

М. Турек<sup>1</sup>, Ю. А. Ваганов, Д. Мончка<sup>2</sup>,  
К. Пышняк<sup>1</sup>, А. Дроздзель<sup>1</sup>

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОНИЗАЦИИ  
В ИСТОЧНИКЕ ИОНОВ С ГОРЯЧЕЙ  
КОНУСООБРАЗНОЙ ПОЛОСТЬЮ**

---

<sup>1</sup> Институт физики Университета им. М. Кюри-Склодовской,  
Люблин, Польша

<sup>2</sup> Национальный центр ядерных исследований, Свек, Польша

Турек М. и др.

P13-2018-57

Моделирование процесса ионизации в источнике ионов  
с горячей конусообразной полостью

Представлена численная модель ионизации в горячей полости в форме усеченного конуса. Исследовано влияние геометрии полости, а именно высоты и радиуса верхнего основания, на эффективность ионизации. Установлено, что для ионизации стабильных изотопов больше подходят удлиненные полости, тогда как в случае ионизации короткоживущих изотопов предпочтительнее использовать укороченные полости. Определена зависимость эффективности ионизации от радиуса экстракционного отверстия и толщины стенки, в которой оно выполнено. Обсуждаются вольт-амперные характеристики, полученные для разных конфигураций полости.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзепелова ОИЯИ и в Институте физики УМКС (Люблин).

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2018

Turek M. et al.

P13-2018-57

Simulation of Ionization in the Ion Source  
with a Hot Cone-Shaped Hollow

A numerical model of ionization in the hot blunted cone-shaped hollow is presented. The influence of the hollow geometry, namely, the height and upper base radius, on the ionization efficiency was investigated. It is found that for the ionization of stable isotopes the elongated hollow is more appropriate, while for the ionization of short-lived isotopes it is preferable to use the shortened hollow. The dependence of the ionization efficiency on the extraction opening radius and wall thickness was determined. The current-voltage curves for different ion source configurations are discussed.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, and at the Institute of Physics, UMCS, Lublin.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Источники ионов с горячей полостью используются уже более сорока лет, прежде всего в исследованиях с целью получения новых короткоживущих изотопов отдельных элементов [1, 2]. К их многочисленным преимуществам следует отнести:

- высокую производительность и, как следствие, относительно небольшое количество рабочего вещества (образца, который подвергается ионизации);
- отличные характеристики ионного пучка, прежде всего его чистота и небольшой энергетический разброс;
- надежность конструкции.

Вышеупомянутые преимущества доказывают, почему источники этого типа (часто используется также ионизация лазером) постоянно привлекают внимание ученых, занятых в проектах типа ISOL (Isotope Separation On-line) [3–9], в рамках которых проводятся исследования в области ядерной спектроскопии, а также электромагнитного разделения изотопов и астрофизики. Главной частью источника ионов является ионизатор, выполненный обычно в виде полукрытой трубки из тугоплавких материалов (W, Ta и т. п.), хотя встречаются ионизаторы и в виде части сферы [10]. Ионизатор нагревается до высоких рабочих температур ( $\sim 2000$  К и выше) с использованием нагрева прямым током и интенсивных пучков электронов с энергией порядка 1 кэВ. Атомы, которые находятся внутри ионизатора, могут подвергаться поверхностной ионизации во время многократных столкновений с горячими стенками полости. Источник ионов такого типа способен работать как в режиме off-line, когда ионизируемое вещество получают перед началом ионизации и масс-сепарации, так и в режиме on-line, когда все эти процессы происходят одновременно. Последний режим особенно желателен для изотопов с очень коротким периодом полураспада. В таком случае облучаемая (например протонами) мишень находится или в непосредственной близости к ионизатору и связана с ним каналом [11], или соответственно подобранный ионизатор одновременно представляет собой облучаемую мишень, из которой исследуемые изотопы попадают непосредственно в полость [12].

