 см² с тыльной стороны и боков изолируют алюминиевой фольгой с помощью силикатного клея, помещают в камеру из боросиликатного стекла объемом 1000 см³ для моделирования условий эксплуатации при температуре 40°С и создают газообмен 0.5 объема/ч азотом особой чистоты с объемной скоростью 8.3 см³/мин. По истечении 3 суток к выходу камеры с исследуемым стеклопластиком присоединяют патрон-концентратор с ПНБИ-3 и при комнатной температуре прокачивают 1000 см³ парогазовой смеси со скоростью 8.3 см³/мин. По окончании концентрирования проводят десорбцию сконцентрированных примесей органических соединений. На рис. 3 приведена хроматограмма летучих органических веществ, выделяющихся из стеклопластика ЛБС-1, при десорбции с ПНБИ-3. Ниже приведены условия анализа.

Санитарно-химическая оценка полимерных материалов – мастичных покрытий полов на основе полистирольных латексов и полистирольной плитки. Санитарно-химическую оценку мастичных покрытий полов на основе полистирольных латексов и полистирольной плитки проводят аналогично оценке линолеума. На

рис. 4 и 5 приведены хроматограммы летучих веществ, выделяющихся из мастичных покрытий полов на основе полистирольных латексов и полистирольной плитки, при десорбции с ПНБИ-1 и ПНБИ-2.

Обсуждение результатов

Исследуемые термостойкие ППС полинафталенбензимидазолы (ПНБИ-1-4) предложены в качестве сорбентов для газовой хроматографии для разделения органических и неорганических соединений и концентрирования микропримесей летучих органических соединений при проведении санитарно-химической оценки ПСМ на основе поливинилхлорида, полистирола и КСМ на основе фенолоформальдегидной смолы в моделюрованных условиях эксплуатации в камере из стекла. Физические свойства ПНБИ-1-4 приведены в табл. 1.

Высокая термостойкость ППС ПНБИ расширяет область их применения в газовой хроматографии. ПНБИ-1-4 относятся к макропористым сорбентам. Вода элюирует на них узким симметричным пиком, что позволяет использовать эти сорбенты для определения примесей воды в различных смесях (рис. 6 а-б).

Следует отметить также полезное свойство исследованных сорбентов – способность разделять воздух, CO и CO₂ (рис. 7).

В табл. 2 представлены коэффициенты селективности изомерных, циклических и непредельных соединений на ПНБИ-1, полисорбимиде-1 и тенаксе GC.



Таблица 2. Коэффициенты селективности изомерных, циклических и непредельных соединений $K = \frac{t^1R}{t^2R}$

Table 2. Selectivity coefficients of isomeric, cyclic and unsaturated compounds $K = \frac{t^1R}{t^2R}$

| Сорбаты | ПНБИ-1 | Полисорбимид-1 | Тенакс GC |
|-------------------------------------|--------|----------------|-----------|
| Октан Изооктан | 52.9 | - | - |
| Бутанол Изобутанол | 4,43 | 1.33 | 1.20 |
| Изобутанол Трет.бутанол | 14.2 | 1.96 | 1.86 |
| Бутанол Трет.бутанол | 62.7 | 2.62 | 2.21 |
| Амиловый спирт Изоамиловый спирт | 22.6 | - | - |
| Н-гексан Циклогексан | 19.1 | 1.15 | 0.58 |
| Н-гексан Метилциклопентан | 8.7 | 1.25 | 0.70 |
| Бензол Циклогексан | 80.5 | 3.40 | 1.50 |
| Циклогексен Циклогексан | 13.2 | 2.15 | 1.38 |
| Пентен-2 Н-пентан | 2.54 | 1.30 | 1.10 |
| Пентадиен-1,3 Н-пентан | 4.30 | 1.80 | 1.40 |
| Гептен-3 Н-гептан | 1.84 | 1.30 | 1.10 |

ПНБИ-1 характеризуется повышенной селективностью к разделению, изомерных, циклических и линейных соединений, ненасыщенных и насыщенных соединений с равным числом атомов углерода в молекуле (табл. 2). В табл. 2 приведены коэффициенты селективности изомерных, циклических и непредельных соединений на ПНБИ-1, т.е. сополимере диангидрида 1,4,5,8-нафтаилентетракарбоновой кислоты и 3,3',4,4'-тетраамино-дифенилоксида. Из данных табл. 2 следует, что селективность сорбента к разделению пар изомерных или циклических соединений в 3-17 раз выше селективности сорбента тенакса GC, а селективность сорбента к разделению пар ненасыщенных и насыщенных соединений в 2-25 раз выше селективности сорбента тенакса и

сорбента, полисорбимида-1. Коэффициенты селективности для сорбентов определяли при оптимальных температурах их использования, то есть для тенакса GC и полисорбимида-1 при 150°C для ПНБИ-1 при 210°C.

