

УДК 537.523.74

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОСТОЯННОГО И СВЧ-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ (КОМБИНИРОВАННЫЕ РАЗРЯДЫ)

Батенин В. М., Роддатис В. К.

Представлены результаты экспериментального исследования процесса подавления винтовой неустойчивости, возникающей в «короткой» дуге ($l_d \approx d_d$) атмосферного давления, в продольном магнитном поле. Экспериментально определены зависимости величины критического приложенного магнитного поля $B_{кр}$ (при котором возникает неустойчивость) от величины вкладываемой в разряд СВЧ-мощности для выбранных плазмообразующих газов — аргона с водородом и азота.

Устойчивость комбинированного разряда в продольном магнитном поле. Как показано в [1], комбинированный разряд можно рассматривать в качестве самостоятельного источника плазмы, обладающего рядом новых свойств, определяющих области его применения. Устойчивость комбинированного разряда во внешнем аксиальном магнитном поле представляет интерес не только с точки зрения практического использования комбинированного разряда, но и позволяет сформулировать общий подход к проблеме подавления винтовой неустойчивости разрядов постоянного тока высокого давления. Переход из цилиндрической в винтовую форму указанных разрядов происходит при определенной комбинации тока и магнитного поля: как внешнего, так и собственного. Критические величины магнитного поля или тока разряда, необходимые для возникновения неустойчивости, определяются набором внешних условий, таких, как длина и диаметр разряда, диаметр стабилизирующего канала, давление, расход и свойства плазмообразующего газа. Физический механизм этого перехода достаточно подробно исследован в [2–4] на основе модельных представлений, которые скорее качественно, чем количественно, согласуются с экспериментом [4–6]. При этом механизм перехода дуги в винтовую форму может быть представлен следующим образом. При определенной комбинации тока через дугу $I=I_{кр}$ и индукции приложенного магнитного поля $B=B_{кр}$ любое случайное радиальное возмущение столба дуги переводит ее в винтовую форму. В каждом сечении элемента дуги при этом выполняется условие динамического равенства скоростей переноса поля изотерм с веществом v_n и собственного движения поля изотерм v_r . Скорость v_n есть результат действия силы $j \times B$, выводящей дугу из состояния равновесия и организующей в каждом ее поперечном сечении поток газа в виде двойного вихря [2]. Скорость v_r оказывает стабилизирующее действие и возникает вследствие радиальной несимметрии тепловыделения и теплоотвода в изогнутом столбе. Из анализа описанного механизма следует, что имеется возможность подавления винтовой неустойчивости при осуществлении направленного воздействия на скорость диффузии поля изотерм v_r . Так как величина v_r определяется радиальным градиентом температуры, возможным способом подавления рассматривае-

