

Метод селекции ионов для их идентификации в газовых средах

В. Н. Лиманский, Б. З. Горбунов

Данный метод относится к задаче выделения ионов с заданной подвижностью из их смеси с электрически нейтральными молекулами. В частности, он позволяет извлекать интересные ионы из потока анализируемого газа, чтобы их можно было направить в поток чистого газа, где их можно было бы определить количественно. Метод обеспечивает более эффективное разделение, увеличивает разрешение устройства селекции ионов и, следовательно, позволяет количественно оценивать сложные смеси при низких концентрациях молекул в газах, представляющих интерес.

Ключевые слова: идентификация ионов, подвижность ионов, обнаружение следовых количеств в воздухе.

1. Предпосылки для создания новой методики

Количественное определение следовых количеств соединений в воздухе часто требует разделения сложной смеси и выбора интересующих молекул для анализа. Одним из методов, используемых при этом для разделения ионов при атмосферном давлении, является спектрометрия подвижности ионов [1], которая широко используется для многих приложений безопасности, например, для обнаружения взрывчатых веществ в аэропортах.

Для разделения электрически заряженных аэрозольных частиц в воздухе использовалась технология дифференциального анализатора подвижности [2]. Недавно этот метод был расширен до разделения ионов при атмосферном давлении [2, 3].

В [4] предложен тип анализатора мобильности ионов в потоке, содержащего по меньшей мере два электрода, расположенных так, чтобы создавать электрическое поле между ними, и поток газа, который направлен вдоль вектора напряжённости электрического поля. Ионы переносятся через канал потоком газа, причём ионы определённой подвижности захватываются электрическим полем и попадают на электрод, а поток газа отводится в стороны. Когда ионы достигают конца канала, детектор на конце канала видит непрерывный поток ионов с выбранной подвижностью. Ионы с той или иной подвижностью отбираются путём изменения электрического поля и/или скорости потока.

Другой метод дифференциального анализатора подвижности с поперечным потоком описан в [5]. Этот метод обеспечивает выполнение спектрометрии подвижности ионов или частиц, детектируя их с помощью многоканального селектора. Система сначала получает образец для анализа, затем ионизирует образец и вводит ионизированный образец в ламинарный газовый поток. Электрическое поле пересекает ламинарный газовый поток, так что ламинарный газовый поток и электрическое поле объединяются, чтобы пространственно разделить ионы анализируемого газа на основе ионной подвижности и чтобы затем пространственно разделённые ионы контактировали с различными элементами многоканального электрода. Далее система анализирует ток многоканального электрода, чтобы определить подвижность ионов анализируемого газа.

В дифференциальных анализаторах подвижности ионов разрешающая способность (РС) определяется отношением зазора между электродами к толщине пучков траекторий ионов в потоке несущего газа. Траектории ионов и нейтральных молекул регулируются законами движения сплошных сред, которые приводят к выражению: $PC = Q_{sh}/Q_i$, где Q_{sh} – величина объёмного расхода воздуха в зазоре между электродами, Q_i – объёмный расход потока анализируемого образца. Таким образом, для уменьшения толщины пучков траекторий ионов необходимо увеличивать скорость потока несущего газа через зазор между электродами или/и уменьшать скорость потока ионов образца.

На практике для увеличения разрешения РС поток в зазоре увеличивается. Чтобы достичь разрешающей способности, достаточной для практических приложений, поток в зазоре между электродами обычно должен быть намного больше, чем поток анализируемого образца ионов, в результате чего скорость потока газа в зазоре между электродами часто может быть близка к скорости звука. Это создает две существенные проблемы. Во-первых, для создания таких высоких скоростей потока газа требуются мощные и, следовательно, большие и дорогие насосы. Во-вторых, это приводит к высоким числам Рейнольдса, – таким образом, поток становится турбулентным. Турбулентность оказывает сильное влияние на разрешающую способность, уменьшая её из-за образования вихрей и увеличивая уширение траекторий ионов. Увеличивать РС за счет уменьшения потока пробы также нежелательно, потому что это уменьшает количество ионов, выходящих из анализатора, и, следовательно, снижает чувствительность.

2. Новый метод

Настоящий метод обеспечивает концептуально другой способ улучшения селекции ионов и увеличения разрешающей способности за счёт использования входа образца для фокусирования ионов перед попаданием в зазор между электродами. Это сужает пучки траекторий ионов и позволяет избежать или уменьшить необходимость увеличения скорости потока через зазор между электродами.

