

03

## Система транспортировки электронного пучка в атмосферу для пушки с плазменным эмиттером

© С.Ю. Корнилов,<sup>1</sup> Н.Г. Ремпе,<sup>1</sup> С.В. Шидловский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050 Томск, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия  
e-mail:kornilovsky@gmail.com

(Поступило в Редакцию 12 октября 2015 г.)

Представлены результаты моделирования течения газа в пушке с плазменным эмиттером и устройстве вывода электронного пучка в атмосферу, построенном на основе стандартных газодинамических окон (ГДО). Представлены конструкция пушки и ГДО. Проведены расчеты для давления в области генерации электронного пучка около  $10^{-3}$  Торр. Показано, что перепад давления до атмосферного в устройстве вывода электронного пучка в атмосферу может быть обеспечен двумя ступенями ГДО, которые откачиваются насосами с оптимальной производительностью.

### Введение

Интерес к электронным пушкам с плазменным эмиттером в последние годы существенно вырос [1,2]. Это обусловлено, на наш взгляд, несколькими причинами. Во-первых, пушки этого типа построены на основе безнакального эмиттера электронов — плазмы газового разряда низкого давления. Использование плазмы как источника электронов позволяет снизить требования к составу и давлению остаточной атмосферы в области формирования электронного пучка и повысить ресурс работы оборудования. Воздействие нейтральных и ионизованных тугоплавких и химически активных паров металлов и газов (в том числе кислорода) на электроды разрядной камеры сводится к минимуму из-за невысокой (не более  $200^\circ\text{C}$ ) температуры этих электродов. Во-вторых, достижения по совершенствованию пушек с плазменным эмиттером [3,4] ставят их по параметрам в один ряд с термокатодными пушками. Особенно существенны эти достижения в тех технологиях, в которых используются непрерывные и квазинепрерывные сфокусированные электронные пучки. И, наконец, третья причина повышенного интереса к пушкам с плазменным эмиттером состоит в ограничениях, которые в отдельных применениях становятся существенными для термокатодных пушек. Так, пушки с плазменным эмиттером имеют в несколько раз более высокую эмиссионную способность. Это делает предпочтительным их выбор при создании электронно-лучевых систем с высокоскоростным переключением тока. Пушки с плазменным эмиттером из-за более простого (диодного) способа управления током имеют преимущество там, где важно обеспечить неизменное положение области с минимальным диаметром сфокусированного пучка при изменении тока.

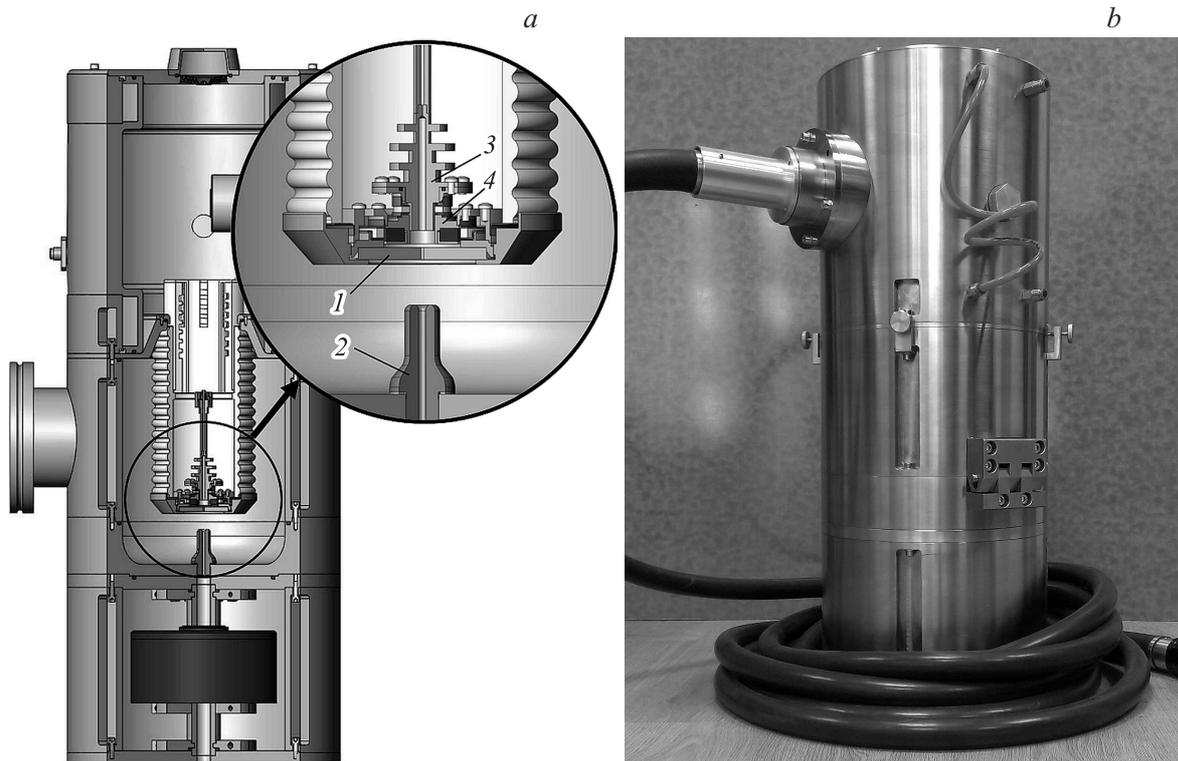
Настоящая работа является одним из этапов дальнейшего совершенствования пушек с плазменным эмиттером и посвящена исследованию особенностей построения