В рассматриваемом источнике происходит ряд физических процессов, которые оказывают существенное влияние на получение ионных пучков. К основным из них следует отнести следующие:

- 1) ядерные реакции в мишени, вызванные ее облучением протонами или тяжелыми ионами;
- 2) диффузию образовавшихся нуклидов в пределах мишени;
- 3) эффузию внутри ионизатора (а также канала, если таковой имеется);
- 4) поверхностную ионизацию на горячих стенках полости, которая рассматривается как основной механизм ионизации;
- 5) дополнительные механизмы ионизации (ионизация в результате столкновений с электронами, ускоренными экстракционным полем, или вторичными электронами);
- 6) распад радиоактивных нуклидов;
- 7) нейтрализацию ионов, вызванную столкновениями со стенками, а также другими частицами;
- 8) ускорение ионов в поле экстракционного электрода и формирование пучка.

В цикле более ранних наших работ [13, 14] мы сосредоточились на описании источников с цилиндрической полостью, поочередно принимая во внимание такие процессы, как радиоактивный распад, задержки, связанные со временем пролета частиц до стенок полости [15], а также диффузии в мишени [16]. Принимался во внимание и дополнительный механизм образования ионов посредством ионизации в результате столкновений с электронами [17]. Чтобы избежать длительных экспериментальных тестов источника и оптимизировать параметры его работы, была разработана соответствующая модель для вычисления эффективности источников со сферической или полусферической полостью [18, 19].

В представленной статье описывается ионизация в горячей полости источника в форме усеченного конуса (рис. 1). Эту форму в зависимости от конфигурации можно трактовать как приближение к цилиндрической (очень удлиненный конус) или полусферической (конус с высотой, сравнимой с диаметром основания) полости. Возможность приближения полусферической полости к конусной с практической точки зрения очень существенна, поскольку материалы для изготовления ионизаторов ( $W$ ,  $Ta$ ,  $Mo$ ) достаточно трудны в механической обработке.

В статье представлены зависимости эффективности ионизации от геометрии полости источника, а именно от высоты и радиуса основания конуса. Показаны также вольт-амперные характеристики источника, определенные для полостей разного вида. Определена зависимость эффективности ионизации от диаметра экстракционного отверстия и толщины стенки ионизатора, в которой оно выполнено. Показано влияние радиоактивного распада на эффективность ионизации в горячей полости.

## ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Разработанная нами численная программа базируется на определении траектории пробных частиц, представляющих собой ионы и нейтральные атомы, с дальнейшим интегрированием численных классических уравнений движения с использованием метода Рунге–Кутты четвертого порядка. Разрез полости в виде усеченного конуса высотой  $h$ , радиусами нижнего основания  $R$  и верхнего  $r$  показан на рис. 1. Представленный там плоский электрод под потенциалом  $V_{\text{ext}}$  находится на расстоянии  $d$  от стенки толщиной  $x$ , представляющей нижнее основание конуса полости ионизатора. В той стенке находится экстракционное отверстие радиусом  $r_{\text{ext}}$ .

Пространство, охватывающее полость и экстракционный электрод, было покрыто прямоугольной численной сеткой ( $800 \times 100 \times 100$  узлов) с размером ячейки  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,05$  мм. Распределение электростатического потенциала рассчитывалось по уравнению Лапласа с граничными условиями, определяемыми полостью и экстракционным электродом. Это уравнение, преобразованное к дифференциальному виду, решается итерационным методом последовательной верхней релаксации (SOR) подобно тому, как это было выполнено в наших ранних работах [20, 21]. Величина напряженности электрического поля в узлах сетки вычисляется с применением численного дифференцирования потенциала, а силы, действующие на отдельные частицы, определяются с использованием линейной интерполяции величины электрического поля в узлах сетки, численно ближайших к положению частиц. Начальные скорости частиц, покидающих поверхность полости, соответствуют температуре  $T$  его стенок, а направления вектора скорости являются случай-

