

**О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ОКНА
ДЛЯ ВЫВОДА ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ**

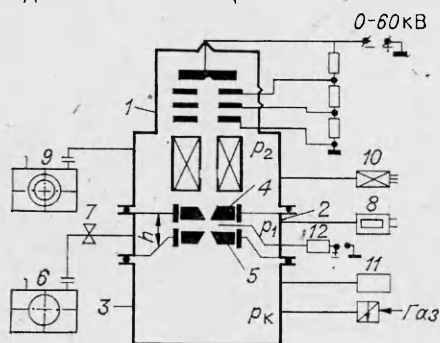
*Л. Н. Орликов, Е. В. Чикин
(Томск)*

1. Устройства для вывода электронных пучков в газ среднего и высокого давления в последнее время находят все большее применение в электронно-лучевой технологии [1], квантовой электронике [2], газодинамических исследованиях [3]. Такие устройства используют главным образом два метода: вывод пучков через тонкую металлическую фольгу и вывод через газодинамическое окно (ГДО) [4], в простейшем виде представляющее собой систему соосных диафрагм с откачкой промежутков между ними. Иногда использование ГДО оказывается более целесообразным и выгодным, чем фольга. Это касается в основном тех случаев, когда требуется обеспечить надежную и безаварийную работу устройства при выводе в непрерывном режиме сравнительно низкоэнергетических (до 100 кэВ), но мощных пучков.

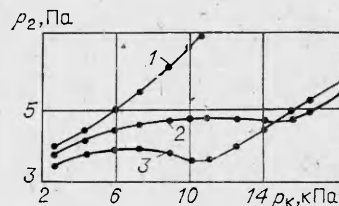
Вместе с тем применение ГДО в технике и научных исследованиях не получило пока широкого распространения из-за ряда технических трудностей, связанных с его использованием. Основная из этих трудностей — необходимость использования высокопроизводительных, громоздких и энергоемких откачных средств для создания требуемого перепада давления между объемами электронной пушки и рабочей камерой, куда выводится пучок. В связи с этим возникает задача изучения условий работы ГДО, при которых возможно снижение производительности и энергоемкости использующихся вакуумных насосов без ухудшения параметров выведенных электронных пучков, т. е. проблема повышения эффективности ГДО.

В данной работе на основе результатов испытания газоразрядной электронной пушки с ГДО [5] приводятся экспериментальные данные, свидетельствующие о возможности повышения эффективности ГДО путем использования эффекта запорного слоя, возникающего при взаимодействии газовой струи с элементами ГДО.

2. Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1. Газоразрядная электронная пушка 1 в комплексе с ГДО 2 установлена в рабочей камере 3. ГДО представляет собой два элемента 4 и 5, установленных соосно электронной пушке в водоохлаждаемых обоймах. Элементы ГДО могут иметь различную форму (плоскости, конусы, воронки и их комбинации). Форма элементов выбиралась из условия обеспечения максимального перепада давления на ГДО (оцениваемого по отношению давления в камере к давлению в пушке) при минимальном расстоянии между элементами. Элементы могут заменяться и перемещаться друг относительно друга без нарушения соосности и герметичности уплотнения в обойме на расстояние от 0 до 30 мм. Элементы имеют соосные каналы длиной 1 мм и диаметром d_2 и $d = 0,6-1,5$ мм. Откачка газа между элементами производится с помощью механического вакуумного насоса 6 (ВН-7) через дроссель 7, обеспечивающий дискретное изменение эффективной скорости откачки газа $\dot{S}_- = 6; 12; 19$ и 40 л/с.



Фиг. 1



Фиг. 2

Изменение скорости откачки позволяет в широких пределах изменять перепад давления в потоке газа, оцениваемый по отношению давления в камере p_K к давлению p_1 в корпусе 2 (p_K/p_1). Это создает возможность изменять газодинамические и геометрические параметры струи, взаимодействующей с элементом 4 ГДО.

