

УДК 537.52

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ФАКЕЛЬНЫХ РАЗРЯДОВ

И. А. ТИХОМИРОВ, В. В. ТИХОМИРОВ, В. Я. ФЕДЯНИН, А. А. СОЛОВЬЕВ,
В. Н. СЕРГЕЕВ, В. И. ШИШКОВСКИЙ

(Представлена научным семинаром физико-технического факультета)

Проведение современных высокопроизводительных процессов в газоразрядной плазме, и особенно в плазме высокочастотных (в. ч.) разрядов, требует детального изучения основных физических параметров последней с целью их учета при конструировании плазмохимических аппаратов и отработки технологических процессов.

Нами исследовался в. ч. факельный разряд, который, обладая всеми достоинствами высокочастотных разрядов, лишен в то же время таких недостатков индукционного разряда, как невозможность использования последнего в полностью металлических конструкциях.

В. ч. факельный разряд был получен в 1928 году Зилитинкевичем. Работы же по изучению физики и кинетики процессов, протекающих при наличии этого типа разряда с целью эффективного использования его для решения ряда прикладных задач, начали проводиться лишь в последнее время.

В. ч. факельный разряд существует в широком интервале частот питающего в. ч. поля и в широком диапазоне давлений. Основные внешние признаки, отличающие его от других типов разрядов, состоят в том, что при $P > 250$ мм рт. ст. разряд состоит из приэлектродного пятна, тонкого канала и диффузной оболочки. Силовые линии поля не замкнуты, и поэтому разряд может возбуждаться с одного электрода.

Ионизационные процессы преобладают в объеме газа, а вторичные процессы на электродах и на стенках разрядной камеры менее важны. Изменение скорости осевого продува до определенных значений не влияет на температуру газа в канале разряда, но влияет на температуру газа в оболочке. Этот факт позволяет при определенных расходах плазмообразующего газа формировать плазменные потоки с равномерным радиальным распределением газовой температуры и плотности электронов.

Температура факельного разряда в значительной степени зависит от рода плазмообразующего газа. Данные о температуре в. ч. факельного разряда при атмосферном давлении представлены в табл. 1.

При давлениях $P > 250$ мм.рт.ст. газовая температура в. ч. факельного разряда слабо зависит от давления и от подводимой к разряду мощности. Электронная температура в канале разряда практически во всех случаях превышает газовую на порядок и более. Электронная концентрация также зависит от рода плазмообразующего газа и составляет от 10^{11} до 10^{15} см⁻³.

Эквивалентная электрическая схема в. ч. факельного разряда при больших мощностях, вкладываемых в разряд, может быть представлена в виде линии с распределенными параметрами. Такая эквивалентная схема позволяет вычислить эффективные электрические параметры разряда: активное сопротивление, емкость и индуктивность. Эти параметры разряда при $f = 40$ мГц представлены в табл. 2.

Проведенные нами исследования [2] показали, что при конструировании в. ч. плазмотронов необходимо учитывать собственные электрические параметры разряда. Существует несколько моделей факельного разряда, наибольший интерес из которых представляет, на наш взгляд, электродинамическая модель разряда, предложенная А. В. Качановым, Г. С. Треховым [3]. Согласно ей канал разряда представляет собой столб плазмы с распространяющейся по нему электромагнитной волной. Мощность, выделяющаяся при этом в виде омических потерь, рассеивается за счет радиальной теплопроводности.

Существующие в настоящее время теоретические модели не описывают достаточно полно наблюдаемые экспериментальные факты, существуют даже некоторые

противоречия между теоретическими и экспериментальными данными. Кроме того, остается необъяснимым интересный с теоретической точки зрения процесс формирования канала факельного разряда. Поэтому теоретические экспериментальные работы нельзя считать законченными и необходимы дальнейшие исследования в этой области.

Значительное увеличение эффективности применения в. ч. плазмы в технологических целях можно достигнуть, используя модулированный в. ч. разряд.

Получение модулированной плазмы осуществляется с помощью амплитудной модуляции (АМ) поля, питающего разряд. Если в. ч. поле, подводимое к плазме факельного разряда, модулировать по амплитуде с частотой модуляции $\Omega \ll \omega$, где ω — частота в. ч. поля, то амплитуда волны на границе плазмы у электрода может быть записана

$$E = E_0 (1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где Ω — частота модуляции;

ω — несущая частота;

m — коэффициент глубины модуляции.