Более раннее элюирование циклических соединений по сравнению с соединениями нормального строения отличает исследованные сорбенты от большинства известных сорбентов и позволяет определять примеси циклических соединений в соединениях нормального строения.

В табл. 3 представлены удельные объемы удерживания (V_g) сорбатов на ППС полинафтаиленбензимидазолах (ПНБИ-1-4) и тенаксе GC при температуре 20°C.

Из табл. 3 следует, что исследуемые в качестве сорбентов для концентрирова-



Таблица 3. Удельные объемы удерживания (V_g) сорбатов при температуре 20°C, при которой проводят концентрирование на полинафталенбензимидазолах (ПНБИ-1-4) и тенаксе GC

Table 3. Specific retention volumes (V_g) of sorbates at a temperature of 20°C, at which concentration is carried out on polynaphthalenebenzimidazoles (PNBI-1-4) and tenax GC

| Сорбаты | T _{кип} , °C | ¹ Тенакс GC | ПНБИ-1 | ПНБИ-2 | ПНБИ-3 | ПНБИ-4 |
|-------------------|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Углекислый газ | -56.6 | 7.2 | 342 | 294.2 | 277.02 | 420.6 |
| Аммиак | -33.5 | 13.16 | 379.2 | 365.2 | 360.5 | 402.3 |
| Формальдегид | -19.0 | 45.71 | 794.3 | 736.4 | 742.1 | 780.8 |
| Винилхлорид | -13.9- | 267.5 | 16894.7 | 16100 | 16600 | 17200 |
| Дивинил | -4.47 | 1121.9 | 75918.3 | 77620 | 77640 | 78140 |
| Гексен-1 | +63.5 | 5388.0 | 33409.1 | 37602 | 37051 | 38000 |
| Хлористый метилен | 41.6 | 3612.02 | 1664.79x10 ² | 1431.72·10 ² | 1348.5·10 ² | 1942.3·10 ² |
| Метанол | +64.6 | 230.8 | 25636.6 | 25130 | 25520 | 26700 |
| Бензол | +80.1 | 342768 | 9299.1·10 ³ | 9153 ·10 ³ | 9220·10 ³ | 9434 ·10 ³ |
| Дихлорэтан | +83.7 | 42220.2 | 3538.8·10 ³ | 3043.4·10 ³ | 2866.5·10 ³ | 3671.5·10 ³ |
| Толуол | +110.6 | 90032.6 | 79465.7·10 ³ | 79231·10 ⁵ | 78952·10 ³ | 83129·10 ³ |
| Этилбензол | +136.15 | 238.02·10 ⁴ | 11898.9·10 ⁵ | 11632·10 ⁵ | 11492·10 ⁵ | 12342·10 ⁵ |
| Стирол | +145.2 | 196.97·10 ⁴ | 45007·10 ⁵ | 44821·10 ⁵ | 43156·10 ⁵ | 45178·10 ⁵ |
| Фенол | +182.0 | 219.87·10 ⁴ | 396023·10 ⁵ | 392503·10 ⁵ | 378237·10 ⁵ | 421643·10 ⁵ |

¹Термостойкий полимерный сорбент тенакс GC на основе оксида 2,6-дифенилфенилена, удельная поверхность 18.6 м²/г, средний диаметр пор 1400 Å, насыпная масса 0.23 г/см³, температурный предел использования 400°C [2].

ния термостойкие ППС полинафталенбензимидазолы (ПНБИ-1, ПНБИ-2, ПНБИ-4, ПНБИ-4) имеют преимущества перед ранее используемым для концентрирования сорбентом тенаксом GC, так как удельные объемы удерживания на них в 16-76 раз больше, чем на тенаксе GC, что позволяет использовать сорбенты ПНБИ-1-4 для эффективного концентрирования микропримесей летучих органических соединений, выделяющихся из ПСМ и КСМ на основе поливинилхлорида, полистирола и фенолоформальдегидной смолы в натурных и моделюрованных условиях эксплуатации в соответствии с МУК [46] на уровне ПДК химических веществ в воздухе жилых помещений.

