



ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья
УДК 543.054.2.9
doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11691

Планарные микрофлюидные концентраторы на основе Силагерма 8040 для пробоотбора и пробоподготовки при анализе газовых сред

Астхик Эдиковна Маргарян,
Игорь Артемьевич Платонов[✉], Ирина Николаевна Колесниченко,
Екатерина Анатольевна Новикова, Алеся Сергеевна Карсункина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия, ria@ssau.ru[✉]

Аннотация. Выдыхаемый воздух представляет собой матрицу, имеющую сложный молекулярный состав, включающий более 3500 компонентов различного происхождения, содержание которых может показывать нормальное или патологическое состояние здоровья человека.

Одним из селективных маркеров диабета, образующихся в выдыхаемом воздухе, является ацетон. Его повышенное содержание (более 2.54 мг/м³) в выдыхаемом воздухе сигнализирует об избыточном уровне глюкозы в крови. Для осуществления диагностически достоверного количественного анализа ацетона в выдыхаемом воздухе необходимо минимизировать случайные погрешности на всех стадиях пробоотбора, концентрирования и калибровки; предложенные МФК позволяют в идентичных условиях осуществлять пробоподготовку и калибровку, при этом совместить стадию отбора пробы и концентрирования.

Концентрирование пробы производится с помощью микрофлюидных систем на основе Силагерма 8040, заполненных сорбентом. В качестве сорбента выбран Порапак-Q, который перед заполнением в каналы предварительно обрабатывается парами этилового спирта. Сорбционное концентрирование в динамическом режиме с использованием МФК проводится путем пропускания полученной модельной газовой смеси «ацетон в воздухе» с концентрацией 2.54 мг/м³ при t=0°C до появления проскока.

Проведение десорбции с использованием МФК на основе Порапака-Q осуществляется при температурах 50, 60 и 70°C в динамическом режиме путем пропускания очищенного воздуха со скоростью 0.5 см³ хроматографическим методом. Главным достоинством данной системы является возможность включения ее в состав газового микрохроматографа. Полученный аналитический комплекс является мобильным, что позволяет использовать его для проведения независимой диагностики во внелабораторных условиях.

Установлены оптимальные условия концентрирования (t_{сорб}=0°C; t_{дес}=70°C, V_{сорб} = 45 мл, t_{дес} = 1 сек) с использованием МФК, заполненных сорбентом Порапак-Q, при которых достигнуто максимальное значение коэффициента концентрирования, равное 43.

При сравнительном анализе стандартного способа пробоотбора (с использованием тедларового пакета) и предложенного с использованием МФК установлено, что при использовании тедларовых пакетов для отбора проб выдыхаемого воздуха имеет место значительное снижение характеристики правильности (более 30-65%) в течение 12 часов, что не применимо для диагностических целей. Этот факт обусловлен сорбцией аналита на стенках пакета и для устранения нежелательных эффектов необходимо использовать дополнительный этап осушения отбираемой пробы. При использовании для отбора проб МФК такой тенденции не наблюдается, характеристика правильности не снижается более, чем на 6-10% в течение 8 часов и не требуется дополнительных стадий осушения отбираемой пробы выдыхаемого воздуха.

Ключевые слова: анализ выдыхаемого воздуха, сахарный диабет, биомаркер, ацетон, пробоотбор, пробоподготовка, сорбция, десорбция.



Благодарности: работа выполнена в рамках реализации Программы развития Самарского университета на 2021-2030 годы в рамках программы «Приоритет-2030» при поддержке Правительства Самарской области.