Для случая, когда коэффициент модуляции невелик ($m \geq 0,4$), искажение глубины модуляции в канале разряда можно не учитывать, хотя последнее будет иметь место вследствие самовоздействия волны. Исходя из этого, для приближенных оценок можно принять, что поле в канале разряда изменяется гармонически по уравнению (1). В соот-

Таблица 1

Газ	Температура, °К
Воздух	3800 ÷ 4200
Азот	4000
Аргон	1400
Смесь аргона с водородом	940
Гелий	900

Таблица 2

I_a [а]	I [м]	R [ом]	C [пф]	L [мкгн]
0,8	0,05	5760	1,36	0,09
1,0	0,10	3080	2,50	0,23
1,2	0,13	2110	2,64	0,33
1,4	0,16	2000	2,78	0,44
1,6	0,22	1750	3,12	0,62

ветствии с законом изменения поля изменяется энергетический спектр электронов. Это делает АМ плазму в ряде случаев еще более неравновесной, чем плазму в ч. разрядов без модуляции.

Указанный факт может быть использован для осуществления реакций с высокими пороговыми энергиями, инициируемых электронами, и общей интенсификацией протекающих в плазме химических процессов. Скорость инициируемых электронами процессов, как известно [4], пропорциональна общей концентрации возбужденных частиц с определяющим процесс уровнем возбуждения.

Проведенные нами исследования позволили установить, что в амплитудно-модулированной плазме при одной и той же мощности разряда, но при различных глубинах модуляции, вместе с ростом T_e и усилением ее неравновесности заметно возрастают от скорости химических процессов с увеличением выхода продукта и улучшением его качества. Отметим также еще одно очень важное свойство высокочастотной АМ плазмы. При давлении 100 мм рт. ст. и выше АМ плазма становится источником акустических полей [5] (звуковых или ультразвуковых в зависимости от частоты модуляции), мощность которых может достигать до 2% от общей мощности разряда.

Разработанные нами модуляторы [6] к в. ч. генераторам различного типа, выпускаемым нашей промышленностью, позволяют получать АМ плазму с частотой модуляции 50—10⁵ гц и регулируемой глубиной модуляции от 0 до 1,0 при несущей частоте поля от 10 до 70 мгц.

Представляет интерес остановиться на особенностях функции распределения электронов по энергиям в в. ч. факельном разряде.

Неравновесная плазма является единой системой взаимодействующих компонентов (атомы, ионы, электроны и т. д.), причем отклонение от равновесия одного из компонентов в практике приводит к аналогичному эффекту для остальных. В соответствии с этим полное математическое описание неравновесной плазмы сводится к системе уравнений, определяющих распределение атомов, молекул и электронов по энергиям.

Первая попытка оценить распределение электронов по энергиям в канале факельного разряда, горящего в молекулярных газах, была сделана в работе Ехта и Кесслера [8], использовавших результаты Маргенау [9]. При этом учитывались лишь неупругие столкновения, приводящие к почти полной потере энергии электронов. Но, как известно в молекулярных газах, таких, как N₂, O₂ или H₂, даже электроны, обладающие энергией в доли электронвольта могут легко возбуждать вращательные уровни молекул ($\sim 10^{-3}$ эв). При этом может оказаться, что столкновения с возбуждением вращательных уровней молекул будут определяющими для электронной функции распределения. Как показывают экспериментальные результаты [10] и теоретические расчеты [11], в плазме канала ВФР существенны лишь такие столкновения электронов, при которых последние в среднем теряют лишь малую долю своей начальной энергии. Нами рассмотрено решение газокINETического уравнения Больцмана в условиях плазмы факельного разряда. Принималось, что распределение ионов и молекул по скоростям максвелловское. Влияние пространственного заряда на функцию распределения электронов по энергиям считалось пренебрежимо малым. Все столкновения с малой относительной долей передачи энергии учитывались с помощью обобщенного параметра

$$\delta(v) \equiv \frac{\sum \frac{2m\nu_m}{M-m} + \sum \frac{\Delta E}{mv^2} \frac{\Delta E}{\kappa T_g} \nu_1}{\sum \nu_m}, \quad (2)$$

где ν_m — частота столкновения для передачи импульса;

ν_1 — частота неупругих столкновений 1 рода.

В выражении (2) предполагается суммирование по всем рассеивающим компонентам и по всем переходам. Полученное нами выражение для симметричной части функции распределения можно представить в следующем виде:

$$f_0 = c \exp - \int_0^v \frac{mvdv}{\kappa T + \frac{2e^2 E^2}{3m\delta(v)(\omega^2 + v^2)}}, \quad (3)$$

где постоянная c находится из условия нормировки

$$n_e = \int_0^\infty f(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (4)$$

На рис. 1 изображена функция распределения электронов по энергиям (кривая 2), полученная нами для канала разряда в воздухе при значениях $T_2 \sim 4 \cdot 10^3$ К, $P \sim 760$ мм рт. ст., $|E| \sim 300$ в/см. Для сравнения здесь же построена максвелловская функция распределения для $T = 4 \cdot 10^3$ °К (кривая 1) и функция распределения Маргенау (кривая 3).

