



УДК 543.07

Микрофлюидные системы в газовом анализе (обзор)

Платонов И.А., Платонов В.И., Колесниченко И.Н., Горюнов М.Г.

ФГАОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» Самара

Поступила в редакцию 16.11.2015 г.

Рассмотрены основные тенденции развития, принципы функционирования и технологии создания микрофлюидной техники для экспрессного газохроматографического анализа на основании обобщения отечественных и зарубежных научных работ с 1979 г. по настоящее время. Показаны перспективы использования микрофлюидных систем в газовом анализе.

Ключевые слова: микрофлюидные системы, анализ газов, газовая хроматография, капиллярные колонки, микроэлектромеханические системы, лаборатория на чипе

Microfluidic systems in gas analysis (review)

Platonov I.A., Platonov V.I., Kolesnichenko I.N., Gorynov M.G.

Samara state aerospace university, Samara

The article presents the basics of the microfluidic technology for gas chromatographic analysis. The review includes domestic and foreign publications from 1979 to 2015. The main materials for the manufacture of the microfluidic systems are silicon, glass and polymer plates. For the manufacture of microfluidic systems it is advisable to use of planar and three-dimensional microtechnology, allowing to form two-dimensional and three-dimensional structures on the substrate. The general scheme of the creation of microfluidic systems includes the preparation of the substrate (silicon, quartz, glass, plastic, etc.), creation of a template for the selected topology microfluidic system, the formation of micro-relief and sealing channels. The advantages of microfluidic devices for gas analytical equipment (dispensers, concentrators, columns, detectors) are presented. The use of microfluidic systems in gas analysis technique allows you to create not only a compact portable devices, but also can reduce the analysis time in thirty or more times compared with stationary devices.

Keywords: microfluidic systems, gas analysis, gas chromatography, capillary columns, micro electro mechanical systems, Lab-on-a-Chip.

Введение

История микрофлюидики начинается с начала пятидесятих годов прошлого века, когда были созданы устройства, обеспечивающие дозирование жидкости в нано- и субнанолитровых диапазонах, в дальнейшем, данные устройства нашли применение в создании современных струйных принтеров [1]. С точки зрения движения вещества внутри микроканалов субмиллиметрового сечения, классической является работа, опубликованная в 1979 году, в которой рассмотрен газовый хроматограф, созданный на плоскости кремниевой пластины [2]. Первый жидкостный хроматограф, колонка которого была изготовлена по технологии анодного сращивания стекла и кремния, был описан в статье, опубликованной в

1990 году А. Мансом и сотрудниками [3]. В конце 80-х годов прошлого столетия были созданы первые микроклапаны [4] и микронасосы [5] на основе технологий плазмохимического травления кремния. Все вышеперечисленные устройства являются примерами микрофлюидных систем, позволяющих точно контролировать потоки вещества, при обеспечении миниатюризации размеров системы.

Концепция «микроаналитических систем» (МАС) или «micro-Total Analysis System» (μ -TAS), предложенная А. Мансом в 1989 г. [6], на первом этапе сводилась к интеграции всех стадий аналитического цикла на кремниевом микрочипе с разветвленной системой каналов, в которых должна осуществляться предварительная подготовка пробы, разделение и последующее детектирование. К достоинствам подобных приборов можно отнести: малый объем анализируемых проб; малый расход реагентов; сокращение времени проведения анализа за счет ускорения аналитических реакций и транспорта реагентов; возможность встраивания микрочипов в существующие аналитические системы со сложной архитектурой; простоту и высокую воспроизводимость микрочипов при изготовлении; компактность, относительно небольшую стоимость и возможность массового производства.

Значительные успехи в развитии МАС прямо связаны с прогрессом в области микроэлектромеханических систем (МЭМС), или Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Одним из типов МАС являются Микрофлюидные аналитические системы (МФАС) [7], известные также как «Микрофлюидные системы» (МФС) или «Micro Fluidic Systems» или «Microfluidics» (MFS), или «лаборатория на чипе» (LOC, Lab-on-a-Chip). В основе МФАС лежит принцип микрофлюидики – ламинарного движения жидкости в узких каналах. Пересекающаяся система каналов и реакторов МФАС дополняется элементами лазерной фотоники: лазерами, интегральной оптикой и оптоэлектроникой, новейшими фотоприемными устройствами.

Принципы создания и функционирования микрофлюидных систем

Для создания микрофлюидных систем на данный момент существуют простые, доступные и недорогие методики, предполагающие формирование микрорельефных конструкций на плоскости кремниевых, стеклянных и полимерных пластин. Для этих целей могут использоваться планарные и объемные микротехнологии, позволяющие формировать на соответствующей подложке двумерные и трехмерные структуры. Общая схема создания микрофлюидных систем состоит из следующих этапов: 1) подготовка подходящей подложки (кремний, кварц, стекло, пластик и др.); 2) изготовление шаблона для выбранной топологии микрофлюидной системы; 3) формирование микрорельефа (системы каналов); 4) герметизация каналов.

В зависимости от выбранной технологической схемы каждого из этапов набор операций и способов их реализации может быть различным. В настоящее время для формирования микрорельефа в микрофлюидных системах используется МЭМС-технологии, которые позволяют с высокой воспроизводимостью получать наноразмерные химически инертные устройства, широко применяющиеся в аналитической химии для анализа газовых сред. В микрофлюидных устройствах обычно требуется создавать каналы и реакционные камеры с размерами от десятков до нескольких сотен микрон. Профиль канала на всей протяженности должен быть достаточно гладким и однородным, одним из требований к поверхности каналов

является обеспечение малых размеров шероховатости для сохранения ламинарности потоков. С другой стороны, при создании реакционной камеры для перемешивания растворов, наоборот, желательно получить достаточно «грубую» поверхность, обеспечивающую появление турбулентных течений.

Одной из актуальных проблем проектирования современной микрофлюидики, является повышение удельной поверхности сорбционных частей микрофлюидных устройств. В работе [8] рассмотрены несколько способов включения пористых материалов в микрофлюидные устройства. Среди них создание мембран (рис. 1 а), поликапиллярные системы (рис. 1 б), создание неупорядоченных (рис. 1 в) и упорядоченных адсорбционных слоев (рис. 1 г).

