

УДК 621.384.8

© И. В. Курнин, Н. В. Краснов, 2019

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СЕПАРАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ С ИОНИЗАЦИЕЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В работе проведен сравнительный анализ типов ионов, получаемых в источниках с ионизацией при атмосферном давлении — ESI, FIAD, APCI. Рассмотрены возможности предварительной сепарации ионного потока от неинформативных ионов и заряженных частиц (микрокапель), влияющих на качество ионного пучка, поступающего в анализатор. Предложен способ, устраняющий легкие ионы типа H^+ , $(H_2O)H^+$, He^+ , N^+ из потока тяжелых ионов целевых веществ. С помощью теоретической модели показана эффективность предлагаемого способа.

Кл. сл.: подвижность ионов, ионно-молекулярные реакции, разрешение ион-дрейфового спектрометра

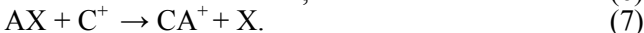
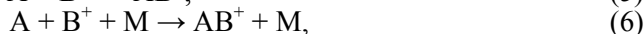
ВВЕДЕНИЕ

В источниках ионов с ионизацией при атмосферном давлении реализованы мягкие методы ионизации: электроспрей (ESI) [1], химическая ионизация при атмосферном давлении (APCI) [2], фотоионизация при атмосферном давлении (FIAD) [3], которые широко применяются в масс-спектрометрии, спектрометрии подвижности ионов при решении аналитических и поисковых задач органической и биоорганической химии, иммунологии, медицины, фармацевтики, токсикологии, следового анализа допинга, наркотиков и их метаболитов в биологических тканях и жидкостях. Из литературных данных известно, что в источниках такого типа образуются ионные пучки довольно сложного состава, включающие в себя как неинформативную компоненту, так и ионы исследуемых веществ. Поэтому важной задачей является найти возможности предварительной сепарации ионного потока от неинформативных ионов и заряженных частиц (микрокапель), влияющих на качество ионного пучка, поступающего в анализатор.

СОСТАВ ИОНОВ В ИСТОЧНИКАХ ESI, APCI, FIAD

В источниках ионов с ионизацией при атмосферном давлении APCI и FIAD используется механизм образования целевых ионов в результате ряда ион-молекулярных реакций между ионами-реагентами, получаемыми из газа-носителя азота под воздействием его первичной ионизации ко-

ронным разрядом, Ni^{63} или УФ-излучением, с газом-носителем гелием и молекулами целевого вещества. Для источника ионов ESI ситуация с ионами-реагентами немного сложнее, т.к. их получают непосредственно в анализируемом растворе, добавляя кислоту в раствор, и при необходимости дополнительные ионы-реагенты образуются в газовой фазе из азота при воздействии коронного разряда, УФ-излучения. В результате ионизации газа-носителя, содержащего низкие концентрации воды, наблюдается ряд ион-молекулярных реакций [2], приводящих к появлению следующих ионов, например, в положительной моде: N_2^+ , $2N^+$, N_4^+ , N_3^+ , H_2O^+ , H_3O^+ , $(H_2O)_2H^+$, $(H_2O)_nH^+$, которые называют ионами-реагентами. В зависимости от физико-химических свойств анализируемого вещества и его соотношения с ионами-реагентами в газовой фазе в последующих ион-молекулярных реакциях образуются положительные или отрицательные ионы. Образование положительных ионов целевого вещества A происходит в результате таких ион-молекулярных реакций как перенос заряда (1), перенос протона либо протонирование (2), отрыв гидридиона (3), диссоциация с переносом протона (4), реакция присоединения (5), кластерообразование (6), замещения (7):