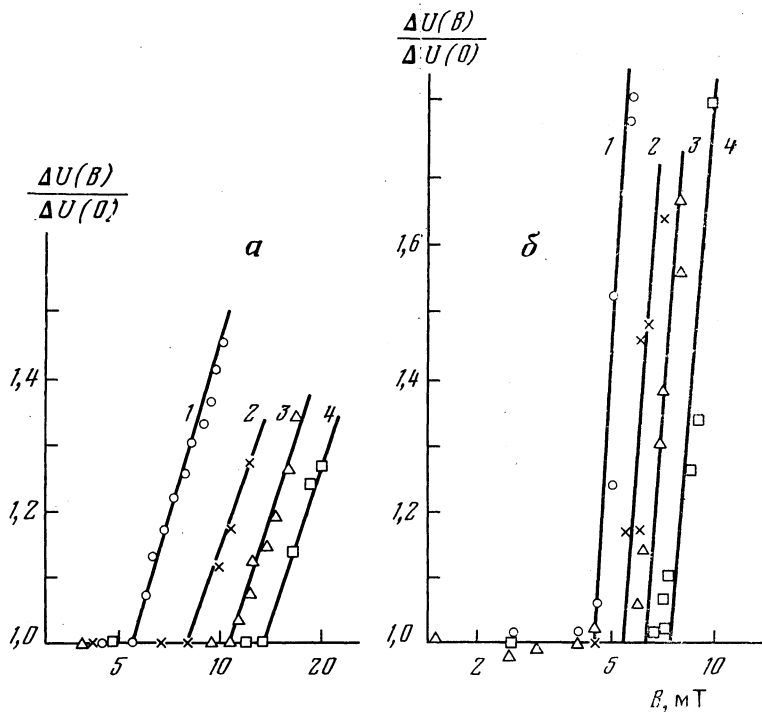


Рис. 1. Зависимость относительного падения напряжения на столбе дуги в Ag с H_2 (а) и N_2 (б) от индукции приложенного продольного магнитного поля ($I=5A$) при значениях $W_{СВЧ}$: 1 — 0; 2 — 0,2 кВт; 3 — 0,36; 4 — 0,45

мой неустойчивости может быть наложение на дугу осесимметричного СВЧ-поля.

Данная часть работы посвящена экспериментальному исследованию этого эффекта. Эксперименты по исследованию влияния СВЧ-поля на винтовую неустойчивость проводились с комбинированными и дуговыми разрядами, описанными в [1]. Магнитное поле создавалось соленоидом с регулируемой величиной индукции магнитного поля B до $0,2 T$ и областью однородного магнитного поля $L=8$ см при длине разряда $1,8$ см, СВЧ-мощность подавалась со стороны катода. Укажем на одну специфическую особенность проведенных экспериментов и полученных в них результатов.

В большинстве известных работ [4–7] изучались длинные дуги ($l_d \geq 20d_d$), причем внешнее магнитное поле на приэлектродные зоны не действовало и принимались специальные меры для исключения влияния этих зон на возникновение неустойчивости. Исследованная в данной работе дуга — короткая ($l_d \approx d_d$), а электроды располагались в зоне действия внешнего магнитного поля. Это поставило вопрос об идентификации неустойчивости, хотя в [6] показано, что и в короткой дуге возникает винтовая неустойчивость с соответствующим значением $B_{кр}$.

В данной работе момент возникновения неустойчивости фиксировался двумя способами: по изменению напряжения на электродах разряда с увеличением B и с помощью регистрации вращения разряда вокруг продольной оси. При этом нужно учитывать, что наличие расширяющейся области вблизи катодного пятна обуславливает существование радиальной составляющей тока, взаимодействующей с внешним магнитным полем. При одинаковых внешних условиях это может привести к существованию области величин $B_{кр}$ вместо единственного значения. На рис. 1 представлены зависимости падения напряжения на столбе разряда (за вычетом

приэлектродных падений напряжения) от индукции приложенного магнитного поля $\Delta U(B)/\Delta U(0) = f(\lg B)$ для разрядов в смеси аргона с водородом и азоте при токе $I=5$ А и различных величинах вкладываемой в разряд СВЧ-мощности. Видно, что экспериментальные точки хорошо аппроксимируются прямыми линиями с одинаковым (для данного рода газа) наклоном, а точки пересечения этих прямых четко фиксируют величину $B_{кр}$, определяемую таким способом с достаточной точностью.

Наблюдаемый разброс точек при $B < B_{кр}$ на рис. 1, б может быть вызван различными причинами, основными из которых, на взгляд авторов, являются следующие. Во-первых, эксперименты с азотным разрядом проводились без кварцевой трубки с осевым потоком газа, вследствие чего разряд имел более четко выраженную коническую форму. Радиальная составляющая тока могла в этом случае стимулировать более раннее развитие неустойчивости. Другая причина состоит в том, что в плазмобразующем газе имелись примеси кислорода, который окислял поверхность электрода. В результате облегчались условия для перемещения катодного пятна по поверхности, что могло приводить к флуктуациям напряжения горения. Определяющую роль второй причины подтверждает специально проведенное исследование, в котором азотный разряд помещался в кварцевую трубку с тангенциальным обдувом для придания ему цилиндрической формы. Величины $B_{кр}$ в этом случае совпадали с величинами, полученными при осевом подводе, однако в области $B < B_{кр}$ отдельные значения $\Delta U(B)/\Delta U(0)$ лежали также в интервале 0,97–1,03. Отличие отношения $\Delta U(B)/\Delta U(0)$ от единицы при $B < B_{кр}$ в азоте затрудняет точное определение $B_{кр}$, поэтому она определялась так же, как и для разряда в аргоно с водородом. Полученная величина носит несколько условный характер, однако при последующем анализе важно не абсолютное значение $B_{кр}$, а ее относительное изменение при наложении на дугу СВЧ-поля. Это изменение определяется рассматриваемым способом, на взгляд авторов, с достаточной точностью.