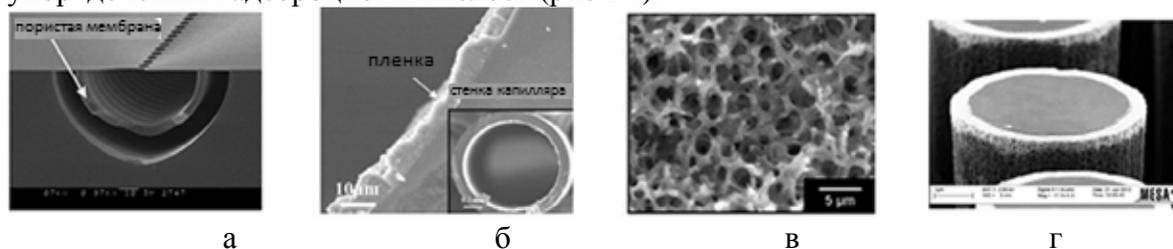


Рис. 1. Фотографии пористых материалов для микрофлюидных устройств: а – мембраны; б – поликапиллярные системы; в – неупорядоченные адсорбционные слои; г – упорядоченные адсорбционные слои

Помимо химического модифицирования удельную поверхность рабочих камер микрофлюидных систем можно увеличить за счет применения адсорбентов различной дисперсности и химической природы, например нанотрубок, фуллеренов, нанодисперсных оксидов кремния и алюминия, наночастиц золота, нанодиазидов.

Для оптимизации функционирования микрофлюидных систем проводится математическое моделирование процессов формирования скоростных, концентрационных, электрических и тепловых полей в элементах микрофлюидных аналитических систем [9, 10]. Установлено, что реализованные варианты анализов на микрочипах не ограничиваются режимами ламинарных потоков. Прежде всего, это относится к системам не с электрокинетическим вводом, а с вводом вещества под давлением, которые базируются на системе уравнений Навье-Стокса. Наглядным примером может служить микрофлюидная система, представленная в работе [11], в которой газовая смесь (1% гексафторида серы в азоте) вводится в камеру через изогнутое сопло (рис. 2). Благодаря изогнутой стенке камеры создается центростремительное ускорение, что обуславливает градиент концентрации гексафторида серы в направлениях, перпендикулярных линий тока газа. Более тяжелые молекулы SF_6 концентрируются в области стенки. Затем с использованием системы переключения потоков отделяется обогащенный газ, а остальная смесь проходит дальше по системе. Представленное устройство является газовой микроцентрифугой, позволяющей получать распределение потоков газовых смесей в соответствии с молекулярными массами компонентов их составляющих.

Данное устройство создано без применения мембран, электронных устройств управления потоком, а также без использования адсорбционных материалов, что значительно снижает его стоимость, а также время одного цикла обогащения, так для данной системы оно составляет меньше чем 0,01 миллисекунду. Данное устройство может быть использовано для разработки каскадного концентратора, в котором числом элементарных ячеек можно регулировать уровень концентрации газовой смеси на выходе. Такие устройства могут способствовать развитию

миниатюрных высокоскоростных анализаторов, применимых, например, для мониторинга окружающей среды в режиме реального времени.

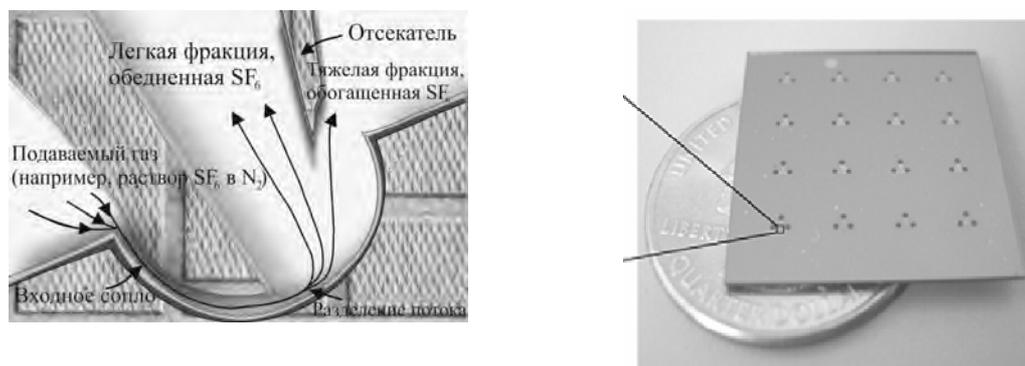


Рис. 2. Фотография микрофлюидного чипа и схема микрофлюидного концентрационного элемента [11]

Основной проблемой современной микрофлюидики является контроль потока газа протекающего через датчик, определяющий микроконцентрации примесей в воздухе. Трудность заключается в контроле постоянства параметров окружающей среды, которые влияют на температуру и расход газа протекающего через детектирующую систему. В работе [11] представлен расчет тепловых потоков, за счет которых будет создаваться конвекция газа, натекающего на чувствительный элемент, выполненный из триоксида вольфрама. Показано, что необходимый диапазон чувствительности (10-100 ppm) будет достигнут при разности температур на входе и выходе канала в 77 К. Материал, из которого изготавливается микрофлюидная система, существенно влияет на распределение температуры в микросистеме, и, в частности, в микроканале, что в свою очередь определяет скорость натекания газа на датчик. Моделирование было выполнено для кремниевых пластин и стекла марки «Пирекс», так как оно имеет лучшие свойства по сравнению с кремниевыми пластинами, обусловленные его низкой теплопроводностью, тем не менее оно имеет ряд недостатков: трудность обработки его поверхности, анодное сращивание системы стекло-стекло провести гораздо сложнее, чем системы стекла марки «Пирекс»- кремний. Из этих факторов, именно кремний был выбран в качестве пластины, на которой формируется микрофлюидная система, а стекло марки «Пирекс» в качестве герметизирующей пластины.

Технологии создания микрофлюидных систем

Для создания микрофлюидных систем существуют десятки комплексных методов формирования каналов и структур внутри каналов, герметизации полученных микрорельефных конструкций, химического и физического модифицирования внутренней поверхности микрофлюидных систем. На кремниевых пластинах микроканалы формируются с помощью литографии и плазмохимического травления [12-14].

Микрофлюидные системы могут представлять собой моно и поликапилляры, а также конструкции более сложного рельефа, необходимого для более эффективного массообмена или смешения газов на плоскости кремниевых пластин. Форма и взаиморасположение каналов на плоскости обуславливаются

функционалом создаваемой микрофлюидной системы, так длина, в зависимости от функций устройства, может варьироваться от 1 мкм до десятков метров. В зависимости от типа канала (моно или поликапилляр), для создания более эффективных микрофлюидных устройств, будет варьироваться рисунок маски, наносимой на кремниевую подложку. Внутреннюю поверхность создаваемых таким образом микрофлюидных систем, как правило, модифицируют пленками полимеров или слоями адсорбентов в целях улучшения хроматографических свойств, создаваемых разделительных колонок. Мощным инструментом для роста низкотемпературных тонких пленок на различных подложках является метод осаждения атомных слоев (МОАС). МОАС позволяет получать однородные микроканалы сложного рельефа, включая наноструктурные поверхности, с точностью в пределах нескольких ангстрем. Использование МОАС покрытий для хроматографических разделений применялось для создания устройств ультратонкослойной хроматографии, что привело к значительному расширению возможностей метода [15].