Для цитирования: Маргарян А.Э., Платонов И.А., Колесниченко И.Н., Новикова Е.А., Карсункина А.С. Планарные микрофлюидные концентраторы на основе силлагерма 8040 для пробоотбора и пробоподготовки при анализе газовых сред // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 5. С. 732-740. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11691>

Original article

Planar microfluid concentrators based on Silagerm 8040 for sampling and sample preparation for the analysis of gas media

Asthiik E. Margaryan, Igor A. Platonov[✉], Irina N. Kolesnichenko, Ekaterina A. Novikova, Alesya S. Karsunkina

Korolev Samara National Research University (Samara University), Samara, Russia, pia@ssau.ru[✉]

Abstract. Exhaled air is a matrix with a complex molecular composition, including more than 3,500 components of various origins, the content of which can indicate the normal or pathological state of human health. One of the selective markers of diabetes formed in exhaled air is acetone. Its increased content (more than 2.54 mg/m³) in exhaled air indicates excessive levels of glucose in the blood. To carry out a diagnostically reliable quantitative analysis of acetone in exhaled air, it is necessary to minimize random errors at all stages of sampling, concentration and calibration. The proposed MFC allow to carry out sample preparation and calibration under identical conditions, while combining the stages of sampling and concentration.

The sample was concentrated using microfluidic systems based on Silagerm 8040 filled with a sorbent. Porapak-Q was chosen as the sorbent, which was pre-treated with ethyl alcohol vapour before filling into the channels.

Sorption concentration in dynamic mode using an MFC was carried out by passing the resulting model gas mixture “acetone in air” with a concentration of 2.54 mg/m³ at $t = 0^{\circ}\text{C}$ until breakthrough appears.

Desorption using the MFC based on Porapak-Q was carried out at temperatures of 50°C, 60°C, 70°C in dynamic mode by passing purified air at a rate of 0.5 ml/sec (desorption time is one second). The effluent was analysed by gas chromatography. The main advantage of this system is the ability to include it in a gas microchromatograph. The resulting analytical complex is mobile, which allows the usage for non-invasive diagnostics in non-laboratory conditions. Optimal concentration conditions using the MFC filled with Porapak-Q sorbent at which the maximum concentration coefficient of 43 was achieved have been established ($t_{\text{sorb}}=0^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{des}}=70^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{sorb}}=45$ ml, $t_{\text{des}}=1$ sec).

In a comparative analysis of the standard sampling method (using a Tedlar bag) and the method proposed using the MFC, it was found that the use of Tedlar bags for sampling exhaled air resulted in significant decrease in the accuracy characteristics (more than 30-65%) within 12 h, which is not applicable for diagnostic purposes. This fact was due to the sorption of the analyte on the walls of the bag and to eliminate undesirable effects it is necessary to use an additional step of sample drying. When the MFC was used for sampling, such a tendency was not observed, the accuracy characteristic did not decrease by more than 6-10% within 8 hours and no additional stages of drying the sample of exhaled air were required.

Keywords: analysis of exhaled air, diabetes mellitus, biomarker, acetone, sampling, sample preparation, sorption, desorption.

Acknowledgments: the work was carried out as part of the implementation of the Development Program of Samara University for 2021-2030 within the framework of the Priority 2030 program with the support of the Government of the Samara Region.

For citation: Margaryan A.E., Platonov I.A., Kolesnichenko I.N., Novikova E.A., Karsunkina A.S. Planar microfluid concentrators based on silagerm 8040 for sampling and sample preparation for the analysis of gas media. *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2023. 23(5): 732-740. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11691>

Введение

Повышение эффективности диагностики различных заболеваний достигается за счет развития методов неинвазивной диагностики, которые позволяют выявлять заболевания на ранних стадиях, исключая при этом физический и эмоциональный дискомфорт пациента. К неинвазивным методам диагностики можно отнести анализ газообразных компонентов, входящих в состав выдыхаемого воздуха.

Выдыхаемый воздух – это многокомпонентная смесь, состоящая из тысячи летучих органических соединений (ЛОС), содержание которых может показывать нормальное или патологическое состояние здоровья человека. Около 20 из них используются в качестве биомаркеров различных заболеваний. В число селективных соединений входит ацетон, который образуется в результате окисления жиров. Его повышенное содержание в выдыхаемом воздухе сигнализирует об избыточном уровне глюкозы в крови, что позволяет использовать ацетон в качестве биомаркера сахарного диабета [1].

