

04

© 1991.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

*А. П. Овчинников, А. А. Тезрюков, Г. Н. Фрейберг*

Применительно к практическому использованию пучково-плазменного разряда в технике описан метод, позволяющий выбирать оптимальный режим (давление рабочего газа, первеанс пушки, энергия электронов пучка) работы установки по КПД пучка, используемого для зажигания и поддержания пучково-плазменного разряда. Приведен графический материал, иллюстрирующий зависимость концентрации, температуры и плавающего потенциала плазмы от давления рабочего газа, энергии электронов пучка и расстояния от пучка, создающего плазму.

### Введение

Пучково-плазменный разряд обладает рядом замечательных свойств, к которым, в частности, относятся возможность достижения высокой степени ионизации вплоть до единицы, относительная простота управления степенью ионизации, температурой, плотностью плазмы. Эти свойства привели к применению пучково-плазменного разряда в технике: получение чистых веществ [1], сухое травление [2] и др.

Вопросу понимания физики процесса пучково-плазменного разряда посвящен ряд теоретических (см., например, [3-6]) и экспериментальных (см., например, [7-10]) работ. Для целей же практического использования пучково-плазменного разряда важно знание технических характеристик разряда. Насколько нам известно, систематических исследований на эту тему в литературе нет, это и послужило поводом для данной работы.

Одной из основных технических характеристик пучково-плазменного разряда служат КПД пучка, используемого для создания разряда, и зависимость этого КПД от таких параметров, как первеанс пушки, давление рабочего газа в камере реактора, энергия электронов пучка. Достаточно сказать, что если микропервеанс пушки меньше единицы, то [11] пучково-плазменного разряда вообще зажечь не удастся. То же относится и к значениям энергии электронов пучка, давлению рабочего газа в камере реактора. К техническим характеристикам пучково-плазменного разряда относятся концентрация, температура, а в ряде случаев и плавающий потенциал плазмы, зависимость этих характеристик от микропервеанса пушки, энергии электронов пучка, давления рабочего газа, а также часто важно знать характер распределения этих характеристик в пространстве камеры реактора.

### Условия эксперимента

Исследования проводились в непрерывном режиме при взаимодействии электронного пучка с созданной им плазмой в продольном магнитном поле на установке, описанной в [11] и состоящей из трех металлических камер с автономной откачкой по высокому вакууму. Диаметр камеры пушки 200 мм, реактора — 300 мм, энергоанализатора — 200 мм. Магнитное поле в камерах пушки и энергоанализатора 400 э, в камере реактора — 100 э. Рабочий газ — воздух.

Пучок ленточный. Катод — вольфрамовая проволока диаметром 0.6 мм и длиной 50 мм. Эксперименты проводили в диапазоне по току от 5 до 400 мА, по энергии электронов — от 100 до 700 эВ, по давлению газа в камере реактора — от  $8 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-3}$  Тор.

Давление рабочего газа (воздуха) в камерах измерялось с помощью вакуумметров типов ВИТ-1 и ВИТ-2. Концентрация и температура плазмы, а также плавающий потенциал измерялись с помощью зонда Ленгмюра, представляющего собой вольфрамовую проволоку диаметром 0.1 мм и длиной 3 мм. Энергию пучка определяли энергоанализатором методом задерживающего потенциала.

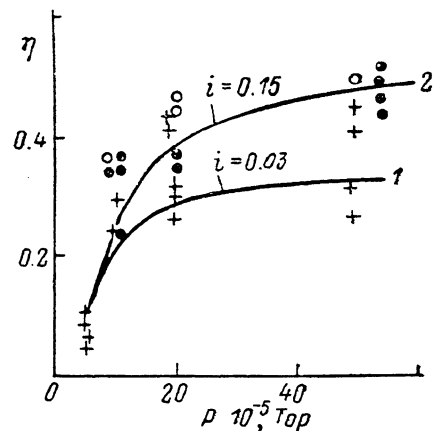


Рис. 1. Зависимость КПД пучка от давления рабочего газа в камере реактора для микропервеансов  $\Pi=5$  (1) и 25 (2).