устройства вывода сфокусированного электронного пучка в газ повышенного давления до атмосферного. Особенность анализа устройства вывода для пушек с плазменным эмиттером состоит в том, что требуется дополнительно учесть поток газа в ускоряющий промежуток из разрядной камеры. Этот поток возникает вследствие того, что в области существования газового разряда поддерживается более высокое давление газа, чем давление в ускоряющем (высоковольтном) промежутке пушки. Разность давлений создается непрерывным напуском газа в разрядную камеру. Газ, как правило, откачивается через ускоряющий промежуток. Таким образом, практически всегда в ускоряющем промежутке пушки имеется поток газа из области эмиттера. Кроме того, пушки с плазменным эмиттером из-за отсутствия накаливаемых электродов могут формировать электронный пучок при давлениях, превышающих рабочее давление в пушках с термокатодом на 2–3 порядка. Этот факт дает надежду на то, что для пушек с плазменным эмиттером может потребоваться более простая система транспортировки электронного пучка из вакуума в атмосферу.

### Электронная пушка с плазменным эмиттером

В пушках с плазменным эмиттером, предназначенных для генерации сфокусированных электронных пучков с высокой яркостью [4], используется низковольтная форма газового разряда — отражательный разряд с полым катодом [5]. Эмиссия электронов из плазмы газового разряда происходит под действием электрического поля [5].

Основным элементом конструкции пушки является металлокерамический узел — разрядная камера (рис. 1, а, выделенная область).



**Рис. 1.** Электродная схема (а) и внешний вид (b) пушки с плазменным эмиттером: 1 — эмиттерный катод, 2 — экстрактор, 3 — полый катод, 4 — анод.

Разряд формируется в разрядной ячейке, образованной внутренними поверхностями полого катода 3, цилиндрического анода 4 и эмиттерного катода 1 (рис. 1, а). Между полым и эмиттерным катодами постоянным магнитом создается аксиально-симметричное поле с индукцией на оси около 0.1 Т.

Давление плазмообразующего газа в разрядной камере составляет примерно  $5 \cdot 10^{-2}$  Торг. Такое давление создается дозированным напуском газа с величиной около  $10-20 \text{ cm}^3 \text{ atm/h}$ , который подается через канал в полый катод и откачивается через канал на оси эмиттерного катода. Разряд горит в непрерывном режиме с напряжением 350–450 В и током 0.1–1.5 А. Указанный диапазон токов разряда позволяет получать электронный пучок с током от единиц до нескольких сотен миллиампер.

Эмиссия электронов из плазмы происходит через отверстие в эмиттерном катоде разрядной камеры в область ускоряющего поля между этим катодом и заземленным высоковольтным анодом (экстрактором).

Сформированный в ускоряющем промежутке электронный пучок фокусируется магнитным полем и транспортируется в вакуумную камеру [2] или атмосферу [4].

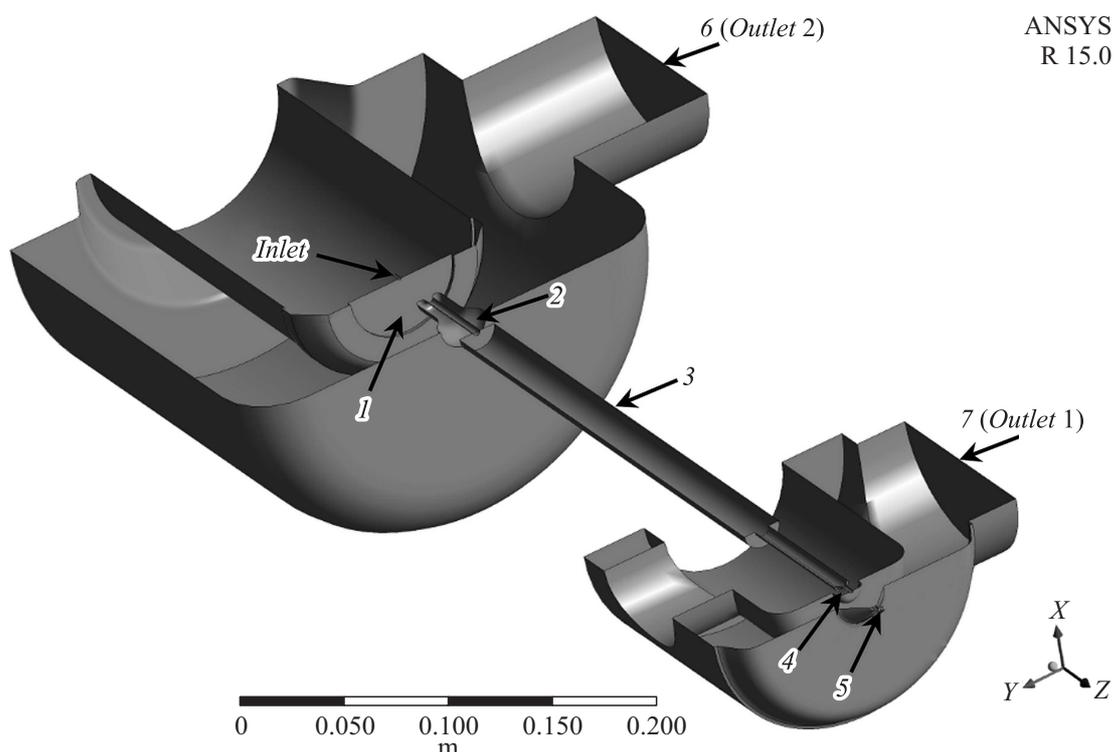
Внешний вид пушки, сконструированной для применения совместно с устройством вывода пучка в атмосферу, приведен на рис. 1, b. Эта пушка формирует сфокусированный пучок электронов с энергией 120 keV и током до 200 mA.