Проведенные исследования по диагностике и физике в. ч. разрядов позволили нам создать ряд плазмотронов факельного типа [1, 6, 7]. Все плазмотроны в металлическом исполнении обладают химической и механической стойкостью, большим ресурсом непрерывной работы (сотни часов) и достаточно высоким к.п.д. (свыше 50÷60%). Проведенные длительные испытания плазмотронов показали, что они удовлетворяют технологическим требованиям и могут быть рекомендованы для промышленного внедрения.

Проблемы исследования химических реакций, осуществляемых в плазме и плазменных струях, требуют, в первую очередь, знания основных параметров применяемой плазмы — «эффективных» температур и концентраций различных частиц и их пространственного временного распределения. Методы определения этих параметров, используемые при исследовании «чистой» плазмы, могут быть применены и для изучения плазмы с введенными в нее реагентами некоторой химической реакции.

Эти соображения и послужили основой для создания исследовательских плазмотронов, один из которых представлен на рис. 2. В таком плазмотроне при проведении плазмохимических реакций можно определять все основные параметры плазмы в. ч. разряда: газовую температуру — T_2 , среднюю энергию электронов T_e , концентрацию электронов n_e , эффективную частоту соударений электронов с тяжелыми частицами — $\nu_{эфф}$, функцию распределения электронов по скоростям.

Как известно, оптимизация плазмохимических процессов возможна лишь при наличии подробной информации о разряде. Принципиально исследовательский плазмотрон может быть выполнен как в виде пря-