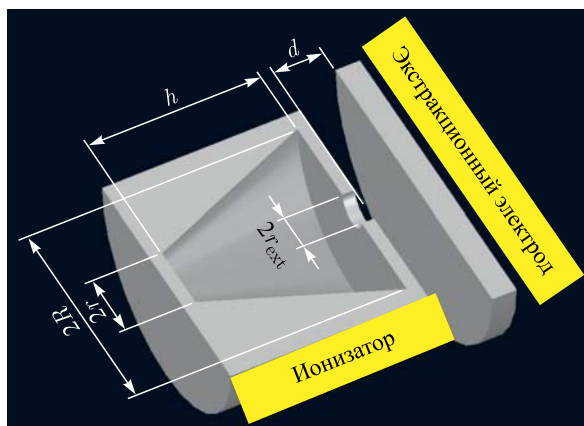


Рис. 1. Разрез полости ионизатора, объясняющий геометрию моделируемого устройства

ными, т. е. имеют в основе равномерное распределение вероятностей. Столкновения молекул между собой данная модель не учитывает.

Степень ионизации, определяемая отношением числа ионов к числу нейтральных атомов, которые отрываются от горячей поверхности, может быть рассчитана по уравнению Саха–Ленгмюра:

$$\alpha = G \exp(-(V_i - \phi_e)/kT), \quad (1)$$

где  $V_i$  — потенциал ионизации атома;  $\phi_e$  — работа выхода материала ионизатора;  $G$  — коэффициент, зависящий от состояния поверхности ионизатора и веса квантовых состояний иона и нейтрального атома.

На практике, однако, удобнее пользоваться вероятностью ионизации атома в процессе столкновения с горячей стенкой полости, которая связана со степенью ионизации следующим образом:

$$\beta = \alpha/(1 + \alpha). \quad (2)$$

Разработанная нами численная модель может также учитывать фактор распада радиоактивного ионизированного нуклида. Величина времени  $t_{\text{dec}}$ , за которое распадается атом, рассчитывается по формуле

$$t_{\text{dec}} = -\tau_{1/2} \ln RND, \quad (3)$$

где  $RND$  — псевдослучайное число из интервала  $(0, 1)$ ;  $\tau_{1/2}$  — период полураспада исходного нуклида. Тут следует подчеркнуть, что время пребывания атома в полости — это не только общее время движения между отдельными столкновениями до выхода из источника, но также время, которое атом проводит на горячей поверхности ионизатора.

Численная программа отслеживает траекторию частиц до прохождения через экстракционное отверстие. Эффективность ионизации рассчитывается как отношение числа ионов к числу всех частиц (ионов и атомов), покидающих полость:

$$\beta_s = \frac{N_+}{N_+ + N_0}. \quad (4)$$

С учетом потерь производительности, связанных с распадом исходных нуклидов, эффективность ионизации в источнике рассчитывается с помощью формулы

$$\beta_s = \frac{N_{p+}}{N_{p+} + N_{s+} + N_{p0} + N_{s0}}, \quad (5)$$

где  $N_p$  и  $N_s$  — число ионов первичного и вторичного нуклидов, а  $N_{p0}$  и  $N_{s0}$  — число нейтральных атомов обоих нуклидов, которые проходят через экстракционное отверстие полости ионизатора.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Одной из целей проводимых исследований было определение влияния геометрии полости на эффективность ионизации  $\beta_s$ . В первую очередь проследили изменения эффективности ионизации в зависимости от высоты полости  $h$ , величина которой изменялась от 2,5 до 40 мм. Радиусы оснований (верхнего  $R$  и нижнего  $r$ ) составляли, соответственно, 2,3 и 0,2 мм. Вычисления проведены для экстракционного напряжения  $V_{\text{ext}} = 2$  кВ, при этом экстракционный электрод был помещен на расстоянии  $d = 2$  мм от экстракционного отверстия ионизатора с  $r_{\text{ext}} = 0,5$  мм (если не указано иное). Моделирование выполнено с использованием 50 000 пробных частиц с массой 150 а.е.м. Шаг времени составлял  $10^{-8}$  с. Это обеспечивало то, что дистанция, которую пробегает частица в процессе одного шага моделирования, была существенно меньше размера клетки. Результаты вычислений  $\beta_s$  для разных величин  $\beta$  представлены на рис. 2.