Соответственно, в одном аспекте метод содержит установку для отделения ионов с заданной подвижностью от газовой смеси ионов с различной подвижностью с использованием устройства анализатора дифференциальной подвижности, при этом устройство анализатора содержит полость (камеру) разделения ионов, имеющую:

- (а) вход для потока измеряемого газа, содержащего ионы;
- (б) фокусирующую камеру, отверстие на одном конце которой служит впускным отверстием для потока измеряемого газа, через которое измеряемый газ с ионами может поступать в камеру разделения ионов;
- (с) впускное отверстие для газа в камеру разделения ионов, соединенное или подсоединенное к источнику газа для поддержания требуемой скорости и объёмного расхода Q_{sh} в камере;
- (д) выпускное отверстие для газа из камеры разделения ионов;
- (е) выпускное отверстие для газа, содержащего ионы с заданной подвижностью;
- (ф) два электрода, предназначенных для создания электрического поля разделения ионов внутри камеры разделения ионов.

При этом зона фокусировки предусмотрена в камере фокусировки, причём зона фокусировки содержит по меньшей мере две поверхности, на которых может создаваться неоднородная плотность электрического заряда.

Эта установка основана на новом способе выделения ионов с заданной подвижностью ионов который включает:

- (i) введение потока чистого (без ионов) газа в камеру разделения ионов через впускное отверстие с заданной скоростью потока (или объёмного расхода), Q_{sh} ;

(ii) введение потока газа-пробы, содержащего ионное облако, в камеру фокусировки и через неё, с заданной скоростью потока (или объёмного расхода) (Qi) в зону фокусировки;

(iii) воздействие на облако ионов в пробе газа в зоне фокусировки неоднородным электрическим полем, создаваемым неоднородной плотностью электрического заряда, так что электрическое поле изменяет траектории ионов в пробе газа таким образом, что они сходятся, образуя поток ионов уменьшенной ширины;

(iv) направление потока исследуемого газа, содержащего ионный поток уменьшенной ширины, из фокусирующей камеры через впускное отверстие для потока измеряемого газа в камеру разделения ионов;

(v) выбор напряжённости разделяющего поля таким образом, чтобы привлекать ионы с заданной подвижностью ионов к выходному отверстию для ионов.

В большинстве известных типов дифференциальных анализаторов подвижности (как показано на рис. 1) поток газа пробы входит в камеру разделения ионов, так что направление его потока совпадает с направлением потока газа в зазоре между электродами. Это достигается с помощью перегородки, которая направляет поток измеряемого газа, так что он течёт в направлении, по существу, параллельном потоку газа в зазоре, прежде чем слиться с потоком газа в зазоре на конце перегородки. Одно существенное различие между известными устройствами дифференциальных анализаторов подвижности и настоящим способом разделения ионов состоит в том, что в настоящем способе нет перегородки, направляющей поток газа пробы в направлении, параллельном потоку газа в оболочке. Вместо этого исследуемый газ проходит через камеру фокусировки, которая ориентирована под углом девяносто градусов относительно направления потока газа в зазоре вдоль камеры разделения ионов и непосредственно через входное отверстие для газа-пробы в камере разделения ионов. Таким образом, поток анализируемого газа входит в камеру разделения ионов под углом девяносто градусов по отношению к направлению потока газа в зазоре.

В новом методе используется существенно неоднородное фокусирующее электрическое поле, создаваемое электрическим зарядом неоднородной плотности. Электрическое поле имеет компоненту, которая ориентирована преимущественно поперёк потока измеряемого газа и имеет свойство изменять траектории ионов в потоке измеряемого газа таким образом, чтобы они сходились, то есть перемещались ближе к центральной линии, проходящей через зону фокусировки.

Электрический заряд с неоднородной плотностью может быть областью с высоким локализованным зарядом. Области локализованного заряда могут быть обеспечены электродами, расположенными внутри фокусирующей камеры. Неоднородное фокусирующее электрическое поле может быть создано двумя или более разнесёнными заряженными областями одинаковой полярности – например, пара разнесённых положительно заряженных областей. Две или более разнесённые области с одинаковой полярностью заряда создают противоположные электрические поля. Ионы, проходящие через противоположно направленные электрические поля, – одинаковой полярности, поэтому подвергаются силам отталкивания, которые заставляют их двигаться к центральной точке между разнесёнными друг от друга заряженными областями или к точке, где отталкивающие эффекты разнесённых друг от друга заряженных областей уравновешиваются.

Степень изменения траекторий ионов при их прохождении через фокусирующее электрическое поле будет зависеть как от силы электрического поля, так и от времени, проведённого ионами в электрическом поле, которое, в свою очередь, будет зависеть, по крайней мере, в некоторой степени от скорости прохождения газа через электрическое поле. Если скорость потока газа пробы слишком высока, ионы не будут подвергаться воздействию электрического поля достаточно долго, чтобы существенно повлиять на их траектории. Поэтому скорость потока измеряемого газа выбирается таким образом, чтобы ионы подвергались воздействию электрического поля в течение достаточно длительного времени, чтобы могла произойти фокусировка.