Модифицирование слоя оксида алюминия хлордиметилоткадецилсиланом, приводит к увеличению селективности хроматографической системы к исследуемым анализам, повышению сорбционной емкости и увеличению эффективности микрофлюидной системы. Это наглядно демонстрируется на рисунке 3, на котором представлены хроматограммы разделения одной и той же смеси анализитов на колонке с адсорбционным слоем диоксида алюминия и на той же колонке, модифицированной хлордиметилоткадецилсиланом (условия хроматографического эксперимента идентичны).

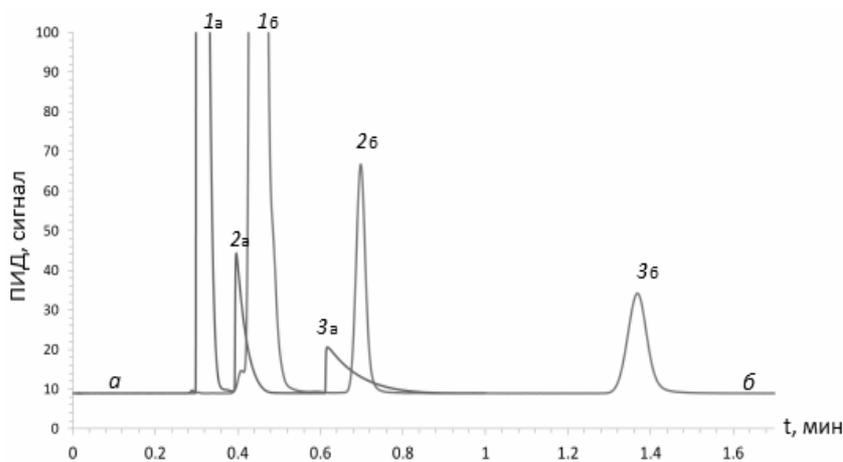


Рис. 3. Хроматограммы разделения смеси алканов на колонке с Al_2O_3 и на той же колонке, модифицированной хлордиметилоткадецилсиланом (давление на входе в колонку – 0,7 атм, температура колонки – 50°C): сигнал (а) – силанизированный сорбент; сигнал (б) – немодифицированный сорбент; 1 – *n*-гексан; 2 – *n*-октан; 3 – *n*-декан

При создании микрофлюидных систем на стеклянных пластинах оригинальной является методика, описанная в работе [16], которая заключается в соединении двух стеклянных пластин с каналами, полученными химическим травлением. Герметизация пластин осуществлялась по схеме, представленной на рис. 4. Химические превращения, происходящие во время манипуляций, показанных на рис. 4, схематично описаны на рис. 5. Микрофлюидные системы, созданные по данной технологии, выдерживают давление во внутренних каналах до 50 атм. Для

создания микрофлюидных систем на полимерных пластинах наиболее часто применяется фотополимеризуемые полимеры (например, полиметилметакрилат) [17], на основе которых микрофлюидные каналы формируются методом фотолитографии. Схема создания микрофлюидной системы на основе полимерной фотолитографии представлена на рис. 6.

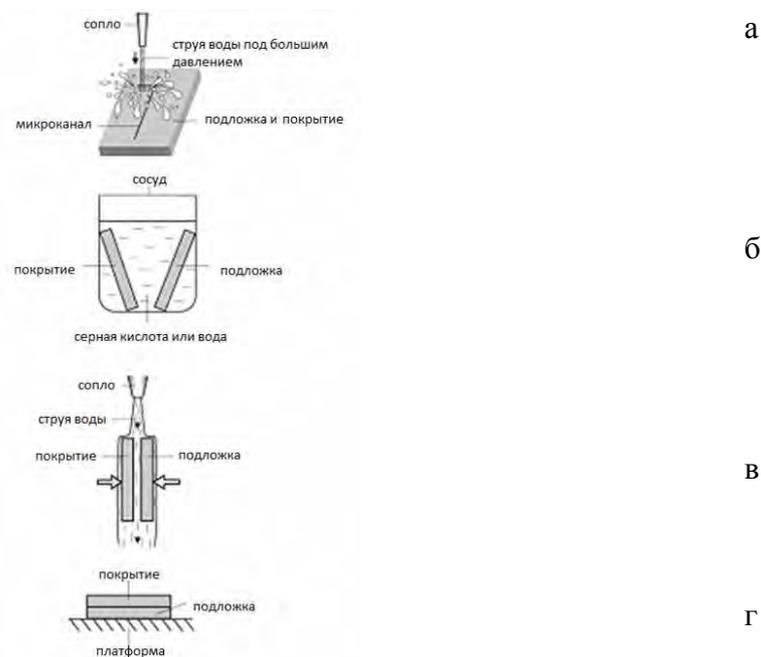


Рис. 4. Схема герметизации микрофлюидных систем на плоскости стеклянных пластин [16]: а – промывание водой (скорость потока 10-20 м/с); б – установка в концентрированном растворе серной кислоты; в – соединении при непрерывном смачивании их поверхности деминерализованной водой; г – установка в течение 5 ч при комнатной температуре

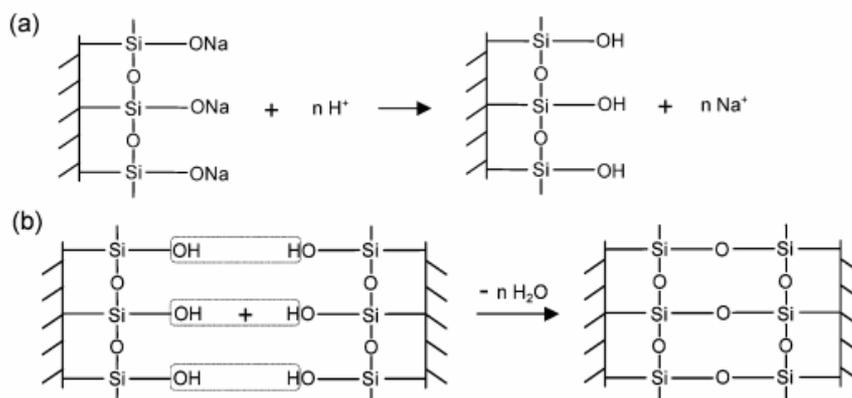


Рис. 5. Химические превращения, происходящие при создании систем на плоскости стеклянных пластин при комнатной температуре [16]: а – формирование гидролизованного слоя на поверхности подложки; б – дегидратация и конденсация Si-OH групп