Согласно статистике Всемирной организации здравоохранения численность лиц, страдающих сахарным диабетом, неуклонно растет и на сегодняшний день составляет до 422 миллионов пациентов в мире, которым необходим постоянный контроль за уровнем глюкозы в крови, в этой связи ранняя диагностика сахарного диабета является актуальной задачей [2].

Так как ацетон в выдыхаемом воздухе находится на уровне микропримесей, возникает необходимость предварительного концентрирования для увеличения чувствительности и точности определения.

Перспективным направлением в области аналитического приборостроения является разработка микрофлюидных устройств, представляющих собой системы тонких каналов на поверхности различных материалов, таких как стекло,

кремний, различные полимерные материалы [3], а наиболее актуальной тенденцией развития аналитического приборостроения является миниатюризация, что позволяет увеличить доступность и мобильность аналитических приборов и расширить границы их использования за пределами лаборатории [4].

Для определения ЛОС широкое применение нашли МФК, состоящие из микрополостей и микроканалов, заполненных сорбентом. Принцип работы микрофлюидных систем заключается в концентрировании аналита при ламинарном движении потока в узких пересекающихся каналах особой геометрии [5]. МФК позволяют достичь высокой чувствительности определения (до 0.5 ppb), и обеспечивают сравнительно короткое время проведения анализа (до 2 мин) [6]. Изготовление таких систем является актуальной задачей и перспективным научным направлением.

Целью настоящего исследования является разработка планарных МФК для количественного анализа ацетона в сложных смесях с высокой точностью и чувствительностью методом газовой хроматографии.

Экспериментальная часть

Методика изготовления планарных МФК

Изготовление шаблонов для получения МФК. Методика изготовления планарных МФК включает ряд этапов. На первом этапе изготавливаются алюминиевая и полимерная на основе АБС (акрилонитрил бутадиен стирол, далее – полимерная) матрицы, используемые в качестве шаблонов при создании первой части планарных МФК. Алюминиевая матрица изготавливается методом микрофрезерования, полимерная матрица с использованием аддитивных технологий путем 3D-печати, при этом полученные шаблоны имеют одну конфигурацию и

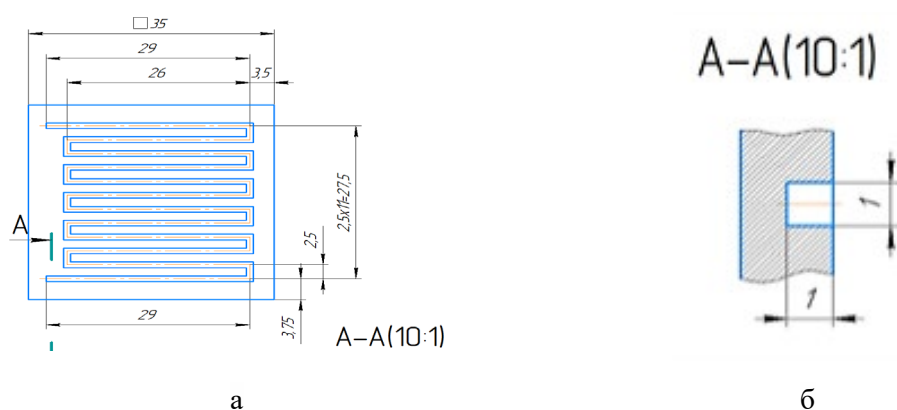


Рис. 1. Чертеж алюминиевой и полимерной матриц, используемых в качестве шаблонов для изготовления МФК

Fig. 1. Drawing of aluminium and polymer matrices used as templates for the manufacture of MFC

одинаковые геометрические характеристики, представленные на рисунке 1. Высокой производительностью отличаются МФК со змеевидной конфигурацией каналов за счет небольшого числа поворотов [7].