Впервые показано (хроматограмма на рис. 6), что при концентрировании микропримесей летучих органических веществ, выделяющихся в моделюрованных условиях эксплуатации из стеклопла-

стика ЛБС-1 на основе фенолоформальдегидной смолы при температуре 40 °C, в патроне-концентраторе из нержавеющей стали с ПНБИ-3 и при введении сконцентрированной пробы методом термической десорбции с помощью устройства [42] в аналитическую колонку с ПФХ при программировании температуры колонки от 130 до 230°C со скоростью 15°/мин детектируются катарометром формальдегид, метанол и фенол. Хроматограмма на рис. 6 показывает полное разделение микропримесей формальдегида, метанола и фенола, выделяющихся из стеклопластика, при этом сконцентрированные микропримеси формальдегида и фенола из газовой среды на термостойком ППС ПНБИ-3 не вступают в химическое взаимодействие. Это сокращает время газохроматографического анализа в 2-3 раза по сравнению с раздельным концентрированием в патронах-концентраторах на полихром-3 фенола, а на полифенилхиноксалине формальдегида и



метанола. Разработанное устройство для ввода проб микропримесей органических веществ, сконцентрированных на исследуемом сорбенте ПНБИ-3, в насадочную аналитическую колонку методом термической десорбции [42] исключает сорбцию формальдегида, метанола и фенола на силиконовой мемbrane испарителя газового хроматографа.

Применение разработанного устройства [42] в многофункциональном газовом хроматографе [41] и сорбента ПНБИ-3 для концентрирования из диффузионных ячеек микропримесей фенола и м-крезола позволяет оптимизировать температуру десорбции при вводе проб из патрона-концентратора в аналитическую колонку и снизить отн. погрешность измерений фенола до 1.4%, м-крезола до 1.2% ($P=0.95$, $n=7$) при создании линейной скорости газа-носителя в патроне-концентраторе, равной 50% линейной скорости газа-носителя в испарительной камере.

Применение разработанного устройства [42] в многофункциональном газовом хроматографе [41] и сорбентов ПНБИ-1, ПНБИ-3 для концентрирования микропримесей бензола, толуола, этилбензола, кумола, мезитилена и псевдокумола из диффузионных ячеек позволяет оптимизировать температуру десорбции при вводе проб этих микропримесей из патрона-концентратора в аналитическую колонку.

Заключение

Целесообразно использовать термостойкие ППС полинафтиленбензимида-золы (ПНБИ-1-4) для газохроматографического разделения органических соединений. При этом они характеризуются повышенной селективностью к разделению изомерных, циклических и линейных соединений, ненасыщенных и насыщенных соединений с равным числом атомов углерода в молекуле. Селективность ПНБИ к разделению пар изомерных или циклических соединений в 3-17 раз выше селективности сорбента тенакса

GC, а селективность ПНБИ к разделению пар ненасыщенных и насыщенных соединений в 2-25 раз выше селективности сорбента тенакса GC и сорбента полисорбамида-1.

Более раннее элюирование циклических соединений по сравнению с соединениями нормального строения отличает исследуемые ПНБИ сорбенты от большинства известных сорбентов и позволяет определять примеси циклических соединений в соединениях нормального строения.

Вода элюирует на ПНБИ узким симметричным пиком, что позволяет применять эти сорбенты для определения примесей воды в различных смесях. На данных сорбентах наблюдается полное разделение воздуха, CO и CO₂ в газовых смесях.

Разработанные устройства для анализа микропримесей летучих органических и неорганических веществ, сконцентрированных на термостойких ППС, из газовых сред существенно расширяют функциональные возможности базового газового хроматографа и позволяют определять микропримеси веществ на уровне ПДК.

Широкое внедрение разработанного многофункционального газового хроматографа со специальными устройствами для анализа микропримесей летучих веществ, сконцентрированных из газовых сред на термостойких ППС, будет востребован для научных исследований и технологического контроля продукции лесопромышленного и химического комплексов по показателям безопасности.