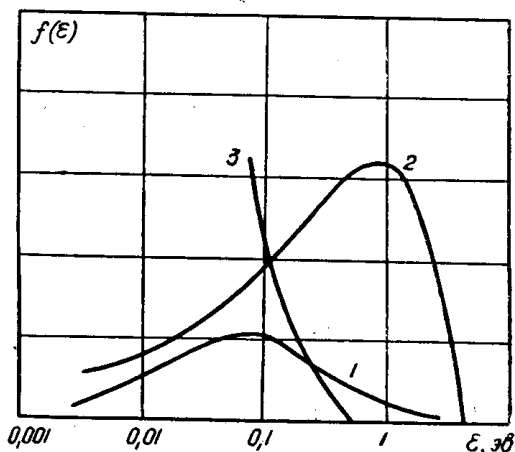


Рис. 1. Функция распределения электронов по энергиям

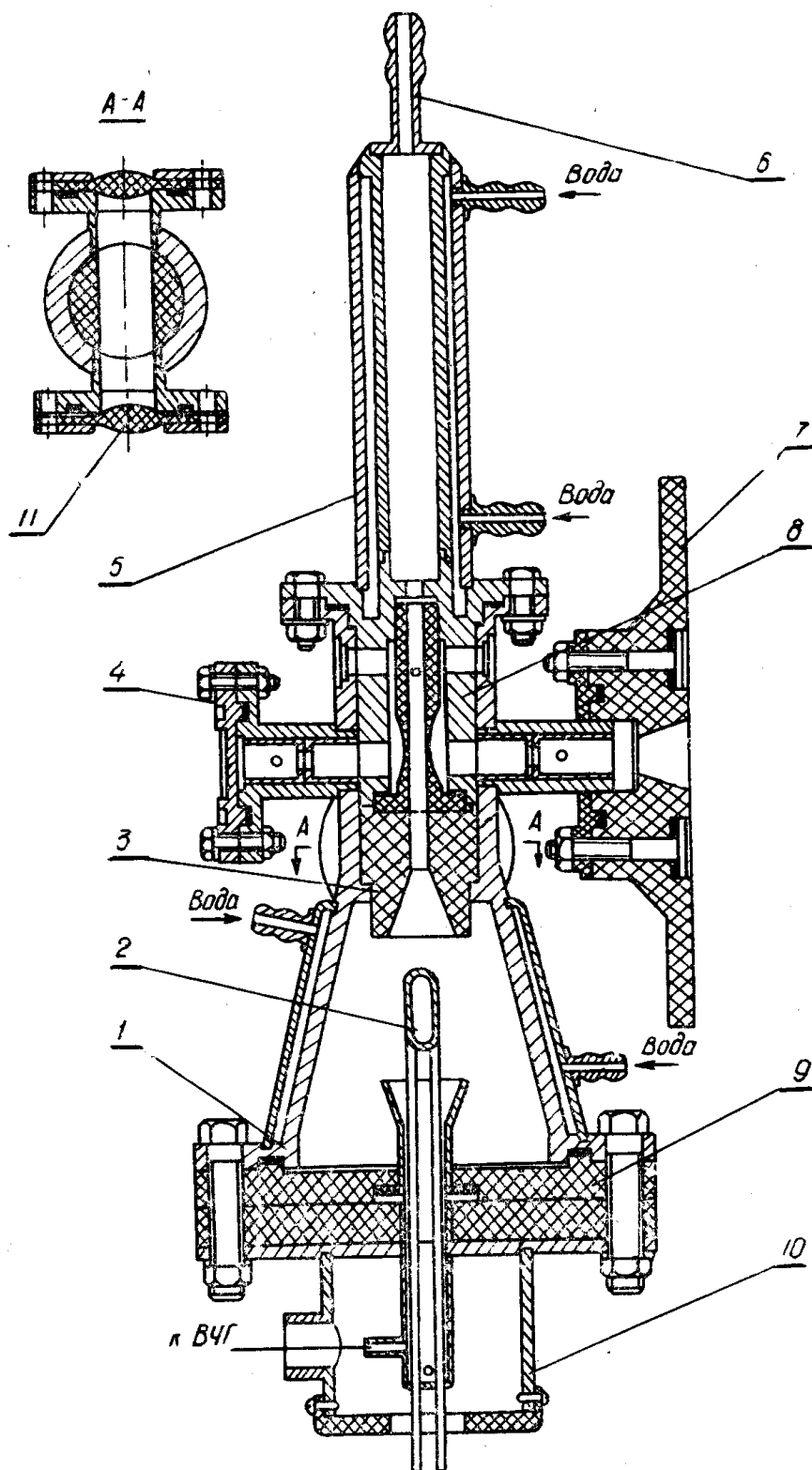


Рис. 2. В. ч. факельный плазмотрон для исследований плазменных технологических процессов

моточного в. ч. факельного плазмотрона, так и в виде плазмотрона взвешенного слоя. К конструктивным особенностям такого плазмотрона относятся вакуумноплотные диэлектрические окна-линзы 11, предназначенные для измерений микроволновыми методами, штуцер 7 с окнами, выполненным из *LiF* для проведения спектральных исследований, камеры для размещения образца 3 твердой фазы и камеры для газодинамического формирования плазменного слоя постоянной геометрии. В плазмотроне применен водоохлаждаемый электрод 2 оригинальной конструкции, совмещенный с устройством для напуска плазмообразующего газа.

Для питания подобного плазмотрона используется в. ч. генераторы мощностью 2—12 кВт с рабочей частотой 5—60 мГц. К. п. д. нагрева газа в плазмотроне составляет 40—65% при давлениях в диапазоне 0,001—1 атм и расходах плазмообразующего газа 0,1—100 л/мин.

Генерируемые плазменные потоки с концентрацией электронов 10^{11} — 10^{17} ом — 3 и электронной температурой 1000—200000°К имеют газовую температуру порядка 1000—5000°К.

Одновременное измерение комплекса плазмофизических параметров в совокупности с электрическими измерениями позволяет получать информацию о механизмах и направленности плазмохимических процессов.

Таким образом, проведенные нами исследования показали большую перспективность использования в. ч. факельного разряда в плазмохимической технологии. Плазмотроны на основе этого типа разряда долговечны, просты в изготовлении и эксплуатации, экономичны, имеют высокий к.п.д. и обладают целым рядом других достоинств.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. Я. Федянин. Известия ТПИ, т. 225, 1972.
2. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. С. Левашов. Известия ТПИ, т. 276, в печати.
3. А. В. Качанов, Е. С. Трехов, Е. П. Фетисов. Сб. «Физика газоразрядной плазмы». Вып. 1. М., Атомиздат, 1968.
4. Очерки по физике низкотемпературной плазмы под ред. Л. С. Полака. М., «Наука», 1971.
5. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. Н. Сергеев. Сб. «Вопросы методики и техники ультразвуковой спектроскопии». Каунас, 1973.
6. В. В. Марусин, И. А. Тихомиров. Сб. «Генераторы низкотемпературной плазмы». М., «Энергия», 1969.
7. И. А. Тихомиров, В. В. Тихомиров, В. М. Савельев, В. Л. Теплоухов, К. Н. Югай, Г. Н. Колпаков, А. П. Кутлин, В. В. Цой, В. П. Дрямов. Сб. «Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы». Алма-Ата, 1970.
8. U. Jecht, W. Kessler. «Phys. Rev.», 178, 133 (1964).
9. H. Margenau. «Phys. Rev.», 73, 297 (1948).
10. Р. Григоровичи, Д. Кристеску. «Оптика и спектроскопия», 6, 129 (1959).
11. I. Japca. «Phys. Letters», A25, 165 (1967).