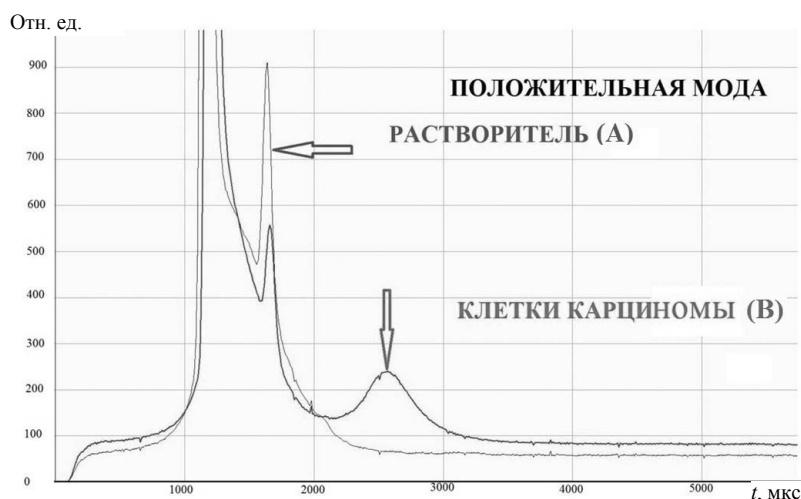


Рис. 1. Наложенные спектры подвижности Human serum albumin 10^{-5} М и Apoferritin 10^{-5} М в водно-ацетонитрильном элюенте (50 / 50 %) [7]

При использовании в качестве газа-носителя азота основными ионами-реагентами являются протонированные водные кластеры [4], при взаимодействии с которыми в зависимости от свойств целевого вещества и его концентрации в газе-носителе также образуются в основном протонированные молекулярные ионы целевого вещества AH^+ либо кластерные ионы $(\text{H}_2\text{O})_n\text{AH}^+$. При рассмотрении процессов, происходящих в источниках ионов с ионизацией при атмосферном давлении, учитывались лишь те из них, которые происходят в камере высокого давления, и не рассматривались неизбежно происходящие в сверхзвуковой струе рабочего газа-носителя, образующейся в системе транспортировки ионного пучка в анализатор.

Из проведенного рассмотрения следует, что в ионных спектрах целевых веществ присутствуют легкие ионы-реагенты, в основном протоны и протонированные кластеры воды. Наиболее показательны в этом ионные спектры тяжелых заряженных частиц, полученных при помощи источников ионов типа ESI. В работе [5] представлены спектры ионной подвижности молекулярных ионов макробиомолекул в положительной моде — Human serum albumin (69 367 Da), Hemoglobin Human (16 000 Da), Apoferritin (445 000 Da), Myoglobin (17 083 Da), Chymotrypsinogen A (25 666 Da). Спектры получены из растворов этих веществ при использовании источника ионов типа ESI в бескапельном режиме с динамическим делением потока анализируемого раствора [6]. Из приведенных там спектров следует, что интенсивность ионной компоненты, принадлежащей легким ионам — протонам и катионированным кластерам растворителя, больше интенсивности целевых веществ приблизительно в десять раз. Аналогичный вид имеет спектр подвижности клеток эпидермоидной карциномы человека A431, полученных из суспензии

клеток в смеси вода—ацетонитрил (50 / 50 %), подкисленной 0.1 % уксусной кислотой, с использованием источника ионов ESI [7]. Концентрация клеток в суспензии 1 млн/мл. На рис. 1 представлен спектр "бланка" — чистого растворителя (A) и спектр карциномы из суспензии (B). Из спектров видно, что интенсивность пиков протонов и протонированных молекул растворителя, являющихся легкими ионами, много больше интенсивности заряженной частицы эпидермоидной карциномы, имеющей размер 1 мкм. Аналогично выглядят и масс-спектры, содержащие большие биомолекулы.

В источнике ионов FIAD с фотоионизацией при атмосферном давлении поток газа-носителя гелия, поступающего из колонки газового хроматографа, ионизуется УФ-излучением и в виде первичных ионов He^+ участвует в ион-молекулярных реакциях с целевым веществом для получения максимального ионного тока вещества. Целевое вещество является микропримесью в потоке гелия, поэтому после прохождения всех ион-молекулярных реакций ионов гелия оказывается много больше ионов целевого вещества. Таким образом, и в источнике ионов с фотоионизацией при атмосферном давлении легкие неинформативные ионы находятся в большом количестве.

Легкие неинформативные ионы обладают большой подвижностью, создают объемный заряд и оказывают основное влияние на движение потока заряженных частиц, транспортируемых в анализатор.

