

УДК 621.384.8

© П. А. Куприй, М. З. Мурадымов, Н. В. Краснов, И. В. Курнин, А. Н. Арсеньев, 2020

## ВЛИЯНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ НА ТРАНСПОРТИРОВКУ ИОНОВ ЧЕРЕЗ СОПЛО ИСТОЧНИКА ИОНОВ С ИОНИЗАЦИЕЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Экспериментально определен вклад газового потока в транспортировку ионного тока из атмосферы в ближнюю к соплу форвакуумную область интерфейса. Получены экспериментальные вольт-амперные характеристики ионного потока, увлекаемого газодинамическим течением за сопло. Показано, что доля ионного тока, проходящего за сопло под воздействием газового потока, может быть увеличена в несколько раз по отношению к величине тока, обусловленной только экстракцией электрическим полем. Проведено моделирование процесса движения ионов в газе для условий, близких к экспериментальным.

*Кл. сл.:* источник ионов, газодинамическое течение, сопло, транспортировка ионов при высоком давлении газа

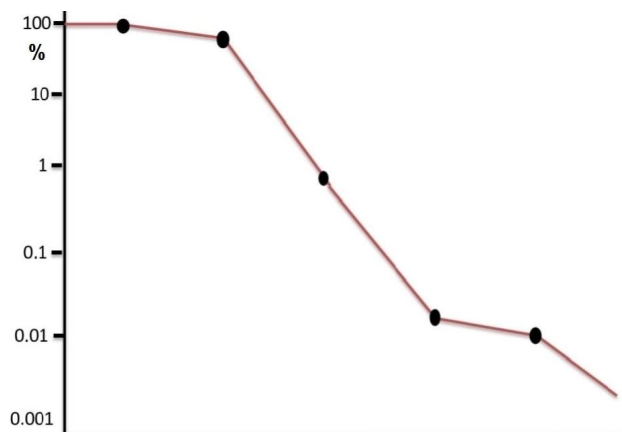
### ВВЕДЕНИЕ

Источники ионов с ионизацией при атмосферном давлении для различных способов ионообразования широко используются в масс-спектрометрии. Продолжается их совершенствование с целью увеличения пропускания ионного тока через систему транспортировки, связывающую область атмосферного давления и высокого вакуума масс-анализатора, что приведет к увеличению чувствительности масс-спектрометрических систем. В настоящий момент основное внимание уделяется транспортировке ионного потока в области форвакуумного давления, при этом применяются различные системы, состоящие из нескольких ступеней откачки [1]. Основные потери ионного пучка происходят при переходе из области с атмосферным давлением через диафрагму (сопло) в форвакуумную область интерфейса и составляют до 2–3 порядков от суммарного тока источника ионов. Качественная зависимость потерь ионного тока в таких системах представлена на рис. 1 [2].

Проблема транспортировки ионного потока в источниках с ионизацией при атмосферном давлении изучалась в работах [3–7] как теоретически, так и экспериментально. За основу были приняты существующие конструкции интерфейсов: аксиальный (сопло – скиммер) [8], с изогнутым Z-каналом и скиммером [5, 6]. В работе [6] проведена оптимизация существующей системы сопло – скиммер введением диафрагмы перед скиммером для фокусировки ионного потока. Использование интерфейса [8]

имеет существенный недостаток — электрическое поле от диафрагмы, расположенной за скиммером, не проникает далеко во внутренний конус скиммера, при этом, в соответствии с экспериментальной работой [9], в отсутствие электрического поля средняя скорость движения ионов в струе равна скорости газового потока при небольшой разряженности газа в струе, дугими словами, ионы вморожены в газ и движутся под воздействием газодинамического поля.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния электрического