Явление модификации траекторий ионов таким образом, что они сходятся, давая ионный поток уменьшенной ширины, может быть обозначено здесь как «свёртка», а действие изменения траекторий ионов таким образом, что они сходятся, может быть названо как «сближение».

Первый критерий сближения определяет взаимосвязь между скоростью потока пробы, скоростью потока газа в зазоре, длиной разделительной камеры анализатора, которая косвенно связана с напряженностью электрического поля, а геометрия зоны фокусировки может быть выражена следующим образом:

$$(H_{in}/L) \cdot (Q_{sh}/Q_i) > Pf,$$

где H_{in} – толщина потока ионов образца, L – длина камеры, Q_{sh} – объёмный расход потока чистого воздуха в зазоре между электродами, Q_i – объёмный расход потока ионов, а Pf – фактор фокусировки ($1 < Pf < 30$). Данное выражение основано на экспериментальных наблюдениях за работой дифференциальных анализаторов подвижности различной геометрии, работающих в различных режимах. Это наиболее важная особенность метода, показывающая, что геометрия входа влияет на фокусировку и, следовательно, на разрешающую способность.

Как указано выше, расход пробы газа (который равен Q_i в приведённом выше выражении) влияет на продолжительность воздействия на ионы фокусирующего электрического поля и, следовательно, на степень изменения траекторий ионов. Кроме того, ширина потока измеряемого газа (которая равна H_{in} в приведённом выше выражении) будет определять начальную ширину или толщину потока ионов, движущихся к камере разделения ионов. Чем больше ширина потока измеряемого газа, тем большая степень фокусировки требуется для получения хорошего разрешения.

Так, например, эксперименты, проведённые с различной шириной потока пробы (H_{in}), показали, как на разрешающую способность влияет геометрия входа (табл. 1).

Таблица 1. Разрешающая способность, измеренная для различных H_{in} в экспериментах с ионами ацетонитрила в азоте ($L = 10$ мм, $Q_{sh} = 4$ л/мин и $Q_i = 0.25$ л/мин были постоянными)

H_{in} (мм)	PC	
	Измерения с фокусировкой	Расчёт без фокусировки
0.1	14	16
0.2	16	16
0.4	18	16
0.8	21	16
1.5	22	16
3.0	21	16

Увеличение H_{in} с 0.1 мм до 3 мм показывает увеличение разрешающей способности с четырнадцати до двадцати одного. Этот эффект нельзя объяснить в терминах обычного анализатора, где $Rp = Q_{sh}/Q_i = 16$. Точность измерения PC составила ± 1.2 . Таким образом, небольшие отклонения в измеренных значениях Rp на 0.1 и 3.0 мм можно объяснить точностью измерений.

В этом методе используется электрическое поле, составляющая которого ориентирована поперёк потока измеряемого газа. При условии, что вышеупомянутый критерий фокусировки (свёртывания) выполняется, ионы в потоке пробы будут подталкиваться к центру потока, образуя узкие пучки ионов, без необходимости увеличения скорости потока через камеру разделения. Способ нового метода настолько эффективен, что позволяет формировать очень узкий поток ионов даже при отсутствии потока газа в камере, хотя, конечно, на практике поток газа в камере используется при разделении и сборе ионов различной подвижности.

Следует отметить, что критерий свёртки содержит, в дополнение к двум параметрам, которые контролируют толщину пучка траекторий ионов в обычном анализаторе (то есть Q_{sh} и Q_i), два дополнительных параметра (H_{in} и L), которые определяют фокусировку ионов в соответствии с настоящим методом. Соответствие критерию свёртки позволяет улучшить разрешение дифференциальных анализаторов подвижности за счёт увеличения значения другого

отношения – H_{in}/L . В обычном устройстве на разрешение влияет только отношение Q_{sh}/Q_i . Это еще одно отношение, позволяющее улучшить разрешение, не увеличивая Q_{sh} настолько, чтобы поток воздуха в камере разделения становился турбулентным. Это позволяет устройству быть меньше, дешевле и обеспечивать более высокое разрешение.

В данном методе обычно используется зона свёртки траекторий ионов, включающая камеру фокусировки (которая может также упоминаться здесь как впускной накопитель ионов), примыкающей к камере разделения ионов, по крайней мере, с двумя поверхностями, где может быть создана неоднородная плотность электрического заряда, через которую может быть направлен поток образца. Неоднородная плотность электрического заряда приводит к возникновению, по существу, неоднородного фокусирующего электрического поля, имеющего компоненту, ориентированную преимущественно поперёк потока образца, и имеет свойство быть способным сворачивать траектории ионов в потоке газа пробы через камеру фокусировки, так что ионы перемещаются ближе к центральной линии зоны свёртки.