Эффективность процесса ионизации возрастает почти вдвое с ростом  $h$ , при этом эта тенденция является наиболее заметной для  $h$  меньше 10 мм. Этот рост тем заметнее, чем меньше величина коэффициента  $\beta$ . При этом стоит вспомнить, что в данном случае эффективность ионизации в горячей полости значительно выше (примерно в 10–20 раз), чем рассчитанная по уравнению Саха–Ленгмюра. То, что эффективность ионизации растет с увеличением длины полости, можно объяснить ростом числа столкновений с ее стенками (и, как следствие, увеличением вероятности ионизации), которые претерпевает частица на своем пути к экстракционному отверстию.

Была также исследована зависимость эффективности ионизации от величины радиуса верхнего основания  $r$  конуса полости в диапазоне 0,2–2 мм, при этом радиус нижнего основания  $R$  оставался постоянным и равным 2,3 мм. Результаты вычислений для разных величин  $\beta$  показаны на рис. 3. Надо от-

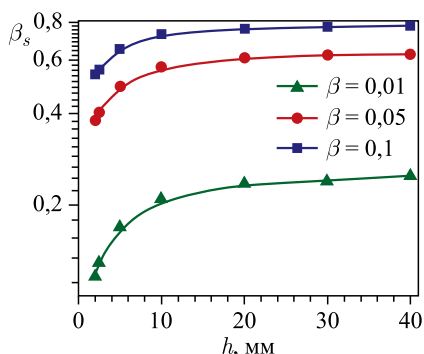


Рис. 2. Зависимость эффективности процесса ионизации в горячей полости от ее высоты  $h$

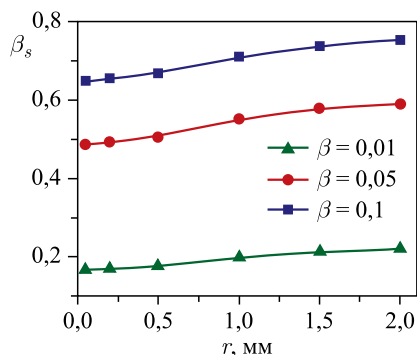


Рис. 3. Зависимость эффективности процесса ионизации в полости от радиуса ее верхнего основания

метить, что эффективность ионизации примерно на 20% выше для  $r = 2$  мм по сравнению с полостью, имеющей больший угол. Этот эффект можно объяснить тем, что частицы, блуждающие в полости с большим  $r$ , испытывают большее число столкновений со стенками, так же как и в случае практически сферической полости [18, 19], которая с хорошим приближением описывает полость с большим  $r$ .

Проследили также влияние экстракционного напряжения на получаемые величины силы тока в полостях разного вида, как удлиненной ( $h = 30$  мм), так и укороченной ( $h = 5$  мм), при радиусах  $r = 0,2$  мм и  $R = 2,3$  мм. Результаты для двух разных величин  $\beta$  показаны на рис. 4, а.

Отмечен резкий рост эффективности ионизации с ростом экстракционного напряжения  $V_{ext}$  до относительно небольших величин (порядка 1 кВ). Выше этих величин динамика роста уменьшается, а для больших  $\beta$  мы наблюдаем насыщение вольт-амперных характеристик. Стоит заметить, что более длинный ионизатор требует более высокого  $V_{ext}$  для достижения состояния, в котором почти каждый ион извлекается вскоре после его образования [13, 14].