## Методика проведения модельного эксперимента

Исследования устройства вывода сфокусированного электронного пучка в атмосферу проводились методом компьютерного моделирования в программе Ansys. Исходный принцип транспортировки электронного пучка основывался на системе газодинамических окон (ГДО), позволяющей ступенчато повышать давление газа до атмосферного.

В термокатодных пушках для вывода пучка в атмосферу в большинстве случаев используются трехступенчатые ГДО [6]. Наши расчеты основаны на исследовании возможности применения для вывода пучка в атмосферу двухступенчатой системы дифференциальной откачки.

На рис. 2 показана геометрическая схема рассматриваемого в задаче устройства вывода электронного пучка в атмосферу, состоящего из двух ГДО. Схема была построена с помощью пакета твердотельного параметрического моделирования SolidWorks. ГДО содержит по две диафрагмы, объем между которыми откачивается вакуумными насосами. Устройство вывода построено таким образом, что ускоряющий промежуток пушки (область между поверхностью эмиттерного катода 1 и экстрактором 2) и лучепровод 3 образуют вторую ступень (второе ГДО) устройства вывода. Отсчет ступеней ведется от атмосферы.



**Рис. 2.** Геометрическая схема устройства вывода электронного пучка в атмосферу: 1 — эмиттерный катод, 2 — экстрактор, 3 — лучепровод, 4 — выходная диафрагма второй ступени, 5 — выходная диафрагма первой ступени, 6 — патрубок откачки второй ступени, 7 — патрубок откачки первой ступени.

Первая ступень имеет осевой канал 5 диаметром 2 mm, через который электронный пучок выводится непосредственно в область с атмосферным давлением. На входе в первую ступень для расчетов задавалось давление в одну атмосферу и температура газа 25°C. Первая ступень откачивалась со скоростью 410 l/s через патрубок 7 (граница, на которой задавались условия откачки, на рис. 2 обозначена как Outlet1) бустерным насосом Рутса, работающим в паре с безмасляным винтовым насосом. Лучепровод, входящий в состав элементов второй ступени, представляет собой канал транспортировки электронного пучка. В канале создается магнитное поле для фокусировки пучка. Откачка второй ступени происходит через патрубок 6 (граница Outlet2) турбомолекулярным насосом со скоростью 700 l/s. Ускоряющий промежуток и лучепровод разделены экстрактором с каналом длиной 40 mm и диаметром 3 mm. На выходе лучепровод имеет сужение в виде конуса, меньшее основание которого обращено к первой ступени и переходящий в протяженный цилиндрический канал 4 длиной 10 mm и диаметром 2 mm.

На границе Inlet (рис. 2) задавались условия для потока газа, напускаемого в разрядную камеру пушки. Величина напуска задавалась 10 cm<sup>3</sup>atm/h.

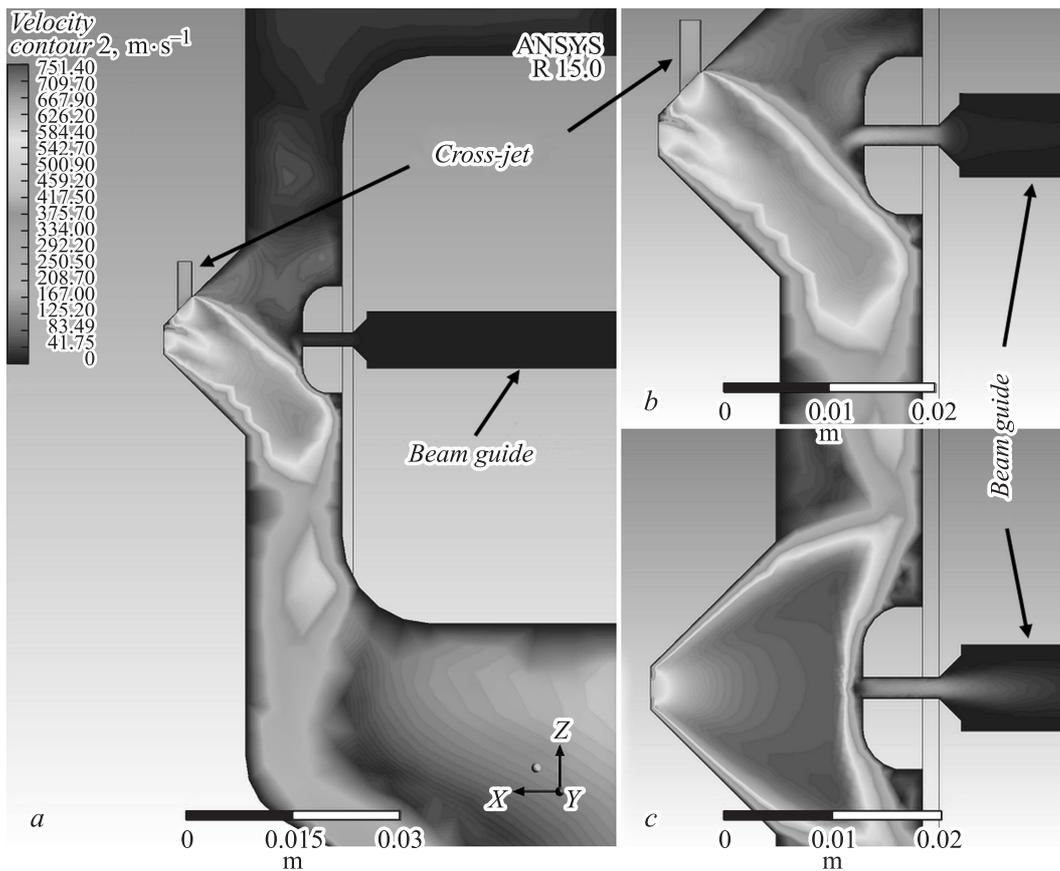
Полученная в SolidWorks геометрическая модель пушки с плазменным эмиттером и системы дифференциальной откачки экспортировалась в САЕ-систему Ansys.