Второй критерий фокусирования/свёртывания, который определяет взаимосвязь между расходом измеряемого газа, напряженностью электрического поля или на практике разностью потенциалов и геометрией зоны фокусировки, может быть выражен следующим образом:

$$\left(1 + \frac{\Delta V_{in}}{\Delta Z_{in}} \cdot \frac{H}{\Delta V}\right) \cdot \frac{H_{in}}{L} \cdot \frac{Q_{sh}}{Q_i} > P_f$$

где H_{in} – толщина потока ионов пробы, L – длина камеры разделения, H – зазор между электродами камеры разделения ионов, ΔV – разность потенциалов между электродами камеры разделения ионов, Q_{sh} – поток чистого газа в зазоре, Q_i – поток газа пробы, ΔV_{in} – разность потенциалов на поверхности входа для образца, ΔZ_{in} – глубина скважины зоны свертки, где применяется разность потенциалов ΔV_{in} , а P_f – фактор фокусировки. Обычно для коэффициента фокусировки P_f попадает в диапазон ($1 < P_f < 40$).

Следует отметить, что во втором критерии свертки $\Delta V_{in} = 0$, это соответствует первому критерию свертки. Зона фокусировки (свёртки) может иметь различные формы.

Она может быть создана пучками электрических зарядов, расположенными на конце камеры фокусировки, то есть там, где отверстие в конце камеры фокусировки служит входом пробы газа. Например, отверстие в конце камеры фокусировки может совпадать с прорезью, зазором или выемкой в одном из электродов камеры разделения ионов, так что края электрода образуют ободок отверстия и обеспечивают пучки электрических зарядов, необходимых для создания фокусирующего электрического поля. Следует понимать, что в этом варианте напряженность электрического поля, создаваемого электрическими зарядами, будет направлена как вверх по потоку назад вдоль камеры фокусировки, так и внутрь камеры разделения ионов.

В одном варианте зона фокусировки обеспечивается электропроводящей полосой, расположенной в стенке фокусирующей камеры, при этом к этой проводящей полосе приложена разность потенциалов ΔV_{in} . Полоска изолирована окружающим электрическим изолятором от любых других внутренних проводящих поверхностей камеры фокусировки и расположена в месте Z_{in} от отверстия в конце фокусировки. Вертикальный размер, или ширина полосы, равен ΔZ_{in} . Изолятор также изолирует полосу от электродов в камере разделения ионов. Подходящие значения для ΔZ_{in} , координаты Z_{in} и напряжения ΔV_{in} можно найти обычным методом проб и ошибок. Этот вариант осуществления выгоден тем, что имеет большую эффективность фокусировки, поскольку дополнительное напряжение ΔV_{in} обеспечивает дополнительное усиление фокусирующего электрического поля в фокусирующей камере.

В другом варианте осуществления способа фокусирующая камера снабжена множеством электрически проводящих полос, расположенных на её стенке, при этом к каждой электрически проводящей полосе приложена разность потенциалов ΔV_{in} , тем самым создавая фокусирующее электрическое поле, причём каждая полоса изолирована окружающим электрическим изолятором от любых других проводящих полос и внутренних проводящих поверхностей фокусирующей камеры.

Таким образом, в этом варианте осуществления метода имеется несколько дополнительных электропроводящих полос (подобных тем, которые описаны в предыдущем варианте),

расположенных в определенных местах (координатах) Z_{in} , $Z_{in\alpha}$ и $Z_{in\beta}$. Каждая полоска имеет приложенную к ней разность потенциалов: ΔV_{in} , $\Delta V_{in\alpha}$ и $\Delta V_{in\beta}$ соответственно. Полоски изолированы друг от друга и от других внутренних поверхностей фокусирующей камеры электрическим изолятором. Расположение верха полосковых электродов относительно отверстия в конце фокусирующей камеры Z_{in} , $Z_{in\alpha}$ и $Z_{in\beta}$, их вертикальные размеры (ширина) ΔZ_{in} , $\Delta Z_{in\alpha}$ и $\Delta Z_{in\beta}$ и напряжения ΔV_{in} , $\Delta V_{in\alpha}$ и $\Delta V_{in\beta}$ могут быть определены эмпирически. Этот вариант осуществления выгоден тем, что каждая из дополнительных полосок, дополнительных напряжений ΔV_{in} , $\Delta V_{in\alpha}$ и $\Delta V_{in\beta}$ обеспечивает дополнительное усиление фокусирующего электрического поля и таким образом улучшает разрешающую способность, обеспечиваемую устройством.