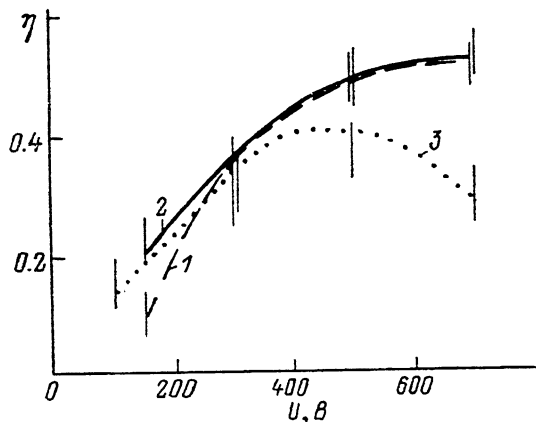


Рис. 2. Зависимость КПД пучка от энергии электронов пучка.

Давление газа  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  Тор. 1 — микропервеанс пучки равен 10; 2, 3 — ток пучка 0.150, 0.05 А соответственно.

### Связь КПД пучка с режимом работы установки

КПД пучка определяли подобно [8, 11] отношением  $\eta = (E_0 - E_1) / E_0$ , где  $E_0$  — энергия пучка до взаимодействия с плазмой,  $E_1$  — энергия пучка после взаимодействия с плазмой. На рис. 1 приведена зависимость КПД от давления рабочего газа (воздуха) в камере реактора для пучка с микропервеансом 5 (кривая 1) и пучка с микропервеансом 25 (кривая 2). Дальнейшее увеличение микропервеанса приводит к повторению результатов, представленных кривой 2 рис. 1. Из рис. 1 видим, что увеличение давления газа от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $20 \cdot 10^{-5}$  Тор приводит к быстрому росту КПД до некоторого значения. Дальнейшее увеличение давления рабочего газа почти не меняет КПД пучка. Вид кривых 1 и 2 зависит также от энергии электронов пучка, которая для рис. 1 равна 314 эВ. На рис. 2 приведены зависимости КПД от энергии электронов пучка. Вид кривой 1 также указывает на наличие (что естественно) некоторого порога, с превышением которого КПД начинает быстро возрастать, достигая значения 0.4–0.5. Дальнейшее увеличение энергии электронов пучка сопровождается незначительным ростом КПД. Вид кривой 1 существенно зависит от давления рабочего газа и микропервеанса пучка. Имеет смысл, естественно, выбрать давление в том диапазоне, где зависимость КПД от давления (при прочих равных условиях) невелика. В частности, данные рис. 2 приведены для давления  $P = 1.5 - 2 \cdot 10^{-4}$  Тор. Микропервеанс для данных, представленных кривой 1 рис. 2, равен 10. Кривая 2 того же рисунка аналогична кривой 1, но уже не для первеанса пучка, а для постоянного тока пучка, равного 150 мА, — при энергии электронов пучка  $eU \geq 200$  эВ и 100 мА — при  $eU = 100$  эВ. В этом случае микропервеанс пучка менялся от 50 до 8 с увеличением энергии пучка. И кривая 2 зависимости  $\eta(U)$  имеет вид, отличный от вида кривой 1 рис. 2 тем, что точки кривой, соответствующие энергии электронов пучка менее 300 эВ, подняты выше аналогичных точек кривой 1. Это связано с тем, что микропервеанс пучки для этих энергий значительно превышает микропервеанс, поддер-

живаемый постоянным и равным 10 при снятии кривой 1. На том же рис. 2 кривой 3 иллюстрируется зависимость  $\eta(U)$  при поддержании тока пучка равным 50 мА. Как и следовало ожидать, участок кривой 3 для энергии электронов пучка  $\leq 300$  эВ примерно совпадает с аналогичным участком кривой 2, а для энергии электронов пучка  $> 300$  эВ скорость подъема кривой 3 начинает отставать от скорости подъема кривых 1 и 2 и при энергии электронов пучка  $\sim 500$  эВ КПД пучка, иллюстрируемый кривой 3, уже не растет, а падает. Ясно, что это падение связано со значительным уменьшением микропервеанса. В частности, для энергии 500 эВ он незначительно превышает 4, а для энергии 700 эВ он уже менее 3. Последнее обстоятельство убедительно показывает на необходимость сравнения характеристик, снятых при постоянном первеансе, а не при постоянном токе, так как в последнем случае меняется не только энергия электронов пучка, но и волновой вектор пучка.