Аналогичным образом изготавливаются шаблоны для получения второй части планарных МФК, представляющую собой плоскую пластину без змеевидного канала размером $35 \times 35 \times 2$ мм.

В рамках данной работы были рассмотрены шаблоны для изготовления МФК из двух различных материалов для проведения сравнительной оценки геометрии сформированных каналов и возможной адгезии.

Использование аддитивных технологий позволяет создавать сложные и замкнутые внутренние каналы любой геометрии поперечного сечения при изготовлении желаемого объекта путем наслаивания. Применение 3D-печати позволяет относительно быстрое изготовление сложных конструкций 3D-каналов с любым желаемым поперечным сечением канала. Кроме того, в последнее время наблюдается экспоненциальный рост числа материалов для 3D-печати, начиная от полимеров (прозрачных, непрозрачных, биосовместимых и т.д.) и керамики, заканчивая металлами [8].

Изготовление первой и второй частей планарных МФК на основе Силагерма 8040. Следующим этапом изготовления МФК является заливка шаблонов двухкомпонентной смесью на основе Силагерма 8040.

Силагерм 8040 – высокопрочный, безусадочный силиконовый двухкомпонентный компаунд для изготовления эластичных форм для заливки в них пластиков, смол, воска, гипса, мыла, полиуретана и т.д., а также изготовления изделий технического назначения. Компоненты компаунда абсолютно инертны, рабочая температура может достигать 250°C .

Первая часть МФК экспонируется в течение двух часов при комнатной температуре до полной полимеризации, вторая часть МФК – в течение одного часа, при этом полимеризация протекает частично. После экспонирования полученные образцы извлекаются из шаблона. На рисунке 2 представлена первая часть МФК из двухкомпонентной смеси на основе Силагерма 8040 после полной полимеризации при комнатной температуре:

Достоинством алюминиевого шаблона является меньшая адгезия полученного

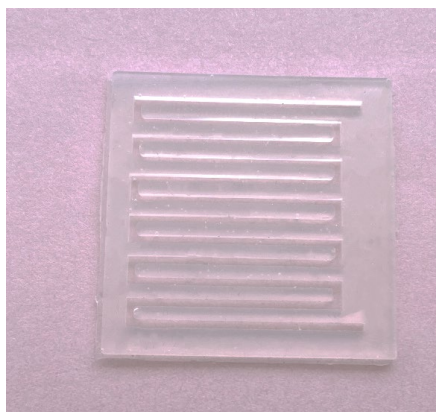


Рис. 2. Первая часть МФК из двухкомпонентной смеси на основе Силагерма 8040 после полной полимеризации при комнатной температуре

Fig. 2. The first part of MFC from a two-component mixture based on Silagerm 8040 after complete polymerization at room temperature

образца и, как следствие, большая вероятность извлечения первой части МФК без разрушения. Достоинством использования полимерного шаблона является способность более точного воспроизведения геометрических параметров МФК.

Заполнение сорбентом. Третьим этапом изготовления планарных МФК является заполнение сорбентом сухим способом. В качестве сорбента выбран Порапак-Q, который перед заполнением в каналы предварительно обрабатывается парами этилового спирта. Подготовленный сорбент укладывается шпателем в соответствующие каналы, избытки сорбента убираются.

