

УДК 543.42 + 543.51

## ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РАСПЫЛИТЕЛИ С ВНУТРЕННИМ ВВЕДЕНИЕМ ГАЗА В ЖИДКОСТЬ ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

**В.Т. Суриков, Н.И. Москаленко\***

*Институт химии твердого тела УрО РАН  
620041, Екатеринбург, Первомайская, 91  
[surikov@ihim.uran.ru](mailto:surikov@ihim.uran.ru)*

*\*Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН  
620219, Екатеринбург, Академическая, 20  
[N.Moskalenko@ihite.uran.ru](mailto:N.Moskalenko@ihite.uran.ru)*

Поступила в редакцию 15 ноября 2007 г.

Рассмотрены устройство и принцип работы пневматических распылителей нового типа, отличающихся внутренним введением газа в исходящий поток жидкости, а также формой и местоположением выходной части газового канала в жидкостном канале.

**Ключевые слова:** распылитель, устройство, аэрозоль, индуктивно связанная плазма, спектрометрия.

**Суриков Владимир Трофимович** – старший научный сотрудник Института химии твердого тела УрО РАН

**Область научных интересов:** атомно-эмиссионная и масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой.

**Автор 200 научных публикаций, 1 монографии и 4 изобретений.**

**Москаленко Николай Иванович** – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН.

**Область научных интересов:** атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, атомно-абсорбционная спектрометрия.

**Автор 110 научных публикаций и 5 изобретений.**

В настоящее время в спектрометрических методах анализа с индуктивно связанной плазмой (ICP) (атомно-эмиссионный - ICP-AES, атомно-флуоресцентный - ICP-AFS и масс-спектрометрический - ICP-MS) нашли применение примерно 10 типов пневматических распылителей, используемых для аэрозольного введения жидкостей в названный высокочастотный электрический разряд [1-6]. Все они генерируют аэрозоль посредством распыления жидкостей с помощью газа. В перечень этих типов входят хорошо известные концентрический, угловой (перекрестный), Бэбингтона, Баргенера, акустический, фокусирующий, моносоппловый, сеточный и стеклопористый, реализованные в различных вариантах [1-6], а также малоизвестные, созданные в 1984 г. распылители Н.И. Москаленко [6]. Перечисленные распылители отличаются типом организации взаимодействия жидкости и газа: направлением потоков, взаиморасположением, формой и размерами газового и жидкостного каналов, а также их выходной части, способом подведения жидкостей к распыляющей газовой струе (принудительный, гравитационный, фильтрационный). При этом конструктивно обусловленное действие распыляющего газа на жидкость всегда (кроме распылителей Москаленко) является наружным. Принципиальным отличием распылителей Москаленко, предложенных в двух вариантах и рассматриваемых в данной публикации, является внутреннее действие распыляющего газа на исходящую жидкость, достигаемое соответствующим расположением газового канала внутри жидкостного. Между собой распылители Москаленко отличаются формой и местоположением выходной части газового канала внутри жидкостного. В одном из них исходящие потоки жидкости и газа являются параллельными, в другом расположены под углом. В обоих случаях выход газа в жидкость внутри жидкостной трубки является боковым, т.е. смещенным от ее оси, пристенным. Устройство этих распылителей пояснено на рис. 1.

Как видно из этого рисунка, данные самодельные распылители по устройству очень просты, так как состоят из трех деталей. Эти детали доступны и относительно дешевы. Жидкостным каналом 1 служит отрезок тefлоновой трубки с внутренним диаметром ~2 мм. Газовый канал 2 изготавливали из полиэтиленовой трубки, выходной конец которой деформировали, согласно рис. 1, и уменьшали в диаметре до состояния капилляра вытяжением в нагретом состоянии, обеспечивающим полимеру необходимую пластичность. При этом диаметры конца капилляра составляли, мм: наружный ~ 0,3, внутренний ~ 0,1. При сборке капилляр вводили в жидкостную трубку через небольшое монтажное отверстие плотно (без зазоров) и располагали внутри под углом к оси жидкостного канала (вариант А) или прилегающим параллельно к внутренней стенке с противоположной стороны (вариант Б). Корпусом 3 распылителей служила эластичная резиновая пробка, снабженная соответствующими отверстиями для трубок 1 и 2. Корпус обеспечивал возможность установки любого из распылителей в аэрозольной камере и фиксировал взаимное положение жидкостной и газовой трубок. Технология изготовления распылителей проста и доступна для применения в лабораторных условиях. Распылители устанавливали в самодельную аэрозольную сепарационную камеру объемом ~ 100 мл, показанную на рис. 2.