источник сопло проводник ступень 1 ступень 2 анализатор

**Рис. 1.** График потерь (в %) ионов при транспортировке от источника в анализатор [2]

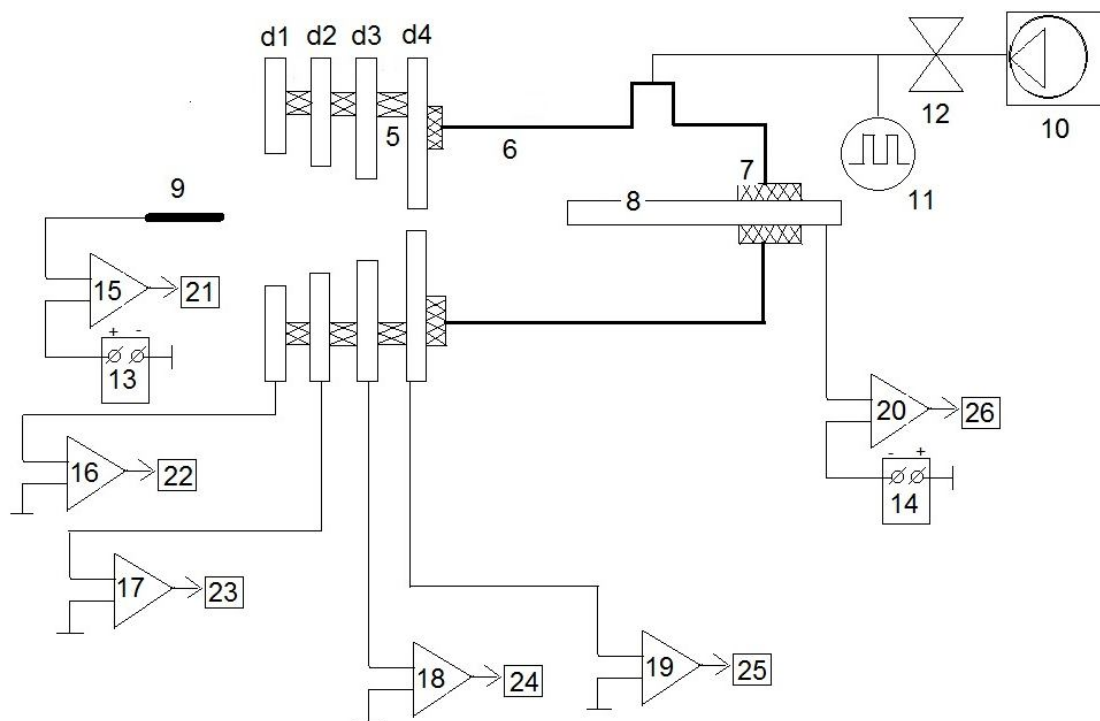
поля на прохождение газового потока, содержащего ионную компоненту, через окрестности входа в сопло при атмосферном давлении и сразу же за выходом сопла в интерфейсе при фиксированном давлении фонового газа. А также проведение численного моделирования динамики ионов с учетом газодинамического потока при условиях эксперимента.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для экспериментального сравнения величины ионных токов, проходящих через входную диафрагму (сопло) в интерфейс анализатора в режиме покоящегося газа под воздействием электрического поля и в режиме газодинамического течения и электрического поля через сопло первой ступени дифференциальной откачки интерфейса источника ионов с ионизацией при атмосферном давлении при нормальных условиях, была создана простая по конструкции и малогабаритная экспериментальная установка. На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки — располо-

жение электродов и их питания.

Аналитическая часть экспериментальной установки содержит квазиплоский концентрический кольцевой электрод, являющийся противоэлектродом для зажигания коронного разряда, состоящий в свою очередь из диафрагм, толщина которых составляет 0.1 мм. Диаметр отверстия в первой диафрагме ( $d_1$ ) составляет 4 мм, второй ( $d_2$ ) — 2.5 мм, третьей ( $d_3$ ) — 1.2 мм, четвертой ( $d_4$ ) — 0.5 мм, выполняющей роль сопла в интерфейсе. Все диафрагмы изолированы друг от друга фторопластовыми прокладками (5) толщиной 0.1 мм. Диафрагма ( $d_4$ ) вакуумно плотно и электрически изолированно присоединена к вакуумной камере (6), внутри которой находится перемещаемый при помощи вильсоновского уплотнения (7) коллектор (8) — стержень диаметром 1.5 мм. Перемещение коллектора в вакуумной камере осуществлялось при помощи вильсоновского уплотнения. Напротив квазиплоского концентрического коллектора располагается острие (игла) (9), в качестве эмитирующей поверхности с положительным коронным разрядом.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки.

$d_1$ – $d_4$  — диафрагмы; 5 — фторопластовые прокладки; 6 — вакуумная камера; 7 — вильсоновское уплотнение; 8 — коллектор (стержень); 9 — эмиттер (игла); 10 — форвакуумный насос; 11 — датчик вакуумного давления; 12 — вентиль; 13, 14 — высокостабильные блоки питания; 15–20 — электрометры; 21–26 — цифровые измерители токов

Получение вакуума в камере (6) осуществлялось при помощи механического форвакуумного насоса (10) DS402 фирмы Agilent. Контроль за вакуумом осуществлялся при помощи датчика форвакуумного давления (11) ConvecTorr фирмы Agilent и регулятора потока (12) — вентиля с плавной ручной регулировкой. В камере поддерживалось форвакуумное давление на уровне 8 Торр.

Электронная часть экспериментальной установки состоит из высоковольтных управляемых высокостабильных блоков питания фирмы Applied Kilovolts HP015PAA025 (+15 кВ) — (13), подающего напряжение на коронирующее острие, и HP001NAA025 (–1кВ) — (14), подающего напряжение на перемещаемый коллектор. Каждый из электродов аналитической части установки был последовательно подключен к своему электрометру (15–20) с диапазоном измерения от  $10^{-6}$  А/В до  $10^{-8}$  А/В и цифровому измерителю токов (21–26) Digital Multimeter. Электроды экспериментальной установки имели независимое питание по высокому напряжению и возможность измерения протекающих через них токов. Диафрагмы (d1–d4) находятся под нулевым потенциалом, замыкает систему диафрагм перемещаемый коллектор (8), на который может подаваться отрицательное напряжение. Питание высоковольтных источников осуществлялось от импульсного блока питания Mean Well S-240-24, подключенного к сети ~ 220 В, потребляемая мощность до 240 Вт, с выходным напряжением 24 В и током нагрузки до 10 А с защитой от перегрузок, короткого замыкания и выбросов питающего напряжения. При помощи персонального компьютера осуществлялась калибровка высоковольтных источников с использованием программы Bus Builder, а программа MSC TOF Software обеспечивала управление высоковольтными блоками. Управляющий сигнал от ПК поступал через преобразователь USB-I<sup>2</sup>C на адаптер шины, связанный с соответствующими портами плат управления высоковольтными источниками. Так же через адаптер шины поступало питание 24 В на высоковольтные блоки.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование влияния газодинамического течения на транспортировку ионов через сопло в источниках ионов с ионизацией при атмосферном давлении проводилось в два этапа.