Вклад объемного заряда в поток заряженных частиц, выходящих из источника ионов, хорошо демонстрируется ходом вольт-амперных характеристик на начальном этапе [8]. Экспериментальные вольт-амперные характеристики при малых значениях тока и ненулевой разности потенциалов между противозлектродом и входной в анализатор

диафрагмой имеют нелинейный характер. Такая нелинейность, по-видимому, определяется электрическим полем объемного заряда, проникающего за противоэлектрод, и зависит от величины ионного тока, диаметра отверстия в противоэлектродной и разностью потенциалов между противоэлектродом и входной диафрагмой. В совокупности наличие легких неинформативных ионов, полученных в результате ион-молекулярных реакций, приводит к ухудшению разрешающей способности анализатора [9].

Источнику ионов ESI присуще наличие большого количества ионов-реагентов — легких ионов, при помощи которых происходит образование заряженных ионов целевых веществ по различным механизмам ион-молекулярных реакций. В этом случае ионами-реагентами являются катионы [1], присутствующие в распыляемом растворе; чаще всего в роли катионов выступают протоны H^+ , которые вносят в раствор с уксусной или муравьиной кислотой. В результате получают как квазимолекулярные ионы анализируемого вещества MH^+ или $MKat^+_n$, так и большое количество свободных протонов H^+ или катионов Kat^+ , во много раз превышающее количество целевых ионов. Таким образом, из источника ионов выходит поток заряженных частиц в виде квазимолекулярных ионов и протонов, которые создают большой объемный заряд и в анализе не нужны, но ведут к кулоновскому взаимодействию одноименно заряженных частиц. Кулоновское взаимодействие, связанное с протонами, приводит к рассеянию потока заряженных частиц и ухудшению его транспортировки в анализатор и, как следствие, ухудшению аналитических параметров анализатора: разрешающей способности, чувствительности, соотношения сигнал/шум.

В потоке заряженных частиц, поступающих из источника ионов ESI к входной диафрагме анализатора, поступают, кроме легких ионов, ионы целевых веществ и еще не испарившиеся заряженные микрокапли анализируемого раствора, которые содержат молекулы целевого вещества.

Неиспарившиеся микрокапли оседают на элементах источника ионов (диафрагмах), что выводит его из работоспособного состояния, и существенно ухудшают качество пучка заряженных частиц. Для частичной сепарации потока заряженных частиц от микрокапель используют горячий газ-носитель [10]; на входе в систему транспортировки ионов в анализатор применяют дополнительные селективные методы либо в виде Z-образных каналов [11], в которых большие капли осаждаются на стенки канала, а ионы с газом-носителем поступают в анализатор, либо длинные прогреваемые капилляры, в которых происходит доиспарение больших капель или их осаждение на

стенки; электрораспыление под углом к оси входа в интерфейс анализатора с последующим электрическим отклонением дополнительным электродом заряженных частиц к отверстию во входной диафрагме интерфейса [10]. Как сказано выше, неиспарившиеся микрокапли оседают на элементах источника ионов (диафрагмах), что выводит его из работоспособного состояния.

Альтернативой сепарации потока заряженных частиц от микрокапель является использование особого режима работы источника ионов с электроспреем (ESI), основанного на способе образования бескапельного ионного потока при динамическом делении распыляемого раствора при нормальных условиях, что позволяет во время распыления [6] освободиться от микрокапель, но легкие неинформативные ионы остаются как в масс-спектрах, так и спектрах подвижности. В результате сепарацию микрокапель проводить не требуется из-за их отсутствия. Но в составе потока полученных заряженных частиц, кроме ионов целевого вещества, присутствует большое количество протонов и протонированных молекул растворителя, которые в потоке заряженных частиц поступают в анализатор и оказывают свое отрицательное воздействие в результате увеличения общего объемного заряда.

МЕТОД ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ ЛЕГКИХ ИОНОВ ИЗ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Цель настоящей работы — показать решение по организации предварительной сепарации легких ионов из потока заряженных частиц в источниках ионов с ионизацией при атмосферном давлении для уменьшения влияния объемного заряда на характеристики потока целевых ионов. Предлагаемое решение проблемы сепарации легких ионов при атмосферном давлении из общего потока заряженных частиц заключается в том, что за противоэлектродом создается область постоянного тянущего электрического поля вдоль оси транспортировки частиц; внутри области расположены параллельно оси транспортировки электроды, на которые подается импульсное поперечное электрическое поле с амплитудой и на время, достаточные для вывода легких ионов из общего потока заряженных частиц, при этом смещение ионов целевого вещества не влияет на их потерю при движении в потоке заряженных частиц к интерфейсу. Далее располагается еще одна область постоянного тянущего электрического поля вдоль оси транспортировки частиц, внутри области расположены параллельно оси транспортировки электроды, на которые подается импульсное поперечное электрическое поле обратной полярности с амплитудой