В другом варианте осуществления метода камера фокусировки на своей внутренней поверхности снабжена слоем проводящего материала, который изолирован от электродов камеры разделения ионов с помощью электроизоляционного материала, и при этом пара проводящих электродов соединена с проводящим электродом. Материал и указанные электроды, в свою очередь, подключены к источнику разности потенциалов, чтобы создать желаемый профиль потенциала вдоль внутренней поверхности фокусирующей камеры. Таким образом, для вертикальной скважины желаемый профиль разности потенциалов $V(Z)$ будет создан внутри скважины как функция Z . Это создаёт неоднородное электрическое поле с фокусирующими свойствами для повышения разрешения.

На рис. 1 показан известный тип устройства дифференциального анализатора подвижности, имеющего вход для образца ионов (1), ведущий к камере разделения ионов (2), и перегородку (3), которая разделяет поток газа образца, проходящий через вход (1), от потока чистого газа (4) оболочки, вводимого через вход потока газа оболочки (5). В камере разделения ионов (2) два электрода расположены сверху (6) и снизу (7) камеры разделения ионов, соответственно, и они создают электрическое поле (8), которое при использовании притягивает ионы выбранной подвижности ионов, так что их траектории отклоняются выходной перегородкой для ионов (10) к выходу для ионов (9). Камера разделения ионов также имеет выход (11) для потока газа, содержащего невыбранные ионы.

Как только поток анализируемого газа покидает перегородку (3), на движение ионов в анализируемом газе влияет электрическое поле (8), в результате чего траектории ионов (12) и (13) отклоняются от преимущественно горизонтальных линий тока (4) в сторону электрода (6). Ионы с заданной подвижностью ионов будут притягиваться к выходу выбранных ионов (9) через секцию камеры (2), примыкающую ко второй перегородке (10).

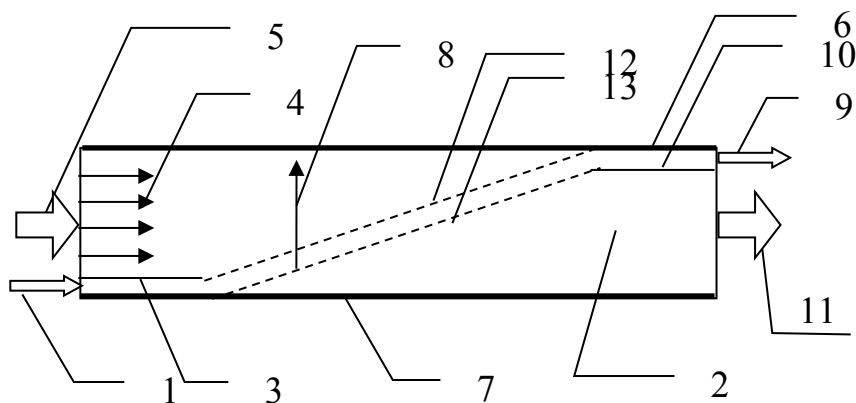
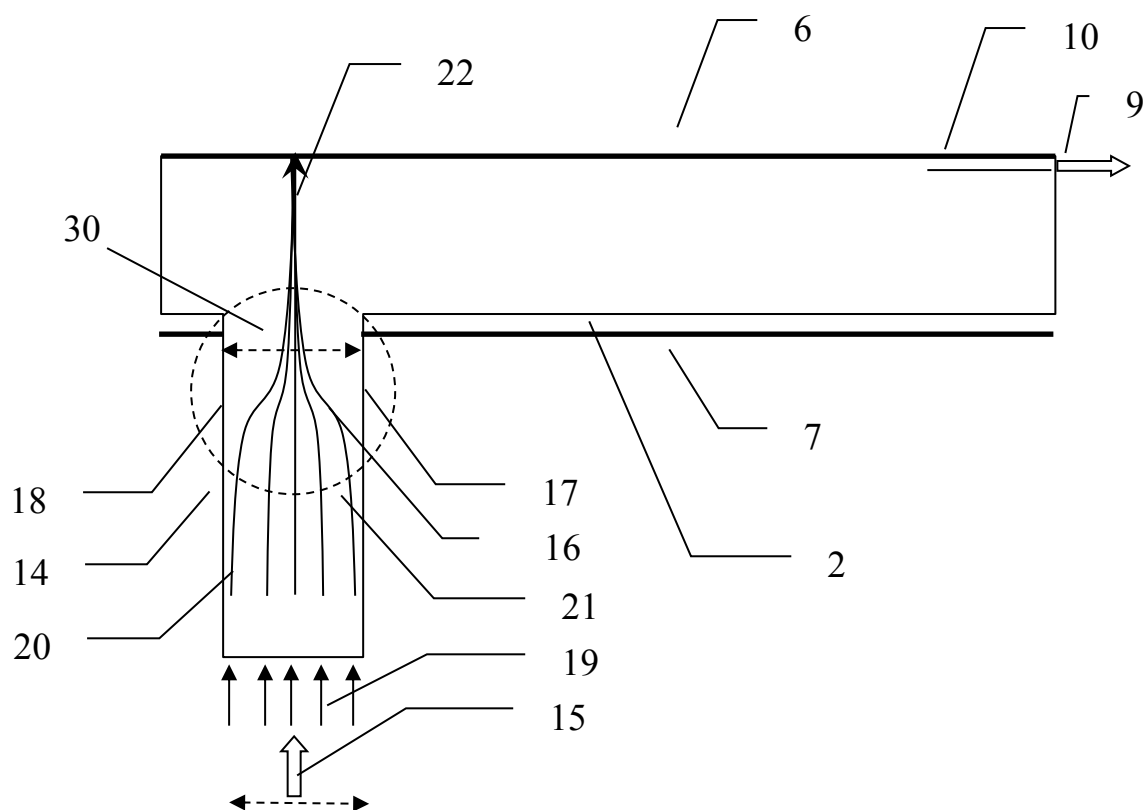