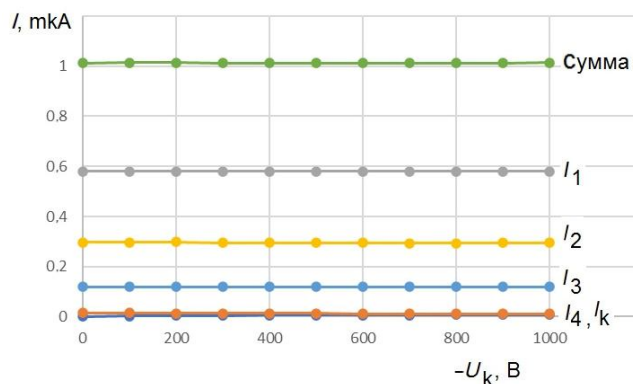
**Первый этап:** проверка работоспособности экспериментальной установки, калибровка систем управления, питания и регистрации. Использование в качестве источника ионов коронного разряда и транспортировка ионов в покоящемся газе —

лабораторном воздухе при нормальных условиях, в том числе и в камере. При этом передвижной коллектор располагался неподвижно за диафрагмой (d4) на расстоянии 0.1 мм и был электрически изолирован. Таким образом, получили квазиплоский концентрический кольцевой коллектор. В ходе экспериментов положительный коронный разряд на игле изменялся в диапазоне от 1 мкА до 2 мкА, расстояние от иглы до первой диафрагмы изменялось в диапазоне от 3 мм до 7 мм, а напряжение на коллекторе от 0 до –1 кВ. В ходе всех измерений контролировалась сумма токов поступающих на электроды квазиплоского концентрического коллектора, которая должна была равняться току коронного разряда в эксперименте. Различие значений не превышало 6 %.

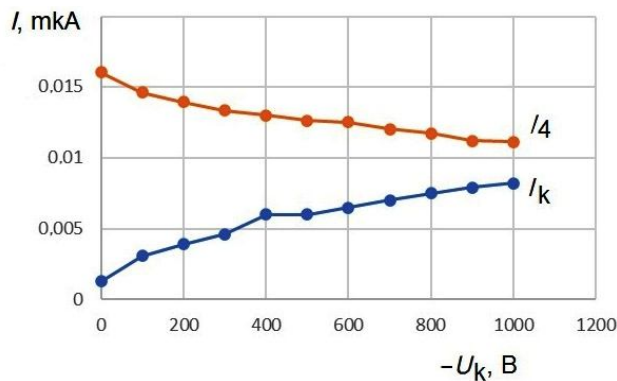
Распределение тока заряженных частиц коронного разряда между электродами (d1–d4), (8) квазиплоского концентрического кольцевого коллектора изучалось при величинах токов порядка 1.5, 2 мкА соответственно, а вольт-амперная характеристика снималась в зависимости от напряжения, подаваемого на коллектор (8). Точная установка величины тока разряда не требовалась, т.к. транспортировка ионов изучалась на качественном уровне для понимания величины эффекта. Система игла – противозлектрод в виде квазиплоского коллектора позволила в описываемых экспериментах получить независимый, относительно стабильный источник заряженных частиц при атмосферном давлении. Напряжения, подаваемые на коллектор (8), не влияли на величину тока коронного разряда.

На рис. 3 представлены типичные зависимости токов, поступающих на электроды квазиплоского концентрического кольцевого коллектора.

Вид зависимостей одинаков для всех значений тока коронного разряда с учетом суммы



**Рис. 3.** Зависимость токов на диафрагмах  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , коллекторе  $I_k$  и их суммы от напряжения на коллекторе  $U_k$  при расстоянии от иглы до первой диафрагмы 5 мм и токе разряда 1 мкА