С помощью модуля CFX Mesh программы Ansys на расчетную область накладывалась неоднородная сетка конечных элементов. Характерные размеры ячеек сетки варьировались в пределах 10<sup>-5</sup>–10<sup>-2</sup> m. Неоднородное задание размеров ячеек сетки позволяет регулировать точность и время выполнения модельных расчетов.

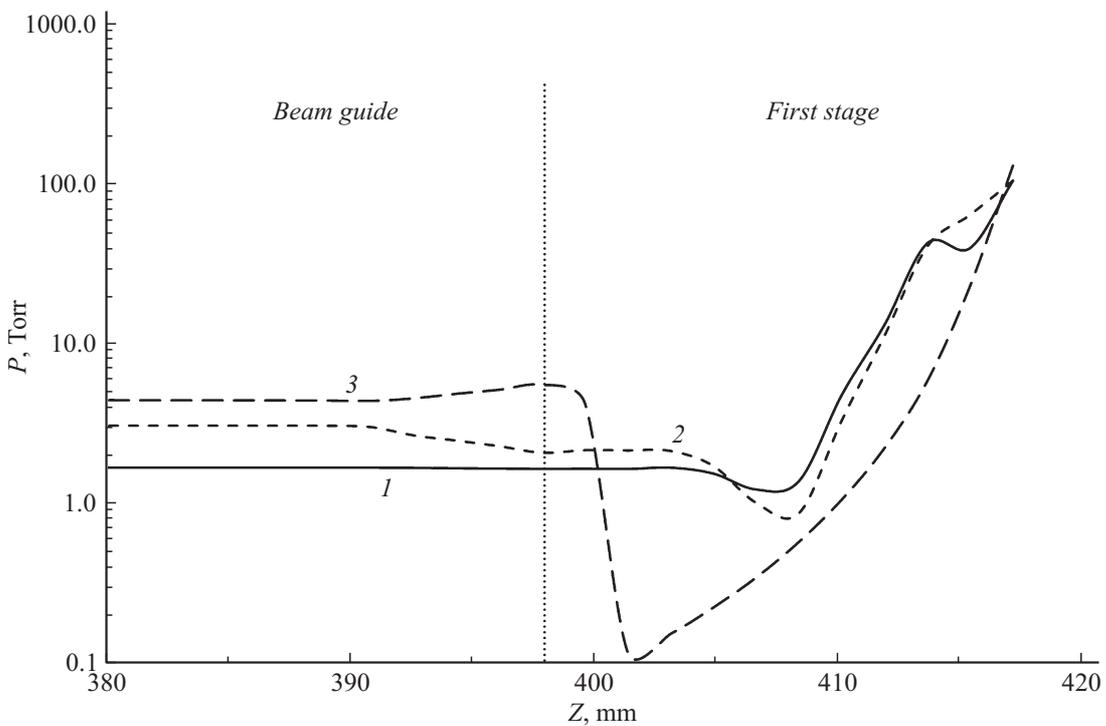
В условиях рассматриваемой задачи моделирование устройства вывода в целом достаточно времяемкий процесс. Для снижения времени счета использовался следующий подход:

- выполнялся расчет некоторой начальной, базовой конструкции двухступенчатой системы вывода,
- выделялась одна из ступеней системы дифференциальной откачки,
- из полученных в базовой конструкции определялись условия на границах выбранной ступени,
- выполнялись модельные расчеты выбранной ступени,
- выполнялся уточненный расчет полной схемы устройства вывода с учетом принятых решений по геометрической схеме каждой ступени.