Рис.1. Известный тип устройства дифференциального анализатора подвижности

Ионы с более высокой подвижностью пересекут линию траектории (12) в направлении электрода (6) и будут разряжены. Ионы с меньшей подвижностью будут пересекать линию траектории (13) и будут уноситься потоком газа оболочки к выпускному отверстию для потока оболочки (11). Сканируя разность напряжений между электродами (6) и (7), можно получить спектр подвижности ионов в образце.

Разрешающая способность устройства, показанного на рис. 1, определяется отношением скорости потока через зазор между электродами к скорости потока ионной пробы Q_{sh}/Q_{in} . Это отношение Q_{in}/Q_{sh} используется для характеристики разрешения анализаторов, потому что оно представляет ширину пика иона в спектре подвижности. Расстояние между перегородкой 3 и электродом 7 обычно выбирается в соответствии с принципом непрерывности потока, чтобы исключить разницу скоростей между потоком измеряемого газа, содержащего ионы, и потоком в зазоре. Разрешающая способность может быть выражена как отношение Q_{in}/Q_{sh} , или чаще используют отношение: $PC = Q_{sh}/Q_{in}$. В обычном дифференциальном анализаторе подвижности на разрешение не влияет геометрия входов и выходов.



На рис. 2 показано устройство анализатора согласно первому варианту реализации. На рисунке показан аппарат без газового потока в зазоре, чтобы более наглядно продемонстрировать свёртку (схождение) траекторий ионов в зоне фокусировки траекторий ионов (14). Таким образом, устройство содержит камеру (2) разделения ионов, подключённую к источнику потока газа пробы (15), содержащего представляющие интерес ионы. Сопутствующие средства (например, насос) для поддержания скорости потока газа пробы в устройство не показаны. Устройство дополнительно содержит камеру для фокусировки ионов (16) с двумя поверхностями (17) и (18), каждая из которых имеет неоднородное распределение плотности электрического заряда, при этом стенки разнесены на расстояние H_{in} (показано двойной пунктирной линией). Камера разделения ионов (2) анализатора с электродами (6) и (7) также включает средства для создания разности напряжений между ними и тем самым создания электрического поля для разделения ионов (не показаны).

Hin, причём каждая из этих двух поверхностей имеет неоднородное распределение плотности электрического заряда одинаковой полярности (например, положительный заряд) на них. Электрические заряды на поверхностях (17) и (18) вызывают неоднородное электрическое поле, которое действует как зона фокусировки (14) для ионов в пробе газа.

Вход (15) камеры фокусировки (16) может быть соединён со средством (например, насосом, не показан) для поддержания потока газа пробы в камеру фокусировки (16).

На рис. 3 показана работа устройства, аналогичного изображённому на рис. 2, с включённым потоком газа в зазоре. Как и в варианте на рис. 2, проба газа, содержащая ионы, входит в отверстие (15) в фокусирующую камеру (16) и проходит вдоль фокусирующей камеры к выходу (30) и в камеру разделения ионов (2). Когда газ пробы проходит по фокусирующей камере (2), начальные траектории ионов (19) фокусируются в узкий пучок траекторий (22), как описано выше в отношении рис. 2. Газовый поток в зазоре (4) входит через входное отверстие для газа (5) и создаёт поток чистого газа через камеру (2). Поток измеряемого газа, содержащий сфокусированный поток ионов, движется в камеру (2) и уносится вниз по потоку газом потока в зазоре. По мере того как они проходят по камере (2), траектории ионов изменяются за счёт взаимодействия с электрическим полем и притягиваются к электроду (6). Степень, с которой ионы перемещаются к электроду (6), зависит от напряжённости поля и подвижности ионов в соответствии с их классом, а также от скорости объединённого потока газа в оболочке и потока газа пробы при заданной напряжённости электрического поля, к выходу попадают только ионы с определённой подвижностью (9). Ионы с большей подвижностью движутся быстрее и нейтрализуются на поверхности электрода (6). Ионы с меньшей подвижностью движутся медленнее и выносятся потоком оболочки в выходное отверстие камеры разделения (11). Напряжённость электрического поля можно регулировать, изменяя разность напряжений, приложенных к электродам (6) и (7), так, чтобы ионы с определённой подвижностью ионов собирались на выходе (9). Изменяя напряжённость электрического поля, можно получить спектр ионов с различной подвижностью. Описанный выше режим работы аналогичен режиму обычного анализатора, но отличается тем, что фокусировка ионов в фокусирующей камере (16) уменьшает толщину пучка ионных траекторий (22), что позволяет уменьшить поток в оболочке без снижения разрешения или улучшения разрешения без увеличения скорости потока оболочки до соотношения скорости потока пробы.