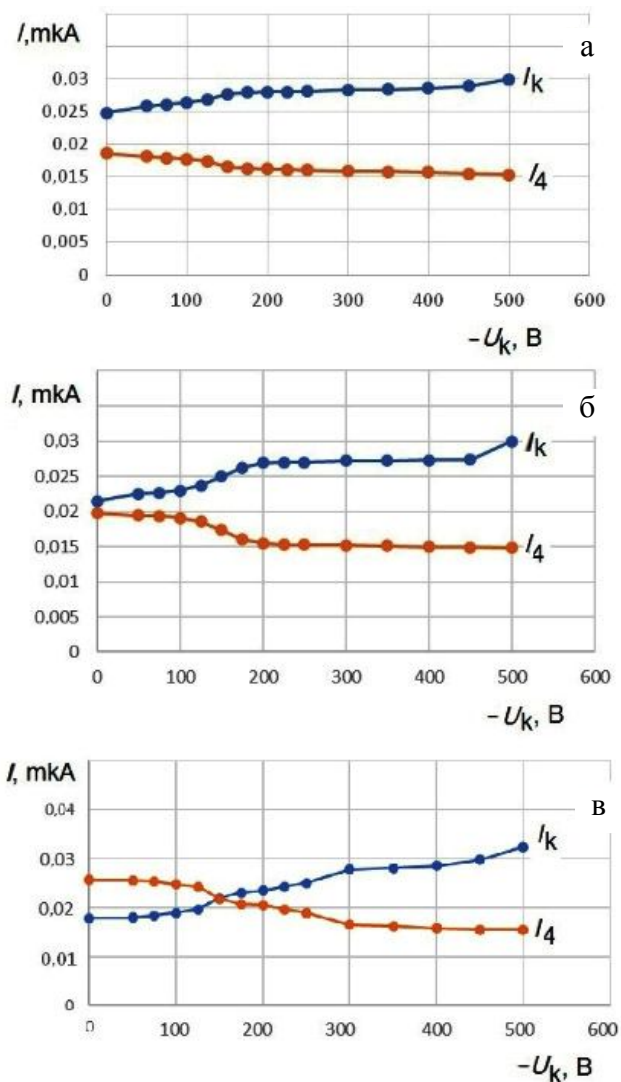
**Рис. 4.** Зависимость токов на четвертой диафрагме  $I_4$  и коллекторе  $I_k$  от напряжения на коллекторе  $U_k$  при расстоянии от иглы до первой диафрагмы 5 мм и токе разряда 1 мкА

всех токов, приходящих на электроды (d1–d4), (8), соответствующей величине тока разряда. Напряжение, подаваемое на коллектор (8)  $U_k$ , не влияет на величину токов, поступающих на электроды (d1–d3) во всем диапазоне изменения напряжения на коллекторе.

На рис. 4 представлено, в увеличенном масштабе, перераспределение токов между электродом (d4) — соплом — и коллектором (8) в зависимости от  $U_k$  в покое газе при токе разряда 1 мкА. Аналогичная зависимость и для случая, когда величина коронного разряда составляет 1.5 мкА.

При максимальном напряжении на коллекторе  $U_k = -1$  кВ ток на коллекторе составляет порядка  $10^{-8}$  А при токе коронного разряда 1–2 мкА. Из рис. 4 видно, что при помощи увеличения напряжения на коллекторе ток, регистрируемый на нем, может увеличиться примерно в 10 раз.

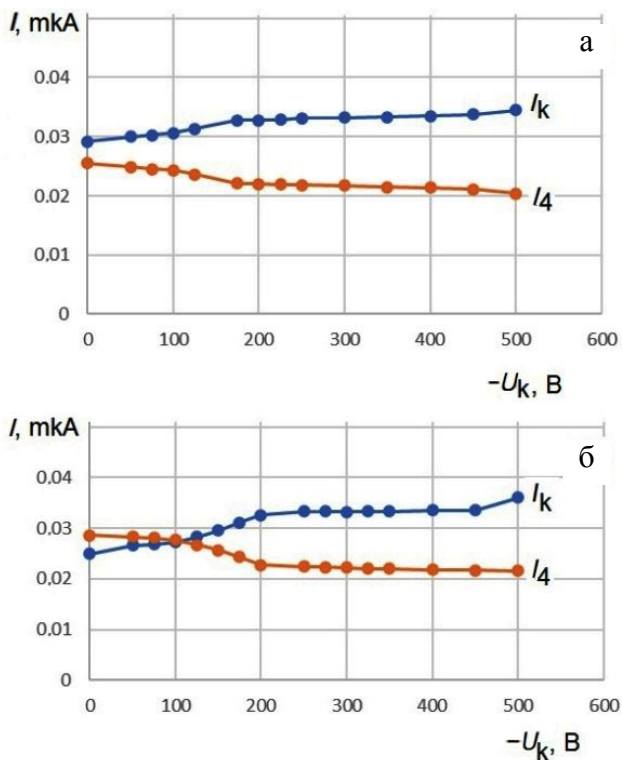
**Второй этап:** исследование влияния газодинамического течения на транспортировку ионов через сопло (электрод d4) в область форвакуумного давления за соплом проводилось для положений перемещаемого коллектора  $L = 5, 10, 15$  мм от сопла и токов разряда 1 и 2 мкА для каждого положения коллектора. Распределения токов по электродам квазиплоского концентрического кольцевого коллектора измерены в зависимости от напряжения, подаваемого на передвижной коллектор. В масштабе рис. 2 полученные распределения для газодинамического течения аналогичны зависимостям для покоящегося газа, при этом баланс токов сохраняется в представленном масштабе. Более информативно перераспределение токов между электродом (d4, соплом) — ( $I_4$ ) и коллектором (8) ( $I_k$ ) в зависимости от напряжения на коллекторе (8) представлено в увеличенном масштабе



**Рис. 5.** Зависимости токов на сопле (четвертой диафрагме)  $I_4$  и коллекторе  $I_k$  от напряжения на коллекторе  $U_k$  при токе разряда 1 мкА и расстоянии от сопла до коллектора (а) 5 мм, (б) 10 мм, (в) 15 мм

на рис. 5, 6. При этом сумма токов, приходящих на сопло ( $I_4$ ) и коллектор ( $I_k$ ), для всех условий конкретного эксперимента оставалась практически постоянной.

