

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1964

А. Р. АХМЕДОВ, А. А. ЗАЙЦЕВ

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО СТОЛБА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Приведены результаты измерений критического магнитного поля для развития винтовой неустойчивости в положительном столбе в продольном магнитном поле при наличии высокочастотного электрического поля.

Приводятся также данные о влиянии длины столба плазмы на критическое магнитное поле.

Введение

Согласно теории винтовой (токово-конвективной) неустойчивости положительного столба в магнитном поле, предложенной В. В. Кадомцевым и А. В. Недоспасовым [1], критическое магнитное поле B_k для возникновения неустойчивости зависит от продольного градиента потенциала в столбе. В данной работе дается экспериментальная проверка указанного следствия теории. Для этого необходимо изменять градиент потенциала, не нарушая или не изменяя в заметной степени другие характеристики положительного столба. В описываемых опытах градиент потенциала изменялся воздействием на столб высокочастотным полем достаточно мощным, чтобы вызвать заметную дополнительную ионизацию в газе. Аналогичные исследования по влиянию ВЧ-поля на B_k , совпадающие по своей общей цели, проводились ранее [2, 3].

Часть опытов проводилась с использованием относительно слабого переменного поля на различных частотах. Результаты этих опытов могут рассматриваться как дополнительное качественное подтверждение представления о механизме неустойчивости, выдвинутого в [1].

В первых опытах [4] по неустойчивости положительного столба в магнитном поле использовались длинные трубки, в которых отношение длины столба плазмы к его радиусу $\frac{L}{R}$ было порядка 400. Предпола-

галось [4], что в менее длинных трубках явление может усложниться за счет указанных Саймоном [5] эффектов короткозамкнутых токов. В последней части настоящей работы исследуется зависимость величины B_k от значения $\frac{L}{R}$.

§ 1. Экспериментальная установка и аппаратура

Измерения проводились в плазме, образованной в прямых цилиндрических стеклянных трубках с расстоянием анод—катод 100, 40 и 30 см и внутренним радиусом 0,9, 1,25 и 1,5 см. В трубках использовался оксидный катод. Анод был сделан из листового молибдена и представлял собой полый конус высотой 3 см и диаметром основания около $\frac{4}{5}$ величины диаметра трубки. Выбранная конструкция анода помогала избежать нежелательных анодных колебаний [6]. Плоский стеночный зонд, сделанный из круглого вольфрамового диска толщиной 0,2 мм и диаметром 0,4 см, служил для измерения ионного тока на стенку; он помещался в средней части трубки. Трубки длиной 100 и 40 см были снабжены также двумя зондами из молибденовой проволоки диаметром 0,1 мм, которые располагались симметрично относительно стеночного зонда на расстоянии 20 см друг от друга. Цилиндрические зонды предназначались для измерения продольного градиента потенциала.

Трубки прогревались под откачкой при температуре 400° в течение двух часов. После этого производилось тщательное обезгаживание анода прогреванием индукционной печью. Активация катода происходила обычным способом. Между откачиваемой трубкой и вакуумной системой помещалась ловушка, охлаждаемая жидким воздухом. Давление остаточных газов, измеряемое ионизационным манометром, не превышало 10^{-6} мм рт. ст.

Наполнением служил спектрально чистый гелий при давлениях от 0,1 до 1 мм рт. ст. Разряд питался от стабилизированного выпрямителя через безындукционное сопротивление. Анодный ток менялся, достигая 500 ма. Спектр шума исследовался с помощью селекционного микрольтметра типа ИП-12-2М, на который напряжение подавалось либо с «плавающего» зонда, либо с сопротивления, включенного в цепь.

Трубки помещались вдоль оси магнитной катушки длиной 60 см, которая создавала достаточно однородное регулируемое магнитное поле 0—2500 гц.