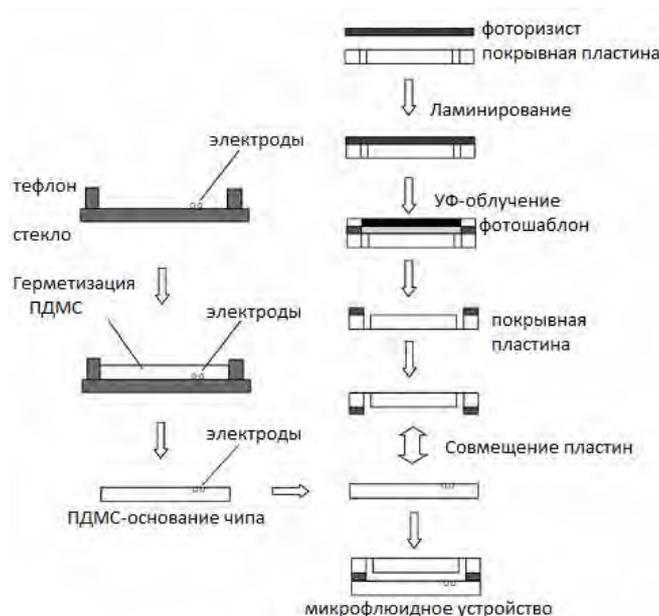


Рис. 6. Схема создания микрофлюидной системы методом полимерной фотолитографии [17]

Микрофлюидные системы для газовой хроматографии

Современные микрофлюидные системы находят широкое применение в аналитической химии для дозирования, транспортировки, разделения самого широкого спектра веществ. В высокоэффективной жидкостной хроматографии за последние десять лет широко рассмотрены дозирующие устройства [18-22] и разделительные колонки [23-25], основанные на микрофлюидных системах и позволяющие работать в нанолитровых диапазонах расхода элюента. В капиллярном электрофорезе микрофлюидные системы используются для дозирования и разделения аналитов [26-28]. Распространенным применением микрофлюидных систем является экстракция и создание смесей веществ в микроканалах [11].

В анализе газовых сред микрофлюидные системы широко применяются для концентрирования токсичных микропримесей из воздуха и для разделения широкого спектра органических и неорганических аналитов, в качестве сенсоров, чувствительные элементы которых основаны на различных физико-химических принципах, для количественного анализа микро- и нано- концентраций исследуемых веществ в газовых средах. Ассортимент устройств для анализа газа, принципы работы которых основаны на микрофлюидных и микроэлектромеханических системах, показывает, что применение данных технологий позволяет создавать портативные аналитические приборы, чувствительность которых достигает 0.5 ppb_v , и сократить время одного цикла анализа до 0.2 мин.

В исследовании [29] рассмотрен трехступенчатый концентратор (рис. 7) для пробоподготовки в анализе следовых количеств органических соединений в газовых средах. За счет применения трех адсорбентов с различной удельной поверхностью, существенно увеличивается емкость концентратора и спектр эффективно концентрируемых органических веществ. В настоящее время, развитие микротехнологий позволяет создавать дешевые концентраторы с низким потреблением электроэнергии и расходных материалов, которые могут быть включены в существующие аналитические системы или интегрироваться в микрочиповые устройства на основе микроэлектромеханических систем вместе с чувствительными элементами. Микроконцентратор может выполнять функции

извлечения образца и ввода пробы в аналитический прибор без вмешательства оператора, что уменьшает погрешность эксперимента.

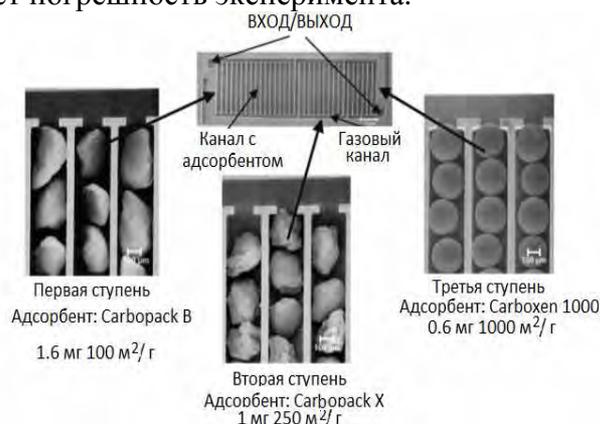


Рис. 7. Фотографии каналов с адсорбентами и общего вида трёхступенчатого концентратора органических веществ из воздуха

На данный момент опубликовано много работ посвященных созданию микрофлюидных систем для концентрирования токсичных примесей на основе адсорбентов различной природы, тем не менее, использование таких систем по-прежнему ограничено в исследовательских лабораториях в связи с трудностью получения надежных и воспроизводимых систем. В таблице 1 представлены работы, посвященные микрофлюидным системам для концентрирования ароматических соединений из газовых сред (сокращения: бензол – Б, толуол – Т, ксилолы – К; этилбензол – Э).

Таблица 1. Микрофлюидные системы для концентрирования ароматических соединений из газовых сред

Структура микрофлюидной системы	Адсорбционный материал	Аналиты	Рабочие параметры	Литература
Микрофлюидная термостатируемая пластина	Микропористый оксид	Б, Т, Э, К	Адсорбция: 40 сек. Десорбция: 200 °С.	[30]
Микрофлюидная термостатируемая пластина с Pt/Ti нагревателем	Аморфный диоксид кремния	4-100 ppb Т	Адсорбция: 30 мин. Десорбция: 180°С	[31]
Кремниевый микрокатридж	Кавитанд, содержащий хиноксалин	0,1 ppb Б, Т, Э, К	Адсорбция: 55 мин Десорбция: 100 °С, 5 мин.	[32]
Спиральная мембранная структура	OV-17	1 ppb БТЭК	Адсорбция: 7 мл/мин. Десорбция: 120 °С, 1-3 сек	[33]
Ловушка объемом 500 мкл	Carborpack X	Б, К, α-пинен	Десорбция: 200°С	[34]
Алюминиевый чип с Pt нагревателем	Составной сорбент: Carborpack X, Carborpack B, Carboxen 1000	100 ppb Б, Т и др.	Адсорбция: 10 сек. Десорбция: 200°С	[35]

Микрофлюидные системы на плоскости стеклянных и кремниевых пластин находят широкое применение в газовой хроматографии в качестве разделительных хроматографических колонок. Внутренняя поверхность микроканалов модифицируется различными адсорбентами и полимерными жидкостями, варьирующимися в зависимости от разделяемых на колонке сорбатов. Так в качестве неполярных неподвижных фаз традиционно используются диметил- и дифенилполисилоксаны. Для разделения полярных соединений используются полимеры на основе полиэтиленгликоля и ионные жидкости. В качестве адсорбента для разделения постоянных газов наиболее часто используются молекулярные сита типа со средним диаметром пор 5 Å. Для разделения легкокипящих углеводородов традиционно используются углеродные и полимерные адсорбенты. В работе [36] показана возможность разделения 8 компонентов от бензола до 3-карена за 4,5 минуты (рис. 8). Микрофлюидная система, используемая в данной работе, была создана на плоскости стеклянной пластины, длина канала составила 7,5 м, диаметр канала - 0,32 мм, в качестве неполярной неподвижной фазы использовался полидиметилсилоксан.

