

УДК 537.534.7,537.291

© И. В. Курнин, 2025

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ РАДИОЧАСТОТНОЙ ВОРОНКИ ВХОДНОГО ИНТЕРФЕЙСА МАСС-СПЕКТРОМЕТРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫХОДНЫХ ИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ

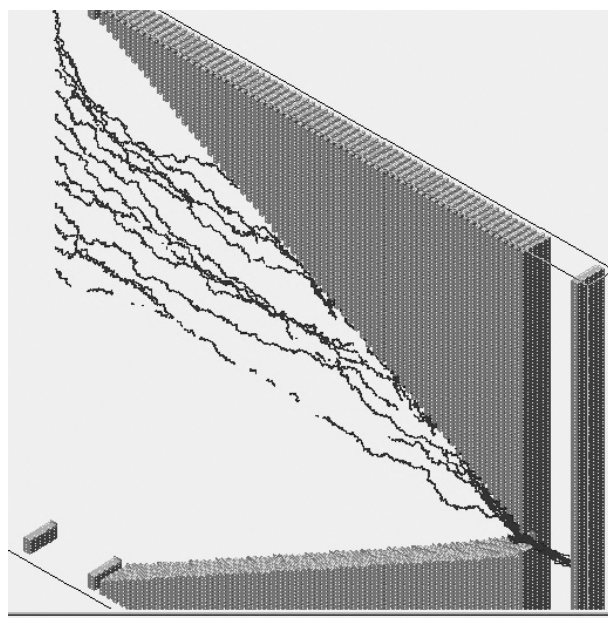
В работе представлены результаты моделирования динамики ионов в фокусирующей ионной воронке, являющейся элементом входного интерфейса масс-спектрометра и предназначенной для сбора и фокусировки ионов. Предполагается, что перед воронкой располагается дрейфовая трубка, в которой происходит предварительное разделение по подвижности при давлении газа в несколько Торр. Моделирование проведено для ионов разных масс в зависимости от угла схождения воронки и соотношения толщины электродов воронки и расстояния между ними. В этих условиях определены уширения выходных ионных импульсов.

*Ключевые слова:* радиочастотная ионная воронка, входной интерфейс масс-спектрометра

### ВВЕДЕНИЕ

Радиочастотные ионные воронки представляют собой устройства, которые активно используются в масс-спектрометрии и других аналитических техниках для сбора, фокусировки и транспортировки ионов. Использование ионной воронки обеспечивает более эффективную передачу ионов в область анализатора и показывает существенное увеличение пропускания ионов от источника к масс-анализатору [1–3]. Также ионная воронка может быть использована при фокусировке и сборе ионов на выходе дрейфовой трубки, работающей при пониженном давлении. Ионная воронка представляет собой последовательность соосно располагаемых плоских электродов с отверстиями, диаметр которых пошагово уменьшается и заканчивается выходной диафрагмой (рис. 1). К каждому электроду прикладывается постоянный потенциал, который линейно меняется от электрода к электроду, что обеспечивает продольное электрическое поле, протягивающее ионы к выходной диафрагме. А прикладываемый радиочастотный (РЧ-) потенциал, противофазный по отношению к соседним электродам, обеспечивает удержание ионов внутри воронки. Основные параметры, влияющие на их работу, включают амплитуду и частоту подаваемого РЧ-потенциала, а также геометрические параметры, такие как толщина электродов, расстояние между ними и шаг уменьшения радиуса отверстия электродов. Толщина электродов и расстояние между ними критически важны для эффективности фокусировки ионов.

Целью настоящей работы является моделирование динамики ионов при давлении в несколько



**Рис. 1.** Разрез фокусирующей радиочастотной воронки с характерными траекториями ионов, запускаемыми равномерно по линии, проходящей по радиусу.

Торр в фокусирующей ионной воронке, являющейся элементом входного интерфейса масс-спектрометра. Предполагается, что перед воронкой располагается дрейфовая трубка, в которой происходит предварительное разделение по подвижности при давлении газа в несколько Торр, и важным становится определение параметров

воронки, обеспечивающих минимальное уширение ионного импульса на выходе.

#### УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Моделирование динамики ионов в фокусирующей ионной воронке проводилось с помощью программы SIMION [4] с использованием подпрограммы, реализующей столкновительную модель, которая учитывает единичные столкновения ионов с молекулами газа посредством применения метода Монте-Карло [5]. Модель статистической диффузии, SDS-модель [6], которая существенно ускоряет процесс счета в случае плотного буферного газа, здесь неприменима, поскольку при давлении газа в несколько Торр и частоте 1 МГц число столкновений, приходящееся на временной шаг, ограничиваемый величиной радиочастотного периода, недостаточно для набора необходимой статистики — не менее  $10^5$  за шаг по времени, — чтобы можно было использовать SDS-модель. В расчетах давление буферного газа (азота) принималось равным 1.5 Торр.

Моделируемая ионная воронка имела следующие параметры. Входной диаметр (диаметр первого отверстия электрода воронки) составлял 76 мм. Рассматривались варианты толщины пластин воронки 0.5 мм и 1 мм при том же расстоянии между ними. Диаметр отверстия последнего кольца воронки (с РЧ-потенциалом) 4.2 мм. Диаметр отверстия выходной диафрагмы воронки (с постоянным потенциалом) 2.5 мм. Рассматривались углы схождения воронки  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $48^\circ$ , при этом длина воронки составляла соответственно 104, 66 и 34 мм, а шаг схождения по радиусу — 0.3475, 0.5508, 1.088 мм. При угле  $30^\circ$  сравнивалась эффективность формирования выходного ионного импульса в зависимости от плотности расположения колец — при расстоянии между ними: 1) 0.5 мм и толщине 0.5 мм и 2) расстоянии 1 мм и толщине 1 мм.

Прикладываемое РЧ-напряжение на кольца воронки — частота  $f = 1$  МГц, амплитуда 80 В. Поле внутри воронки составляло 0.5 В/мм, а напряженность вытягивающего поля за выходной диафрагмой воронки составляла 2.66 В/мм.

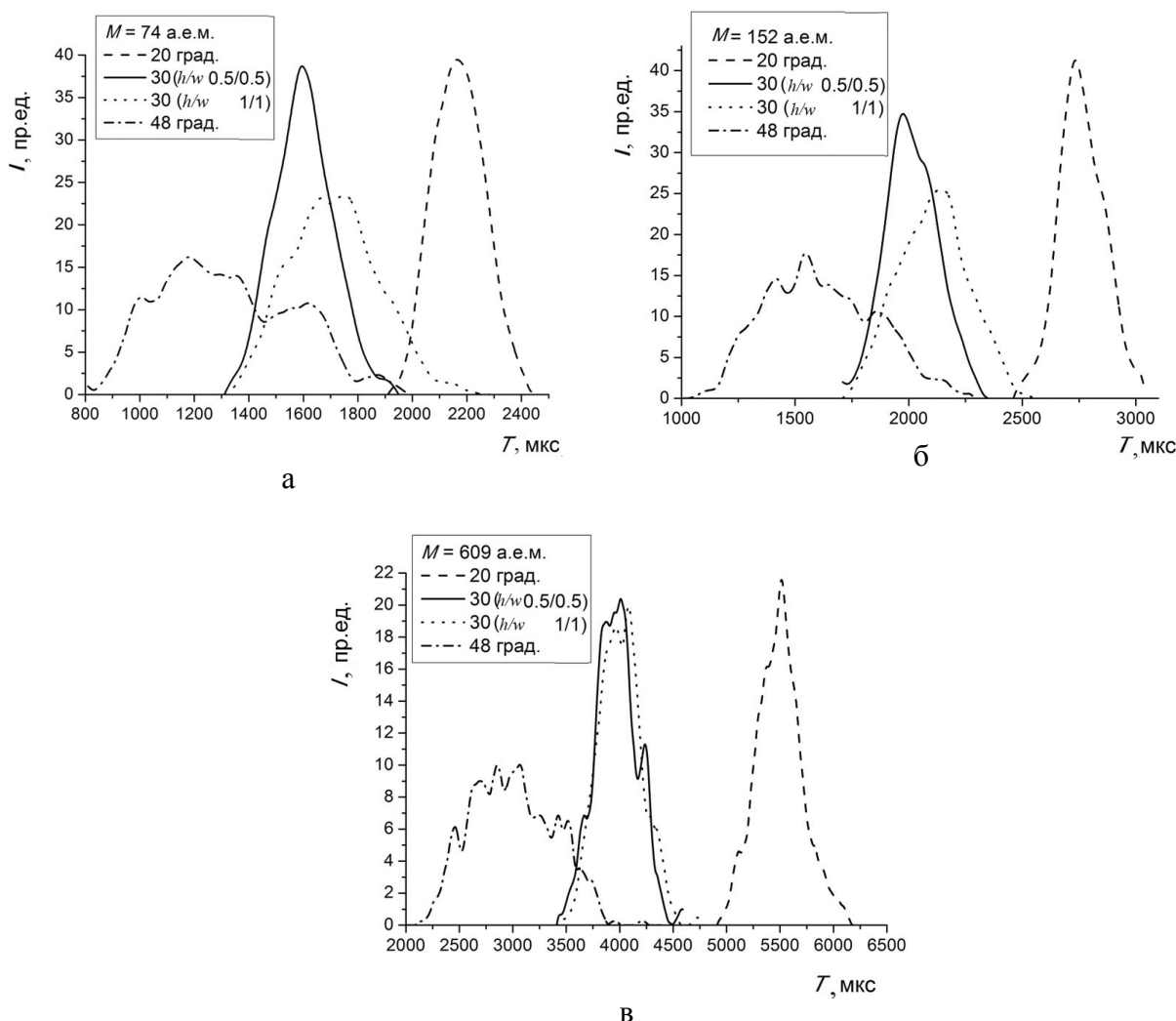
Моделировалась динамика групп трех разных однозарядных ионов: тетраметиламмония массой 74.1 а.е.м. и значением поперечного сечения столкновений в азоте, равным  $107.4 \text{ \AA}^2$ ; ацетиламина — масса 152.1 а.е.м., сечение столкновений  $130.4 \text{ \AA}^2$ ; резерпина — масса 609.4 а.е.м., сечение столкновений  $254.3 \text{ \AA}^2$ .