Из представленных зависимостей видно влияние расстояния между соплом и коллектором, другими словами, напряженности электрического поля в каждой конкретной точке и влияние величины ионного тока, поступающего в область форвакуумного давления между соплом и коллектором. При расстоянии  $L = 5$  мм и токах разряда 1 мкА и 2 мкА зависимости на рис. 5, а, и 6, а, качественно не отличаются. На расстоянии  $L = 10$  при тех



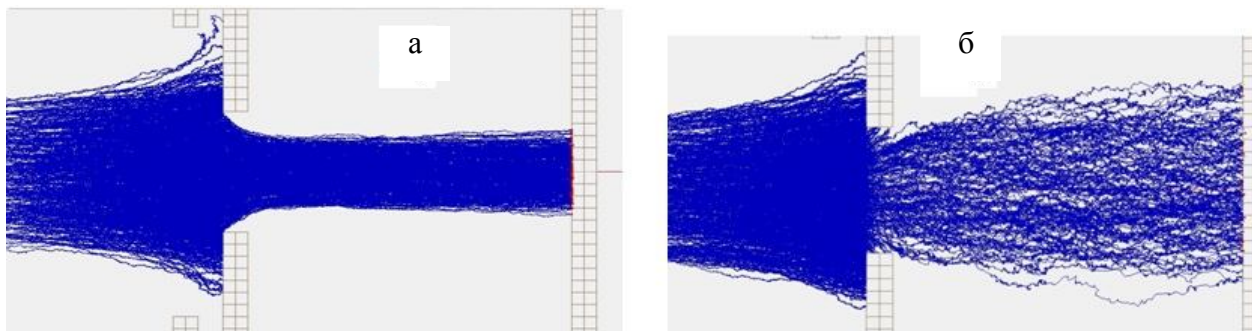
**Рис. 6.** Зависимости токов на сопле (четвертой диафрагме)  $I_4$  и коллекторе  $I_k$  от напряжения на коллекторе  $U_k$  при токе разряда 2 мкА и расстоянии от сопла до коллектора (а) 5 мм, (б) 10 мм

же токах разряда перераспределения токов, приходящих на сопло и коллектор, на рис. 5, б, и 6, б, имеют качественно другой характер на начальном участке зависимостей. При  $U_k$  более 200 В дальнейшее перераспределение токов не происходит и практически зависимости выходят на плато. Исходя из условий эксперимента, следует, что при напряженности электрического поля в промежутке между соплом и коллектором, равной  $E = 200$  В/см,

происходит полный отбор тока, прошедшего через сопло на коллектор диаметром 1.5 мм, что можно принять за диаметр потока. Таким образом, формируется ионный поток по оси системы диаметром 1.5 мм и током  $\sim 10^{-8}$  А. Дальнейшая задача системы транспортировки ионного потока в форвакууме — не увеличить диаметр ионного потока и не потерять ионы на рассеянии в градиенте давления в интерфейсе. Исходя из зависимостей, представленных на рис. 5 и 6, можно отметить, что при нулевом напряжении на коллекторе регистрируется до 70 % от максимального значения тока коллектора, при этом ток на сопло составляет  $\sim 140$  % от тока, поступающего на сопло при максимальном напряжении на коллекторе, т.е. идет перераспределение — разнонаправленные изменения. Сравнивая значения токов на коллекторе при нулевых напряжениях на нем, но в покоящемся газе или в газовой струе, следует отметить увеличение потока ионов с использованием струи в десятки раз в зависимости от условий эксперимента (токи коронного разряда, расстояния от сопла до коллектора, напряжения, подаваемые на коллектор). Изменения напряжения на коллекторе позволяют получить слабоизменяющуюся зависимость тока — практически постоянную величину, которая может составлять порядка  $10^{-8}$  А. Сочетание газодинамического течения и вытягивание электрическим полем ионного потока позволяет получить на коллекторе максимальный ионный ток не менее чем в три раза больше по сравнению с покоящимся газом при атмосферном давлении, что видно из рис. 4, а, и 5, а.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ИОНОВ В ГАЗЕ

Моделирование движения ионов в газе в условиях, соответствующих экспериментальным, проводилось с помощью программы SIMION [10] с использованием статистической диффузионной



**Рис. 7.** Характерные траектории ионов в области выходной диафрагмы. а — при атмосферном давлении и потенциале на коллекторе  $-300$  В, б — при нулевом потенциале на коллекторе с учетом скорости истечения газового потока (давление воздуха за диафрагмой 8 Торр)

модели SDS [11], которая учитывает диффузию иона в плотном газе и на основании коэффициента подвижности — его движение в электрическом поле. Расчет большого числа реальных столкновений заменяется в этой модели данными статистических распределений, связывающих перемещение иона за единицу времени с числом столкновений. В данном случае использовался модифицированный вариант SDS-модели, в которой новое представление времени между столкновениями иона с частицами газа точно соответствует поляризованному механизму взаимодействия в слабых полях и при этом определяет зависимость коэффициента подвижности от скорости иона в сильных электрических полях, что позволяет корректно описывать движение иона в плотном газе при наличии таких полей [12]. Также при моделировании динамики ионов в плотном газе и сильных электрических полях использовалась и универсальная модель, описанная в [13].