Рис. 1 и 2 показывают, что КПД пучка близок к насыщению при давлении  $\geq 15 \cdot 10^{-5}$  Тор и энергии электронов пучка 500 эВ. На рис. 3 приведена зависимость  $\eta(\Pi)$  от микропервеанса пушки для давления рабочего газа  $P =$

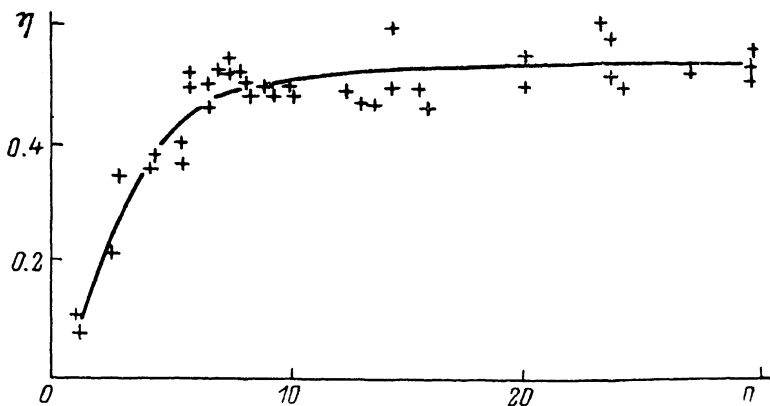


Рис. 3. Зависимость КПД пучка от микропервеанса пушки.

Давление рабочего газа (воздуха) в камере реактора  $P = 1,5 \cdot 10^{-4}$  Тор. Энергия электронов пучка  $eU = 500$  эВ.

$= 1,5 \cdot 10^{-4}$  Тор и  $eU = 500$  эВ, т. е.  $P$  и  $U$  выбраны в тех диапазонах, в которых  $\eta(\Pi)$  от изменения указанных параметров зависит слабо. Видим, что при микропервеансе меньше 1 КПД стремится к нулю. Увеличение микропервеанса до 6 приводит к достаточно быстрому росту КПД до 0,5. Дальнейшее увеличение микропервеанса до 30 практически не меняет КПД. Поэтому в практической работе следует брать пушки с микропервеансом, равным шести. Пушки с меньшим первеансом не позволяют получить большой КПД, пушки же с большим первеансом не реализуют дополнительных затрат на изготовление первеансных пушек.

Из анализа данных рис. 1—3 следует, что для выбора оптимального режима работы пучка на воздухе следует выбрать пушку с микропервеансом  $\sim 6$ , энергией электронов пучка  $\sim 600$  эВ и давлением рабочего газа  $\sim 1,5 \cdot 10^{-4}$  Тор.

### Связь параметров плазмы с режимом работы установки

Параметры плазмы, образованной пучком, также сильно зависят от условий ее создания. Так, на рис. 4 приведены зависимости температуры и концентрации плазмы от давления рабочего газа в камере реактора при энергии электронов пучка 313 эВ и токе пучка 0,11 А. На этом же рисунке приведена кривая зависимости плавающего потенциала плазмы от давления газа. Как показывают данные рис. 4, концентрация плазмы линейно возрастает с увеличением давления газа, а температура электронов плазмы быстро уменьшается при увеличении давления до  $1,5 - 2 \cdot 10^{-4}$  Тор. Дальнейшее увеличение давления

газа приводит к дальнейшему уменьшению температуры плазмы, но скорость этого уменьшения становится меньше. Данные рис. 4 приведены для области газового разряда, непосредственно прилегающей к пучку. С удалением границы

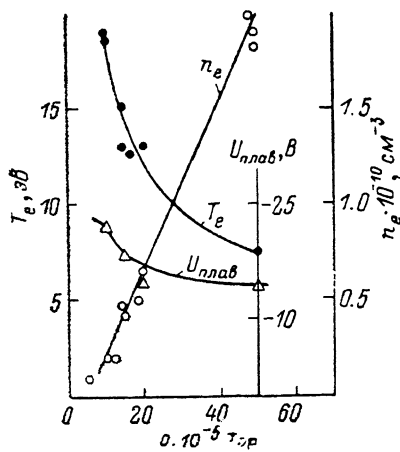


Рис. 4. Зависимость температуры  $T_e$ , плотности  $n_e$  электронов и плавающего потенциала плазмы от давления рабочего газа (воздуха) в камере реактора.