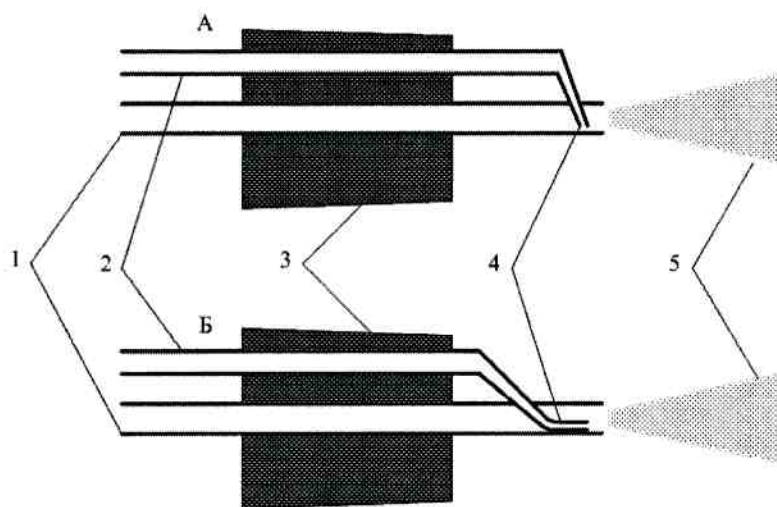


Рис. 1. Схематическое изображение распылителей Москаленко (масштаб условный): А – распылитель с пересекающимися потоками (угловой); Б – распылитель с параллельными потоками (параллельный); 1 – жидкостной канал; 2 – газовый канал; 3 – корпус (резиновая пробка); 4 – выходной газовой капилляр; 5 – первичный аэрозоль. Средства соединения распылителя с источниками газа и жидкости для упрощения рисунка не показаны

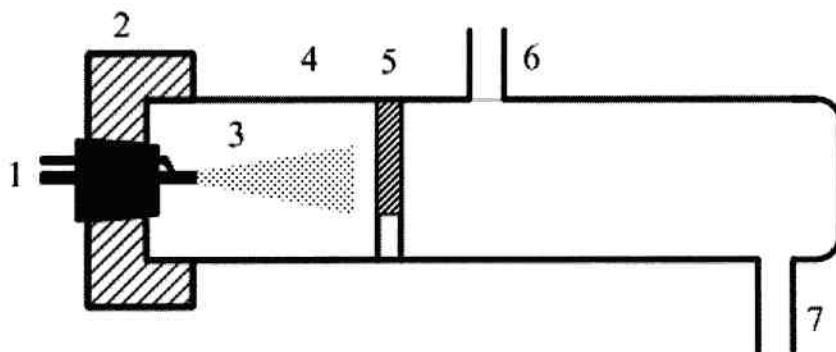


Рис. 2. Сборка распылителя Москаленко с аэрозольной камерой: 1 – распылитель; 2 – соединительная крышка; 3 – первичный аэрозоль; 4 – цилиндрическая камера; 5 – перегородка с небольшим окном внизу (незаштрихованная область); 6 – канал вывода аэрозоля в плазменную горелку; 7 – дренажный канал. Примечание: рабочее положение сборки отличается небольшим отклонением от горизонтального, обеспечивающим естественный (гравитационный) сток неиспользованной части жидкости в дренажный канал

Камера представляет собой стеклянный цилиндр длиной 150 мм с внутренним диаметром 30 мм, разделенный на два последовательных отсека: входной и выходной. Первый отсек служит для освобождения первичного аэрозоля от крупных капель за счет столкновения диспергированной струи, выходящей из распылителя, с перегородкой камеры. Перегородка между отсеками внизу имеет окно размером ~1 см<sup>2</sup>, обеспечивающее прохождение мелкодисперсной части аэрозоля, а также

сток неиспользованной жидкости из первого отсека во второй. Выходной отсек служит для стабилизации аэрозольного потока, транспортирования и выведения аэрозоля через канал 6 в стандартную (или самодельную [7, 8]) плазменную горелку для аналитического использования, а также для удаления неиспользованной жидкости через дренажный канал 7. Перегородка 5 выполнена в виде подвижного, химически стойкого резинового диска с вышеупомянутым нижним окном. Подвижность этого диска была использована для определения оптимального соотношения объемов входного и выходного отсеков камеры, которое составило ~1:3. Удержание заданной позиции диска в камере обеспечивала сила трения между стеклом и резиной.

Испытания и дальнейшую эксплуатацию распылителей проводили в составе атомно-эмиссионного спектрометра JY-48 (Jobin Yvon, Франция), состоящего из оптического многоканального полихроматора и генератора индуктивно связанной плазмы с кварцевой стабилизацией частоты HFP-1500D (PlasmaTherm, США). Работу спектрометра контролировали с помощью компьютера PDP-11 (США), обеспечивающего также ввод, обработку и вывод информации. Главные параметры спектрометра и распылителя указаны в табл. 1.