Сводный график величин $B_{кр}$ представлен на рис. 2, где каждая точка — среднее нескольких измерений, проведенных в разное время и различающихся не более чем на 10%.

Второй способ фиксации момента возникновения неустойчивости сводился к определению формы разряда и частоты его вращения вокруг продольной оси. С этой целью проводились визуальные наблюдения и фотографирование разряда с использованием стробоскопа. На рис. 3 представлена зависимость измеренной частоты вращения разряда от индукции приложенного магнитного поля. Видно, что вращение разряда возникает с некоторого критического значения магнитного поля, согласующегося со значениями $B_{кр}$, определенными по росту напряжения на разряде. Минимальное значение наблюдаемой частоты (~ 300 Гц) согласуется с оценкой частоты вращения тангенциального потока, стабилизирующего разряд.

Исследования формы разряда показали, что при $B > B_{кр}$ он имеет винтовую форму, а четкая привязка к электродам как бы навивает разряд на бочкообразную поверхность, образованную эллипсоидом вращения.

Все это позволяет с уверенностью говорить о возникновении в исследуемых коротких дуговых и комбинированных разрядах во внешнем аксиальном магнитном поле винтовой неустойчивости, причем значение $B_{кр}$ может быть надежно измерено.

Основная цель данного исследования — количественно описать стабилизирующее действие СВЧ-поля, т. е. определить зависимость $B_{кр}^{СВЧ}/B_{кр}^0 = f(W_{СВЧ})$, где $B_{кр}^{СВЧ}$ и $B_{кр}^0$ — значения критических магнитных полей в комбинированном и дуговом разрядах при одинаковой величине постоянного тока I . Анализ стабилизирующего влияния СВЧ-поля проведем в рамках модели, предложенной в [3]. В этой работе в линейном приближении рассматривается задача устойчивости столба «длинной» дуги в собственном или приложенном магнитном поле, причем в любом поперечном сечении неподвижного изогнутого столба выполняется равенство $|\mathbf{v}_n| = |\mathbf{v}_r|$. Проанализируем, к чему в случае «длинной» дуги приводит наложение на нее СВЧ-поля. Обозначим полную поглощенную мощность в единице длины разряда $L = L_d + L_{СВЧ}$, где $L_d = IE$ и $L_{СВЧ} = W_{СВЧ}/l$ (справедливость такого выбора $L_{СВЧ}$ показана в [4]). Условие устойчивости,

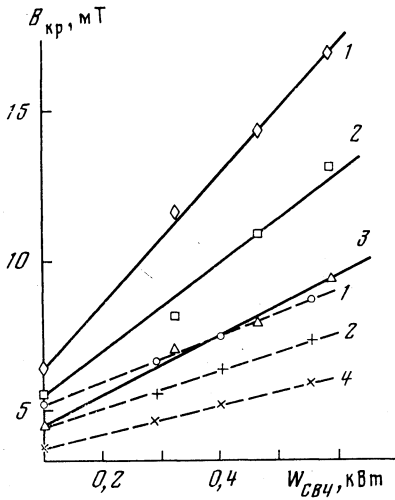


Рис. 2

Рис. 2. Зависимости величины критического приложенного магнитного поля $B_{кр}$ от вкладываемой в разряд СВЧ-мощности (сплошные линии — Ar с N_2 , штриховые — N_2) для тока дуги: 1 — 3,5 А; 2 — 5,0; 3 — 7,5; 4 — 7,0