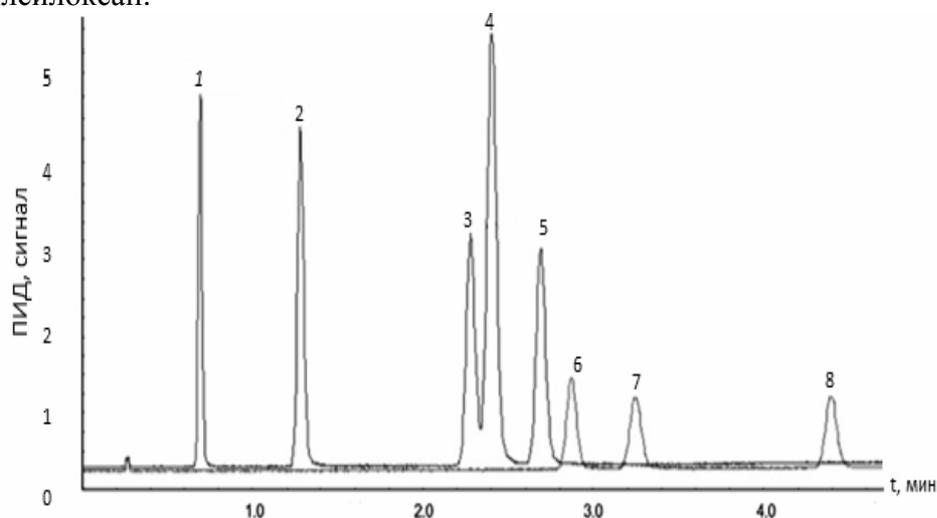


Рис. 8. Разделения предельных и ароматических углеводородов на планарной стеклянной газохроматографической колонке (объем петли дозатора 0,5 мкл, концентрация стандартов 2 ppm): 1 – бензол; 2 – толуол; 3 – этилбензол; 4 – *n*-, *m*-ксилол; 5 – *o*-ксилол; 6 – нонан; 7 – α -пинен; 8 – 3-карен

За счет применения планарных технологий при создании газохроматографической системы энергопотребление для термостатирования газохроматографической колонки удалось снизить на два порядка, а применение в качестве детектора фотоионизационного детектора обеспечивает чувствительность системы на уровне нанограммов, что позволяет авторам рекомендовать описанную выше систему для создания высокоскоростного и высокочувствительного портативного хроматографа для анализа ароматических соединений.

Стенки полученных капилляров, как правило, модифицируют полисилоксанами либо традиционными адсорбентами. Так, в работе [12] показано, что с использованием микроколоники на плоскости кремния возможно за 1 минуту разделить 9 компонентов от дихлорметана до *n*-нонана (рис. 9).

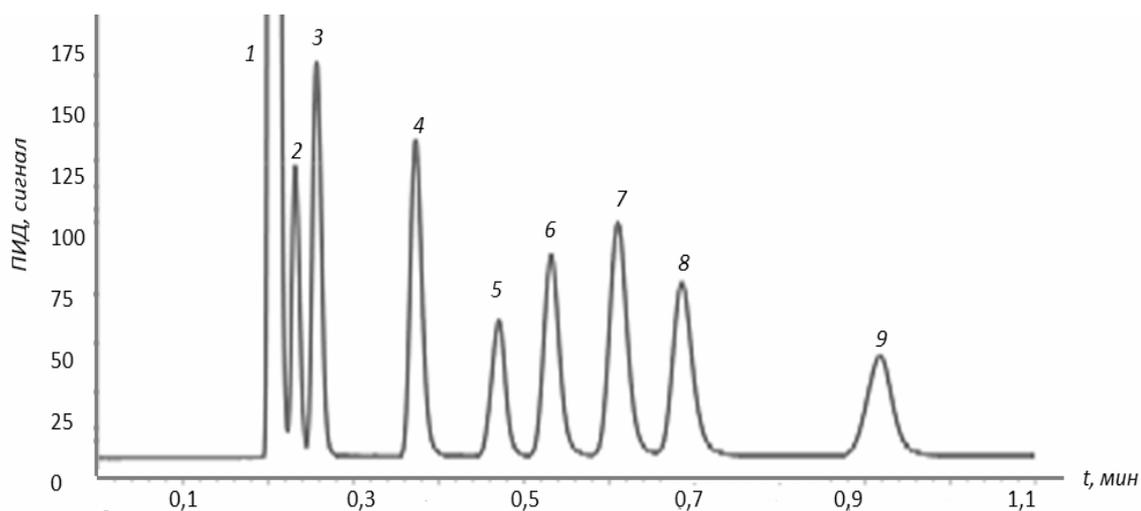


Рис. 9. Разделение на планарной газохроматографической колонке на кремниевой пластине, внутренняя поверхность которой модифицирована триметилалюминием при температуре колонки 50°C и давление на входе 50 кПа, сброс пробы 75:1 [12]: 1 – дихлорметан (растворитель); 2 – *n*-гексан; 3 – бензол; 4 – толуол; 5 – тетрахлорэтилен; 6 – хлорбензол; 7 – этилбензол; 8 – *n*-ксилол; 9 – *n*-нонан

Большое количество работ по микрофлюидным системам для газового анализа посвящено различным сенсорам [37-40]. В работе [40] рассмотрена микрофлюидная система для определения аммиака с чувствительным элементом на основе триоксида вольфрама. Газ нагнетается на датчик с помощью тепловой конвекции, диапазон определяемых концентраций аммиака для данной микрофлюидной системы варьируется от 10 до 100 ppm. Описанные выше микрофлюидные устройства могут быть объединены в системы анализа газовых сред, примеры которых представлены в таблице 2. Как видно из представленных в таблице данных, приборы, созданные на основе микрофлюидных систем, способны с высокой чувствительностью (до 0.6 ppb_v), не уступающей лабораторным приборам, экспрессно (время анализа может снижаться до 0.2 мин) и высокоточно анализировать различные вещества органической и неорганической природы.

Таблица 2 – Устройства на основе микрофлюидных систем для анализа газов

Метод	Особенности проведения анализа	Анализируемые вещества	Источник
1	2	3	4
Термодесорбция	Улавливание на стеклянной пластине микрофлюидного десорбера с последующим УФ-детектированием	Бензол, толуол, этилбензол, ксилол	[41]
Термодесорбция	Улавливание с поэтапным увеличением температуры на термодесорбере, с последующим хемилюминисцентным детектированием	Метил-, этил-меркаптаны	[42]