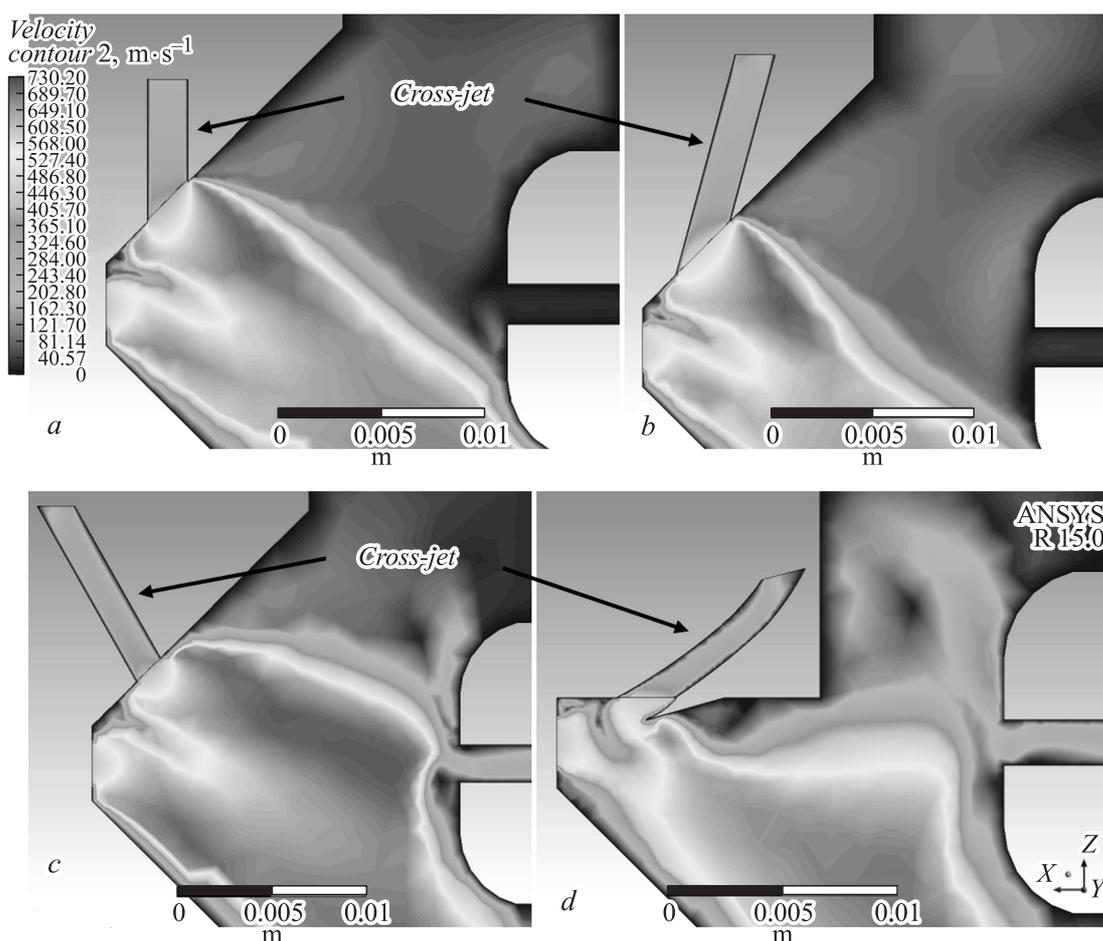
Такой подход позволил существенно, на три порядка, снизить затраты машинного времени на проведение вычислительных экспериментов. Результаты расчетов по описанному подходу совпали с результатами, полученными при моделировании всей расчетной области.



**Рис. 3.** Поля скоростей потоков газа в первой ступени и части второй ступени (лучепровод) устройства вывода: *a* — с cross-jet, 1 atm; *b* — с cross-jet, 1.5 atm; *c* — без cross-jet.



**Рис. 4.** Распределение давления на оси лучепровода пушки и первой ступени устройства вывода: *1* — соответствует рис. 3, *a*; *2* — рис. 3, *b*; *3* — рис. 3, *c*.



**Рис. 5.** Поля скоростей потоков газа в первой ступени и части второй ступени (лучепровод) устройства вывода при давлении на входе патрубка cross-jet одна атмосфера и угле между осью поперечной струи и осью системы: *a* —  $90^\circ$ , *b* —  $105^\circ$ , *c* —  $60^\circ$ , *d* —  $135^\circ$ .

## Результаты моделирования и их обсуждение

Предварительные оценочные расчеты, проведенные для заданной геометрической схемы устройства вывода, показали низкую эффективность откачки ускоряющего промежутка (второй ступени ГДО). Давление во второй ступени оказывалось предельным для пушек с плазменным эмиттером и не обеспечивало надежную работу пушки. При этом задача оптимизации конфигурации газодинамических окон для получения максимально эффективной откачки в настоящей работе не ставилась. В связи с этим для снижения давления в ускоряющем промежутке пушки без увеличения производительности откачных средств дальнейшие расчеты проводились с использованием поперечной струи газа (cross-jet) в первой ступени устройства [6]. Этот известный прием позволяет перенаправить большую часть потока, поступающего из атмосферы, непосредственно к патрубку насоса, подключенного к первой ступени откачки.