Использование при моделировании движения ионов в РЧ-полях столкновительной модели при давлении несколько Торр занимает значительное

время. В зависимости от подвижности иона и длины дрейфа, увеличивающейся при уменьшении угла схождения воронки, скорость счета может составлять несколько ионов в час, что затрудняет набор расчетной статистики. Поэтому, чтобы сократить расчетное время без потери информативности, ионы разных масс запускались на входе в воронку вдоль радиуса ( $R = 38$  мм) с равномерным по нему шагом 0.076 мм (500 ионов) (рис. 1). Это дает возможность соотнести поперечную координату старта иона с регистрируемым временем его выхода из воронки. Приосевые ионы проходят путь практически напрямую с минимальным временем, тогда как крайние ионы двигаются вдоль стенки воронки, испытывая тормозящее воздействие РЧ-полей, при этом их путь до выходной диафрагмы воронки и так длиннее. Зависимости времени выхода ионов от поперечной координаты старта, полученные в результате моделирования, линейно аппроксимировались, что позволяет определить выходные характеристики ионных импульсов для разных начальных распределений ионов во входном сечении воронки. В предположении равномерного распределения ионов по поперечному сечению на входе собирающей воронки число ионов, приходящихся на площадь поперечного кольца постоянной ширины  $dr$ , линейно растет с расстоянием от оси. А именно, исходя из линейной аппроксимации, каждому стартовому кольцу шириной  $dr$  соответствует время выхода ионов  $t+dt$ . Доля ионов в кольце радиусом  $r$  и шириной  $dr$  по отношению к полному числу ионов в сечении будет равна  $dN / N_0 = 2r dr / R^2$ , где  $N_0$  — полное число ионов по входному сечению. Таким образом, учитывая этот вес в расчетных выходных распределениях, соответствующих начальному распределению ионов вдоль входного радиуса воронки, возможно получить временной профиль выходного ионного импульса, отвечающий начальному распределению ионов во входном сечении воронки.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ВЫХОДЕ СОБИРАЮЩЕЙ ИОННОЙ ВОРОНКИ