1	2	3	4
Термодесорбция	Улавливание при температуре 55°C (5 мин.) Десорбция при 150°C хемилюминисцентный детектор	Изопрен	[43]
Микротермодесорбция, газовая микрохроматография, масспектрометрическое детектирование	Улавливание на Tenax (40 мин)	Летучие органические соединения	[44]
Микроконцентратирование	Улавливание на покрытом сорбентом микроконцентраторе, нагрев до 180°C за 40 миллисекунд. Детектирование - спектрометрия ионной подвижности	Тринитротолуол, нервнопаралитические газы	[45]
Микротермодесорбция и газовая микрохроматография	Микроконцентратор выполнен на кремниевом чипе, газовый микрохроматограф с пламенно-ионизационным детектором. Концентрирование в течение 10 мин. со скоростью 25 мл/мин.	30 летучих органических соединений	[46]
Микротермодесорбция и газовая микрохроматография	Микросенсорная система	11 летучих органических соединений	[47]
Газовая микрохроматография	Газовая микрохроматография на основе высокоскоростных МЭМС, изменение температуры со скоростью 10 ⁰ С/сек	Алканы C ₅ -C ₁₆ , тринитротолуол, зарин, иприт	[48]
Газовая микрохроматография	Колонка с полидиметилсилоксаном	Алканы C ₅ -C ₁₂	[49]
Микротермодесорбция, газовая микрохроматография	2- и 3D-микроконцентратор, система кварцевых поверхностно-акустических волновых сенсоров	Бензол, толуол, ксилол, нервнопаралитические вещества, иприт	[50]
Газовая микрохроматография с плазма-имиссионным детектированием	Двуглавые микроканалы	Галогенорганические соединения	[51]
Газовая микрохроматография с термокаталитическим детектированием	Планарная микрохроматографическая колонка, Carborack B (зернение 0,10-0,12 мм). Термокаталитический микродетектор	Алканы C ₁ -C ₅	[52]

В работе [52] представлен газовый микрохроматограф, основные узлы (дозатор, детектор, колонки) которого выполнены на основе микрофлюидных систем. Габаритные размеры микрохроматографа составляют 22.2×14.6×5.5 см, вес 1.2 кг, предел детектирования для термокаталитического детектора 5×10⁻¹¹ г/мл, объем дозирующей петли планарного микродозатора 10 мкл, микрохроматографическая колонка с нанодисперсными частицами диоксида

кремния. Управление микрохроматографом осуществляется дистанционно по беспроводной сети.

На рис. 10 представлены фотографии микрофлюидных систем, входящих в состав газового микрохроматографа.

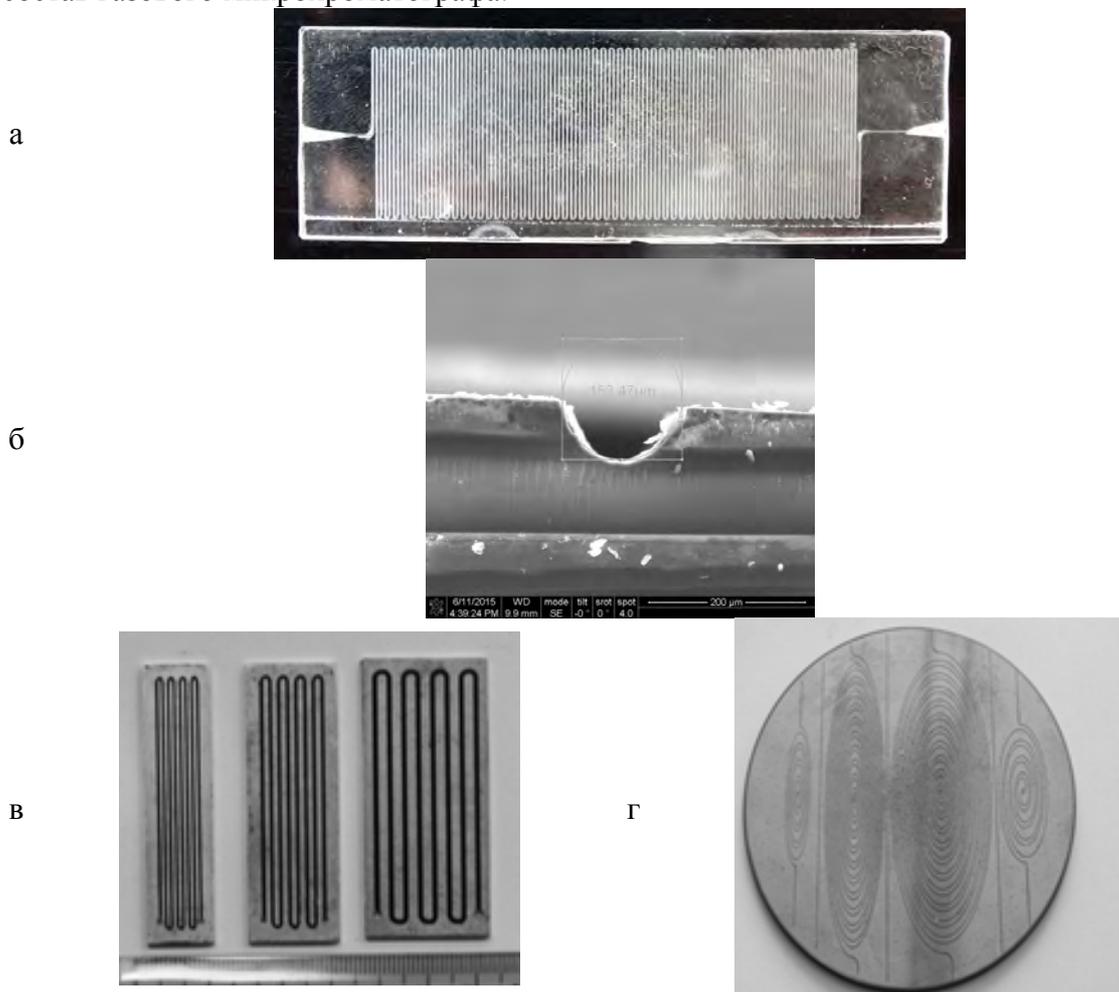


Рис. 10. Фотографии микрофлюидных элементов, входящих в состав газового микрохроматографа: а – стеклянный микрофлюидный чип; б – поперечное сечение канала; в – микрофлюидные хроматографические колонки, выполненные на алюминиевой подложке; г – микрофлюидные хроматографические колонки, выполненные на кремниевой подложке

На примере смеси легких углеводородов авторами показана возможность разделения при сохранении метрологических характеристик, свойственных для стационарных газовых хроматографов, при удельной эффективности свыше 1000 теоретических тарелок. Следует отметить, что время полного анализа составляет не более 12 секунд, а при работе со стандартно применяемыми колонками для углеводородов C_2 – C_5 анализ занимает в 30 раз больше времени. Кроме того, применение планарных микроколонок, используемых авторами, приводит к увеличению чувствительности хроматографа по отношению к анализируемым компонентам за счет уменьшения размытия пика. Важным преимуществом предложенной планарной системы является тот факт, что ее применение позволяет существенно снизить продолжительность анализа, значительно уменьшить габариты прибора, энергопотребление, материальные затраты на изготовление и техническое обслуживание хроматографического оборудования. Таким образом, применение

аналитических блоков, основанных на принципах микрофлюидики, является перспективным при создании новых портативных хроматографических систем, используемых во всех областях газохроматографического анализа.