На рис. 4, б показана зависимость эффективности ионизации от величины радиуса экстракционного отверстия. Для обеих конфигураций ниши оптимальный  $r_{ext}$  до 0,5–0,6 мм, при этом большее отверстие выбрано в случае удлиненной полости. Зависимость эффективности ионизации от длины экстракционного канала показана на рис. 5. Видно, что  $\beta_s$  значительно уменьшается с ростом  $x$  (вдвое при росте  $x$  от 0,2 до 0,5 мм). Эта тенденция тем заметнее, чем меньше величина  $\beta$ . Увеличение длины экстракционного канала оказывает более негативное влияние на эффективность ионизации в полостях с большим  $h$  из-за более слабого проникновения электрического поля внутрь полости.

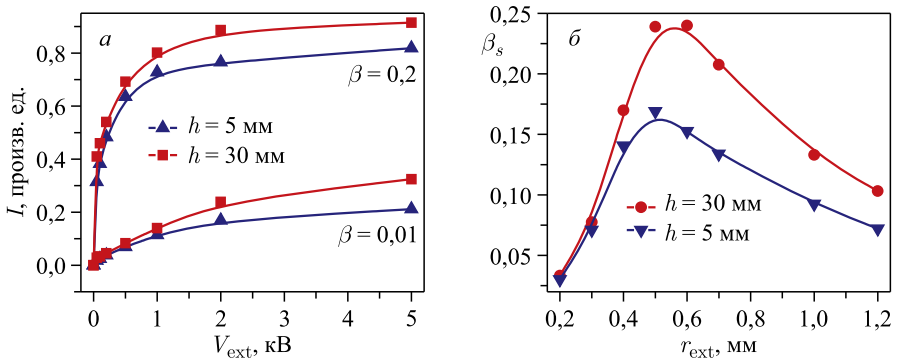


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики для двух разных конфигураций полости (а), а также зависимость эффективности ионизации от радиуса экстракционного отверстия (б)



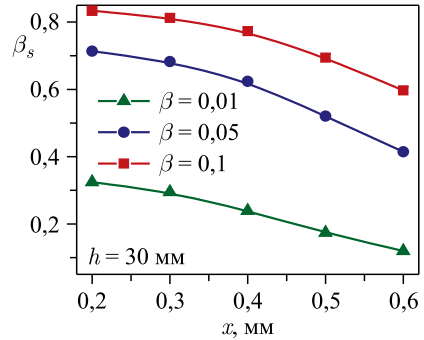
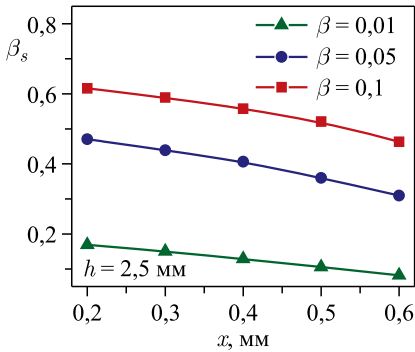


Рис. 5. Зависимость эффективности ионизации от толщины стенки, в которой выполнено экстракционное отверстие

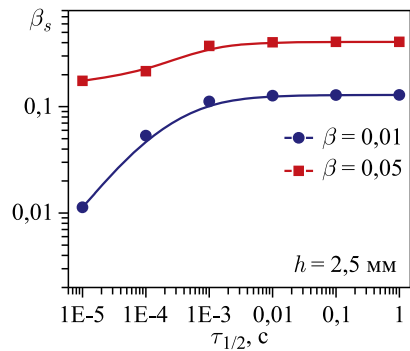
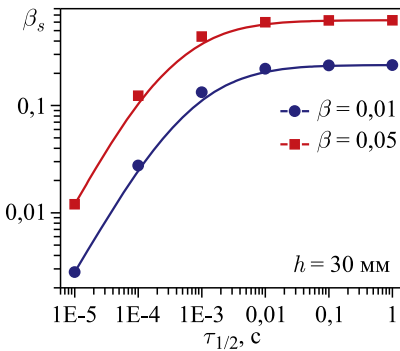


Рис. 6. Зависимость эффективности ионизации от периода полураспада для разных конфигураций полости

Представленные данные получены в результате ионизации атомов стабильных изотопов. Как было упомянуто ранее, модель может учитывать потери, вызванные радиоактивным распадом. На рис. 6 представлено влияние величины периода полураспада на эффективность ионизации в полостях разных конфигураций, при этом не учитываются задержки, связанные с прилипанием частиц к стенкам полости.