Термостойкие ППС ПНБИ-1-4 являются перспективными сорбентами для разработки новых методик газохроматографического анализа и концентрирования микропримесей органических веществ, выделяющихся при проведении санитарно-химической оценки в натуральных и моделированных условиях эксплуатации древесных и композиционных материалов, полимерных строительных и композиционных материалов на основе



поливинилхлорида, полистирола, карбамидо-, меламино- и фенолоформальдегидных смол.

Широкое внедрение исследованных термостойких ППС ПНБИ-1-4 в практику позволит существенно сократить время отбора проб, повысить точность количественного определения микропримесей летучих органических веществ при концентрировании примесей из газовых сред и будет содействовать решению экологи-

ческих проблем обитаемой среды человека и способствовать решению задач охраны воздушной среды.

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.

Список литературы/References

1. Sakodynskij K. I., Panina L.I. Poristye polimernye sorbenty v gazohromatograficheskem analize. Analiz na polimernyh sorbentah : sb. – M. : NIITEKhIM, 1974:24-65. (In Russ.)
2. Sakodynskij K.I., Panina L.I. Polimernye sorbenty dlja molekuljarnoj hromatografii. M.: Nauka, 1977, 166 p. (In Russ.)
3. Panina L.I., Sakodynskij K.I. Poristye polimernye sorbenty dlja gazovoj hromatografii. Reaktivy i osobo chistye vewestva. Obzornaja informacija. M.: NIITEKhIM, 198 p. (In Russ.)
4. Glazunova L.D., Panina L.I., Sakodynskij K.I. Ispol'zovanie poristyh polimernyh sorbentov dlja koncentrirovaniya mikroprimesej organicheskikh soedinenij iz gazovoj i zhidkih prob. *Uspehi himii.* 1983; 52(7): 1225-1246. (In Russ.)
5. Koncentrirovanie sledov organicheskikh soedinenij. Problemy analiticheskoy himii, tom 10. Sb. nauch. trudov Instituta geohimii i analiticheskoy himii im. V.I.Verndaskogo pod red. Kuz'mina N.M., M.: Nauka, 1990. 280 p. (In Russ.)
6. Panina L.I. Diss. d-ra him. nauk. Moscow, 1992, 579 p. (In Russ.)
7. Panina L.I., Sakodynskij K.I. Polimernye sorbenty dlja jekologicheskogo i promyshlennogo monitoringa. *Himicheskaja promyshlennost'.* 1996; 10: 68-74. (In Russ.)
8. Beljakova L.D. Diss. d-ra him. nauk. Moscow, 1997, 231 p. (In Russ.)
9. Khabarov V.B. Diss. kand. him. nauk. Moscow, 1997, 258 p. (In Russ.)
10. Khabarov V.B., Panina L.I., Chumichjova O.A. Polifenilhinoksalin dlja koncentrirovaniya i gazohromatograficheskogo opredelenija nizkomolekuljarnyh organicheskikh soedinenij v poliakrilonitril'nom volokne metodom parofaznogo analiza. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy.* 2014;14(2): 240-253. (In Russ.)
11. Khabarov V.B., Panina L.I., Burjak A.K., Habarov M.V. Glava 6 «Poristye polimernye sorbenty v hromatografii» pp. 64-164, pp. 265-297 monografii «Biologicheski aktivnye vewestva (hitozan i ego proizvodnye)» pod redakciej akademika RAN A.Ja. Samujlenko. Krasnodar. 2018, 356 p. (In Russ.)
12. Khabarov V.B., Pronin A.Ja., Samujlenko A.Ja., Burjak A.K., Grin' A.V. Izuchenie metodom HPLC fiziko-himicheskikh harakteristik preparatov hitozana pri ih izgotovlenii i hranenii. *Doklady Rossijskoj akademii s/h nauk.* 2009; 4: 58-60. (In Russ.)
13. Khabarov V.B., Pronin A.Ja., Burjak A.K., Samujlenko A.Ja. Vozmozhnosti molekuljarnogo himicheskogo analiza metodom HPLC pri ispol'zovaniyu polimernogo sorbenta na osnove vyso-kosshotogo polidivinilbenzola. *Reports of the Academy of Sciences,* 2009; 427(1): 57-60. (In Russ.)
14. 153. Hollis O. H. Porous polymers used in GC and LC. *Chromatogr. Sci.* 1973; 11: 335-342.
15. Cjurupa M. P. Diss. d-ra him. nauk. Moscow, 1985, 426 p. (In Russ.)
16. Davankov V. A., Tsyurupa M. P. Hypercrosslinked Polymeric Networks and Adsorbing Materials: Synthesis, Properties,



Structure, and Applications. *Comprehensive Analytical Chemistry*. 2011; 56. 648 p.