Объем электронной пушки откачивается механическим насосом 9 (ВН-1МГ). Давление в корпусе (в первой ступени ГДО) оценивается вакуумметром 8 (ВСБ-1), давление p_2 в объеме электронной пушки (во второй ступени ГДО) — термомпарным датчиком 10 (ПМТ-2), в рабочей камере — деформационным манометром 11. В стенке корпуса выполнено окно, закрытое свинцовым стеклом, позволяющее визуально наблюдать картину течения газа между элементами ГДО. Визуализация течения газа проводилась тлеющим разрядом [6], обеспечиваемым с помощью герметично вводимого между элементами электрода 12, на который подавалось напряжение 300—600 В от универсального источника питания УИП-1.

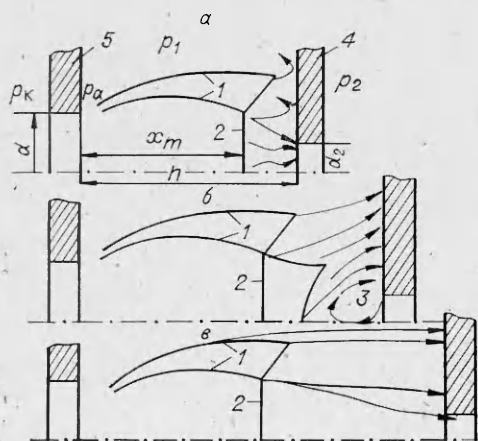
3. С целью выяснения возможностей создания максимального давления газа в камере в диапазоне рабочих давлений в пушке 2—10 Па при минимальном расстоянии между элементами ГДО для обеспечения минимальных потерь электронного пучка на элементах при его выводе был проведен ряд экспериментов. На фиг. 2 представлены зависимости давления в пушке от давления в камере для различных расстояний h между плоскими элементами ГДО. Зависимости построены для следующих условий: $d = d_2 = 0,8$ мм, $S_1 = 12$ л/с; кривая 1 — $h = 4$; 2 — 8; 3 — 6 мм. Из характера зависимостей видно, что при малом h (кривая 1) с увеличением давления в камере давление в пушке почти линейно возрастает. Это качественно описывается известным уравнением вакуумной техники, связывающим давление газа p , величину его потока Q и скорость его откачки S :

$$(3.1) \quad p = Q/S.$$

При увеличении расстояния между элементами ГДО (кривые 2, 3) характер зависимостей изменяется. При определенном давлении в камере (6—16 кПа) наблюдается независимость или обратная зависимость (кривая 3) давления в пушке от давления в камере («эффект полки»). Это, на первый взгляд, противоречащее соотношению (3.1), явление оказывается интересным и полезным с точки зрения возможностей повышения перепада давления на ГДО, т. е. увеличения его эффективности.

4. Обсуждение полученных результатов целесообразно проводить совместно с рассмотрением структуры газового потока в ГДО. Представления о структуре потока получены в результате визуализации его тлеющим разрядом, зажигаемым в пространстве между элементами ГДО. Характер течения газа и структура потока в этом пространстве качественно совпадают с особенностями истечения и взаимодействия газовых струй с преградами [7—10]. При малом давлении в камере и малом давлении между элементами ($p_K < 6$ кПа, $p_1 < 15$ Па, $p_K/p_1 \approx 500$) свечение

газа в тлеющем разряде происходит в виде светящегося шара. Это свидетельствует о том, что истечение газа в пространстве между диафрагмами происходит с сильным недорасширением струи, для которого свойственно радиальное истечение газа по всем направлениям от отверстия d . Поэтому на начальном участке повышения давления в камере наблюдается увеличение давления в пушке при любых расстояниях между диафрагмами, т. е. соотношение (3.1) выполняется вплоть до от-



Ф и г. 3

ношения $p_R/p_1 = 80-100$. С уменьшением отношения p_R/p_1 между элементами ГДО формируется бочкообразная форма потока с висячими 1 и центральным 2 (фиг. 3) скачками давления перед диафрагмой 4, что соответствует истечению недорасширенной струи в вакуум.