Заключение

Микрофлюидные системы как системы интеграции всех конструктивных узлов аналитической системы на плоской пластине с разветвленной системой каналов, в которых сопряжены все аналитические стадии – отбора, предварительная подготовка пробы, разделение и последующее детектирование компонентов пробы – является одной из наиболее активно развивающихся областей аналитического приборостроения. Благодаря этому стало возможным создание новых аналитических технологий и технических средств, сочетающих в себе передовые достижения подходов и методов из арсенала различных областей науки и техники: химии, физики, математики, микроэлектроники, вычислительной техники и т.д., поскольку только такой системный подход делает возможным создание «умных» приборов, объединяющих в себе передовые мировые технологии. Комплексное использование достижений газовой хроматографии, микроэлектромеханических и микрофлюидных систем стало основой для создания нового поколения портативных аналитических приборов для анализа газовых сред, которые объективно характеризуются не только компактными габаритами, экономичностью ресурсопотребления, но и позволяют повысить экспрессность анализа.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания на выполнение работ, проект № 608.

Список литературы

1. Le H.P. // *J. Imaging Sci. Technol.* 1998. Vol. 42. pp. 49-62.
2. Terry S.C., Jerman J.H., Angell J.B // *IEEE Trans. Electron Devices.* 1979. Vol. 26. pp. 1880-1886.
3. Manz A., Miyahara Y., Miura J // *Sens. Actuators B Chem.* 1990. Vol. 1. pp. 249-255.
4. Shoji S., Esashi M., Matsuo T. // *Sens. Actuators.* 1988. Vol. 14. pp. 101-107.
5. Van Lintel H.T.G., Vandepol F.C.M., Bouwstra S. // *Sens. Actuators.* 1988. Vol. 15. pp. 153-167.
6. Van der Schoot, Bergveld P. // *Sensors and Actuators B.* 1985. Vol. 8. No 1. pp. 11-22.
7. Беленький, Б.Г., Зими́на Т.М. // *Научное приборостроение.* 1999. Т. 9, № 3. С. 77-92.
8. Hereijgers J., Desmet G., Breugelmans T., Malsche W. // *Microelectronic Engineering* - URL: <http://http://anet.uantwerpen.be/docman/irua/2fe5ae/8365.pdf> (дата обращения 12.12.2014).
9. Baeza-Baeza J.J., García-Álvarez-Coque M.C. // *Journal of Chromatography A.* 2011. Vol. 1218. pp. 5166-5174.
10. Буляница А.Л. // *Научное приборостроение.* 2005. Т. 15. № 2. С. 51-66.
11. Li S. et al. // *Sensors and Actuators A.* 2007. Vol. 136. pp. 69-79.
12. Shakeela H. // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2014. Vol. 203. pp. 641-646.
13. Ali S. // *Sensors and Actuators B.* 2009. Vol. 141. pp. 309-315.
14. Sun J. // *Sensors and Actuators B.* 2009. Vol. 141. pp. 431-435.
15. Jim S. R. // *Journal of Chromatography A.* 2013. Vol. 1299. pp. 118.
16. Jia Z. J. // *Anal. Chem.* 2004. Vol. 76. pp. 5597-5602.
17. Tsai Y. C. // *Journal of Chromatography A.* 2006. Vol. 111. pp. 267-271.

18. Ericson C. // *Anal. Chem.* 2000. Vol. 72. pp. 81-87.
19. Malsche W. // *Anal. Chem.* 2007. Vol. 79. pp. 5915-5926.
20. Ocvirk G. // *Anal. Methods Instrum.* 1995. Vol. 2. pp. 74-82.
21. Wilm M. // *Analytical Chemistry.* 1996. Vol. 68. pp. 1-8.
22. Wang X. // *Journal of Chromatography A.* 2012. Vol. 1246. pp. 123-128.
23. Luo Q. // *Journal of Chromatography A.* 2009. Vol. 1216. pp. 1223-1231.
24. Nyholm L.M. // *Journal of Chromatography A.* 1998. Vol. 813. pp. 11-20.
25. Thurmann S. // *Journal of Chromatography A.* 2014. Vol. 1370. pp. 33-39.
26. Zhang H. // *Biosensors and Bioelectronics.* 2013. Vol. 42. pp. 503-511.
27. Kler P.A. // *Journal of Chromatography A.* 2013. Vol. 1297. pp. 204-212.
28. Kim M. // *Sensors and Actuators B.* 2005. Vol. 107. pp. 818-824.
29. Tian W.C. // *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems.* 2005. Vol. 14. pp. 498-507.
30. Casalnuovo S.A. // *Eur. Frequency Time Forum 1999 IEEE Int. Frequency Control Symp. Proc. 1999 Joint Meeting, Besanc, on. France.* 1999. pp. 991-996.
31. Ueno Y. // *Analytical Chemistry.* 2001. Vol. 73. pp. 4688-4693.
32. Bianchi F. // *New Journal of Chemistr.* 2003. Vol. 27. pp. 502-509.
33. Kim M. // *Journal of Chromatography A.* 2003. Vol. 996. pp. 1-11.
34. Tian W.C. // *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems.* 2005. Vol. 14. pp. 498-507.
35. Blanco F. // *Sensors and Actuators B.* 2008. Vol. 132. p. 90-98.
36. Lewis A. C. // *Journal of Chromatography A,* 2010. Vol. 1217. pp. 768-774.
37. Moos R. // *Sensors and Actuators B: Chemical,* 2002. Vol. 83. pp. 181-189.
38. Zhu L. // *Sensors and Actuators B: Chemical,* 2007. Vol. 121. pp. 679- 688.
39. Stankova M. // *Sensors and Actuators B: Chemical.,* 2006. Vol. 113. pp. 241-248.
40. Marquis B.T. // *Sensors and Actuators B: Chemical.,* 2001. Vol. 77. pp. 100-110.
41. Martinia Vol. // *Sensors and Actuators B,* 2012. Vol. 170. pp. 45-50.
42. Ueno Y. // *Anal. Chem.,* 2001. Vol. 73. pp. 4688-4693.
43. Azad Md. A. K. // *Anal. Chem.,* 2006. Vol. 78. pp. 6252-6259.
44. Ohira S. // *Anal. Chem.,* 2007. Vol. 79. P 2641-2649.
45. Zhong Q. // *J. Environ. Monit.,* 2007. Vol. 9. pp. 440-448.
46. Voiculescu I. // *IEEE Sens. J.,* 2006. Vol. 6. pp. 1094-1104.
47. Tian W. // *Microelectromech. Syst.,* 2003. Vol. 12. pp. 264-272.
48. Agah M. // *J. Microelectromech. Syst.,* 2006. Vol. 15. pp. 1371-1378.
49. Reidy S. // *Anal. Chem.,* 2006. Vol. 78. pp. 2623-2630.
50. Lewis pp.R. // *IEEE Sens. J.,* 2006. Vol. 6. pp. 784-792.
51. Bessoth F. G. // *J. Anal. At. Spectrom.* 2002. Vol. 17. pp. 794-799.
52. Platonov I. A., Platonov Vol. I., Goryunov M. G. A // *Journal of Analytical Chemistry.* 2015. Vol. 70. No 9. pp. 1158-1163.