В опытах с наложенным переменным полем применялись трубки длиной 100 см. Катод и анод размещались далеко от катушки, в пространстве, свободном от магнитного поля. В одной группе опытов (§ 2,а) для создания осциллирующего поля использовался мощный генератор. В других опытах (§ 2,б) для этой цели применялся мало-мощный генератор 100-И, позволяющий менять частоту от 10 до 10^4 кГц.

§ 2. Результаты при использовании дополнительного высокочастотного поля

а. Влияние на критическое магнитное поле высокочастотного поля большой амплитуды

При действии высокочастотного поля на положительный столб разряда постоянного тока часть энергии, расходуемой на поддержание стационарного состояния плазмы, черпается из этого поля. Поэтому, если на столб наложено достаточно сильное внешнее ВЧ-поле, то продольный градиент потенциала в нем уменьшается. Посредством увеличения или уменьшения напряженности переменного поля можно плавно регулировать величину градиента потенциала.

В рассматриваемых в этом разделе опытах для создания ВЧ-поля в одном случае переменное напряжение подавалось на два кольцевых

электрода, охватывающих трубку в области положительного столба (расстояние между электродами 50 см). В другом случае переменное напряжение подводилось к концам намотанного на трубку соленоида. Применялись частоты 5 и 7,2 мГц.

На рис. 1 пунктирной кривой показаны результаты измерений критического магнитного поля в зависимости от продольного градиента потенциала: данные относятся к двум значениям анодного тока 30 и 100 ма. Точки и заполненные треугольники представляют результаты при возбуждении ВЧ-поля с помощью кольцевых электродов; кружки и незаполненные треугольники — при возбуждении с помощью соленоида. Для сравнения на рис. 1 показаны две кривые (А и В), вычисленные на основе формул теории [1] при различных значениях электронной температуры. Из рисунка видно, что общий вид экспериментальной зависимости B_k в функции от E_k соответствует ходу кривых, предсказанных теорией: с уменьшением градиента потенциала критическое магнитное поле возрастает. Кривая А построена на постоянном значении T_e , которое определялось из зондовых измерений при нулевом магнитном поле. Она заметно расходится с экспериментальной кривой по абсолютным значениям ординат, причем при больших магнитных полях это расхождение увеличивается. Последнее может быть обусловлено отчасти зависимостью B_k от электронной температуры. Как известно, температура T_e в положительном столбе в присутствии магнитного поля становится меньше, чем в его отсутствие, и ее значение зависит от величины поля. При учете этого изменения величины T_e может быть достигнуто лучшее количественное согласие между расчетными данными и результатами наблюдения. Кривая В представляет результат такого рассмотрения. Уменьшение электронной температуры при различных значениях $\frac{V}{p}$ приближенно оценивалось на основании данных работы [8].

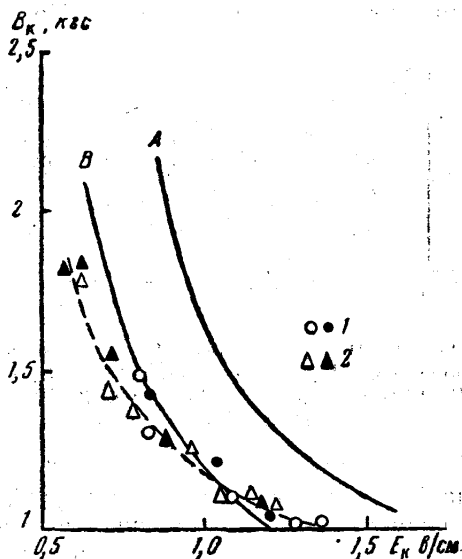


Рис. 1. Зависимость B_k от E_k . Гелий, $p = 0,26$ мм рт. ст., $R = 1,5$ см. А — расчетная кривая при $T_e = 57\,000^\circ\text{K}$, 1 — 30 ма, 2 — 100 ма

б. Действие на критическое магнитное поле переменного поля малой амплитуды. Влияние частоты наложенного поля

На кольцевой электрод, создающий поле высокой частоты, накладывалось переменное поле 10—20 в относительно земли. При таких напряжениях возбуждаемое ВЧ-поле было слабым и приводило лишь к незначительному (в пределах нескольких процентов) уменьшению градиента потенциала в положительном столбе. Тем не менее наблюдения показали, что и при этих условиях в присутствии поля высокой ча-

стоты в некоторой области частот величина $B_{к}$ несколько изменяется.