На фиг. 3 представлены схемы взаимодействия газовой струи, истекающей из отверстия элемента 5 ГДО с преградой в виде элемента 4 ГДО для простейшего случая плоских элементов и различного расстояния между ними.

При малом ($h < 2d$) расстоянии между элементами ГДО (фиг. 3, а) значительная часть потока перехватывается отверстием диафрагмы 4 и попадает в объем пушки. С увеличением расстояния создаются условия более свободного расширения струи. Струя газа с кольцевым сечением достигает элемента 4. Внешняя часть кольцевого слоя газа растекается по элементу 4 в направлении от оси струи и откачивается насосом 6. Внутренняя часть струи растекается к ее оси в направлении отверстия d_2 для вывода пучка, а затем устремляется навстречу основному потоку, образуя циркуляционную вихревую зону 3 (фиг. 3, б). Таким образом, формируется циркуляционное течение 3, обладающее эжектирующим действием у отверстия d_2 диафрагмы 4, которое оказывает как бы запорное действие для осевого потока в направлении отверстия d_2 , сообщающегося с объемом электрической пушки. При этом давление в пушке при увеличении давления в камере не увеличивается (см. фиг. 2, кривая 2), а даже уменьшается (см. фиг. 2, кривая 3). Наступает «эффект полки». Начало его проявления для плоских элементов ГДО соответствует условию

$$(4.1) \quad X_m > h > 0,5X_m,$$

где X_m — расстояние до диска Маха [7]: $X_m = 0,7d \sqrt{kp_a/p_1}$; k — показатель адиабаты газа; p_a — давление на срезе отверстия d [11]:

$$(4.2) \quad p_a = p_k \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_a^2 \right)^{k/(k-1)},$$

λ_a — коэффициент скорости потока на срезе отверстия d (для цилиндрического отверстия $\lambda_a = 1$, для воздуха $k = 1,4$, (4.2) преобразуется к виду $p_a = 0,528 p_k$).

Качественно условие (4.1) объясняется из [10], где для $h < 0,5 X_m$ при взаимодействии газа с плоской преградой в центре преграды всегда наблюдается максимум давления.

Для плоских элементов ГДО при использовании в качестве рабочего газа воздуха максимальный перепад давления (p_R/p_2) достигался при $h/d = 9-11$. При $p_R/p_1 < 80$ расстояние, соответствующее максимальному перепаду давления (p_R/p_2), подчиняется зависимости $h = 2X_m$. При увеличении расстояния между элементами ГДО (см. фиг. 3, в) диафрагма 4 выходит из начального участка струи на основной участок, для которого характерен максимальный массоперенос газа по оси струи. Поэтому при дальнейшем увеличении расстояния давление в пушке возрастает, а характер зависимости давления в пушке от давления в камере все более приближается к линейному, подобному кривой 1 (см. фиг. 2), т. е. «эффект полки» пропадает.

Характер взаимодействия потока с элементом 4 при изменении давления в камере аналогичен картине, наблюдаемой при изменении расстояния.

Уменьшение отношения давления в потоке газа (p_R/p_1) сопровождается уменьшением расстояния X_m и поперечных размеров струи, поэтому с уменьшением p_R/p_1 уменьшается поперечное сечение струи, что сопровождается сокращением размеров циркуляционной зоны. При этом снижается отношение расхода эжектируемого газа к эжектирующему (коэффициент эжекции), что ведет, как следует из теории эжекторов [11], к уменьшению предельного давления эжектирования у отверстия d_2 диафрагмы 4. Давление в пушке при этом уменьшается (см. фиг. 2, кривая 3), несмотря на увеличение давления в камере и между диафрагмами

вне струи. Однако при дальнейшем уменьшении p_R/p_1 сокращение размеров струи ведет к устремлению периферийных потоков в отверстие для вывода пучка, и давление в пушке соответственно возрастает.