Таблица 1

Рабочие параметры спектрометра и распылителей

Частота генератора, МГц	27,12
Мощность генератора, выводимая на горелку, Вт	1200
Отраженная мощность, Вт	10
Высота участка отбора света над индуктором, мм	13
Расход аргона для охлаждения горелки и плазмообразования, л/мин	15
Расход аргона для распыления жидкостей, л/мин	1,1
Давление распыляющего аргона, кПа	289
Жидкостной расход с использованием перистальтического насоса, мл/мин	2,7

В ряде сравнительных экспериментов использовали увлажнитель аргона, входящий в комплект периферийных устройств вышеуказанного спектрометра, обеспечивающий предварительное пропускание распыляющего газа через столб воды высотой 200 и диаметром 60 мм, а также серийные пневматические концентрические распылители: стеклянный Майнхарда с двухпроходной аэрозольной камерой Скотта [1, 6] и металлический разборный Жобен Ивон [6], работающие в примерно одинаковых условиях с близкими расходными характеристиками.

В представленных здесь распылителях Москаленко проявление эффекта Вентури (всасывание жидкости действием разрежения, создаваемым газовой струей) было ничтожным. Поэтому для их жидкостного питания использовали миниатюрный трехроликовый перистальтический насос. Двигающаяся к выходу из распылителя жидкость при обтекании газового капилляра образует за ним (в «теневогой» зоне) на внутренней стенке тефлоновой трубки тонкую пленку, которая распыляется газом значительно эффективнее, чем остальные порции исходящей жидкости. Это можно объяснить значительным повышением поверхностной энергии жидкой пленки [9], а также ее меньшей механической прочностью по сравнению со свойствами «толстой» струи. Образование и распыление этой пленки внутренним потоком аргона является очень важной особенностью и причиной успешности работы данных распылителей.

Оптимизацию расстояния между выходными концами газового капилляра и жидкостной трубки выполняли преимущественно для параллельного распылителя (рис. 1, тип Б). Полученные результаты представлены на рис. 3.

Представленные данные и сопутствующие наблюдения позволили сделать следующие заключения. Компланарное (в одной плоскости) взаимоположение выходных отверстий газового и жидкостного каналов, а также выдвижение газового капилляра из жидкостной трубки наружу характеризуется нестабильностью получаемых сигналов. Возвращение газового капилляра внутрь жидкостной трубки на глубину 0,1-1,5 мм приводит к существенному улучшению стабильности сигналов, наибольшая интенсивность которых имеет место при величине данного расстояния, равном 0,15 мм. При этом превосходство распылителя Москаленко над распылителем Майнхарда по интенсивности спектральных линий было 2,5-кратным и более. Эксперименты с использованием ионных спектральных линий привели к таким же выводам. В итоге оптимальным значением расстояния между выходными концами газового капилляра и жидкостной трубки было принято  $0,15 \pm 0,05$  мм. Эффект увлажнения распыляющего аргона при этом был незначительным и разнодействующим (увеличивающим или уменьшающим интенсивность и стабильность сигналов) для атомных и ионных спектральных линий, что позволило отказаться от этого средства при анализе разбавленных жидкостей.

В случае углового распылителя Москаленко (рис. 1, тип А) оптимальное значение рассматриваемого параметра было примерно таким же. При этом осталась неисследованной роль угла между осями выходных концов газового капилляра и жидкостной трубки.

Для выявления аналитических свойств распылителей Москаленко была выполнена оценка пределов обнаружения (ПО) химических элементов, достигаемых с их помощью, в сравнении с таковыми для концентрических распылителей Майнхарда и Жобен Ивон, полученными в одинаковых условиях. ПО получали в виде удвоенного относительного стандартного отклонения интенсивности фоновых сигналов спектра при распылении дистиллированной воды, вычисляемого с доверительной вероятностью 0,95 из 10 последовательных измерений интенсивности на заданных длинах волн, регистрируемых в течение 20 с. Аналогичные данные получали также для воды с добавлением хлористого натрия (200 г/л) и

с использованием увлажнения распыляющего аргона. Полученные данные приведены в табл. 2. Кроме того, была выполнена оценка стабильности работы этих распылителей по величинам относительного стандартного отклонения измеряемых сигналов, приведенная в табл. 3 и на рис. 4.