Этот эффект был обследован при помещении кольцевого электрода в различных положениях вдоль разрядной трубки. Найдено, что он больше, когда электрод помещен на средней части трубки, находящейся в пределах магнитной катушки. Результаты измерений для различных токов при давлении 0,2 мм рт. ст. приведены на рис. 2. На этом рисунке по ординате отложено отношение $B_{кf\sim}/B_{к0}$ критического магнитного поля при наличии ВЧ-поля к критическому магнитному полю при нулевом ВЧ-поле. В определенном интервале частот приложенного поля $f\sim$ это отношение меньше единицы и оно проходит через минимум при некотором значении $f\sim$. Положение минимума слегка смещается

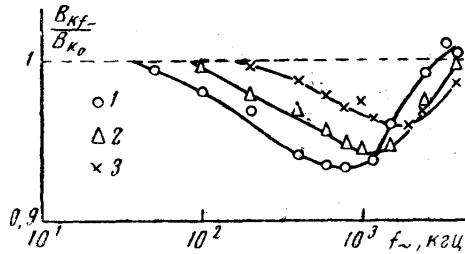


Рис. 2. Влияние частоты f_{\sim} переменного поля на $B_{к}$. Гелий, $p = 0,2$ мм рт. ст., $R = 1,5$ см, сила тока: 1—15 ма, 2—30 ма, 3—60 ма, $B_{к0} = 920$ гс

в зависимости от величины разрядного тока. Необходимо отметить, что в данном случае изменение критического магнитного поля противоположно изменению, наблюдавшемуся в опытах с использованием сильного ВЧ-поля.

Одновременно было также замечено уменьшение под влиянием ВЧ-поля ионного тока на стенку в области расположения кольцевого электрода. Это уменьшение могло возникнуть из-за неоднородности поля по радиусу столба в этой области. Известно [9], что в ВЧ-поле с изменяющейся

в пространстве амплитудой на заряженную частицу действует средняя сила, направленная в сторону уменьшения амплитуды. В случае, если частица движется в газе, выражение для этой силы имеет вид [10, 11]

$$F = - \frac{e^2}{4(\omega^2 + \nu^2)m} \frac{dE^2}{dx}, \quad (1)$$

где e и m — соответственно заряд и масса частицы, E и ω — амплитуда и частота поля, ν — частота столкновений частицы. Действие F должно вызвать уменьшение эффективного коэффициента диффузии частиц в направлении к стенкам. Изменение ионного радиального тока при наложении на столб неоднородного ВЧ-электрического поля экспериментально наблюдалось недавно в [10]. В этой работе изучалась частотная зависимость наблюдаемого явления и, в частности, было показано существование для него нижней частотной границы. Результаты [10] относятся к немагнитной плазме.

Данные измерений авторов приведены на рис. 3. За ординаты взято отношение ионного тока на стенку $i_{wf\sim}$ при действии ВЧ-поля к ионному току i_{w0} в отсутствие поля, а за абсциссы — частота $f\sim$. Кривые 1, 2, 3 представляют результаты измерений, когда положительный столб находится в магнитном поле; кривыми 1,а, 2,а и 3,а показаны результаты для случая, когда магнитное поле отсутствует. Последние находятся в согласии с данными [10]. Сравнивая кривые рис. 2 для случая $H \neq 0$ с кривыми рис. 3, нетрудно заметить, что частотные зависимости отношений $B_{кf\sim}/B_{к0}$ и $i_{wf\sim}/i_{w0}$ имеют одинаковый характер. Поэтому можно предположить, что имеется связь между наблюдаемым изменением величины критического магнитного поля и изменением ионного тока на стенку. Такое предположение согласуется с

теорией Кадомцева и Недоспасова. По этой теории радиальная диффузия носителей зарядов является фактором, регулирующим механизм винтовой неустойчивости, причем с уменьшением диффузии величина V_k должна понижаться. Интересно, что критическое магнитное поле чувствительно к уменьшению i_w , происходящему в пределах сравнительно небольшого участка положительного столба длиной в несколько сантиметров в той области, где расположен кольцевой ВЧ-электрод. Отсюда можно сделать вывод, что при увеличении магнитного поля неустойчивость инициируется раньше в этой области.