На рис. 7, а, показаны характерные траектории ионов в газе при атмосферном давлении для потенциалов на коллекторе  $-300$  В. Потенциал иглы, находящейся на расстоянии 5 мм от первой диафрагмы, равен 4 кВ. При нулевом потенциале коллектора и заземленных диафрагмах  $d1-d4$  почти все ионы теряются на диафрагмах, а при понижении потенциала коллектора ионы, находящиеся в окрестности выходного отверстия (диаметр 0.5 мм) последней диафрагмы ( $d4$ , сопла), начинают вытягиваться полем в сторону коллектора (рис. 7, а).

При откачке камеры за соплом до форвакуумного давления в 8 Торр формируется исходящий газодинамический поток. Результаты газодинамических расчетов, отвечающие экспериментальным условиям, дают среднюю скорость газового потока за соплом равной 370 м/с, — рис. 8, а. Характерные ионные траектории при нулевом потенциале коллектора с учетом исходящего газового потока показаны на рис. 7, б. При понижении потенциала коллектора ионы, помимо воздействия

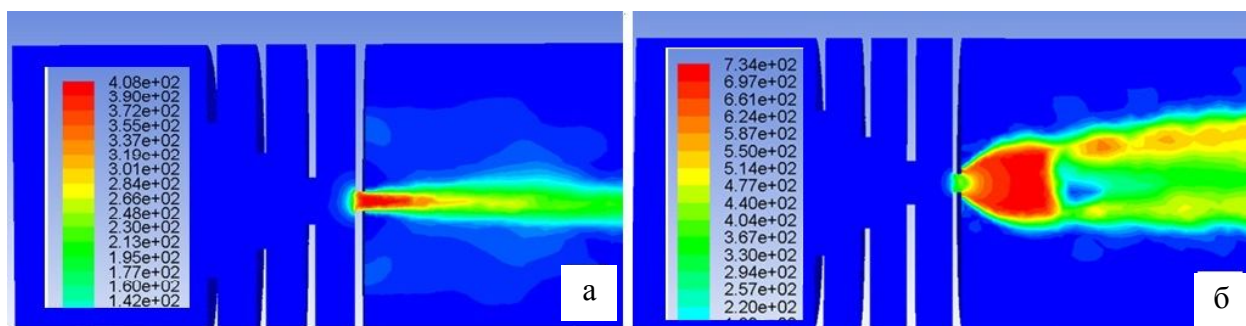


Рис. 8. Пространственное распределение скорости газового потока в системе транспортировки ионов при давлении в камере справа (а) 8 Торр и (б) 2 Торр. Диаметр отверстия диафрагмы 0.5 мм

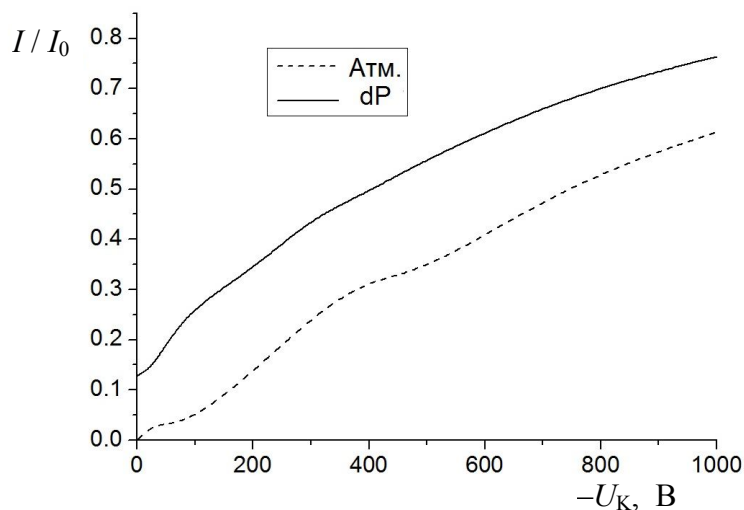


Рис. 9. Нормированные зависимости величины тока на коллекторе от его потенциала. Обозначены: система транспортировки при атмосферном давлении (Атм), при откачке области за последней диафрагмой до давления 8 Торр (dP)

вытягивающего электростатического поля, дополнительно увлекаются газовым потоком и эффективно выносятся на коллектор. На рис. 9 приведены нормированные зависимости величины тока на коллекторе от его потенциала  $U_k$  для покоящегося газа (воздуха) при атмосферном давлении и в случае откачки воздуха из камеры за соплом (за 4-й диафрагмой) и образования выходного газодинамического потока. Из приведенных зависимостей виден существенный вклад газодинамического течения на величину тока, поступающего на коллектор за соплом, что согласуется с экспериментальными данными.