Таким образом, реализация независимости давления в пушке от давления в камере («эффект полки») может быть обеспечена подбором соответствующей геометрии элементов ГДО, их взаимного расположения и режима эксплуатации устройства в целом. Используя ГДО с плоскими элементами при отверстиях для вывода пучка $d = d_2 = 0,8$ мм, расстоянии между ними $h = 8$ мм и откачке ГДО только двумя отдельными насосами ВН-1 МГ, удалось повысить давление в камере от 13,3 до 40 кПа и сохранить давление в пушке на уровне 5 Па.

Из рассмотренных особенностей взаимодействия газовых струй с преградой видно, что в ряде случаев не только производительность откачных средств, но форма и взаимное расположение элементов ГДО являются решающим фактором для обеспечения перепада давления, а возможности повышения эффективности ГДО во многом зависят от учета струйного характера течения газа между его элементами.

Авторы выражают признательность А. К. Реброву и П. А. Сквородко за полезные обсуждения, стимулирующие развитие данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Г. И. Электронно-лучевая сварка в атмосфере инертных газов.— Сварочное производство, 1971, № 7.
2. Бычков Ю. И., Королев Ю. Д. и др. Возбуждение лазерных сред с помощью электронного пучка, вводимого через газодинамическое окно.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1979, т. 43, № 2.
3. Диагностика потоков разреженного газа/Под ред. С. С. Кутателадзе, А. К. Реброва. Новосибирск: Наука, 1979.
4. Иевлев В. М., Коротеев А. С. Вывод в атмосферу и исследование мощных стационарных электронных пучков.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1981, № 3.
5. Гитт В. Д., Рыльцев П. И. и др. Газоразрядная электронная пушка с выводом пучка в газ среднего давления.— ПТЭ, 1981, № 4.
6. Сенковенко С. А. Экспериментальные методы исследования структуры потока и релаксационных процессов в сверхзвуковых струях газов.— В кн.: 6 Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов. Тезисы докл. Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1979.
7. Кисляков Н. И., Ребров А. К., Шарафутдинов Р. Г. О структуре высоконапорных струй низкой плотности за сверхзвуковым соплом.— ПМТФ, 1975, № 2.
8. Гинзбург И. П., Семилетенко Б. Г., Усков В. Н. Экспериментальное исследование взаимодействия недорасширенной струи с плоской преградой, перпендикулярной оси струи.— В кн.: Газодинамика и теплообмен. Л.: ЛГУ, 1973, вып. 3.
9. Губанова О. И., Луев В. В., Пластинина Л. Н. О центральной срывной зоне при взаимодействии сверхзвуковой недорасширенной струи с преградой.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1974, № 2.
10. Голомазов М. М., Давыдов Ю. М. и др. Исследование полей течений в области взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с преградами.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1982, № 3.
11. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая Динамика. М.: Наука, 1976.

Поступила 9/1 1984 г.

УДК 537.84

ТИРИНГ-НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С КОНЕЧНОЙ ИОННОЙ ВЯЗКОСТЬЮ

В. В. Гатилов, А. М. Сагалаков, В. Ф. Ульченко
(Барнаул)

1. Разрывная неустойчивость представляет собой очень интересное и важное физическое явление, которое интенсивно изучается в последнее время (см., например, [1]). На развитие данной неустойчивости оказывает влияние целый ряд различных физических факторов. Определенное значение имеют течение плазмы вдоль токового слоя и нормальная к слою компонента магнитного поля [2]. На устойчивость токового слоя влияют неоднородности плотности и проводимости, а также перенос проводимости вместе с движением среды (конвекция проводимости).

Одним из важных факторов является ионная вязкость, которая может существенно воздействовать на тиринг-моду. Попытка оценить влияние ионной вязкости бы-