Видно, что эффективность ионизации резко уменьшается для  $\tau_{1/2}$  меньше 1 мс. Это происходит потому, что среднее время пребывания частиц в полости составляет порядка 1 мс, и чем  $\tau_{1/2}$  короче этого времени, тем существеннее становится влияние потерь, вызванных радиоактивным распадом. Стоит обратить внимание на то, что в случае очень коротких периодов полураспада полость компактного вида характеризуется примерно в десять раз более высокой эффективностью, чем ниша с  $h = 30 \text{ мм}$ . Это связано с тем, что среднее время пребывания частиц в короткой полости часто на несколько десятков процентов меньше, чем в длинной полости.

## ВЫВОДЫ

В данной статье предложена численная модель работы источника, в которой учитываются процессы ионизации в конусообразной горячей полости. Проведенные вычисления зависимости эффективности ионизации от вида полости указывают на то, что в случае стабильных изотопов наиболее эффективны удлиненные полости, приближенные к цилиндрическому виду. В случае изотопов с очень коротким периодом полураспада преимущество на стороне более коротких полостей, так как в этом случае среднее время пребывания частиц в полости на несколько десятков процентов меньше. Установлено, что оптимальный радиус экстракционного отверстия составляет 0,5 мм, в то время как увеличение длины экстракционного канала отрицательно влияет на эффективность ионизации для любой конфигурации полости. Ход вольт-амперных характеристик означает, что напряжения порядка 2 кВ достаточно для достижения высокой эффективности ионизации, при этом для источника с удлиненной полостью требуется более высокое напряжение, чем для конструкции с укороченной полостью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Beyer G. J. et al. // Nucl. Instr. Meth. 1971. V. 96. P. 437.*
2. *Ravn H. L., Sundell S., Westgaard L. // Nucl. Instr. Meth. 1975. V. 123. P. 131.*
3. *Alton G. D., Liu Y., Stracener D. W. // Rev. Sci. Instr. 2006. V. 77. P. 03A711.*
4. *Shmor P. W. // Rev. Sci. Instr. 2002. V. 73. P. 707.*
5. *de Angelis G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2015. V. 580. P. 012014.*
6. *Liu Y. et al. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2015. V. 48. P. 115006.*
7. *Fink D. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2015. V. 344. P. 83.*
8. *Liu Y. // Hyperfine Interactions. 2014. V. 227. P. 85.*
9. *Reponen M. et al. // Eur. Phys. J. A. 2009. V. 42. P. 509.*
10. *Hausladen P. A. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2002. V. 190. P. 402.*
11. *Osa A. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 2008. V. 266. P. 4394.*
12. *Kalinnikov V. G. et al. // Nucl. Instr. Meth. B. 1992. V. 70. P. 62.*
13. *Turek M. et al. // Vacuum. 2008. V. 82. P. 1103.*
14. *Turek M. et al. // Rev. Sci. Instr. 2012. V. 83. P. 023303.*
15. *Turek M. // Acta Phys. Pol. A. 2013. V. 123. P. 847.*
16. *Turek M. // Vacuum. 2014. V. 104. P. 1.*
17. *Turek M., Pysznik K., Drozdziel A. // Vacuum. 2009. V. 83. P. S260.*
18. *Turek M. // Acta Phys. Pol. A. 2011. V. 120. P. 188.*
19. *Turek M. // Acta Phys. Pol. A. 2015. V. 128. P. 935.*
20. *Turek M. et al. // Vacuum. 2005. V. 78. P. 649.*
21. *Turek M. et al. // AIP Conf. Proc. 2006. V. 812. P. 153.*

Получено 31 октября 2018 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.11.2018.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,73. Тираж 215 экз. Заказ № 59557.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)