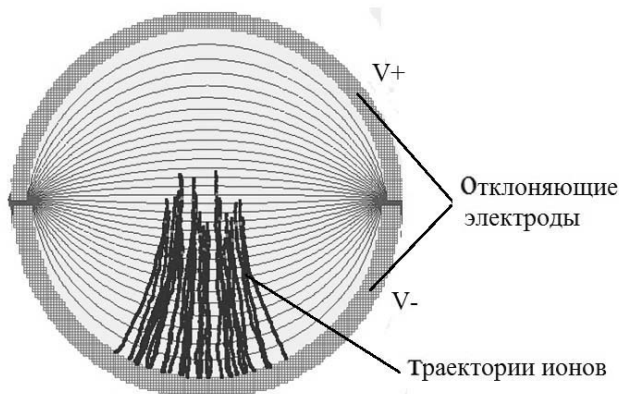


Рис. 2. Характерные траектории в рассматриваемой конфигурации электродов при импульсном воздействии поперечного электрического поля (показаны эквипотенциальные линии выталкивающего электрического поля)

и на время, достаточные для смещения ионов целевого вещества на первоначальные траектории движения в потоке заряженных частиц вдоль оси их транспортировки к отверстию входной диафрагмы интерфейса. Благодаря высокой подвижности протонов и легких ионов происходит предварительная экстракция легких ионов из потока заряженных частиц и соответственно уменьшение влияния объемного заряда потока на движение ионов целевого вещества. Т.к. коэффициент подвижности легких ионов больше, чем у тяжелых, легкие ионы быстрее будут выброшены на электроды, в то время как тяжелые лишь сместятся с оси.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим схему решения данной задачи. Области постоянного тянущего электрического поля ограничены сеточными электродами с высокой прозрачностью. Эти электроды подключены к делителю с источником питания. Между сеточными электродами в каждой области расположены относительно протяженные пары электродов, параллельных оси транспортировки. Электроды каждой пары подключены к импульсным источникам питания, которые в свою очередь находятся под потенциалом, задаваемым с делителя. Поперечные электрические импульсы в первой области выводят легкие ионы из потока заряженных частиц, а обратные по полярности поперечные импульсы во второй области корректируют движение ионов целевого вещества по оси потока к входной диафрагме интерфейса. На рис. 2 показаны характерные расчетные траектории ионов в рассматриваемой конфигурации электродов при импульсном воздействии поперечного электрического поля: легкие ионы, имеющие больший коэффициент подвижности по сравнению с тяжелыми, за время

импульса будут вынесены на электроды, а тяжелые ионы лишь сместятся с оси. При проведении количественной оценки эффективности работы предлагаемого решения по предварительной сепарации легких заряженных частиц в источнике ионов с ионизацией при атмосферном давлении используем зависимость коэффициента подвижности при нормальных условиях от массы заряженной частицы, приведенную в работе [12]. А именно, по массе рассматриваемого иона находится его модельный диаметр, значение которого определяет коэффициент подвижности:

$$\begin{aligned} d_i &= 0.120415405 \cdot (m_i)^{1/3}, \\ A_i &= 4.9137 - 1.4491 \cdot \lg(d_i) - \\ &\quad - 0.2772 \cdot (\lg(d_i))^2 + 0.717 \cdot (\lg(d_i))^3, \\ K_0 &= 10^{-5} \cdot 10^4, \end{aligned} \quad (8)$$