На рис. 2 приведены расчетные ионные импульсы, регистрируемые на выходе собирающей воронки, при начальном распределении ионов разных масс: а) 74 а.е.м., б) 152 и в) 609 а.е.м., одновременно стартующих вдоль входного радиуса воронки, и углах схождения воронки  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  и  $48^\circ$ . Видно, что при больших углах схождения воронки выходной ионный импульс оказывается значительно шире, что можно объяснить влиянием РЧ-рельефа вблизи стенки воронки, т.к. в этом случае ионы сильнее прижимаются к торцам пластин воронки протягивающим полем. Кроме того,

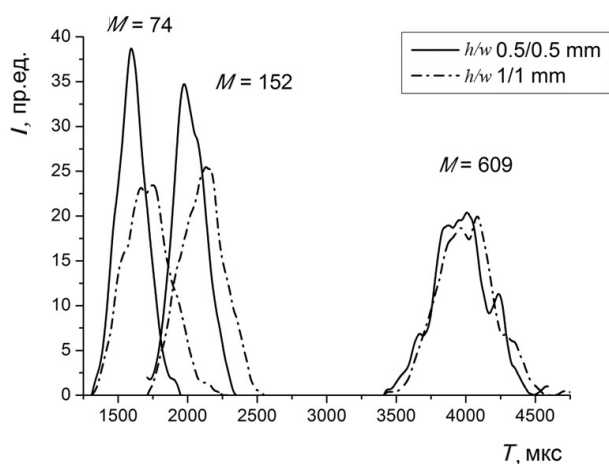


**Рис. 2.** Расчетные ионные импульсы, регистрируемые за выходом воронки с углами схождения  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , и  $48^\circ$  для ионов с массами (а) 74 а.е.м., (б) 152 и (в) 609 а.е.м.  
 $h/w$  — соотношение толщины колец и расстояния между ними

как показывается на рис. 3, при фиксированном угле схождения с увеличением массы иона выходной импульс уширяется.

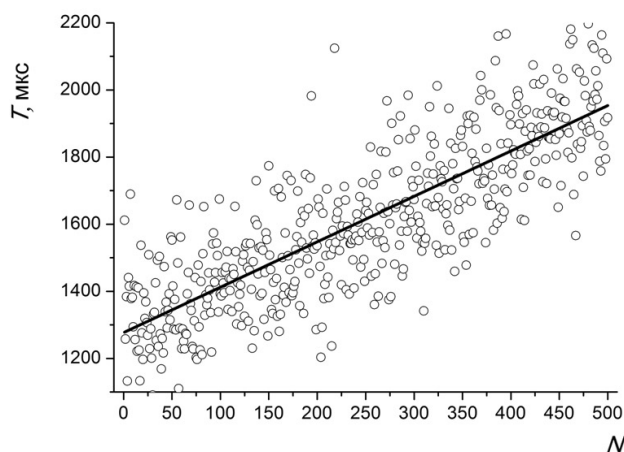
Также расчетные профили выходных ионных импульсов, приведенные на рис. 3, показывают влияние толщины пластин  $h$  воронки и расстояния между ними  $w$  на временные профили выходных ионных импульсов. Сравнивая выходные импульсы ионов одной массы при угле схождения собирающей воронки  $30^\circ$ , можно видеть, что при толщине колец и расстоянии между ними  $0.5 / 0.5 \text{ мм}$  выходные ионные импульсы заметно выше

и имеют меньшую ширину на полувысоте относительно импульсов, полученных при соотношении геометрических параметров воронки  $1 / 1 \text{ мм}$ . Это можно объяснить тем, что с увеличением расстояния между электродами воронки РЧ-рельеф в непосредственной близости от стенки воронки становится более выраженным, и ионы на некоторое время задерживаются в окрестности межэлектродных промежутков. В результате выходные ионные импульсы становятся шире. При этом видно, что с увеличением массы иона различия между выходными ионными импульсами уменьшаются.



**Рис. 3.** Выходных импульсы ионов с массами 74, 152 и 609 а.е.м. при угле схождения собирающей воронки  $30^\circ$  и разных толщинах  $h$  колец и расстояний  $w$  между ними — 0.5 / 0.5 мм и 1 / 1 мм.