$$eU=313 \text{ эВ}, i=0.11 \text{ А.}$$

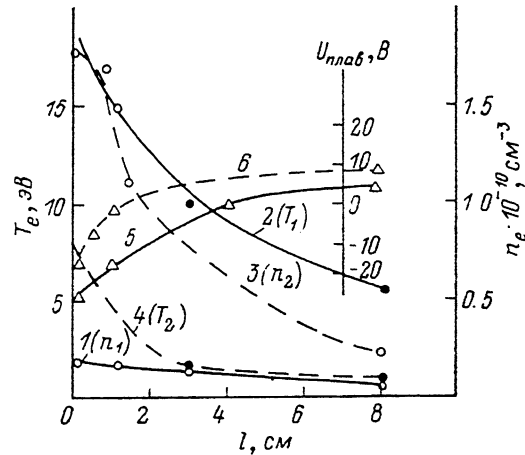


Рис. 5. Зависимость концентрации (1, 3), температуры (2, 4) и плавающего потенциала (5, 6) плазмы от расстояния от пучка электронов.

$$eU=313 \text{ эВ}, i=0.11 \text{ А.}$$

пучка вдоль нормали к поверхности пучка как температура, так и концентрация плазмы уменьшаются. Характер этих зависимостей иллюстрируется кривыми 1—4 на рис. 5. Данные рис. 5 прежде всего показывают достаточно широкую возможность выбора области плазмы с требуемыми параметрами по концентрации и температуре электронов.

Видно, что изменением давления рабочего газа в камере реактора можно эффективно управлять температурой и концентрацией электронов плазмы. Кривые 1, 2 ( $eU=313 \text{ эВ}, i=0.11 \text{ А}, P=1 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$ ) показывают, что резкой границы плазма практически не имеет. Визуальные наблюдения также подтверждают результаты этих измерений. Плазма (светящаяся ее часть) занимает значительное пространство камеры реактора, размеры

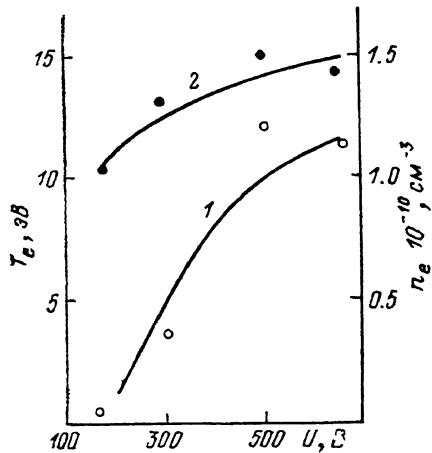


Рис. 6. Зависимость концентрации (1) и температуры (2) плазмы от энергии электронов пучка.

$$P=2 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}, \Pi=10.$$

которой существенно превышают размеры пучка. Кривые же 3, 4 ( $eU=313 \text{ эВ}, i=0.11 \text{ А}, P=5 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$ ), напротив, иллюстрируют быстрое уменьшение температуры плазмы до нескольких электронвольт. Визуально четко видна светящаяся часть плазмы, граница которой примерно совпадает с границей пучка. Однако, судя по данным измерений, иллюстрируемых кривыми 1, 3, плотность плазмы во втором случае значительно выше плотности плазмы в первом случае и на расстояниях, много больших размеров светящейся части плазмы. Сужение области плазмы следует и из рассмотрения кривых 5, 6, иллюстрирующих зависимость плавающего потенциала от расстояния от границы пучка. При давлении рабочего газа в камере  $1 \cdot 10^{-4} \text{ Тор}$  равенство нулю плавающего потенциала наступает на расстоянии 4 см от границы