где m_i — масса иона в а.е.м., d_i — его диаметр в нм, K_0 — коэффициент подвижности при нормальных условиях, выраженный в $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Соответственно перемещение иона $d\mathbf{L}$ за временной шаг dt определится как $d\mathbf{L} = K_0 \cdot \mathbf{E} \cdot dt$, где \mathbf{E} — напряженность электрического поля. Если изменение абсолютного значения скорости иона за счет внешнего поля на длине свободного пробега сравнимо с тепловой скоростью, то уже нельзя считать, что его подвижность не зависит от величины внешнего поля. В этом случае можно воспользоваться зависимостью коэффициента подвижности от скорости иона в сильных электрических полях, приведенной в работе [13], что позволяет корректно описывать движение иона в плотном газе при наличии таких полей. На рис. 3 показаны модельные, согласно выражениям (8), зависимости величины поперечного смещения ионов для масс 1, 10 и 100 Да от времени в импульсном поперечном поле напряженностью 500 В/см при прохождении

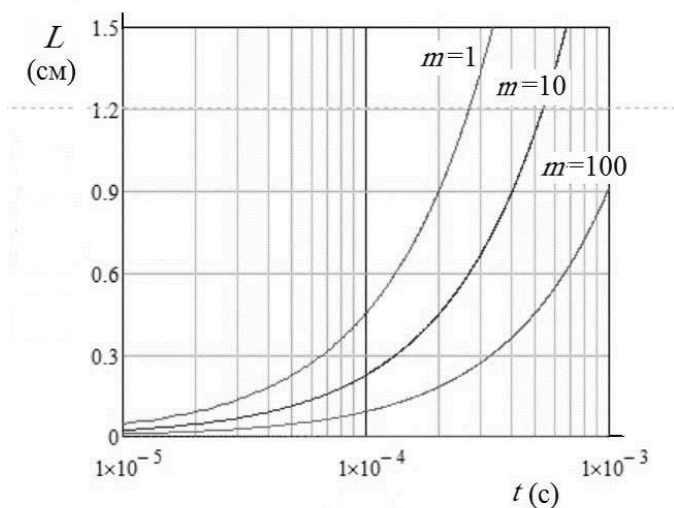


Рис. 3. Модельные зависимости величины смещения ионов с массами 1, 10 и 100 Да в импульсном поперечном поле напряженностью 500 В/см от времени

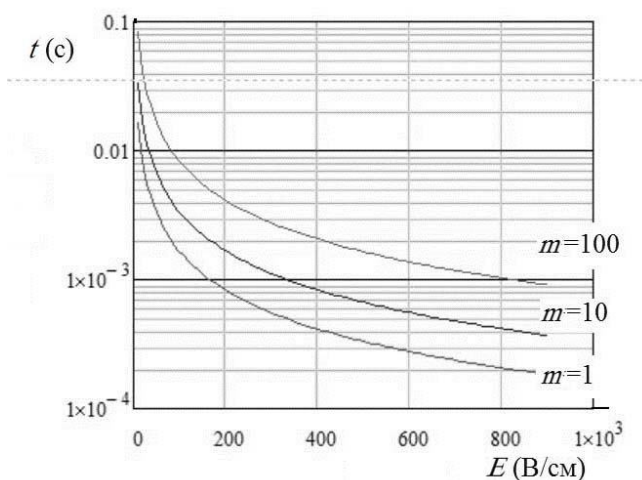


Рис. 4. Зависимости времени вылета ионов за пределы канала транспортировки радиусом 15 мм от амплитуды импульсного поперечного электрического поля для масс ионов 1, 10 и 100 Да

первой области тянущего электрического поля.

Из представленной зависимости видно, что на момент времени, когда ионы с массой 10 Да покинут канал транспортировки радиусом 15 мм, ионы массой 100 Да сместятся с оси только на расстояние 6 мм. На рис. 4 показаны зависимости времени вылета ионов за пределы канала транспортировки радиусом 15 мм от амплитуды импульсного поперечного электрического поля в первой области для масс ионов 1, 10 и 100 Да.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Такой вариант решения предварительной сепарации легких ионов в источниках ионов с ионизацией при атмосферном давлении позволяет

уменьшить величину объемного заряда и не потерять ионы целевого вещества из потока заряженных частиц.

Работа частично выполнена в рамках НИР 0074-2019-0009 (номер Гос. регистрации АААА-А19-119053190069-2), входящей в состав Гос. задания № 075-00780-19-02 ИАП РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexandrov M.L., Gall L.N., Krasnov N.V., Nikolaev V.I., Pavlenko V.A., Shkurov V.A. Extraction of ions from solutions under atmospheric pressure as a method for mass spectrometric analysis of bioorganic compounds // Rapid communications in mass spectrometry. 2008. Vol. 22. P. 267–270. DOI: 10.1002/rcm.3113.