17. Hollis O.H. Gas Separation on Microporous Polymer. VI International Symposium on Gas Chromatography. Rome, Italy : Inst. Petroleum, 1966: 8-12.

18. Hollis O. H. Separation of gaseous mixtures using porous polyaromatic polymer beads. *Anal. Chem.* 1966; 38: 309-316.

19. Hollis O.H. Water Analysis by Gas Chromatography using Porous Polymer Columns. *J. Gas Chromatogr.* 1966; 4(7):235-239.

20. Patent № 3729457 USA, 1973. Macaronet polystyrene structures for ionites and method of producing same. (In Russ.)

21. Cropper F.R., Kaminsky S. Determination of Toxic Organic Compounds in Admixture in the Atmosphere by Gas Chromatography. *Anal. Chem.* 1963; 35(6): 735-743.

22. Novak J., Vasak V., Janak J. Chromatographic Method for the Concentration of Trace Impurities in the Atmosphere and Other Gases. *Anal. Chem.* 1965; 37(6): 661-666.

23. Raymond A., Guiochon G. The Use of Graphitized Carbon Black as a Trapping Material for Organic Compounds in Light Gases Before a Gas Chromatographic Analysis. *J. Chromatogr. Sci.* 1975; 13: 173-177.

24. Butles L.D., Burke M.F. Chromatographic Characterization of Porous Polymers for Use as Adsorbents in Sampling Columns. *J. Chromatogr.* 1976; 14: 117-122.

25. Novak J. Kolichestvennyj analiz metodom gazovoj hromatografii. M.: Mir. 1978: 92-99. (In Russ.)

26. Gavrilina L.Ja., Zhejvot V.I., Emel'janov I.D. Opredelenie kojefficiente obogawenija pri gazohromatograficheskem koncentrirovaniu mikroprimesej. *Izv. SO AN SSSR*. 1982; 7: 97-102. (In Russ.)

27. Khabarov V.B. Sanitarno-himicheskie harakteristiki kompozicionnyh drevesnyh materialov i sinteticheskikh smole po dannym gazovoj hromatografii. *Sorbtionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2015; 15(2): 196-215. (In Russ.)

28. Khabarov V.B., Panina L.I. Osobennosti sanitarno-himicheskoy ocenki ognezawiwjonnoj fanery metodom gazovoj

hromatografii. *Derevoobrabatyvajuja promyshlennost'*. 2008; 5: 8-11. (In Russ.)

29. Khabarov V.B., Kovba I.T., Panina L.I. Ocenka polimernyh stroitel'nyh materialov dlja zhivotnovodcheskih zdanij. *Veterinarija*. 2008; 1: 35-40. (In Russ.)

30. Khabarov V.B. Innovacionnyj metod gazovoj hromatografii dlja sanitarno-himicheskoy ocenki teplovoj izoljacii stroitel'nyh konstrukcij. *Kontrol' kachestva produkci*. 2023; 11: 51-55. (In Russ.)

31. Khabarov V.B., Panina L.I., L'vov A.I. Gazohromatograficheskoe opredelenie formal'degida, metanola, fenola i krezoval v podguznikah metodom parofaznogo analiza. *Sorbtionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2018; 18(5): 696-708. (In Russ.)

32. Khabarov V.B., Panina L.I. Innovacionnyj metod gazovoj hromatografii dlja opredelenija sanitarno-himicheskikh harakteristik podguznikov. *Kontrol' kachestva produkci*. 2024; 4(1): 40-47. (In Russ.)

33. Khabarov V.B. Opredelenie udel'nyh vybrosov organicheskikh vewestv pri proizvodstve oboev na osnove polivinilchlorida metodom gazovoj hromatografii. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii 21 veka*. 2016; 7-8: 32-39. (In Russ.)

34. Khabarov V.B., Lebedev S.N. Primenenie innovacionnogo metoda gazovoj hromatografii dlja sanitarno-imicheskoy ocenki mebel'noj produkci. *Kontrol' kachestva produkci*. 2022; 1(1): 46-56. (In Russ.)