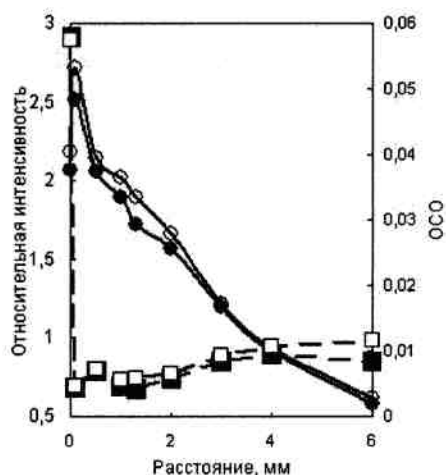


Рис. 3. Влияние расстояния между выходными отверстиями газового капилляра и жидкостной трубки параллельного распылителя Москаленко на интенсивность атомных спектральных линий, отнесенную к таковой для распылителя Майнхарда и принятой за единицу, а также на относительное стандартное отклонение (ОСО) измеренных сигналов (выделено пунктиром). Кривые, обозначенные черными маркерами, получены с увлажненным аргоном

Таблица 2

Пределы обнаружения элементов для сравниваемых распылителей, полученные в разных условиях измерений, мкг/л: 1 – распыление дистиллированной воды; 2 – тоже с увлажнением аргона; 3 – распыление дистиллированной воды, содержащей 200 г/л NaCl; 4 – то же с увлажнением аргона

Распылитель	Условия измерения	Спектральная линия, нм				
		Cr II 267,72	Cr I 425,43	Mn II 293,31	Cu I 327,40	Fe II 259,94
Москаленко, параллельный	1	1,3	9,2	2,6	1,3	0,76
	2	1,1	11,8	2,4	1,6	0,72
	3	4,2	30,8	10,8	2,2	3,0
	4	3,2	21,4	7,0	1,52	2,2
Москаленко, угловой	1	2,2	46,6	6,6	2,2	1,7
	2	2,8	71,2	7,6	2,1	2,2
	3	7,4	76,0	15,0	5,8	5,6
	4	6,8	72,0	14,0	5,9	4,8
Майнхарда	1	2,2	34,6	6,2	1,8	1,6
	2	1,6	30,8	4,1	2,4	1,3
	3	20,0	162,0	40,0	12,4	13,8
	4	6,0	50,0	12,0	3,6	5,4
Жобен Ивон	1	2,0	29,0	4,8	1,9	1,4
	2	4,8	83,0	12,3	4,3	3,2
	3	33,4	390,0	62,0	25,8	22,0
	4	31,0	390,0	62,0	25,2	20,0

Полученные данные (табл. 2) позволили сделать следующие выводы. При анализе маломинерализованного раствора лучшие ПО оказались у параллельного распылителя Москаленко. Последующие места заняли распылители Майнхарда, Жобен Ивон и угловой Москаленко, ПО которых были хуже в 1,8-2,6 раза.

В случае анализа высокосолевого раствора ПО всех распылителей стали хуже (возросли), но в разной степени. При этом лучшее место снова оказалось у параллельного распылителя Москаленко, ПО которого ухудшились примерно в 3 раза.

Последующие места в порядке перечисления заняли распылители Москаленко угловой, Майнхарда и Жобен Ивон, отставшие от лидера по ПО примерно в 2,5-13 раз, соответственно. У двух последних это связано с узостью жидкостного капилляра, пропускаемость которого ухудшается с ростом концентрации солей в растворах из-за отложения солей на его внутренних стенках и выходном отверстии. Такая проблема практически отсутствует в распылителях Москаленко, благодаря достаточной просторности жидкостного канала. Поэтому увлажнение распыляющего аргона в этом случае не давало эффекта, как для разбавленного, так и для высокосолевого растворов, и, следовательно, было не нужным. Напротив, для распылителя Майнхарда, увлажнение аргона, препятствующее кристаллизации солей на внутренних стенках и выходном отверстии относительно короткого жидкостного капилляра, при распылении раствора с высоким содержанием NaCl давало положительный эффект в виде улучшения ПО примерно в 3 раза. Эффект увлажнения аргона для диспергирования такого раствора распылителем Жобен Ивон, обладающим узким металлическим жидкостным капилляром повышенной длины [6], был значительно меньшим. При распылении дистиллированной воды, безопасной в отношении солевого блокирования жидкостного канала, существенного положительного эффекта от увлажненного аргона для распылителей Майнхарда и Жобен Ивон не наблюдали.

Таблица 3

Сравнение стабильности работы распылителей (относительное стандартное отклонение измеряемых сигналов - ОСО) при разных условиях измерения для растворов, содержащих Cr, Cu, Mn и Fe по 10 мг/л, а Mg - 1 мг/л: 1 – распыление раствора элементов с добавлением 50 г/л HCl; 2 – то же с увлажнением аргона; 3 – то же с добавлением 200 г/л NaCl без увлажнения аргона; 4 – то же с увлажнением аргона