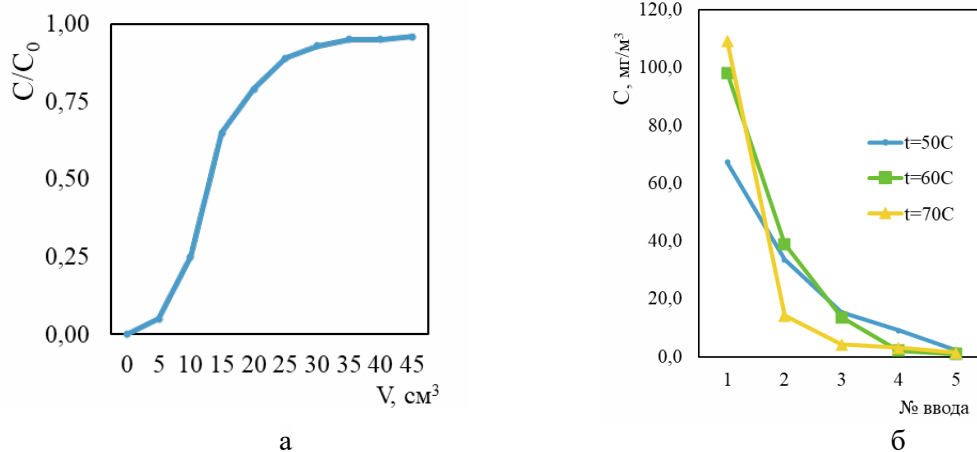
Герметизация. При проведении этапа герметизации первая часть МФК со сформированными каналами, заполненными сорбентом, закрывается второй частью МФК, которая полимеризована частично. Полученные формы герметично скрепляются между собой и помещаются под пресс на один час до полной полимеризации второй части МФК и для создания трубчатой системы с закрытым каналом. Сформированная микрофлюидная колонка также герметизируется газопроницаемыми заглушками во избежание потери сорбента при эксплуатации.

Экспериментальное исследование МФК. Эксперимент проводится на переносном малогабаритном газовом хроматографе ПИА с микротермохимическим

детектором (номер в Государственном реестре средств измерения № 60785-15) и микронасадочной хроматографической колонкой (длина 1 м, сечение 1×1 мм), заполненной сорбентом Carborack В (диаметр частиц 0.10-0.12 мм). В состав газового хроматографа входит планарный микротермодесорбер непрерывного действия [6]. Использование высокоэффективного термоизоляционного материала на основе аэрогеля и силиконовой матрицы позволяет снизить температуру сорбции до 0°C при сохранении небольших габаритов устройства.

Анализ проводится при следующих условиях: температура колонки 70°C , температура дозатора 60°C , расход подвижной фазы (воздух) $5.5 \text{ см}^3/\text{мин}$, объем вводимой пробы 150 мкл.

Приготовление стандартных газовых смесей, содержащих микропримеси ацетона известной массы, проводится согласно ГОСТ 6144-2008 Анализ газов. Приготовление градуировочных смесей. Статический объемный метод [9]. В качестве аналита используется ацетон со степенью чистоты 99.9%. Стандартные газовые смеси для градуировки прибора получены путем последовательного разбавления исходных стандартных газовых смесей. Коэффициент корреляции градуировочной зависимости составляет $R^2=0.999$.



а – сорбционная кривая при проведении концентрирования с использованием МФК на основе Порапака-Q при $t = 0^{\circ}\text{C}$; б – десорбционная кривая, полученная при использовании МФК на основе Порапака-Q при $t = 50, 60$ и 70°C

Рис. 3. Сорбционная и десорбционные кривые, полученные с использованием планарных МФК на основе Силагерма 8040, заполненных сорбентом Порапак-Q

Fig. 3. Sorption and desorption curves obtained using planar MFC based on Silagerm 8040 filled with Porapak-Q sorben

Для определения коэффициента концентрирования ацетона в воздухе с использованием МФК используется стандартная газовая смесь, содержащая

2.54 мг/м^3 ацетона в воздухе. Поскольку данные о предельно допустимом содержании ацетона несколько разнятся [10] и [11], выбирается наименьшее граничное значение между здоровым и уровнем ацетона в выдыхаемом воздухе, соответствующем началу патологии.