35. Khabarov V.B., Panina L.I., Lebedev S.N. O nesootvetstvii dejstvujuvej normativnoj bazy dlja ocenki himicheskoy bezopasnosti kompozicionnyh drevesnyh materialov trebovanijam zakonodatel'noj metrologii. *Kontrol' kachestva produkci*. 2024; 6(1): 58-64. (In Russ.)

36. Khabarov V.B., Burjak A.K. Patent № 2764302 RF, 2022. (In Russ.)

37. Khabarov V.B., Mal'cev V.V. Author's certificate of the USSR no 1728793, 1992. (In Russ.)

38. Glazunova L.D., Zabel'nikov N.S., Panina L.I., Sakodynskij K.I., Habarov V.B. Author's certificate of the USSR no 993724 SSSR, 1982. (In Russ.)



39. Khabarov V.B., Panina L.I. Novye termostojkie poristye polimernye sorbenty – polinaftailenbenzimidazoly dlya gazohromatograficheskogo razdeleniya i koncentrirovaniya letuchih veshchestv // Sbornik tezisov XXII I Mendeleevskogo s"ezda po obshchej i prikladnoj himii, 7-12 oktyabrya, 2024, tom 4, s. 51. XXII Mendeleevskij s"ezd po obshchej i prikladnoj himii, 7-12 oktyabrya, 2024, Federal'naya territoriya «Sirius», Rossiya. Sbornik tezisov dokladov v 7 tomah. Tom 4. — M.: OOO «Admiral Print», 2024. – 324 p.
40. Alentiev A.Yu, Syrtsova D.A., Nikiforov R.Yu., Ryzhikh V.E., Belov N.A., Skupov K.M., Volkova Yu.A., Ponomarev I.I. Poly-naphthylenebenzimidazoles as polymer materials for high-temperature membrane gas separation. *Polymer*. 2024; 308: 1-10.
41. Khabarov V.B., L'vov A.I., Panina L.I. Mnogofunktional'nyj gazovyj hromatograf dlya analiza mikroprimesej letuchih veshchestv iz gazovyh sred. Trudy II Mezhdunarodnoj konferencii «Sovremennye tekhnologii nauchnogo priborostroeniya i informacionno-izmeritel'nyh sistem», 21-25. (In Russ.)
42. Khabarov V.B. Novoe ustrojstvo dlja vvoda prob organicheskikh vewestv v metode gazovoj hromatografii. *Sorbtionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2013; 13(6): 947-958. (In Russ.)
43. Baskin L.Z., Vaulin V.F., Novikov V.A., Kisilyov N.G. Ampuly ftoroplastovye. Tekhnicheskie usloviya 95-766-80. Kirovo-Chepeckij himicheskij kombinat. 1980, 9 p. (In Russ.)
44. Khabarov V.B. Sozdanie dinamicheskim metodom v potoke azota graduirovочных smesej metanola i formal'degida. *Sorbtionnye i Khromatograficheskie Protsessy*. 2012; 12(4): 513-522. (In Russ.)
45. Grob R.L. Hromatograficheskij analiz okruzhayushchej sredy. M.: Himiya, 1979: 95-103. (In Russ.)
46. MUK 2.1.2.1829-04 «Sanitarno-gigienicheskaja ocenka polimernyh i polimersoderzhawih stroitel'nyh materialov i konstrukcij, prednaznachennyh dlja primenenija v stroitel'stve zhilyh, obwestvennyh i promyshlennyh zdanij», utverzhdeny Glavnym gos. san. vrachom RF 06.01.2004, vvedeny s 01.05.2004. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

В.Б. Хабаров – к.х.н., с.н.с. лаборатории физико-химических основ хроматографии и хромато-масс-спектрометрии, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия, e-mail: Victor.khabarov2013@yandex.ru

Л.И. Панина – д.х.н., профессор, гл. науч. сотр. НИОКО «Биоэкомониторинг», Москва, Россия

V.B. Khabarov – Candidate of Chemistry, senior researcher, laboratory of physico-chemical principles of chromatography and chromatography – mass spectrometry, Institute of Physical chemistry and electrochemistry RAS, Moscow, Russian, e-mail: Victor.khabarov2013@yandex.ru

L.I. Panina – Doctor of Chemical Sciences, Professor, NIOKO «Bioecomonitoring», Moscow, Russian

Статья поступила в редакцию 07.02.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 06.07.2025.

The article was submitted 07.02.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 06.07.2025.