2. Полякова А.А., Ревельский И.А., Токарев М.И., Коган Л.О., Тальрозе В.Л. Масс-спектрометрический анализ смесей с применением ион-молекулярных реакций. М.: Химия, 1989. 240 с.
3. Ревельский И.А., Яшин Ю.С., Вознесенский В.Н., Курочкин В.К., Костяновский П.Г. Способ масс-спектрометрического анализа газовой смеси. Патент SU 1159412. 1985.
4. Shanin M.M. Mass-spectrometric studies of corona discharge in air at atmospheric pressures // J. Chem. Phys. 1966. Vol. 45, no. 7. P. 2600–2605.
5. Арсеньев А.Н., Алексеев Д.Н., Бельченко Г.В. и др. Спектроскопия пептидов, белков и олигонуклеотидов из растворов методом ионной подвижности // Научное приборостроение. 2015. Т. 25, № 1. С. 17–26. URL: <http://iairas.ru/mag/2015/abst1.php#abst2>
6. Arseniev A.N., Muradymov M.Z., Krasnov N.V. Investigation of electrospray stability with dynamic liquid flow splitter // Anal. Chem. 2014. Vol. 69, no. 14. P. 30–32. DOI: 10.1134/S1061934814140020
7. Al-Tavil E.E., Krasnov N.V., Muradymov M.Z., Kurnin I.V., Krasnov M.N. Dropletless ESI for IMS at ambient conditions // Int. J. Ion Mobil. Spec. 2019. DOI: 10.1007/s12127-019-00250-2
8. Курнин И.В. Влияние ион-молекулярных реакций на разрешение ион-дрейфового спектрометра с затвором Бредбери—Нильсена // Научное приборостроение. 2017. Т. 27, № 3. С. 90–98. DOI: 10.18358/np-27-3-i9098
9. Arsiniev A.N., Kurnin I.V., Muradymov M.Z., Krasnov N.V., Yavor M.I., Krasnov M.N., Pomozov T.V. Optimization of ion transport from atmospheric pressure ion sources // Int. J. Ion Mobil. Spec. 2019. Vol. 22, no. 1. P. 31–38. DOI: 10.1007/s12127-018-02420-2
10. *Introducing Shimadzu*. URL: www.Shimadzu.com
11. *Conquer Scientific*. URL: <https://conquerscientific.com/product/waters-micromass-q-tof-micro-mass-spectrometer/>
12. Appelhans A.D., Dahl D.A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure // Int. J. Mass Spectrom. 2005. Vol. 244. P. 1–14.
13. Курнин И.В., Явор М.И. Модель движения в вязкой среде со статистической диффузией для расчета динамики ионов в плотном газе и сильных электрических полях // Научное приборостроение. 2015. Т. 25, № 3. С. 29–34. URL: <http://iairas.ru/mag/2015/abst3.php#abst4>

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург**

Контакты: Курнин Игорь Васильевич,
igor.kurnin@gmail.com

Материал поступил в редакцию 23.09.2019

PRELIMINARY SEPARATION OF CHARGED PARTICLES IN AN ION SOURCE AT ATMOSPHERIC PRESSURE

I. V. Kurnin, N. V. Krasnov

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, Russia

A comparative analysis of the types of ions obtained in ion sources at atmospheric pressure, such as ESI, FIAD, APCI, is carried out. The possibility of preliminary separation of the ions under consideration from non-informative ions and charged particles (microdrops) affecting the quality of the ion beam entering the analyzer is considered. A method is proposed for eliminating light ions, such as H^+ , $(H_2O)H^+$, He^+ , N^+ from a beam of heavy ions of interest.