Распылитель	Условия	Спектральная линия, нм						Среднее
		Cr II 267,72	Cr I 425,43	Mg II 280,27	Cu I 327,40	Fe II 259,94	Mn II 293,31	
Москаленко, параллельный	1	0,0012	0,0026	0,0012	0,0016	0,0014	0,0019	0,0016
	2	0,0016	0,0026	0,0016	0,0020	0,0015	0,0026	0,0020
	3	0,0044	0,0170	0,0041	0,0143	0,0040	0,0045	0,0081
	4	0,0031	0,0071	0,0033	0,0078	0,0037	0,0037	0,0048
Москаленко, угловой	1	0,0036	0,0029	0,0036	0,0037	0,0044	0,0036	0,0036
	2	0,0030	0,0021	0,0024	0,0023	0,0025	0,0029	0,0025
	3	0,0123	0,0113	0,0128	0,0143	0,0130	0,0131	0,0128
	4	0,0109	0,0112	0,0109	0,0127	0,0122	0,0118	0,0116
Майнхарда	1	0,0016	0,0043	0,0016	0,0026	0,0016	0,0025	0,0024
	2	0,0019	0,0028	0,0019	0,0023	0,0021	0,0020	0,0022
	3	0,0220	0,0320	0,0200	0,0350	0,0240	0,0240	0,0262
	4	0,0059	0,0060	0,0060	0,0080	0,0070	0,0065	0,0066
Жобен Ивон	1	0,0153	0,0166	0,0160	0,0190	0,0160	0,0160	0,0165
	2	0,0153	0,0206	0,0158	0,0224	0,0173	0,0153	0,0178
	3	0,0850	0,0780	0,0310	0,2900	0,0750	0,0950	0,1090
	4	0,0570	0,0300	0,0870	0,0900	0,0650	0,0520	0,0635

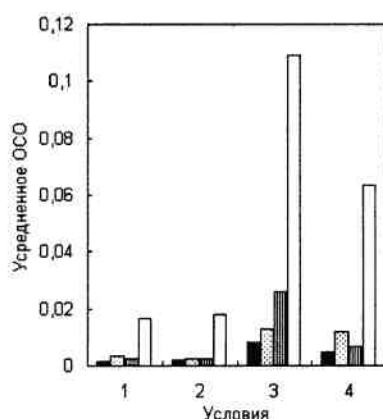


Рис. 4. Сравнение стабильности распылителей при разных условиях распыления (цифровые обозначения условий на горизонтальной оси такие же, как в табл. 3). Тип распылителя показан заливкой прямоугольников гистограммы: черная – параллельный Москаленко, точечная – угловой Москаленко, линейчатая - Майнхарда, белая – Жобен Ивон

Относительное стандартное отклонение (ОСО) аналитических сигналов, характеризующее стабильность работы распылителей в разных условиях, рассчитывали из 10 параллельных измерений с регистрацией каждого по 20 с. Как видно из табл. 3 и рис. 4, при анализе маломинерализованного раствора наилучшую стабильность обеспечивал параллельный распылитель Москаленко. Его усредненное ОСО оказалось в 1,4 раза лучше, чем у распылителя Майнхарда, в 1,6 раза лучше, чем у углового распылителя Москаленко и в 3-10 раз лучше, чем у распылителя Жобен Ивон.

При анализе высокосолевого раствора (200 г/л NaCl) стабильность распыления в разной степени ухудшилась у всех распылителей. При этом лучшим снова был параллельный распылитель Москаленко. Его усредненное ОСО при использовании сухого аргона было лучше, чем у углового распылителя Москаленко примерно в 1,5 раза, чем у распылителя Майнхарда в 3,3 раза и чем у распылителя Жобен Ивон в 13,5 раз. Применение для анализа данного раствора увлажненного аргона улучшило стабильность всех распылителей и измеряемых сигналов, но в неодинаковой степени. Максимальный (4-кратный) эффект имел место у распылителя Майнхарда. Однако общее кратное преимущество по усредненному ОСО над другими распылителями сохранилось у параллельного Москаленко и составило: Майнхарда – 1,4, углового – 2,4, Жобен Ивон – 13,3.

По совокупности эффектов влияния увлажнения аргона на достигаемые ПО и стабильность работы данных распылителей можно заключить, что необходимость применения этого способа минимальна для обоих распылителей Москаленко, благодаря высокой пропускаемости их просторного жидкостного канала, даже при высокой концентрации солей в растворах. Напротив, для распылителей Майнхарда и Жобен Ивон с их узкими каналами при анализе высокосолевого раствора, увлажнение распыляющего аргона является необходимым, т.к. ослабляет их солевое блокирование и стабилизирует истечение жидкости. Однако при этом следует помнить, что применение увлажнения распыляющего аргона в масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой чревато усилением уровня спектральных помех от термостойких оксидных ионов типа  $\text{CeO}^+$  [1, 4, 5].

Проверку склонности сравниваемых распылителей к эффекту «памяти» химических элементов выполняли с использованием аэрозольной камеры простейшего (цилиндрического) типа разного объема и раствора, содержащего Cr, Cu, Fe и Mn по 100, Mg – 10 и Ca – 5 мг/л, а также 50 г/л HCl. Результаты эксперимента приведены в табл. 4. Погрешность измерения времени при этом составила  $\pm 1,3$  с. Камера, обозначенная там, как 100-П, имеет внутреннюю перегородку (см. рис. 2), остальные камеры перегородок не имеют.