На рис. 3 представлены поля скоростей газовых потоков в первой ступени (левая часть рисунков) и части

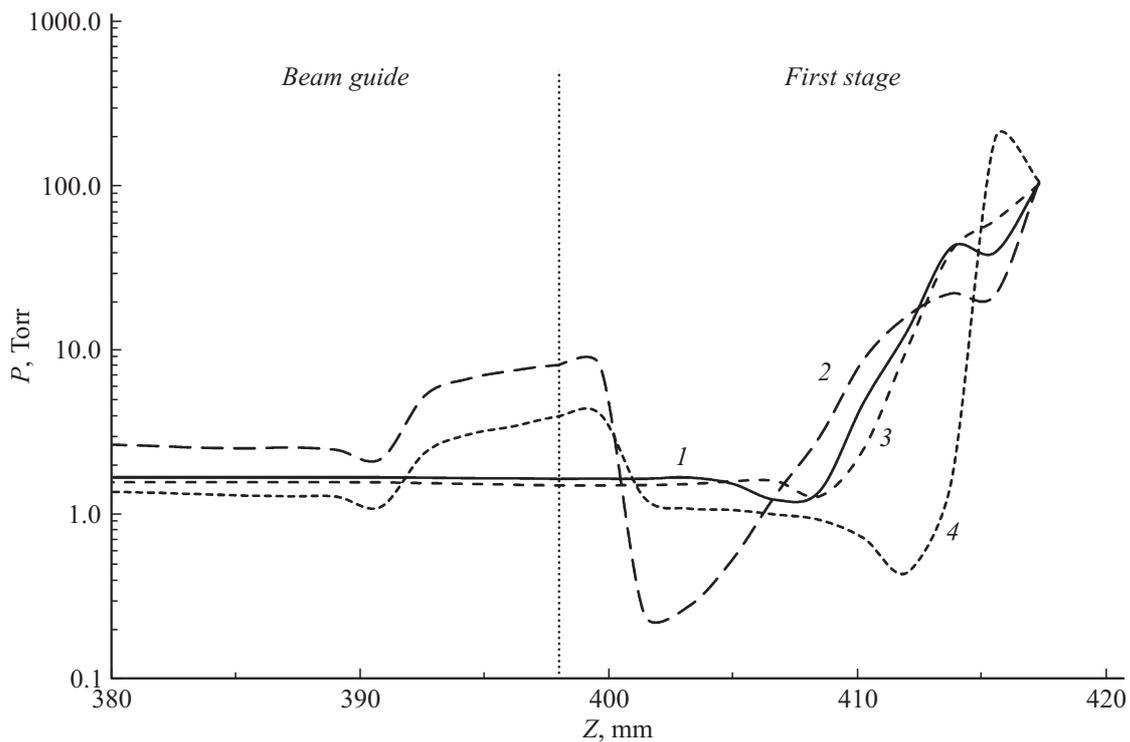
второй ступени, в лучепроводе пушки, полученные в результате модельных расчетов.

Для этих же областей на рис. 4 представлены распределения давлений на оси.

Представленные на рис. 3 и 4 результаты демонстрируют влияние поперечной струи, направленной перпендикулярно осевому газовому потоку из области с атмосферным давлением. Рис. 3, *a* и *b* и соответствующие им распределения 1 и 2 на рис. 4 получены для двух давлений на входе в cross-jet. Для сравнения рис. 3, *c* и распределение 3 на рис. 4 показывают поле скоростей газового потока и осевое распределение давления в устройстве без поперечной струи.

При „пассивном“ (давление на входе cross-jet составляет одну атмосферу) обдуве потока газа наблюдается более эффективный отвод потока от оси в сторону откачного патрубка. При этом проникновение во вторую ступень периферийной части поперечной струи в результате ее расширения минимально и не вызывает существенный рост давления в лучепроводе.

Повышение давления на входе cross-jet до 1.5 атмосфер приводит к тому, что значительная часть попереч-



**Рис. 6.** Распределение давления на оси лучепровода пушки и первой ступени устройства вывода при давлении на входе патрубка cross-jet одна атмосфера и угле между осью патрубка и осью системы: 1 — соответствует рис. 5, а, 2 — рис. 5, б, 3 — рис. 5, в, 4 — рис. 5, д.

ного потока, перераспределяясь, поступает во вторую ступень.

В случае, когда cross-jet отсутствует, поступающая из атмосферы струя газа равномерно расширяется в объеме первой ступени, повышая давление на оси ступени и лучепровода. При этом наблюдается область уплотнения вблизи входа во вторую ступень.

Из представленных на рис. 4 распределений давления видно, что наиболее предпочтительным вариантом является использование поперечной струи, образованной при давлении на входе cross-jet в одну атмосферу. Удастся понизить давление по всей длине лучепровода примерно в 3 раза относительно давления в отсутствие cross-jet. При этом существенно уменьшаются неоднородности в распределении давления на оси первой ступени. Отсутствует слой уплотнения вблизи входа во вторую ступень. Давление снижается плавно от атмосферного до давления в лучепровode. Связано это с уменьшением скорости осевого потока и, как следствие, снижением вероятности возникновения ударных волн, образующихся при встрече сверхзвуковой струи с конструктивом входной диафрагмы второй ступени.