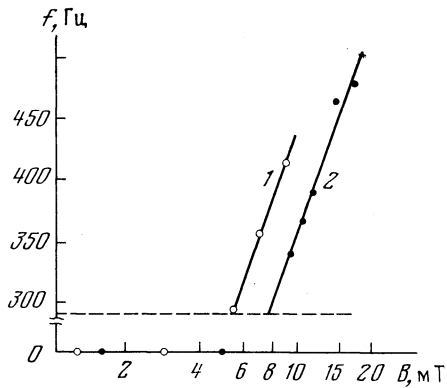


Рис. 3

Рис. 3. Наблюдаемая частота вращения Ar- N_2 -разряда от индукции приложенного магнитного поля: 1 — $W_{свч}=0$; 2 — $W_{свч}=0,36$ кВт ($I=5$ А). Штриховая линия — оценка частоты вращения прямого разряда

согласно [3], выражается в виде $f_1 f_4 - f_3 = 0$, коэффициенты f_i могут быть расшифрованы следующим образом. Коэффициент f_3 характеризует движение газа со скоростью v_m в сечении изогнутой дуги под действием силы $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ и остается постоянным, поскольку $I = \text{const}$ в дуговом и комбинированном разрядах. Коэффициенты f_1 и f_4 , характеризующие стабилизирующее действие скорости v_r за счет трения столба дуги при его движении и движение поля изотерм, пропорциональны L . Записанное выше условие устойчивости в размерном виде может быть представлено следующим образом:

$$\rho h / \eta \cdot BIR / L = z_4 z_6 / y, \quad (1)$$

где все величины имеют тот же смысл, что и в работе [3], а L определено выше. Легко показать, что (1) можно привести к виду

$$(\rho h / \eta) (RB_{кр}^{свч} / E(W_{свч})) (1 + L_{свч} / L_d)^{-1} = z_4 z_6 / y, \quad (2)$$

которое справедливо и для дугового разряда, если положить $L_{свч} = 0$ и использовать соответствующие значения $B_{кр}$ и E . Наконец, взяв отношение выражений (2) для комбинированного и дугового разрядов и пренебрегая различием $(\rho h / \eta)_{комб}$ и $(\rho h / \eta)_d$, $R_{комб}$ и R_d , а также комплексов в правой части (2), получим

$$(B_{кр}^{свч} / B_{кр}^0) (E(0) / E(W_{свч}))^{-1} = L_{свч} / L_d. \quad (3)$$

Применительно к короткой дуге более или менее последовательный теоретический анализ влияния СВЧ-поля провести не удается. Однако можно качественно рассмотреть два предельных случая. В первом случае анализ, выполненный для единицы длины дугового столба, распространяется на всю дугу и вместо удельных характеристик дуги используются ее интегральные характеристики: полное напряжение на дуге и полные вкладываемые мощности. В этом случае уравнение (3) преобразуется к виду

$$(B_{кр}^{свч} / B_{кр}^0) (U(0) / U(W_{свч})) - 1 = W_{свч} / W_d. \quad (4)$$

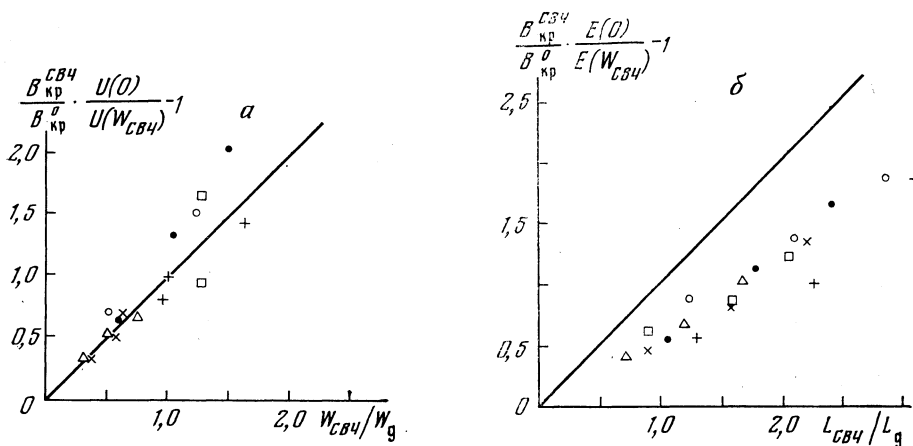


Рис. 4. Обработка экспериментальных данных по зависимостям: *a* — (4), *б* — (3).