Сорбционное концентрирование в динамическом режиме с использованием МФК проводится путем пропускания полученной модельной газовой смеси «ацетон в воздухе» с концентрацией 2.54 мг/м^3 при $t=0^{\circ}\text{C}$ до появления проскока, то есть до выравнивания концентрации на входе в систему и выходе. Поток, выходящий из МФК, анализируется газохроматографическим методом.

Проведение десорбции с использованием МФК на основе Порапака-Q осуществляется при температурах $50, 60$ и 70°C в динамическом режиме путем пропускания очищенного воздуха со скоростью $0.5 \text{ см}^3/\text{сек}$ (время проведения де-

сорбции составляет одну секунду). Выходящий поток анализируется газохроматографическим методом.

Обсуждение результатов

Результаты проведения сорбции и десорбции. При реализации сорбции и десорбции получены следующие зависимости, представленные на рис. 3 (а, б).

В результате проведения десорбции при различных температурах установлено, что большая часть сорбированного ацетона десорбируется при первом вводе. При $t=50^{\circ}\text{C}$ десорбируется 52.7% ацетона, при $t=60^{\circ}\text{C}$ – 63.8% , при $t=70^{\circ}\text{C}$ – 82.6% . В связи с этим для дальнейших исследований была выбрана температура 70°C .

С использованием планарных МФК на основе Силагерма 8040, заполненных сорбентом Порапак-Q, при выбранных условиях достигнуто максимальное значение коэффициента концентрирования, равное 43 .

Относительное среднее квадратичное отклонение среднего арифметического

Таблица 1. Концентрация ацетона при пробоотборе

Table 1. Concentration of acetone during sampling

Условное время хранения образца	Первый способ пробоотбора		Второй способ пробоотбора	
	Измеренная концентрация ацетона $C \pm \Delta$, мг/м ³	Правильность, %	Измеренная концентрация ацетона $C \pm \Delta$, мг/м ³	Правильность, %
0 часов	2.49±0.07	2	2.51 ± 0.07	2
2 часа	2.23±0.07	12	2.39 ± 0.07	6
4 часа	1.86±0.07	30	2.32 ± 0.07	9
8 часов	1.67±0.08	47	2.30 ± 0.07	10
12 часов	1.45±0.08	65	2.28 ± 0.07	11

результата (СКО) SR (%) рассчитывалось согласно ГОСТу [12].

Использование изготовленных планарных МФК для пробоотбора. Изготовленные планарные МФК могут быть использованы для отбора выдыхаемого воздуха, хранения в течение длительного времени, транспортировки и проведения анализа во внелабораторных условиях. Для установления целесообразности применения изготовленных МФК в качестве систем для пробоотбора была проведена сравнительная оценка двух способов пробоотбора.

Первый способ заключается в отборе модельной газовой смеси «ацетон в воздухе» с концентрацией 2.54 мг/м³ в тедларовый пакет.

Второй способ заключается в пропуске модельной газовой смеси «ацетон в воздухе» с концентрацией 2.54 мг/м³ объемом 45 см³ через МФК при температуре 0°C с последующей десорбцией при температуре 70°C.

В обоих случаях хроматографический анализ проводился через определённые промежутки времени (таблица 1).

При использовании первого способа пробоотбора наблюдается ухудшение характеристик правильности газовой смеси (более 30-65%), что связано с сорбцией аналита на стенках пробоотборника, что в свою очередь усугубляется наличием паров воды в выдыхаемом воздухе, которые конденсируются в тедларовом пакете на стенках при хранении более 2 часов.

При использовании второго способа пробоотбора с использованием МФК характеристика правильности составляет 6-10% для периода хранения до 8 часов.

Заключение

Предложена конфигурация МФК, которые представляют собой пластины на основе Силагерма 8040 с микроканалами, заполненными сорбентом Порапак-Q. В качестве аналита выбран ацетон как ключевой биомаркер сахарного диабета. Подобраны условия концентрирования с использованием МФК. Оценена возможность использования МФК для пробоотбора и пробоподготовки с учетом периода хранения пробы.