На практике было замечено, что первый критерий свёртки позволяет достичь $PC = 30$ при очень небольшом расходе через зазор: $Q_{sh} = 4$ л/мин. Это значительно меньше, чем поток в зазоре, необходимый для получения той же разрешающей способности с обычным инструментом, где требуется $Q_{sh} > 100$ л/мин. Следовательно, с дифференциальным анализатором подвижности, разработанным согласно настоящему предложению на основе критерия свёртки, можно построить небольшое и дешёвое портативное устройство.

Второй критерий свёртки позволяет ещё больше увеличить разрешающую способность. Таким образом, устройство, разработанное в соответствии со вторым критерием свёртки, продемонстрирует ещё больший потенциал миниатюризации и увеличения разрешения.

Следует уточнить, что критерии свёртки и значение Pf не предсказывают количественно разрешающую способность. Они должны указать направление увеличения РС. Разрешающая способность – это монотонная функция фокусирующего фактора $PC(Pf)$, которую можно представить в дифференциальной форме $dPC(Pf)/dPf > 0$. В общем случае зависимость РС от Pf является сложной функцией.

3. Эксперименты

Устройство селекции ионов согласно варианту осуществления, показанному на рис. 2 и 3, было построено и испытано. Исследованы различные размеры входного отверстия для образца. Все металлические части, включая электрод (6) и (7), были изготовлены из нержавеющей стали. Прокладка (перегородка) 10 мм между электродами (6) и (7) была изготовлена из

ПТФЭ. В одном варианте ширина фокусирующей камеры (16) составляла $H_{in} = 1$ мм. Зазор между электродами в камере анализатора (2) составлял $H = 8$ мм. Длина зоны селекции, или расстояние между входом для ионов и выходом для ионов, составляла 10 мм. Зазор между верхним электродом (6) и выходной перегородкой (10) на входе (9) составлял 0.5 мм. В камере анализатора были две пористые мембраны, пропускающие воздух через поток оболочки, чтобы уменьшить турбулентность и создать режим ламинарного потока, не показанный на чертежах. Мембраны располагались слева от входа для ионов и справа от выхода для ионов и были изготовлены из полиамида (нейлона) толщиной 0.5 мм. Выходная перегородка изготовлена из нержавеющей стали толщиной 0.2 мм. Остальные размеры устройства были такими, как описано в [7].

Напряжение между электродами подавалось пилообразным генератором, специально разработанным для данного анализатора и позволяющим достичь линейного изменения напряжения от 1 В до 1000 В за время сканирования от 10 до 1000 с. Это позволило записать количество отсчётов в зависимости от напряжения сканирования с использованием ионного счётчика типа, описанного в US 7,372,020 [8]. Полученные данные можно использовать для расчёта количества отсчётов в зависимости от электрической подвижности. Процедура этого расчёта широко описана в технических учебниках, а также см. [7].

Типичный спектр образца, содержащего ацетонитрил, записанный с помощью описанного выше устройства, показан на рис. 4.