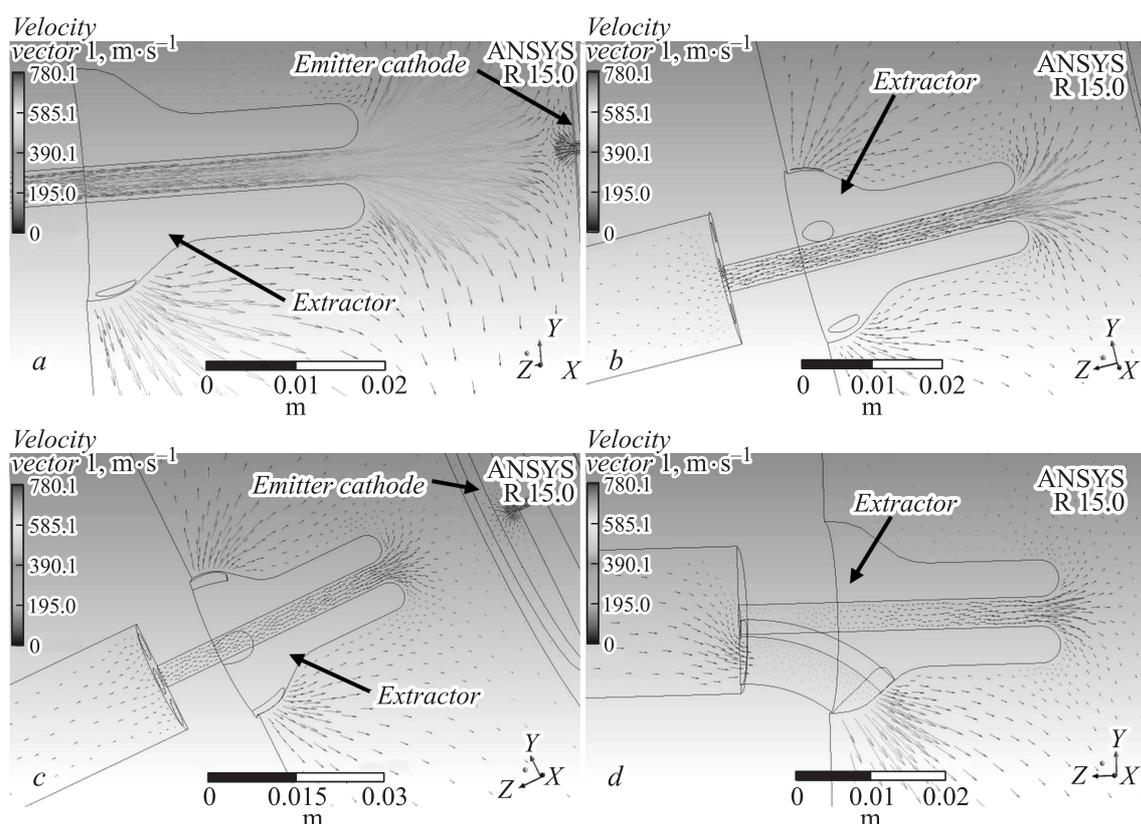
На рис. 5 и 6 представлены результаты, демонстрирующие влияние ориентации поперечной струи относительно оси системы на скорость потока на входе во вторую ступень и распределение давления, соответствующее разным углам входа поперечной струи.

Если ввод поперечной струи происходит под углом, меньшим  $90^\circ$  к оси системы, наблюдается увеличение

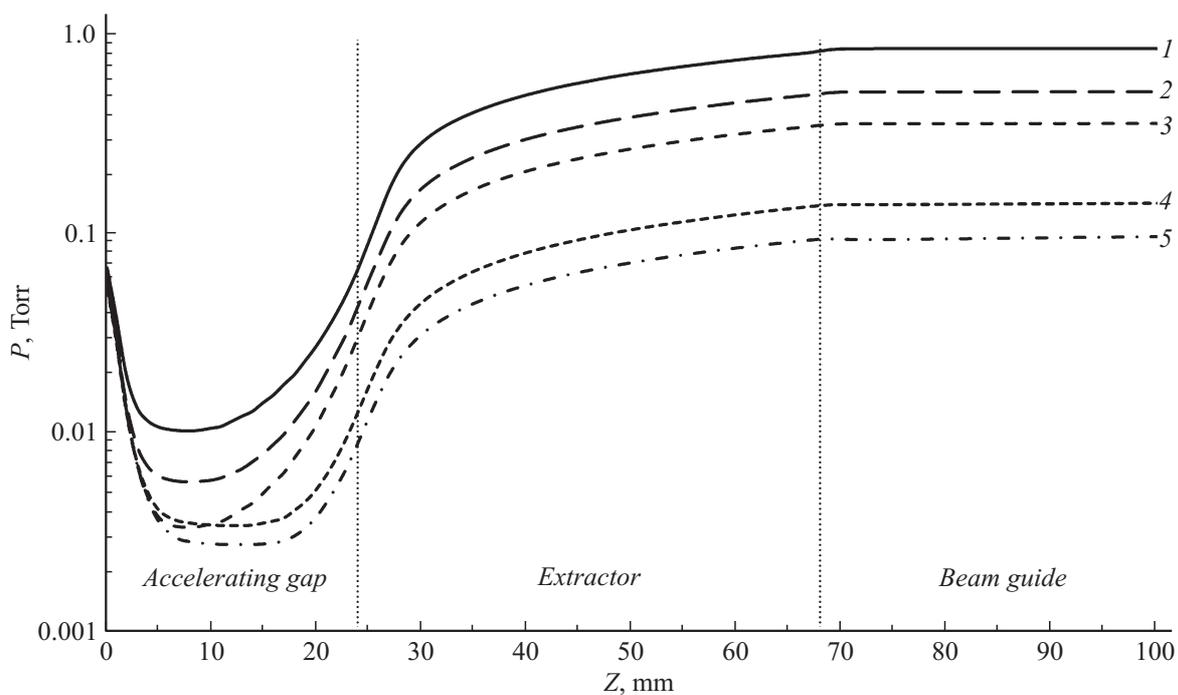
осевого потока, поступающего во вторую ступень. Связано это с тем, что область обдува осевого потока смещается ко входу во вторую ступень. Создаются условия для проникновения рассеянной поперечной струи в лучепровод. Кроме того, распределение давления на оси первой ступени имеет ярко выраженные переходные области с локальными скачками уплотнения и разрежения газовой среды. По-видимому, это связано с отражением потока от входной диафрагмы ГДО. Поперечный поток в этих условиях негативным образом влияет на работу системы. Иные распределения наблюдаются, если угол между осью поперечного потока и осью системы составляет  $90^\circ$  и более. Сдувание осевого потока происходит уже вблизи входной диафрагмы первой ступени. Направления движения рассеянной части поперечного потока вместе с осевым потоком образуют струю, обтекающую диафрагму второй ступени на достаточном удалении от ее осевой части. Тем самым обеспечивается существенное снижение величины потока газа, входящего во вторую ступень устройства вывода пучка в атмосферу.