На рис. 4 на примере угла схождения воронки  $48^\circ$  и массы иона 152 а.е.м. приведена статистическая зависимость времени выхода ионов из воронки от порядкового номера старта, который определяет положение точки старта иона вдоль радиуса с шагом  $dr = 0.076$  мм, как  $r_n = (n - 1)dr$ . Линейная аппроксимация такой зависимости и учет начального распределения ионов по входному сечению

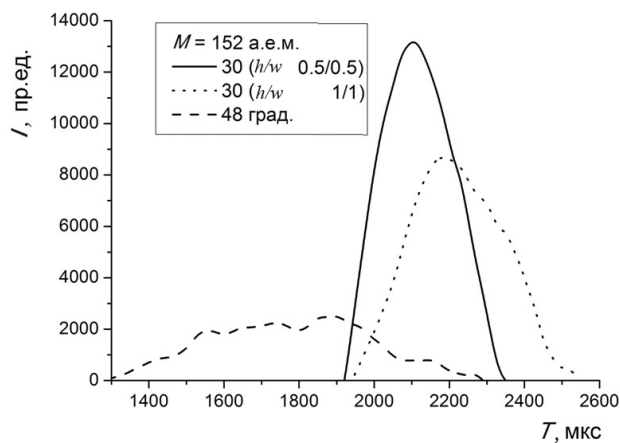


**Рис. 4.** Зависимость отсчетов времени выхода ионов из воронки от их порядкового номера старта (радиуса) и соответствующая линейная аппроксимация (для угла схождения воронки  $48^\circ$  и массы ионов 152 а.е.м.).

воронки позволяют определить выходные характеристики ионных импульсов без проведения затратных по времени расчетов. На рис. 5 приведены выходные профили ионных импульсов при разных углах схождения воронки в предположении равномерного распределения ионов по поперечному входному сечению фокусирующей радиочастотной воронки. Видно, что в случае толщины колец и расстояний между ними 0.5 / 0.5 мм высота выходного ионного импульса значительно превосходит импульс, регистрируемый при толщине колец и расстояний между ними 1 / 1 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты моделирования динамики ионов в фокусирующей ионной воронке, являющейся элементом входного интерфейса масс-спектрометра и предназначенной для сбора и фокусировки ионов. Предполагается, что перед воронкой располагается дрейфовая трубка, в которой происходит предварительное разделение по подвижности при давлении газа в несколько Торр, и важным становится определение параметров воронки, обеспечивающих минимальное уширение ионного импульса на выходе. Ширину выходных ионных импульсов характеризует уширение ионного импульса при прохождении ионами воронки в зависимости от ее геометрических параметров.



**Рис. 5.** Выходные профили ионных импульсов при углах схождения воронки  $30^\circ$  ( $h / w$  — 0.5 / 0.5 и 1 / 1 мм) и  $48^\circ$  при равномерном начальном распределении ионов (152 а.е.м.) по поперечному входному сечению фокусирующей радиочастотной воронки.

Полученные результаты моделирования показывают, что с увеличением угла схождения воронки ширина выходных ионных импульсов увеличивается. При увеличении расстояния между пластинами воронки с сохранением угла схождения время выхода импульса увеличивается, как и его ширина, поскольку более выраженный РЧ-рельеф стенок воронки сильнее притормаживает дрейф ионов. При этом задние фронты импульсов оказываются несколько затянутыми, поскольку ионы, изначально идущие по большему радиусу, проходят больший путь вдоль стенки воронки с РЧ-рельефом.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00444-25-00 (от 26.12.2024), тема НИР FFZM-2025-0006.*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kelly R.T., Tolmachev A.V., Page J.S., Tang K., Smith R.D. The ion funnel: theory, implementations and applications // *Mass Spectrom. Rev.* 2010, Vol. 29, no. 2. P. 294–312. DOI: 10.1002/mas.20232
2. Kim T., Tang K., Udseth H.R., Smith R.D. A multicapillary inlet jet disruption electrodynamic ion funnel interface for improved sensitivity using atmospheric pressure ion sources // *Anal. Chem.* 2001. Vol. 73, no. 17. P. 4162–4170. DOI: 10.1021/ac010174e
3. Ibrahim Y., Belov M.E., Tolmachev A.V., Prior D.C., Smith R.D. Ion Funnel Trap Interface for Orthogonal Time-of-Flight Mass Spectrometry // *Anal. Chem.* 2007. Vol. 79, no. 20. P. 7845–7852. DOI: 10.1021/ac071091m
4. Manura D., Dahl D.A. SIMION 8.0 User's Manual. Sci. Instrument Services, Inc. Idaho Nat. Lab, 2006.
5. Курнин И.В., Явор М.И. Особенности транспортировки ионных пучков в газонаполненных радиочастотных квадрупольях на промежуточных давлениях // *ЖТФ.* 2009. Т. 79, № 9. С. 112–119.  
URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/9799>
6. Appelhans A.D., Dahl D.A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure // *International Journal of Mass Spectrometry.* 2005. Vol. 244, no. 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijms.2005.03.010