Для определения влияния структуры газодинамической струи за соплом были проведены два модельных эксперимента при форвакуумном давлении 8 Торр и 2 Торр — рис. 8, а, и 8, б. При давлении в форвакуумной области 8 Торр струя имеет сечение, сравнимое с диаметром отверстия сопла на расстояниях не менее 15–20 мм, что хорошо согласуется с полным отбором тока на коллектор диаметром 1.5 мм в эксперименте. При давлении в форвакуумной области 2 Торр сечение струи в несколько раз больше диаметра отверстия сопла, на расстоянии 15–20 мм ее диаметр примерно равен 1 см. Таким образом, плотность тока на оси системы транспортировки падает на 2–3 порядка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены экспериментальные вольт-амперные характеристики ионного потока, проникающего за сопло в составе газодинамического потока. Показано, что доля ионного тока, проходящего за сопло под воздействием газового потока, может быть увеличена в несколько раз по отношению к величине тока, обусловленной только экстракцией электрическим полем. При этом в зависимости от величины электрического поля, проникающего за скиммер, происходит перераспределение тока между соплом и коллектором. Получено, что при условиях эксперимента, весь ионный поток достигает подвижного коллектора на расстоянии до 15 мм при напряженности поля 200 в/см. Диаметр ионной компоненты потока составляет 1.5 мм. Проведено моделирование процесса движения ионов в газе для условий, близких к экспериментальным. На основании полученных результатов можно рассматривать системы транспортировки ионов далее в анализатор.

*Работа частично выполнена в рамках НИР 0074-2019-0009 (номер гос. регистрации АААА-А19-*

*119053190069-2), входящей в состав Госзадания № 075-00780-19-02 ИАП РАН.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврик М.А., Корнев Д.И., Мурадымов М.З. Исследование характеристик газодинамического интерфейса в составе времяпролетного масс-спектрометра MX 5311 // Научное приборостроение. 2010. Т. 20, № 4. С. 114–119. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33636275>
2. Willoughby R., Sheehan E., Fries D. Transmission of ions through laminated conductance pathways from atmospheric pressure // Proceedings of the 52<sup>nd</sup> ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics, Nashville, Tennessee, 2004. URL: [http://www.lcms.com/products/pdf/ion\\_conductane\\_asms\\_2004\\_abstract.pdf](http://www.lcms.com/products/pdf/ion_conductane_asms_2004_abstract.pdf)
3. Jurgoot M., Groth C.P.T., Thomson B.A., et al. Numerical investigation of interface region flows in mass spectrometers ion transport // Journal of Physics D: Applied Physics. 2004. Vol.37, no. 4. P. 550–559. DOI: 10.1088/0022-3727/37/4/007
4. Андреева А.Д., Елистратов А.А., Галль Л.Н. Аналитическая модель ионного транспорта в интерфейсной области источника ионов ЭРИ АД // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 2. С. 73–77. URL: <http://iairas.ru/mag/2006/abst2.php#abst8>
5. Мурадымов М.З., Кириллов С.Н., Курнин И.В., Беляев К.А., Максимов С.В., Андреева А.Д., Вереников А.Н. Измерение характеристик ионного пучка на выходе из газонаполненного квадрупольного источника // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 3. С. 59–66. URL: <http://iairas.ru/mag/2006/abst3.php#abst7>
6. Андреева А.Д., Мурадымов М.З., Курнин И.В., Галль Л.Н. Электростатическая фокусировка ионов в газодинамических интерфейсах масс-спектрометров // Научное приборостроение. 2006. Т. 16, № 3. С. 80–87. URL: <http://iairas.ru/mag/2006/abst3.php#abst9>
7. Arseniev A.N., Kurnin I.V., Krasnov N.V., Muradytov M.Z., Potomov T.V., Yavor M.I., Krasnov M.N. Optimization of ion transport from atmospheric pressure ion sources. // International Journal for Ion Mobility Spectrometry. 2019. Vol. 22, no. 1. P. 31–38. DOI: 10.1007/s12127-018-0242-2
8. Александров М.Л., Галль Л.Н., Краснов Н.В., Николаев В.И., Шкурин В.А. Экстракция ионов из растворов при атмосферном давлении – новый метод масс-спектрометрического анализа // ДАН СССР. 1984. Т. 277, № 2. С. 379–393.
9. Fenn J.B. Mass Spectrometric implications of high-pressure ion sources // Int. J. Mass Spectrom. 2000. Vol. 200. P. 459–478. DOI: 10.1016/S1387-3806(00)00328-6

10. Manura D., Dahl D.A. SIMION 8.0 User's Manual, Sci. Instrument Services, Inc. Idaho Nat. Lab, 2006.
11. Appelhans A.D., Dahl D.A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure // *International Journal of Mass Spectrometry*. 2005. № 244. P. 1–14.
12. 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>
13. Курнин И.В. Универсальная модель для расчета динамики ионов в плотном газе и сильных электрических полях // *Научное приборостроение*. 2018. Т. 28, № 3. С. 118–123.  
URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst3.php#abst15>

