

водников на переменном токе и перспективы их использования. Техническая сверхпроводимость в электроэнергетике и электротехнике. Опыт и основные результаты сотрудничества стран - членов СЭВ: Сб. тр. М., 1986. С. 123-136.

[3] У и л ь я м с Дж. Сверхпроводимость и ее применение в технике. М.: Мир, 1973. 262 с.

Институт  
физики металлов  
АН СССР

Поступило в Редакцию  
10 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 24

26 декабря 1989 г.

04

## О ЯВЛЕНИИ КРИТИЧЕСКОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ СКОРОСТИ В ПЛАЗМЕННОЙ ЦЕНТРИФУГЕ

С.В. К о р о б ц е в, Д.Д. М е д в е д е в,  
Я.Р. Р а х и м б а б а е в, В.Д. Р у с а н о в

Процессы, происходящие при взаимодействии потоков заряженных частиц с нейтральным газом, играют огромную роль во многих областях физики плазмы. Одно из самых интересных - это явление критической ионизационной Альвеновской скорости. Движение плазмы через нейтральный газ поперек магнитного поля со скоростью выше критической  $V_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon_i}{M}}$  ( $\epsilon_i$  и  $M$  - потенциал ионизации и масса атома соответственно) вызывает лавинную ионизацию газа, при этом расходуется энергия относительного движения и плазма тормозится [1]. Гипотеза Альвена была подтверждена в большом числе различных плазменных экспериментов [2], а для ее объяснения предложено несколько теоретических моделей, однако ни одна из них не является сегодня общепризнанной [3].

Нами исследовались особенности и диапазон существования явления критической скорости в плазменной центрифуге. Для этого измерялись параметры разряда, когда существуют стабилизация разрядного напряжения и его пропорциональность величине магнитного поля, связываемые с явлением критической скорости [1]. Исследования проводились при относительно высоких давлениях в отличие от работы [4], где рассматривались лишь пучковые эксперименты с редкой плазмой.

### Э к с п е р и м е н т а л ь н а я у с т а н о в к а

Эксперименты проводились в импульсной центрифуге с частично ионизованным газом [5]. Разрядная камера установки представляла

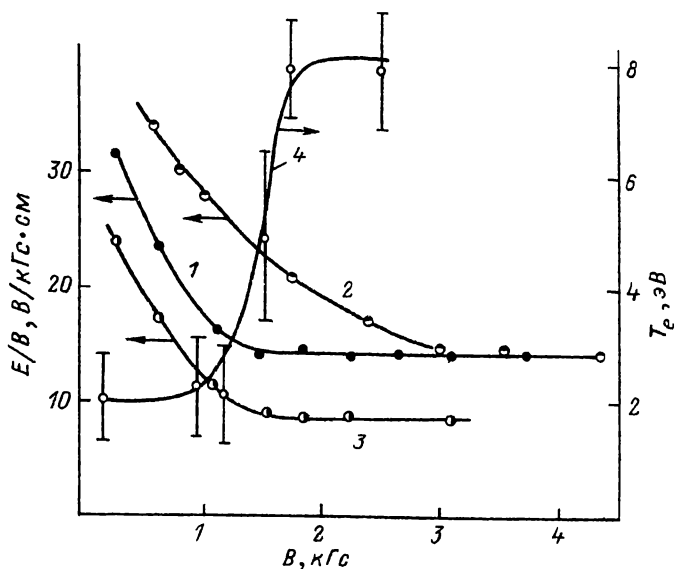


Рис. 1. Зависимости отношения  $E_{\text{ср}}/V$  и температуры электронов от напряженности магнитного поля. Параметры разряда: 1 -  $Ne$ ,  $p=0.09$  Тор,  $J=0.6$  кА,  $D=36$  см ( $D$  - диаметр внешнего электрода); 2 -  $Ne$ ,  $p=0.09$  Тор,  $J=0.6$  кА,  $D=23.5$  см; 3 -  $Ar$ ,  $p=0.09$  Тор,  $J=0.6$  кА,  $D=36$  см; 4 -  $Ar$ ,  $p=0.045$  Тор,  $J=1.8$  кА,  $\tau=4$  мс,  $R=14$  см.

собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 36 и длиной 85 см. В некоторых экспериментах в камеру вставлялся лайнер, уменьшающий диаметр внешнего электрода до 23.5 см. Через торцевые изоляторы внутрь камеры введены два центральных электрода диаметром 5.5 см. Продольное магнитное поле варьировалось от 0.1 до 5 кГс. Радиальное электрическое поле и ток длительностью 10-15 мс создавались разрядом конденсаторной батареи. В качестве рабочих газов использовались аргон и неон при начальных давлениях 0.04-0.5 Тор.

Напряженность электрического поля измерялась с помощью специальных зондов. Температура и концентрация электронов измерялась с помощью одиночного электрического зонда. Средняя плотность электронов составляла в этих экспериментах  $\sim 10^{10}-10^{11}$  см $^{-3}$ .

### Э к с п е р и м е н т а л ь н ы е д а н н ы е

В работе измерялась средняя вдоль радиуса напряженность электрического поля в зависимости от магнитного поля. В дрейфовом приближении скорость вращения плазмы  $V_{\varphi}$  связана с напряженностью

радиального электрического поля  $E$  и напряженностью магнитного поля  $B$  соотношением  $V_{\varphi} = c \cdot \frac{E}{B}$ , а напряжение на разрядном промежутке характеризует среднюю вдоль радиуса скорость вращения. Результаты измерений приведены на рис. 1 в виде зависимости отношения  $\frac{E_{cp}}{B}$  от магнитного поля. На этом же рисунке показана зависимость температуры электронов от магнитного поля при разряде в аргоне. Видно, что существует предельное значение магнитного поля  $B_{кр}$ , ниже которого не соблюдается пропорциональность  $E$  и  $B$ , причем величина  $B_{кр}$  сильно зависит от длины разрядного промежутка (радиуса камеры) и слабо - от рода газа. В нашем диапазоне параметров значение  $B_{кр}$  не зависит от давления газа, полярности и величины разрядного тока. При уменьшении магнитного поля происходит резкое падение температуры электронов, причем скачок наблюдался при величине магнитного поля близкой к  $B_{кр}$ .

В работе также измерялись распределения напряженности электрического поля вдоль радиуса (рис. 2). В прианодном слое значительной толщины наблюдалось увеличение напряженности электрического поля выше величины, соответствующей критической скорости,  $E_{кр} = \frac{V_{кр} \cdot B}{c}$ . При смене полярности электродов слой с повышенной напряженностью электрического поля оставался около анода.

Кроме того, исследования показали, что электронная температура в прианодной области была меньше ( $T_e = 2-3$  эВ), чем в прикатодной ( $T_e = 5-6$  эВ), хотя и наблюдалось некоторое увеличение  $T_e$  в непосредственной близости от анода. Интенсивность свечения плазмы хорошо соответствовала радиальному распределению электронной температуры.

## Обсуждение результатов

Полученные данные показывают, что в центрифуге существует прианодный слой с пониженной электронной температурой и повышенной напряженностью электрического поля, толщина которого растет с уменьшением магнитного поля. Этот слой имеет много общего с известным явлением прианодного падения потенциала в тлеющем разряде в магнитном поле [9, 10], однако использовать предложенные в этих работах теоретические модели для объяснения всей совокупности экспериментальных данных невозможно. Стабилизация напряжения, зависимость разрядного напряжения и напряженности электрического поля от рода газа, их пропорциональность магнитному полю, численные значения отношения  $E/B$ , постоянные в большом диапазоне параметров (вне прианодного слоя), заставили нас, следуя авторам [1, 6, 7], обратиться в интерпретации наших экспериментов к теории критической скорости.

В настоящее время наиболее популярна теория критической скорости, в основе которой лежит явление модифицированной двухпоточковой неустойчивости (МДПН) [6]. Относительное движение поперек