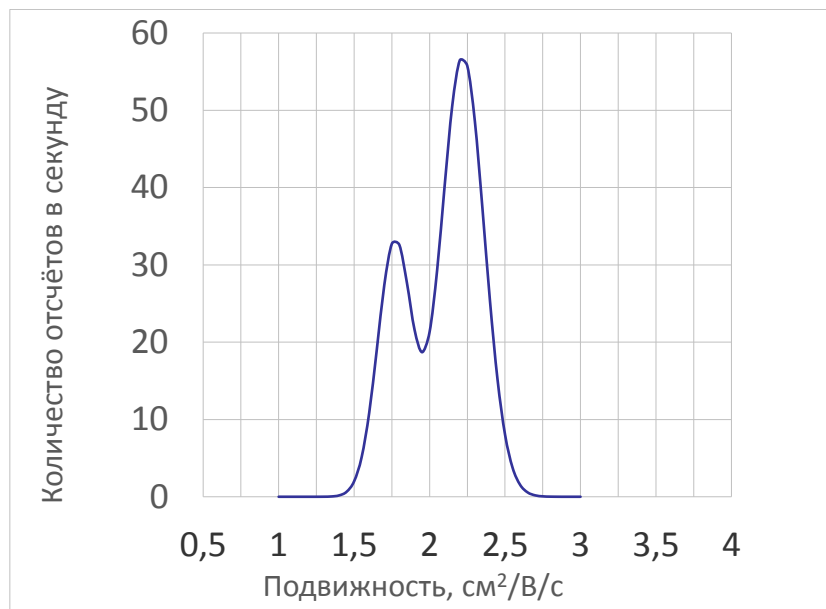


Рис. 4. Спектр подвижности ионов, характерный для изложенного метода

Тот факт, что в спектре присутствуют два пика, демонстрирует высокое разрешение, обеспечиваемое предложенным устройством. Без фокусировки ионов, обеспечиваемой устройством по настоящему методу, два таких пика не могут быть разрешены.

Литература

1. *Eiceman G. A.* Ion-mobility spectrometry as a fast monitor of chemical composition // *Trends in Analytical Chemistry*. 2002. V. 21, № 4. P. 259–275.
2. *Martínez-Lozano P., Fernández de la Mora J.* Resolution improvements of a nano-DMA operating transonically // *J. Aerosol Sci.* 2006. V. 37. P. 500–512.
3. *Santos J. P., E. Hontanón, E. Ramiro and M. Alonso* Performance evaluation of a high-resolution parallel-plate differential mobility analyser // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 2419–2429.

4. Патент США 2005/0006578; A1, Alan L. Rockwood, Edgar D. Lee, Nosa Agbonkonkon, Milton L. Lee.
5. Патент США 2006/0054804; A1, Anthony S. Wexler.
6. Патент США 7,928,374; B2, Juan Rus-Perez and Juan Fernandez de la Mora.
7. Steer B., Gorbunov B., Muir R., Ghimire A. and Rowles J. Portable Planar DMA: Development and Tests // *Aerosol Science and Technology*. 2014. V. 48. P. 250–259.
8. Патент США 7,372,020 B2. Счетчик ионов; Б. Горбунов.

Статья поступила в редакцию 19.11.2021.

Лиманский Владимир Николаевич

к.т.н., доцент кафедры ЦТРВиСПС СибГУТИ (630102, Новосибирск, Кирова, 86),
e-mail: v_lim@mail.ru.

Горбунов Борис Захарович

д.ф.-м.н., Ancon Technologies Limited, CIC, Canterbury, Kent CT2 7FG, UK,
e-mail: gorbunov1@aol.com.

References

1. Eiceman G. A. Ion-mobility spectrometry as a fast monitor of chemical composition. *Trends in Analytical Chemistry*. 2002, vol. 21, no 4, pp. 259-275.
2. Martínez-Lozano P., Fernández de la Mora J. Resolution improvements of a nano-DMA operating transonically. *J. Aerosol Sci.* 2006, vol. 37, pp. 500-512.
3. Santos J. P., E. Hontanón, E. Ramiro and M. Alonso Performance evaluation of a high-resolution parallel-plate differential mobility analyser. *Atmos. Chem. Phys.* 2009, vol. 9, pp. 2419-2429.
4. Patent SShA [US Patent] 2005/0006578; A1, Alan L. Rockwood, Edgar D. Lee, Nosa Agbonkonkon, Milton L. Lee.
5. Patent SShA [US Patent] 2006/0054804; A1, Anthony S. Wexler.
6. Patent SShA [US Patent] 7,928,374; B2, Juan Rus-Perez and Juan Fernandez de la Mora.
7. Steer B., Gorbunov B., Muir R., Ghimire A. and Rowles J. Portable Planar DMA: Development and Tests. *Aerosol Science and Technology*. 2014, vol. 48, pp. 250-259.
8. Patent SShA [US Patent] 7,372,020 B2. *Schetchik ionov* [Ion counter]; B. Gorbunov.

An ion selecting method for identification of ions in gaseous media

Vladimir N. Limanskii

Candidate of technical sciences, Docent, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), v_lim@mail.ru.

Boris Z. Gorbunov

Doctor of physical and mathematical sciences, Ancon Technologies Limited, CIC (Canterbury, Kent CT2 7FG, UK), gorbunov1@aol.com.

This method relates to selecting ions with a predetermined ion mobility from its mixture containing ions and electrically neutral molecules. More particularly, this method enables to extract ions of interest from a flow of analyzed gas so that they can be directed into a clean gas flow where they can be quantified. The method provides more effective separation, increases the resolution of ion selecting device and therefore enables to quantify complex mixtures at low concentrations molecules of interest in gases.

Keywords: ion identification, ion mobility, detection of trace amounts in air.