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

Контакты: Курнин Игорь Васильевич,  
[igor.kurnin@gmail.com](mailto:igor.kurnin@gmail.com)

Материал поступил в редакцию 02.09.2025

# THE EFFECT OF THE GEOMETRY OF THE RADIO FREQUENCY ION FUNNEL OF THE MASS SPECTROMETER INTERFACE ON THE CHARACTERISTICS OF THE OUTPUT ION PULSES

I. V. Kurnin

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

The paper presents the results of modeling the dynamics of ions in a radio frequency ion funnel, which is an element of the mass spectrometer input interface and is designed to collect and focus ions. The simulation was performed for ions of different masses depending on the angle of convergence of the funnel and the ratio of the thickness of the electrodes of the funnel to the distance between them. Under these conditions, the broadening of the output ion pulses is determined.

**Keywords:** RF ion funnel, interface of mass spectrometer

## REFERENCES

1. Kelly R.T., Tolmachev A.V., Page J.S., Tang K., Smith R.D. The ion funnel: theory, implementations and applications. *Mass Spectrom. Rev.*, 2010, vol. 29, no. 2, pp. 294–312. DOI: 10.1002/mas.20232
2. Kim T., Tang K., Udseth H.R., Smith R.D. A multicapillary inlet jet disruption electrodynamic ion funnel interface for improved sensitivity using atmospheric pressure ion sources. *Anal. Chem.*, 2001, vol. 73, no. 17, pp. 4162–4170. DOI: 10.1021/ac010174e
3. Ibrahim Y., Belov M.E., Tolmachev A.V., Prior D.C., Smith R.D. Ion Funnel Trap Interface for Orthogonal Time-of-Flight Mass Spectrometry. *Anal. Chem.*, 2007, vol. 79, no. 20, pp. 7845–7852. DOI: 10.1021/ac071091m
4. Manura D., Dahl D.A. *SIMION 8.0 User's Manual*. Sci. Instrument Services, Inc. Idaho Nat. Lab, 2006.
5. Kurnin I.V., Yavor M.I. [Peculiarities of ion beam transportation in gas-filled radio-frequency quadrupoles at intermediate pressures]. *JTF* [Journal of Technical Physics], 2009, vol. 79, no. 9, pp. 112–119. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/9799> (In Russ.).
6. Appelhans A.D., Dahl D.A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2005, vol. 244, no. 1, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.ijms.2005.03.010

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

Article received by the editorial office on 02.09.2025

## INTRODUCTION

Radiofrequency ion funnels are devices widely used in mass spectrometry and other analytical techniques for collecting, focusing, and transporting ions. Using an ion funnel ensures more efficient ion transfer to the analyzer and significantly increases ion throughput from the source to the mass analyzer [1–3]. An ion funnel can also be used to focus and collect ions at the outlet of a drift tube operating at reduced pressure. An ion funnel consists of a series of coaxially arranged flat electrodes with holes which diameter gradually decreases and ends with an outlet diaphragm (Fig. 1).

**Fig. 1.** Sectional view of a focusing radiofrequency funnel showing characteristic ion trajectories launched uniformly along a radius line.

A constant potential is applied to each electrode, which varies linearly from electrode to electrode, providing a longitudinal electric field that draws ions toward the outlet diaphragm. The applied radio frequency (RF) potential, out of phase with the adjacent electrodes, ensures the ion confinement within the funnel. The key parameters influencing their operation include the amplitude and frequency of the applied RF potential, as well as geometric parameters such as electrode thickness, the distance between them, and the step size of the electrode opening radius. The thickness and distance between the electrodes are critical for ion focusing efficiency. The aim of this work is to model ion dynamics at a pressure of several Torr in a focusing ion funnel, which is an element of the input interface of a mass spectrometer. It is assumed that a drift tube is located in front of the funnel, where preliminary mobility separation occurs at a gas pressure of several Torr. Determining the funnel parameters that ensure minimal broadening of the ion pulse at the output becomes important.