Таблица 4

Влияние объема аэрозольной камеры на время ее отмыкания, с

Распылитель	Объем камеры, мл			
	100-П	100	55	15
Параллельный, Москаленко	40	25	16	18
Угловой, Москаленко	42	27	16	14
Майнхарда	34	30	20	17
Жобен Ивон	31	30	17	14

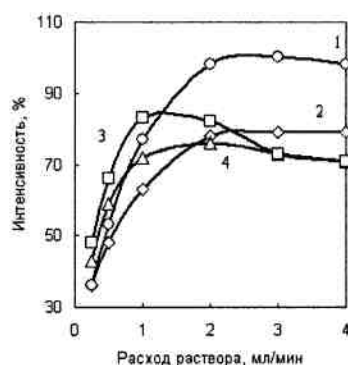


Рис. 5. Зависимость нормализованной (выраженной в %) интенсивности спектральных линий однозарядных ионов от расхода раствора для разных распылителей: 1 – параллельный Москаленко, 2 – угловой Москаленко, 3 – Жобен Ивон, 4 – Майнхарда

Из этой таблицы видно, что удаление перегородки, а также уменьшение объема (следовательно и внутренней поверхности) камер сокращает время их отмыкания до определенного предела, который можно рассматривать как собственную «память» распылителей. В данном случае можно заключить, что химическая «память» сравниваемых распылителей незначительная и примерно одинаковая. При выборе объема камер следует иметь в виду, что уменьшение их

объема ускоряет проведение анализа, а увеличение – выравнивает колебания внутренних транспортных процессов, способствуя улучшению точности измерений.

Эффективность распылителей сравнивали также по достигаемой в одинаковых условиях интенсивности спектральных линий ионов (рис. 5) при различном расходе анализируемого раствора, содержащего по 10 мг/л примесных элементов и 50 г/л HCl, с использованием увлажненного аргона. Как видно из этого рисунка, наибольшую интенсивность при расходах жидкости 1,2-4,0 мл/мин обеспечивал параллельный распылитель Москаленко. Это позволяет сделать вывод о преимуществе данного распылителя над другими не только по интенсивности, но и по скорости поступления аэрозоля в разрядную плазму (транспортной эффективности). Правомочность этого вывода подтверждена линейной пропорциональной зависимостью между указанными параметрами, установленной для этого распылителя (рис. 6).

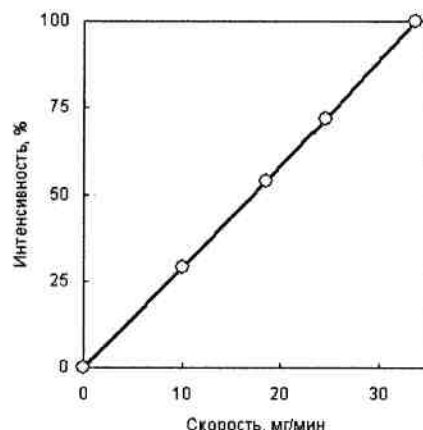


Рис. 6. Зависимость нормализованной (%) интенсивности спектральных линий однозарядных ионов от скорости (мг/мин) поступления аэрозоля в плазму для параллельного распылителя Москаленко. Аргон увлажненный, состав раствора такой же, как в предыдущем опыте

Транспортную эффективность и производительность работы системы, состоящей из параллельного распылителя Москаленко и двухсекционной аэрозольной камеры (рис. 2), исследовали в следующем эксперименте. Аэрозоль дистиллированной воды, получаемый при ее различном расходе с помощью увлажненного аргона, выводили из аэрозольной камеры внутрь присоединенного к ней (вместо плазменной горелки) цилиндра, заполненного силикагелем. Количество образовавшегося аэрозоля измеряли в виде прироста массы этого цилиндра за время 10 мин. Эти измерения с точностью до 5 % отн. совпадали с результатами, полученными по разности объемов воды, поступающих в распылитель и выходящих в дренаж из аэрозольной камеры. Результаты эксперимента приведены на рис. 7. Как видно, изменение расхода распыляемой воды в пределах 2-4 мл/мин почти не сказывается на аэрозольной производительности данной системы, что благоприятно для стабилизации ее работы. Напротив, транспортная эффективность работы системы падает с ростом расхода воды. Поэтому на практике необходима оптимизация обсуждаемых параметров, зависящая от особенностей объекта анализа и выбираемого аналитического метода.