пучка, в то время как при  $P=5 \cdot 10^{-4}$  Тор это равенство наступает уже на расстоянии всего лишь 1 см от границы пучка. Переход от состояния, иллюстрируемого кривыми 1, 2 рис. 5, к состоянию, иллюстрируемому кривыми 3, 4 рис. 5, происходит не плавно, а скачком. Граница этого перехода приходится на область давления газа (воздуха) в камере в диапазоне  $1.5-2 \cdot 10^{-4}$  Тор. Увеличение энергии электронов пучка незначительно сдвигает эту границу в область более низкого давления, уменьшение энергии электронов пучка сдвигает эту границу в область более высокого давления газа, практически оставаясь в пределах  $1.5-2 \cdot 10^{-4}$  Тор. Переход к состоянию 3, 4 сопровождается существенным увеличением доли высокоэнергичных электронов, энергия которых заметно превышает максимальную энергию электронов пучка. Доля высокоэнергичных электронов зависит еще и от длины зоны взаимодействия пучка с плазмой, о чем было сообщено в [12], в результате чего здесь мы дополнили измерения в этом направлении не проводили.

Зависимость температуры электронов плазмы и концентрации ее от энергии электронов пучка иллюстрируют кривые 1, 2 рис. 6. При снятии кривых рис. 6 микроперванс был равен 10, а давление рабочего газа —  $2 \cdot 10^{-4}$  Тор. Данные рис. 6 показывают рост как температуры, так и концентрации электронов плазмы с увеличением энергии электронов пучка.

### Заключение

Подводя итог сказанному, отметим, что результаты данной работы позволяют определить оптимальные режимы работы установки пучково-плазменного разряда. Оптимальные режимы работы могут зависеть от рода рабочего газа, от конкретного процесса, для которого предназначена данная установка, и ряда других условий. В качестве метода, необходимого для выбора оптимальных режимов по КПД в каждом конкретном случае, можно рекомендовать следующую последовательность действий. Снять серию зависимостей КПД от микроперванса пучка  $\Pi$ , т. е.  $\eta(\Pi)$  для  $U$  и  $P$ , меняемых в качестве параметра. Для каждой отдельной кривой  $\eta(\Pi)$  и  $P$  и  $U$  поддерживают постоянными. Затем таким же образом снять кривые  $\eta(U)$  и  $\eta(P)$ . По полученным данным измерений определить участки 1 параметров  $\Pi$ ,  $U$ ,  $P$ , в которых  $\eta$  наиболее сильно зависит от указанных параметров, и участки 2, в которых  $\eta$  от изменения параметров  $\Pi$ ,  $U$ ,  $P$  почти не зависит. Оптимальному режиму работы установки по  $\eta$  будут соответствовать минимальные значения  $\Pi$ ,  $U$ ,  $P$ , выбранные из участка 2. Подобный подход позволяет быстро выбрать нужный режим работы в данном случае по КПД пучка.

### Список литературы

- [1] Атаманов В. М., Жужунашвили А. И., Левадный Г. В. и др. // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2311—2320.
- [2] Наседкин Ю. Ф., Левадный Г. В., Серов А. А. и др. // ТВТ. 1985. Т. 23. Вып. 1. С. 156—162.
- [3] Михайловский А. Б. Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1975. Т. 1, 2.
- [4] Иванов А. А., Рудаков Л. И. // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. Вып. 5 (11). С. 1522—1534.
- [5] Иванов А. А. Физика сильнонеравновесной плазмы. М.: Атомиздат, 1977. 347 с.
- [6] Гусева Г. И., Дмитриев К. К., Завьялов М. А. и др. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. Вып. 3. С. 366—370.
- [7] Левитский С. М., Шашурин И. П. // ЖЭТФ. 1967. Т. 52. Вып. 2. С. 350—356.
- [8] Березин А. К., Березина Г. И., Болотин Л. И., Файнберг Я. Б. // Атомная энергия. 1963. Т. 14. Вып. 1. С. 249—256.
- [9] Шустин Е. Г., Попович В. П., Харченко И. Ф. // ЖТФ. 1969. Т. 39. Вып. 6. С. 993—1000.
- [10] Овчинников А. П., Теврюков А. А., Фрейберг Г. Н. // Элементарные процессы в химических реагирующих средах. М., 1983. С. 34—39.
- [11] Закатов Л. П., Пляхов А. Г. // ЖЭТФ. 1971. Т. 60. Вып. 2. С. 588—593.
- [12] Овчинников А. П., Теврюков А. А., Фрейберг Г. Н. Физико-химические процессы в преобразователях энергии. М., 1987. С. 15—17.