References

1. Le H.P., *J. Imaging Sci. Technol.,* 1998, Vol. 42, pp. 49-62,
2. Terry S.C., Jerman J.H., Angell J.B *IEEE Trans. Electron Devices,* 1979, Vol. 26. pp. 1880-1886.
3. Manz A., Miyahara Y., Miura, *J Sens.Actuators B Chem.,* 1990, Vol. 1, pp. 249-255.
4. Shoji S., Esashi M., Matsuo T., *Sens. Actuators,* 1988, Vol. 14, pp. 101-107.
5. Van Lintel H.T.G., Vandepol F.C.M., Bouwstra S. *Sens. Actuators,* 1988, Vol. 15, pp. 153-167.
6. Van der Schoot, Bergveld P. *Sensors and Actuators B,* 1985, Vol. 8, No 1, pp. 11-22.
7. Belen'kij B.G. *Nauchnoe priborostroenie,* 1999, Vol. 9, No 3, pp. 77-92.
8. Hereijgers J., Desmet G., Breugelmans T., Malsche W. *Microelectronic Engineering* - URL: http:anet.uantwerpen.be/docman/irua/2fe5ae/8365.pdf (дата обращения 12.12.2014).
9. Baeza-Baeza J.J., García-Álvarez-Coque M.C. *Journal of Chromatography A,* 2011, Vol. 1218, pp. 5166-5174.

10. Buljanica A. L. *Nauchnoe priborostroenie*, 2005, Vol. 15, No 2, pp. 51-66
11. Li S. et al. *Sensors and Actuators A*, 2007, Vol. 136, pp. 69-79.
12. Shakeela H. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, Vol. 203, pp. 641-646.
13. Ali S. *Sensors and Actuators B*, 2009, Vol. 141, pp. 309-315.
14. Sun J. *Sensors and Actuators B*, 2009, Vol. 141, pp. 431-435.
15. Jim S. R. *Journal of Chromatography A*, 2013, Vol. 1299, pp. 118.
16. Jia Z. J. *Anal. Chem.* 2004, Vol. 76, pp. 5597-5602.
17. Tsai Y. C. *Journal of Chromatography A*, 2006, Vol. 111, pp. 267-271.
18. Ericson C. *Anal. Chem.*, 2000, Vol. 72, pp. 81-87.
19. Malsche W. *Anal. Chem.*, 2007, Vol. 79, pp. 5915-5926.
20. Ocvirk G. *Anal. Methods Instrum.* 1995. Vol. 2. pp. 74-82.
21. Wilm M. *Analytical Chemistry*, 1996, Vol. 68, pp. 1-8.
22. Wang X. *Journal of Chromatography A*, 2012, Vol. 1246, pp. 123-128.
23. Luo Q. *Journal of Chromatography A*, 2009, Vol. 1216, pp. 1223-1231.
24. Nyholm L.M. *Journal of Chromatography A*, 1998, Vol. 813, pp. 11-20.
25. Thurmann S. *Journal of Chromatography A*, 2014, Vol. 1370, pp. 33-39.
26. Zhang H. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, Vol. 42, pp. 503-511.
27. Kler P.A. *Journal of Chromatography A*, 2013, Vol. 1297, pp. 204-212.
28. Kim M. *Sensors and Actuators B*, 2005, Vol. 107, pp. 818-824.
29. Tian W.C. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005, Vol. 14, pp. 498-507.
30. Casalnuovo S.A. Eur. Frequency Time Forum 1999 IEEE Int. Frequency Control Symp. Proc. 1999 Joint Meeting, Besanc, on. France. 1999. pp. 991-996.
31. Ueno Y. *Analytical Chemistry*, 2001, Vol. 73, pp. 4688-4693.
32. Bianchi F. *New Journal of Chemistr*, 2003, Vol. 27, pp. 502-509.
33. Kim M. *Journal of Chromatography A*, 2003, Vol. 996, pp. 1-11.
34. Tian W.C. *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, 2005, Vol. 14, pp. 498-507.
35. Blanco F. *Sensors and Actuators B*, 2008, Vol. 132, p. 90-98.
36. Lewis A. C. *Journal of Chromatography A*, 2010, Vol. 1217, pp. 768-774.
37. Moos R. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2002. Vol. 83. pp. 181-189.
38. Zhu L. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, Vol. 121, pp. 679- 688.
39. Stankova M. *Sensors and Actuators B: Chemical.*, 2006, Vol. 113, pp. 241-248.
40. Marquis B.T. *Sensors and Actuators B: Chemical.*, 2001, Vol. 77, pp. 100-110.
41. Martinia Vol. *Sensors and Actuators B*, 2012, Vol. 170, pp. 45-50.
42. Ueno Y. *Anal. Chem.*, 2001, Vol. 73, pp. 4688-4693.
43. Azad Md. A. K. *Anal. Chem.*, 2006, Vol. 78, pp. 6252-6259,
44. Ohira S. *Anal. Chem.*, 2007. Vol. 79. P 2641-2649.
45. Zhong Q. *J. Environ. Monit.*, 2007, Vol. 9, pp. 440-448.
46. Voiculescu I. *IEEE Sens. J.*, 2006, Vol. 6, pp. 1094-1104.
47. Tian W. *Microelectromech. Syst.*, 2003, Vol. 12, pp. 264-272.
48. Agah M. *J. Microelectromech. Syst.*, 2006. Vol. 15. pp. 1371-1378.
49. Reidy S. *Anal. Chem.*, 2006, Vol. 78, pp. 2623-2630.
50. Lewis pp.R. *IEEE Sens. J.*, 2006, Vol. 6, pp. 784-792.
51. Bessoth F. G. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2002, Vol. 17, pp. 794-799.
52. Platonov I. A., Platonov Vol. I., Goryunov M. G. A *Journal of Analytical Chemistry*, 2015, Vol. 70, No 9, pp. 1158-1163.

Платонов Игорь Артемьевич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой химии СГАУ, Самара

Платонов Владимир Игоревич – к.х.н., ассистент кафедры химии СГАУ, Самара

Колесниченко Ирина Николаевна – к.х.н., ассистент кафедры химии СГАУ, Самара

Горюнов Максим Глебович – аспирант кафедры химии СГАУ, Самара

Platonov Igor A. - Grand Ph.D, Professor, Head of Department of Chemistry SSAU, Samara, pia@ssau.ru

Platonov Vladimir I. - Ph.D, assistant of Department of Chemistry SSAU, Samara

Kolesnichenko Irina N. - Ph.D, assistant of Department of Chemistry SSAU, Samara

Goryunov Maxim G. - the postgraduate student of Department of Chemistry SSAU, Samara