На основании выполненных экспериментов, совокупности полученных результатов, эксплуатационных и экономических показателей в качестве лучшего для нашего ICP-AES спектрометра (см. табл. 1) и химического состава анализируемых нами проб был выбран параллельный распылитель Москаленко. Технически подготовленный специалист при наличии необходимых навыков, материалов и инструментов может изготовить такой распылитель в течение 30-40 мин. Доля брака при его изготовлении незначительная. Отсутствуют высокие требования к качеству деталей и их соединения, отменено трудновыполнимое требование соосности жидкостного и газового каналов, нет необходимости в его разборке или регулировании при эксплуатации. Распылитель дешевый, химически стойкий и долговечный. Пригоден для анализа жидкостей различного происхождения, в том числе агрессивных, содержащих органические растворители или минеральные кислоты, в частности, плавиковую и серную (1:1) кислоты. В последнем случае газовый капилляр становится матовым, но работоспособность сохраняется. Распылитель подходит для высокосолевых растворов и суспензий с крупностью частиц не более 0,4 мм. Альтернативные серийные концентрические распылители Майнхарда и Жобен Ивон существенно уступают по химической стойкости, непригодны для суспензий и высокосолевых растворов, дороги. Распылитель Майнхарда хрупок и недолговечен, распылитель Жобен Ивон капризен и сложен, поэтому от его применения в ICP-AES давно отказались.

Параллельный распылитель Москаленко мы успешно эксплуатировали с 1985 по 2003 г. для анализа многочисленных разнообразных объектов с научными и практическими целями: высокотемпературных сверхпроводников [10, 11], безвольфрамовых твердых сплавов [12], новых функциональных материалов [13-16], промышленных отходов [17], солевых расплавов [18, 19], экологических проб [20] и проч.

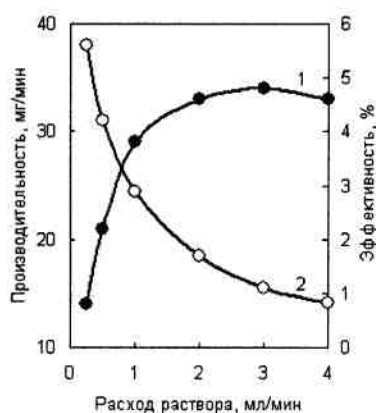


Рис. 7. Зависимость аэрозольной производительности (1) и транспортной эффективности (2) системы, состоящей из параллельного распылителя Москаленко и двухсекционной аэрозольной камеры (см. рис. 2), от расхода жидкости

Предположительно данный распылитель может быть использован также для масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой после соответствующей дополнительной размерной и расходной оптимизации, отвечающей особенностям этого метода. В частности, целесообразно уменьшить жидкостной расход, сохранив при этом стабильность распыления, и исключить увлажнение распыляющего аргона.

В заключение рассмотрим возможность создания пневматического концентрического распылителя с внутренним осевым (центральным) введением газа. Опытный образец такого распылителя был изготовлен из тех же деталей, что и описанные распылители Москаленко, и подвергнут испытаниям в 1985 г. Однако по своим характеристикам он существенно уступал вышеназванным. По-видимому, это связано с недостаточной оптимизированностью соотношения выходных диаметров жидкостного и газового каналов, отсутствием образования тонкой жидкой пленки на внутренних стенках жидкостной трубки перед началом распыления. Теоретически можно предполагать существенное улучшение свойств такого распылителя после устранения перечисленных технических недостатков. Однако в случае значительного уменьшения просвета кольцевого зазора между газовым капилляром и стенками жидкостной трубки, необходимого для образования тонкой выходной жидкой пленки, обеспечивающей успешное распыление, может возникнуть ограничение по пропускной способности жидкостного канала и, следовательно, по области применения распылителя, пригодной тогда только для сильно разбавленных растворов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Inductively coupled plasma mass spectrometry / Ed. A. Montaser. N.Y.: Wiley-VCH. 1998. 992 p.
2. Mora J. Liquid-sample introduction in plasma spectrometry / J. Mora, S. Maestre, V. Hernandez, J.L. Todoli // Tr. Anal. Chem. 2003. V. 22. P. 123-132.
3. Чудинов Э.Г. Атомно-эмиссионный спектральный анализ с индукционной плазмой // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Аналит. химия. 1990. Т. 2. 254 с.
4. Thomas R. Practical guide to ICP-MS. New York: Marcel Dekker. 2004. 317 p.
5. Taylor H.E. Inductively coupled plasma-mass spectrometry: practices and techniques. San Diego: Academic Press, 2001. 295 p.
6. Суриков В.Т. Стандартные концентрические распылители для аналитической спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2007. Т. 11, № 4.
7. Суриков В.Т. Самодельная упрощенная разборная горелка для аргоновой высокочастотной индуктивно связанной плазмы / В.Т. Суриков, Н.И. Москаленко // XVIII Урал. конф. по спектроск. (10-14 сент. 2007, Новоуральск). Тез. докл. Екатеринбург. 2007. С. 47-48.
8. Суриков В.Т. Самодельная упрощенная разборная горелка для аргоновой высокочастотной индуктивно связанной плазмы / В.Т. Суриков, Н.И. Москаленко // Аналитика и контроль. 2007. Т. 11. № 2-3. С. 182-187.
9. Пажи Д.Г. Распылители жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. М.: Химия, 1979. 216 с.
10. Суриков В.Т. Определение металлических элементов основы в оксидных системах, обладающих высокотемпературной сверхпроводимостью / В.Т. Суриков, И.А. Панкова, В.М. Егорочкин, Д.И. Курбатов, Э.М. Лебедева, С.Д. Сурина, Н.И. Москаленко, Л.Л. Соколова // Заводская лаборатория. 1990. Т. 56, № 8. С. 25-28.
11. Surikov V.T. Determination of carbonates content in complex superconducting oxides / V.T. Surikov, N.I. Moskalenko, T.P. Lyampasova // ICP Inf. Newslett. 1991. V. 16. P. 645.