Установлены оптимальные условия концентрирования ($t_{\text{сорб}}=0^\circ\text{C}$; $t_{\text{дес}}=70^\circ\text{C}$, $V_{\text{сорб}}=45 \text{ см}^3$, $t_{\text{дес}}=1 \text{ сек}$) с использованием МФК, заполненных сорбентом Порапак-Q, при которых достигнуто максимальное значение коэффициента концентрирования, которое равно 43.

При сравнительном анализе стандартного способа пробоотбора (с использованием тедларового пакета) и предложенного с использованием МФК установлено, что при использовании тедларовых пакетов для отбора проб выдыхаемого воздуха имеет место значительное снижение характеристики правильности (более 30-65%) в течение 12 часов, что не применимо для диагностических целей. Этот факт обусловлен сорбцией аналита на стенках пакета и для устранения неже-



лательных эффектов необходимо использовать дополнительный этап осушения отбираемой пробы. При использовании для отбора проб МФК такой тенденции не наблюдается, характеристика правильности не снижается более, чем на 6-10% в течение 8 часов и не требуется дополнительных стадий осушения отбираемой пробы выдыхаемого воздуха.

Список литературы

1. Копылов Ф.Ю., Сыркин А.Л., Чохамидзе П.Ш. Перспективы диагностики различных заболеваний по составу выдыхаемого воздуха // *Клиническая медицина*. 2013. № 10. С. 16-21.

2 Глобальный доклад по диабету // www.who.org: Всемирная организация здравоохранения. – 2016. – URL: <http://www.who.org/diabetes/global-report/ru/> (дата обращения 10.01.2023).

3 Платонов И.А., Платонов Вл.И., Платонов Вал.И., Рощупкина И.Ю. Пилларные МЭМС колонки для газовой хроматографии // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2018. Т. 18, № 2. С. 243-247.

4 Платонов Вал.И. Микрофлюидные колонки для газовой хроматографии : дис...канд. хим. Наук. Воронеж, 2020. 102 с.

5 Li S. A fast-response microfluidic gas concentrating device for environmental sensing // *Sensors and Actuators A*. 2007. Vol. 136. P. 69-79.

6 Горюнов М.Г. Определение летучих соединений в газовых средах с использованием газохроматографических микрофлюидных систем: диссертация на соискание ученой степени канд. хим. наук. Воронеж, 2019. 107 с.

7 Ghosh A. Microchip gas chromatography columns, interfacing and performance // *Talanta*. 2018. Vol. 188. P. 463-492.

8 Gupta V., Talebi M., Deverell J., Sandron S., Nesterenko P.N. 3D printed titanium micro-bore columns containing polymer monoliths for reversed-phase liquid

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.

chromatography // *Analytica Chimica Acta*. 2016. Vol. 910. P. 84-94.

9 ГОСТ 6144 – 2008. Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Статический объёмный метод. М.: Стандартинформ, 2009. 23 с.

10 Малышева А.О., Балдин М.Н., Грузнов В.М., Блинова Л.В. Внелабораторный экспрессный газохроматографический способ анализа выдыхаемого человеком воздуха с автоматизированной градуировкой // *Аналитика и контроль*. 2018. Т. 22, № 2. С. 177-185.

11 Sagnik Das, Mrinal Pal. Non-Invasive Monitoring of Human Health by Exhaled Breath Analysis: A Comprehensive Review, *Journal of The Electrochemical Society*, 2020. Vol. 167. 037562. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab67a6>

12 ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения (с Поправкой). М.: Стандартинформ. 2019.

References

1. Kopylov F.YU., Syrkin A.L., Chokhamidze P.SH. Perspektivy diagnostiki razlichnyh zabolevanij po sostavu vydyhaemogo vozduha. *Klinicheskaya medicina*. 2013; 10: 16-21.