## SIMULATION CONDITIONS AND RESULT PROCESSING ALGORITHM

The ion dynamics in a focusing ion funnel were simulated using the SIMION program [4] with a subroutine implementing a collision model that takes into account single collisions of ions with gas molecules by applying the Monte-Carlo method [5]. The statistical diffusion model, the SDS model [6], which significantly accelerates the calculation process in the case of a dense buffer gas, is not applicable here, since at a gas pressure of several Torr and a frequency of 1 MHz, the number of collisions per

time step limited by the radio frequency period is insufficient to collect the necessary statistics — at least  $10^5$  per time step — so as to enable the use of the SDS model. In the calculations, the pressure of the buffer gas (nitrogen) was taken to be 1.5 Torr.

The simulated ion funnel had the following parameters. The inlet diameter (the diameter of the first hole of the funnel electrode) was 76 mm. Funnel plate thicknesses of 0.5 mm and 1 mm with the same distance between them were considered. The diameter of the opening of the last funnel ring (with RF potential) was 4.2 mm. The diameter of the opening of the funnel outlet diaphragm (with constant potential) was 2.5 mm. Funnel convergence angles of 20°, 30°, and 48° were considered, with funnel lengths of 104, 66, and 34 mm, respectively, and radial convergence increments of 0.3475, 0.5508, and 1.088 mm. At an angle of 30°, the efficiency of output ion pulse generation was compared depending on the ring density: with a distance between them of 1) 0.5 mm and a thickness of 0.5 mm and 2) a distance of 1 mm and a thickness of 1 mm.

The RF voltage applied to the funnel rings had a frequency of 1 MHz and an amplitude of 80 V. The field inside the funnel was 0.5 V/mm, and the strength of the extracting field behind the funnel output diaphragm was 2.66 V/mm.

The dynamics of groups of three different singly charged ions were simulated: tetramethylammonium with a mass of 74.1 u and a collision cross section in nitrogen of 107.4 Å<sup>2</sup>; acetaminophen with a mass of 152.1 u and a collision cross section of 130.4 Å<sup>2</sup>; reserpine with a mass of 609.4 u and a collision cross section of 254.3 Å<sup>2</sup>.

Using a collision model to simulate ion motion in RF fields at pressures of several Torr takes considerable time. Depending on the ion mobility and the drift length, which increases with decreasing funnel convergence angle, the counting rate can be several ions per hour, complicating the collection of calculation statistics. Therefore, to reduce the calculation time without losing information content, ions of different masses were launched at the funnel entrance along a radius ( $R = 38$  mm) with a uniform step of 0.076 mm (500 ions) (Fig. 1). This makes it possible to correlate the transverse coordinate of the ion's start with the recorded time of its exit from the funnel. Paraxial ions travel almost directly with minimal time, whereas edge ions move along the funnel wall, experiencing the braking effect of RF fields, while their path to the funnel's exit diaphragm is longer anyway. The dependences of the ion exit time on the transverse coordinate of the start, obtained as a result of the simulation, were linearly approximated, which allows us to determine the output characteristics of the ion pulses for different initial ion distributions in the funnel's inlet cross section. Assuming a uniform ion dis-

tribution over the cross section at the collecting funnel inlet, the number of ions per area of a transverse ring of constant width  $dr$  increases linearly with distance from the axis. Specifically, based on the linear approximation, each starting ring of width  $dr$  corresponds to an ion exit time of  $t + dt$ . The proportion of ions in a ring of radius  $r$  and width  $dr$  relative to the total number of ions in the cross section is equal to  $dN / N_0 = 2r dr / R^2$ , where  $N_0$  is the total number of ions in the entrance cross section. Thus, by taking this weight into account in the calculated exit distributions corresponding to the initial ion distribution along the funnel's entrance radius, it is possible to obtain a time profile of the exit ion pulse corresponding to the initial ion distribution in the funnel's entrance cross section.