The solution to the problem of separation of light ions at atmospheric pressure from the total flow of charged particles is that behind the counter electrode creates a region of constant pulling electric field along the axis of particle transportation. Inside the region, electrodes are arranged parallel to the axis of transportation, to which a pulsed transverse electric field is supplied with an amplitude and for a time sufficient to remove light ions from the total flow of charged particles. In this case, the displacement of the ions of the target substance does not affect their loss when moving in the flow of charged particles to the interface. Next is another area of a constant pulling electric field along the particle transportation axis. Inside the region, electrodes are arranged parallel to the axis of transportation, to which a pulsed transverse electric field of reverse polarity is supplied with an amplitude and for a time sufficient to shift the ions of the target substance to the initial motion paths in the stream

of charged particles along the axis of their transportation to the opening of the input diaphragm of the interface. Due to the high mobility of protons and light ions, a preliminary extraction of light ions from the flow of charged particles, accordingly, a decrease in the effect of the space charge of the flow on the movement of ions of the target substance. Since the mobility coefficient of light ions is more than that of heavy ions, light ions will be faster ejected onto the electrodes, while heavy ions will only shift from the axis.

The efficiency of the proposed method is shown by means of a theoretical model.

Keywords: ion mobility, ion-molecular reactions, resolution of ion mobility spectrometer

REFERENCES

1. Alexandrov M.L., Gall L.N., Krasnov N.V., Nikolaev V.I., Pavlenko V.A., Shkurov V.A. Extraction of ions from solutions under atmospheric pressure as a method for mass spectrometric analysis of bioorganic compounds. *Rapid communications in mass spectrometry*, 2008, vol. 22, pp. 267–270. DOI: 10.1002/rcm.3113.
2. Polyakova A.A., Revel'skij I.A., Tokarev M.I., Kogan L.O., Tal'roze V.L. *Mass-spektrometricheskij analiz smesej s primeneniem ion-molekulyarnyh reakcij* [Mass spectrometric analysis of mixtures using ion-molecular reactions]. Moscow, Himiya Publ., 1989. 240 p. (In Russ.).
3. Revel'skij I.A., Yashin Yu.S., Voznesenskij V.N., Kurochkin V.K., Kostyanovskij R.G. *Method for mass spectrometric analysis of a gas mixture*. Patent SU 1159412. 1985. (In Russ.).
4. Shanin M.M. Mass-spectrometric studies of corona discharge in air at atmospheric pressures. *J. Chem. Phys.*, 1966, vol. 45, no 7, pp. 2600–2605.
5. Arseniev A.N., Alekseev D.N., Belchenko G.V., et al. [Spectroscopy of peptides, proteins and oligonucleotides from solutions by ion mobility]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015, vol. 25, no 1, pp. 17–26. URL: <http://iairas.ru/en/mag/2015/abst1.php#abst2> (In Russ.).
6. Arseniev A.N., Muradymov M.Z., Krasnov N.V. Investigation of electrospray stability with dynamic liquid flow splitter. *Anal. Chem.*, 2014, vol. 69, no. 14, pp. 30–32. DOI: 10.1134/S1061934814140020
7. Al-Tavil E.E., Krasnov N.V., Muradymov M.Z., Kurnin I.V., Krasnov M.N. Dropless ESI for IMS at ambient conditions. *Int. J. Ion Mobil. Spec.*, 2019. DOI: 10.1007/s12127-019-00250-2
8. Kurnin I.V. [Influence of ion-molecular reactions on a resolving power of ion mobility spectrometer with Bradbury–Nielsen gate]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2017, vol. 27, no. 3, pp. 90–98. DOI: 10.18358/np-27-3-i9098 (In Russ.).
9. Arseniev A.N., Kurnin I.V., Muradymov M.Z., Krasnov N.V., Yavor M.I., Krasnov M.N., Pomozov T.V. Optimization of ion transport from atmospheric pressure ion sources. *Int. J. Ion Mobil. Spec.*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 31–38. DOI 10.1007/s12127-018-02420-2
10. *Introducing Shimadzu*. URL: www.Shimadzu.com
11. *Conquer Scientific*. URL: <https://conquerscientific.com/product/waters-micromass-q-tof-micro-mass-spectrometer/>
12. Appelhans A.D., Dahl D.A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure. *Int. J. Mass Spectrom.*, 2005, vol. 244, pp. 1–14.
13. Kurnin I.V., Yavor M.I. [Model of motion in a viscous media with a statistic diffusion for calculation of ion dynamics in a dense gas and strong electric fields]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2015, vol. 25, no. 3, pp. 29–34. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-25-3-i2934

Contacts: *Kurnin Igor' Vasil'evich*,
igor.kurnin@gmail.com

Article received by the editorial office on 23.09.2019