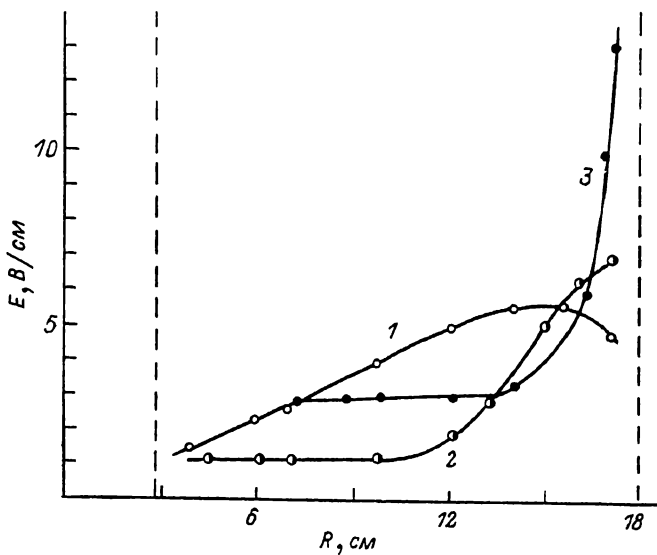


Рис. 2. Радиальное распределение напряженности электрического поля в аргоновом разряде  $J=1.8$  кА: 1 -  $V=95$  Гс,  $p=0.09$  Тор, 2 -  $V=180$  Гс,  $p=0.045$  Тор, 3 -  $V=390$  Гс,  $p=0.045$  Тор.

магнитного поля электронов плазмы и ионов, образующихся при ионизации газа, возбуждает колебания плазмы за счет МДПН. При этом энергия электронов достигает величины  $M \cdot V^2/2$ , здесь  $V$  - скорость относительного движения плазмы и газа. Когда  $V \geq V_{кр}$ , энергия электронов превышает потенциал ионизации нейтральных частиц и происходит быстрая ионизация газа.

Однако около анода всегда существует слой, в котором электроны, получив энергию, попадают на электрод, не успевая ионизовать газ. Кроме того, в пристеночном слое температура электронов снижается за счет более быстрых потерь "горячих" электронов, в результате возрастает энергетическая "цена ионизации". Все это приводит к тому, что в прианодном слое необходим более интенсивный подвод энергии к электронам для развития быстрой ионизации газа (за счет модифицированной двухпотоковой неустойчивости), которая ограничивает скорость дрейфа. Такой подвод энергии становится возможен при большей относительной скорости плазмы и газа, т.е. скорость азимутального дрейфа плазмы становится выше критической, соответственно растет и напряженность радиального электрического поля. Когда величина магнитного поля становится ниже  $V_{кр}$ , напряжение на прианодном слое составляет значительную часть напряжения на разрядном промежутке и пропорциональность напряжения и магнитного поля нарушается.

Исследованы эффекты, проявляющиеся при приближении магнитного поля к критической величине  $V_{кр}$ , ниже которой нарушается пропорциональность напряжения на разрядном промежутке и напряженности магнитного поля. Полученное значение  $V_{кр}$  значительно превышает предельные величины, предсказанные теорией [4].

Экспериментально обнаружено превышение критической скорости в прианодном слое, толщина которого уменьшается с ростом величины магнитного поля.

Обнаружена корреляция между значениями электронной температуры и наличием явления критической скорости.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] A l f v e n H. // Rev. Modern. Phys. 1960. V. 32. N 4. P. 710-713.
- [2] D a n i e l s s o n L. // Astrophis. & Space Sci. 1973. V. 24. N 2. P. 459-458.
- [3] A l f v e n H. Cosmic plasma. Dordrecht, 1981. 216 p.
- [4] B r e n n i n g N. // Phis. Fluids. 1985. V. 28. N 11. P. 3424-3426.
- [5] K o r o b t s e v S.V., K o s i n o v a T.A., R a c h i m b a b a e v Y.R., R u s a n o v V.D. Plasma Chem. & Plasma Proc. 1986. V. 6. N 1. P. 97-107.
- [6] S h e r m a n J.C. Nobel Symp. Uppsala, 1972. N21. P. 315-339.
- [7] Г а л е е в А.А., Х а б и б р а х м а н о в И.Х. В кн.: Итоги науки и техники. Сер. Исследование космического пространства, т. 27, М.: ВИНТИ, 1988. с. 56-142.
- [8] M c B r i d e J.B., O t t E., B o r i s J.P. et al. // Phys. Fluids. 1972. V. 15. N 12. P. 2367-2383.
- [9] Г р а н о в с к и й В.Л. Электрический ток в газе. М.: Наука, 1971. 544 с.
- [10] К е р в а л и ш в и л и Н.А., Ж а р и н о в А.В. // ЖТФ. 1965. Т. 35. В. 12. С. 2194-2201.

Институт  
атомной энергии  
им. И.В. Курчатова

Поступило в Редакцию  
29 мая 1989 г.  
В окончательной редакции  
13 октября 1989 г.