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Курпий П.А.)**

**Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Мурадымов М.З., Краснов Н.В., Курнин И.В., Арсеньев А.Н.)**

Контакты: Краснов Николай Васильевич,  
krasnov@alpha-ms.com

Материал поступил в редакцию 28.10.2020

## EFFECT OF GAS-DYNAMIC FLOW ON ION TRANSPORT THROUGH THE NOZZLE OF AN ION SOURCE WITH IONIZATION AT ATMOSPHERIC PRESSURE

P. A. Kupriy<sup>1</sup>, M. Z. Muradymov<sup>2</sup>, N. V. Krasnov<sup>2</sup>, I. V. Kurnin<sup>2</sup>, A. N. Arseniev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia*

<sup>2</sup>*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia*

The effect of the gas flow to the ion transport from the atmosphere to the forevacuum region of the is determined experimentally. Experimental volt-ampere characteristics of the ion flow carried by the gas-dynamic flow behind the nozzle are obtained. It is shown that the fraction of the ion current passing through the nozzle under the influence of the gas flow can be increased several times in relation to the current value due only to the extraction by the electric field.

In this case, depending on the magnitude of the electric field penetrating beyond the skimmer, the current is redistributed between the nozzle and the collector. It was found that, under the experimental conditions, the entire ion flux reaches the movable collector at a distance of up to 15 mm at a field strength of 200 V / cm. The diameter of the ionic component of the flow is 1.5 mm.

The ion motion in a gas is simulated for conditions close to the experimental ones. Developing research findings, it is possible to consider systems for transporting ions further to the analyzer.

*Keywords:* ion source, gas dynamic flow, nozzle, ion transport at high gas pressure

### REFERENCES

1. Gavrik M.A., Kornev D.I., Muradymov M.Z. [Investigation of characteristics of a gas-dynamic interface bandwidth time-of-flight mass-spectrometer MX 5311]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2010, vol. 20, no. 4, pp. 114–119. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33636275>
2. Willoughby R., Sheehan E., Fries D. Transmission of ions through laminated conductance pathways from atmospheric pressure. *Proceedings of the 52<sup>nd</sup> ASMS Conference on Mass Spectrometry and Allied Topics*, Nash-



- ville, Tennessee, 2004. URL: [http://www.lcms.com/products/pdf/ion\\_conductane\\_asms\\_2004\\_abstract.pdf](http://www.lcms.com/products/pdf/ion_conductane_asms_2004_abstract.pdf)
3. Jurgoot M., Groth C.P.T., Thomson B.A., et al. Numerical investigation of interface region flows in mass spectrometers ion transport. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004, vol. 37, no. 4, pp. 550–559. DOI: 10.1088/0022-3727/37/4/007
  4. Andreeva A.D., Elistratov A.A., Gall' L.N. [An analytical approach to ion transport in the interface region of the ERI AD (Electrospray) ion source]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2006, vol. 16, no. 2, pp. 73–77. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33176366>
  5. Muradymov M.Z., Kirillov S.N., Kurnin I.V., Belyaev K.A., Maksimov S.V., Andreeva A.D., Verenchikov A.N. [Ion beam characteristics at the exit of the gas filled quadrupole]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2006, vol. 16, no. 3, pp. 59–66. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33176933> (In Russ.).
  6. Andreeva A.D., Muradymov M.Z., Kurnin I.V., Gall' L.N. [An electrostatic focusing effect in the gas dynamical interface of the mass spectrometer]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2006, vol. 16, no. 3, pp. 80–87. (In Russ.). URL: <http://iairas.ru/mag/2006/abst3.php#abst9>
  7. Arseniev A.N., Kurnin I.V., Krasnov N.V., Muradymov M.Z., Pomezov T.V., Yavor M.I., Krasnov M.N. Optimization of ion transport from atmospheric pressure ion sources. *International Journal for Ion Mobility Spectrometry*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 31–38. DOI: 10.1007/s12127-018-0242-2
  8. Aleksandrov M.L., Gall' L.N., Krasnov N.V., Nikolaev V.I., Shkurov V.A. [Extraction of ions from solutions at atmospheric pressure - a new method of mass spectrometry analysis]. *DAN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1984, vol. 277, no. 2, pp. 379–393. (In Russ.).
  9. Fenn J.B. Mass Spectrometric implications of high-pressure ion sources. *Int. J. Mass Spectrom.*, 2000, vol. 200, pp. 459–478. DOI: 10.1016/S1387-3806(00)00328-6
  10. Manura D., Dahl D.A. *SIMION 8.0 User's Manual*, Sci. Instrument Services, Inc. Idaho Nat. Lab, 2006.
  11. Appelhans A.D., Dahl D.A. SIMION ion optics simulations at atmospheric pressure. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2005, № 244, pp. 1–14.
  12. 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. DOI: 10.18358/np-25-3-i2934 (In Russ.).
  13. Kurnin I.V. [Model for simulation of ion dynamics in a dense gas and strong electric fields]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 3, pp. 118–123. DOI: 10.18358/np-28-3-i118123 (In Russ.).

Contacts: *Krasnov Nikolay Vasil'evich*,  
[krasnov@alpha-ms.com](mailto:krasnov@alpha-ms.com)

Article received by the editorial office on 28.10.2020