#### ION PULSE CHARACTERISTICS AT THE OUTPUT OF THE COLLECTING ION FUNNEL

Figure 2 shows the calculated ion pulses recorded at the outlet of the collecting funnel for an initial distribution of ions of different masses: a) 74 u, б) 152 u, and в) 609 u, simultaneously starting along the funnel's entrance radius, and funnel convergence angles of 20°, 30°, and 48°.

**Fig. 2.** Calculated ion pulses recorded at the exit of funnel with convergence angles of 20°, 30°, and 48° for ions with masses of a) 74 u, б) 152 u, and в) 609 u.  
 $h / w$  is the ratio of the ring thickness to the distance between them

It can be seen that at larger convergence angles, the output ion pulse is significantly broader. This can be explained by the influence of the RF relief near the funnel wall, as in this case, the ions are more strongly pressed against the ends of the funnel plates by the pulling field. Furthermore, as shown in Fig. 3, at a fixed convergence angle, the exit pulse broadens with increasing ion mass.

**Fig. 3.** Output pulses of ions with masses of 74, 152, and 609 u at a convergence angle of the collecting funnel of 30° and various thicknesses  $h$  of the rings and distances  $w$  between them — 0.5 / 0.5 mm and 1 / 1 mm.

The calculated exit ion pulse profiles shown in Fig. 3 also demonstrate the influence of the funnel plate thickness  $h$  and the distance  $w$  between them on

the time profiles of the exit ion pulses. Comparing the output pulses of ions of the same mass at a collecting funnel convergence angle of 30°, it can be seen that with a ring thickness and distance between them of 0.5 / 0.5 mm, the output ion pulses are noticeably higher and have a smaller width at half-maximum relative to the pulses obtained with a funnel geometric parameter ratio of 1 / 1 mm. This can be explained by the fact that with an increase in the distance between the funnel electrodes, the RF relief in the immediate vicinity of the funnel wall becomes more pronounced, and the ions are temporarily trapped near the inter-electrode gaps. As a result, the output ion pulses become wider. It is also clear that with increasing ion mass, the differences between the output ion pulses decrease.

Figure 4 shows, using the example of a funnel convergence angle of 48° and an ion mass of 152 u, the statistical dependence of the ion exit time from the funnel on the starting serial number, which determines the position of the ion starting point along the radius with a step of  $dr = 0.076$  mm, as  $r_n = (n - 1)dr$ .

**Fig. 4.** Dependence of the time counts of ions leaving the funnel on their starting serial number (radius) and the corresponding linear approximation (for a funnel convergence angle of 48° and an ion mass of 152 u).

A linear approximation of this dependence and taking into account the initial ion distribution across the funnel's entrance cross-section allow us to determine the output characteristics of the ion pulses without time-consuming calculations. Figure 5 shows the output ion pulse profiles for different funnel convergence angles, assuming a uniform ion distribution across the transverse entrance cross-section of the focusing radiofrequency funnel. It can be seen that, for a ring thickness and spacing of 0.5 / 0.5 mm, the output ion pulse height significantly exceeds the pulse recorded for a ring thickness and spacing of 1 / 1 mm.

**Fig. 5.** Output profiles of ion pulses at funnel convergence angles of 30° ( $h / w$  — 0.5 / 0.5 and 1 / 1 mm) and 48° with a uniform initial distribution of ions (152 u) over the transverse input section of the focusing radiofrequency funnel.

#### CONCLUSION

This paper presents the results of modeling ion dynamics in a focusing ion funnel, which is an element of the mass spectrometer input interface and is de-

signed to collect and focus ions. It is assumed that a drift tube is located in front of the funnel, in which preliminary mobility separation occurs at a gas pressure of several Torr. Determining the funnel parameters to ensure minimal ion pulse broadening at the exit becomes important. The width of the exit ion pulses is characterized by the ion pulse broadening as the ions pass through the funnel, depending on its geometric parameters.

The obtained modeling results show that with increasing funnel convergence angle, the width of the

exit ion pulses increases. As the distance between the funnel plates increases while maintaining the convergence angle, the pulse emergence time increases, as does its width, since the more pronounced RF relief of the funnel walls more strongly slows ion drift. Meanwhile, the trailing edges of the pulses are somewhat delayed, since ions initially traveling along a larger radius travel a longer distance along the funnel wall with its RF relief.