12. Суриков В.Т. Аналитический контроль безвольфрамовых твердых сплавов КНТ 16 и ЛЦК 20 / В.Т. Суриков, Курбатов Д.И., Н.И. Москаленко, С.Д. Сурина, Э.М. Лебедева, И.А. Панкова, Л.Л. Соколова // Всес. конф. «Совр. мет. анализа металлов, сплавов, объектов окр. среды». Тез. докл. Ижевск, 1990. Ч. 2. С. 347.
13. Суриков В.Т. Аналитический контроль состава матрицы ферроцианида олова / В.Т. Суриков, Е.В. Поляков, Л.Л. Соколова, И.А. Панкова, Л.И. Манакова // XIII Урфк. конф. по спектр. (Заречный. 1997). Тез. докл. Заречный, 1997. С. 8-9.
14. Поляков Е.В. Молекулярная сорбция на ферроцианидах олова (II) / Е.В. Поляков, Т.А. Денисова, Л.Г. Максимова, В.Г. Зубков, Г.А. Большакова, В.Т. Суриков, Л.Л. Соколова // ЖНХ. 1997. Т. 42. С. 365-370.
15. Суриков В.Т. Атомно-эмиссионный контроль состава никель-замещенных купратов лантана / В.Т. Суриков, Г.В. Базуев, В.Н. Красильников, Н.И. Москаленко, О.В. Сурикова // Всерос. науч.-практ. конф. «Оксиды. Физ.-хим. свойства и технологии». Тез. докл. Екатеринбург, 1995. С. 144.
16. Суриков В.Т. Особенности аналитического контроля состава нитрида алюминия / В.Т. Суриков, Л.Ю. Булдакова, Н.И. Москаленко, Т.В. Колмогорова // Пробл. теор. и экспер. аналит. химии. Матер. и тез. докл. регион. научн. конф. Пермь, 2002. С. 140.
17. Курбатов Д.И. Определение скандия в промпродуктах глиноземного производства с помощью индукционной плазмы / Д.И. Курбатов, В.Т. Суриков, Н.И. Москаленко, С.Д. Сурина, Г.А. Большакова, Г.Н. Ильвес // Совр. методы анализа и исслед. хим. состава матер. металлургии, машиностр., объектов окр. среды. Тез. докл. Уральск. конф. Устинов. 1985. С. 145.
18. Салюлев А.Б. Электропроводность расплавленных смесей  $PCl_5-ZrCl_4$ ,  $PCl_5-TaCl_5$  и  $PCl_5-MoCl_5$  / А.Б. Салюлев, А.А. Редькин, Н.И. Москаленко // Расплавы. 1997. № 3. С. 30-34.
19. Москаленко Н.И. Определение иридия, рутения и родия методом индуктивно-связанной плазмы в хлоридах щелочных металлов / Н.И. Москаленко, Н.Г. Молчанова, В.Н. Стрекаловский // XI Уральск. конф. «Нов. спектр. методы контроля в промышл., сельск. хозяйстве и охр. окр. среды». Челябинск. 1984. С. 33.
20. Nulman A.A. Inexpensive express-indicator of aerogenetic heavy metal environmental contamination / A.A. Nulman, I.I. Gluhih, V.I. Outkin, A.E. Rytsk., R.A. Kopteva, N.I. Moskalenko // IV Intern. Symp. Exhibit. Environ. Contamin. Centr. and Eastern. Europe. Warsaw (Poland). 1998. Proceeding. M. # 247.

## PNEUMATIC NEBULIZERS WITH INNER INTRODUCTION OF GAS INTO LIQUID FOR ANALYTICAL SPECTROMETRY WITH INDUCTIVELY COUPLED PLASMA

**V.T. Surikov, N.I. Moskalenko**

Design, peculiarities and operation principle of new type pneumatic nebulizers with inner introduction of gas into liquid for analytical spectrometry with inductively coupled plasma are considered.

*Keywords: nebulizer, design, aerosol, inductively coupled plasma, spectrometry*