Из результатов моделирования также следует, что нежелательно использовать встречный поток газа, направленный под углом  $135^\circ$  и более градусов. Давление в лучепровode несколько снижается, однако наблюдается неоднородность в распределении давления в первой ступени с ярко выраженными скачками уплотнения газовой среды.

Таким образом, ориентация поперечного потока в диапазоне  $90^\circ$ – $105^\circ$  к оси системы обеспечивает наи-



**Рис. 7.** Распределение скорости потока газа во второй ступени устройства вывода: *a* — откачка через осевой канал в экстракторе и два периферийных канала диаметром 3 mm, *b* — откачка через осевой канал в экстракторе и шесть периферийных каналов диаметром 3 mm, *c* — откачка через осевой канал в экстракторе и шесть периферийных каналов диаметром 5 mm, *d* — откачка через осевой канал в экстракторе и один периферийный канал диаметром 10 mm.



**Рис. 8.** Распределение давления во второй ступени устройства вывода: *1* — откачка через осевой канал в экстракторе, *2* — соответствует рис. 7, *a*, *3* — рис. 7, *b*, *4* — рис. 7, *c*, *5* — рис. 7, *d*.

лучшее распределение давления между атмосферой и входом во вторую ступень устройства вывода.

Как было отмечено выше, пушки с плазменным эмиттером работают при непрерывном напуске газа в разрядную камеру с откачкой через ускоряющий промежуток. Наличие двух встречных потоков в ускоряющем промежутке создает область разрежения с давлением на два порядка ниже, чем давление в ускоряющем промежутке и в канале ускоряющего электрода. Длина области разрежения практически совпадает с длиной ускоряющего промежутка.

На рис. 7 и 8 представлены распределения давления и скорости потоков в ускоряющем промежутке пушки при различных вариантах откачки осевого потока.

Как видно из рис. 8, откачка газа из второй ступени устройства вывода лишь через осевой канал в экстракторе не обеспечивает нужное для работы пушки давление в ускоряющем промежутке. Для снижения давления необходимо отводить часть потока непосредственно из лучепровода. В связи с этим были выполнены расчеты течения газа через различное количество дополнительных откачных каналов в лучепроводе. Расчеты показали, что важным является не количество каналов, а общая площадь их поперечных сечений и ориентация. Приемлемый результат получен при использовании каналов, ориентированных в сторону откачного патрубка, с площадью поперечного сечения примерно в 6 раз превосходящей площадь осевого отверстия в ускоряющем электроде.

## Заключение

Выполненное моделирование показало возможность использования для пушки с плазменным эмиттером такого устройства вывода электронного пучка в атмосферу, которое содержит лишь два газодинамических окна. Это устройство должно содержать систему для формирования поперечной струи газа на входе в первую ступень и обеспечивать дополнительную откачку лучепровода во второй ступени. При этих условиях создается такое распределение давления в ускоряющем промежутке, которое близко к рабочему при эксплуатации пушки в вакуумной камере.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Соглашение № 14.577.21.0018 (RFMEFI57714X0018).

## Список литературы

- [1] *Pozo S.D., Ribton C.N., Smith D.R.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 2014. Vol. 61. N 6. P. 1890–1894.
- [2] *Hassel T., Rempe N., Kornilov S., Beniyash A.* // Welding and Cutting. 2012. Vol. 11. N 2. P. 122–127.
- [3] *Корнилов С.Ю., Осипов И.В., Ремпе Н.Г.* // ПТЭ. 2009. N 3. С. 104–109.

- [4] *Kornilov S., Rempe N., Beniyash A., Murray N.* // J. Physics: Conference Series. 2014. Vol. 552. N 1. P. 1–6.
- [5] *Gushenets V.I., Oks E.M., Yushkov G.Yu., Rempe N.G.* // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 123–138.
- [6] Apparatus for electron beam welding at atmospheric pressure, United States Patent, N 5951886, Sep. 14, 1999.