На рис. 4, *a* представлены экспериментальные данные, обработанные в соответствии с (4). Второй предельный случай сводится к тому, что в приэлектродных зонах неустойчивость не развивается, ее источником является только столб разряда. Тогда следует пользоваться выражением (3), в котором $E(W_{\text{СВЧ}})/E(0)$ даны в [1], а сделанное там предположение о равномерности вклада СВЧ-мощности по длине разряда позволяет определить $L_{\text{СВЧ}}$. На рис. 4, *б* представлены экспериментальные точки, обработанные в соответствии с (3). Из сравнения рис. 4, *a* и *б* видно, что в лучшем согласии с результатами расчета по принятой модели (сплошная линия на обоих рисунках) находятся точки на рис. 4, *a*, в особенности данные для разряда в N_2 . Одновременно значительное отклонение данных по $\text{Ag}-\text{H}_2$ -разряду, в особенности при $L_{\text{СВЧ}}/L_{\text{д}} > 1,5$, указывает на несовершенство выбранной модели.

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают, что с большей вероятностью за возникновение винтовой неустойчивости в рассматриваемых условиях несут ответственность приэлектродные зоны. Наложение на разряд СВЧ-поля приводит к смещению границы неустойчивости в область больших магнитных полей. Количественно это смещение связано с вкладываемой в разряд СВЧ-мощностью соотношением

$$\Delta B_{\text{кр}}/B_{\text{кр}}^0 \leq W_{\text{СВЧ}}/W_{\text{д}},$$

что свидетельствует о высокой «цене» рассматриваемого метода подавления.

В заключение укажем на экспериментальный факт, выходящий за рамки рассматриваемого линейного приближения. Стабилизирующее действие СВЧ-поля проявляется не только в увеличении $B_{\text{кр}}$ для комбинированного разряда по сравнению с дуговым. Дуга, помещенная в магнитное поле с $B^* > B_{\text{кр}}$ (с развившейся винтовой неустойчивостью), при подведении к ней СВЧ-мощности достаточной величины, такой, чтобы выполнялось условие $B_{\text{кр}}^{\text{СВЧ}} > B^*$, приобретает цилиндрическую форму. Напряжение горения на разряде при этом падает и становится равным напряжению горения комбинированного разряда в отсутствие магнитного поля. Увеличение, например, тока вновь приводит к возникновению неустойчивости с $B_{\text{кр}}^{\text{СВЧ}}$, соответствующим данной комбинации тока через разряд и вкладываемой СВЧ-мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батенин В. М., Роддагис В. К. О некоторых особенностях разрядов атмосферного давления при совместном воздействии постоянного и СВЧ — электрических полей (Комбинированные разряды).— ТВТ, т. 18, № 6, с. 1137.
 2. Ulenbusch I. Miscellaneous Arc Devices.— Proc. XII ISPIG, invited papers, Endhoven, 1975, p. 2.
 3. Ragaller K. Investigations on Instability of Electric Arcs.— Z. Naturforsch, 1974, v. 29A, p. 556.
 4. Man Chen Yuen. Stability of the Poiseville Plasma Arc in an Axial Magnetic Field.— Phys. Fluids, 1966, v. 9, p. 1140.
 5. Менгель Ю. Магнитная неустойчивость электрической дуги. В кн.: Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. Новосибирск: СО Наука, 1977, с. 182.
 6. Асиновский Э. И., Афанасьев А. А., Пахомов Е. П. Спиральная форма дугового столба: условия и область существования.— ДАН СССР, 1976, т. 231, с. 326.
 7. Афанасьев А. А. Исследование винтовой неустойчивости столба дуги высокого давления в магнитном поле: Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук, ИВТАН, М. 1977.
-