2 Global'nyj doklad po diabetu // www.who.org: Vsemirnaya organizaciya zdavoohraneniya. – 2016. – URL: <http://www.who.org/diabetes/global-report/ru/> (data obrashcheniya 10.01.2023).

3 Platonov I.A., Platonov V.I., Platonov V.I., Roshchupkina, I.Y. Pillar MEMS columns for gas chromatography. *Sorbtsionnye*



I Khromatograficheskie Protsessy, 2018; 18(2): 243-247.

<https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2018.18/506>

4 Platonov Val.I. Mikroflyuidnye kolonki dlya gazovoj hromatografii : dis....kand. him. Nauk. Voronezh, 2020. 102 s.

5 Li S. A fast-response microfluidic gas concentrating device for environmental sensing. *Sensors and Actuators A*. 2007; 136: 69-79.

6 Goryunov M.G. Opredelenie letuchih soedinenij v gazovyh sredah s ispol'zovaniem gazohromatograficheskikh mikroflyuidnyh sistem: dissertaciya na soiska-nie uchenoj stepeni kand. him. Nauk. Voronezh, 2019. 107 p.

7 Ghosh A. Microchip gas chromatography columns, interfacing and performance // *Talanta*. 2018. Vol. 188. P. 463-492.

8 Gupta V., Talebi M., Deverell J., Sandron S., Nesterenko P.N. 3D printed titanium micro-bore columns containing polymer monoliths for reversed-phase liquid

chromatography. *Analytica Chimica Acta*. 2016; 910: 84-94.

9 GOST 6144 – 2008. Analiz gazov. Prigotovlenie graduirovochnyh gazovyh sme-sej. Statcheskij ob"yomnyj metod. M.: Standartinform, 2009. 23 s.

10 Malysheva A.O., Baldin M.N., Gruznov V.M., Blinova L.V. Vnelaboratornyj ekspressnyj gazohromatograficheskij sposob analiza vydyhaemogo chelovekom voz-duha s avtomatizirovannoj graduirovkoj. *Analitika i kontrol'*. 2018; 22(20): 177-185.

11 Sagnik Das, Mrinal Pal. Non-Invasive Monitoring of Human Health by Exhaled Breath Analysis: A Comprehensive Review, *Journal of The Electrochemical Society*, 2020; 167: 037562. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab67a6>

12 GOST R 8.736-2011 Gosudarstvennaya sistema obespecheniya edinstva izmerenij (GSI). Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmere-nij. Osnovnye polozheniya (s Popravkoj). M.: Standartinform. 2019.

Информация об авторах / Information about the authors

А.Э. Маргарян – аспирант кафедры химии, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

И.А. Платонов – заведующий кафедрой химии, профессор, д.т.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

И.Н. Колесниченко – доцент кафедры химии, к.х.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

Е.А. Новикова – доцент кафедры химии, к.х.н., Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

А.С. Карсункина – аспирант кафедры химии, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Самара, Россия

A.E. Margaryan – the postgraduate student of the Department of Chemistry, Samara National Research University, e-mail: asyaigithanyan@mail.ru

I.A. Platonov – Head of the Department of Chemistry, Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Chemistry, Samara National Research University, Samara, Russia, e-mail: pia@ssau.ru

I.N. Kolesnichenko – candidate of chemical sciences, associate professor, Department of Chemistry, Samara National Research University Samara National Research University, Samara, Russia, e-mail: irniks@mail.ru

E.A. Novikova – candidate of chemical sciences, associate professor, Department of Chemistry, Samara National Research University Samara National Research University, Samara, Russia, e-mail: novikova.ea@ssau.ru

A.S. Karsunkina – the postgraduate student of the Department of Chemistry, Samara National Research University, Samara, Russia, e-mail: karsunkina.alesya@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15.06.2023; одобрена после рецензирования 27.07.2023; принята к публикации 02.08.2023.

The article was submitted 15.06.2023; approved after reviewing 27.07.2023; accepted for publication 02.08.2023.