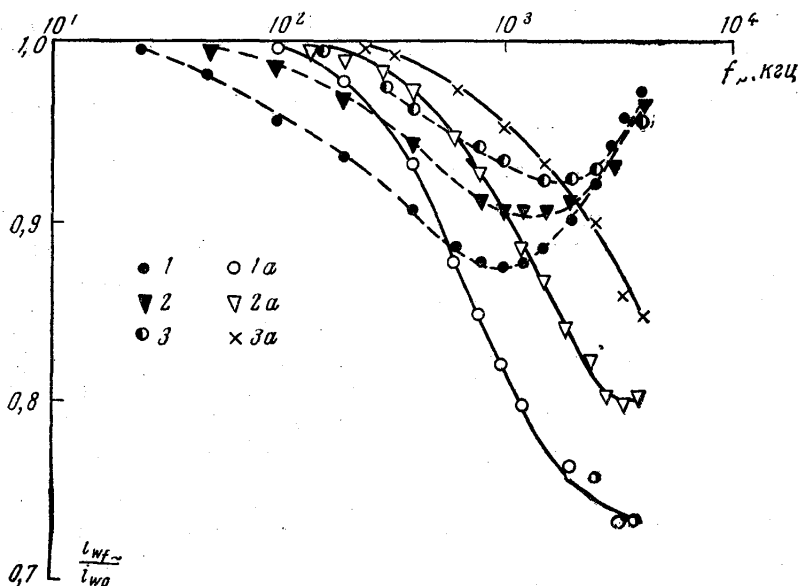


Рис. 3. Зависимость относительного изменения ионного тока на стенку от частоты приложенного переменного поля. Гелий, $p=0,2$ мм рт. ст.; $R=1,5$ см. Сила тока: 1 и 1а — 15 ма, 2 и 2а — 30 ма, 3 и 3а — 60 ма, 1а, 2а, 3а — $V=0$; 1, 2, 3 — $V=870$ в, $V_{к0}=920$ в

§ 3. Влияние длины положительного столба

Как было отмечено, первые опыты по винтовой неустойчивости [4] проводились с длинными разрядными трубками с применением весьма длинной магнитной катушки (4 м). Подчеркнем, что результаты измерений критического магнитного поля при длине катушки 60 см в трубках длиной 90—100 см и радиусами 1,5—0,5 см при давлении от 0,1 до 0,5 мм рт. ст. [7] хорошо согласуются с результатами работы [4].

Б. Б. Кадомцев [12] указывает, что в достаточно короткой катушке может иметь место стабилизирующий эффект, и положительный столб в таких условиях может находиться в устойчивом состоянии при любом магнитном поле; при этом наименьшая длина катушки, при которой еще возможно возникновение неустойчивости, должна быть порядка длины корреляции пульсации электрического поля, которая выражается формулой

$$l \approx \Omega_e \tau_e R, \quad (2)$$

где Ω_e — циклотронная частота электронов, τ_e — среднее время между электронно-атомными столкновениями, R — радиус трубки.

Для проверки этих представлений были проведены опыты, в которых длина положительного столба (L), находящегося внутри катушки, уменьшалась, начиная от 60 см. Измерения проводились с трубками длиной 100, 40 и 30 см и радиусами 1,5, 1,25 и 0,9 см. Трубка радиусом 1,25 см была снабжена подвижным анодом, благодаря чему длина положительного столба могла непрерывно меняться. В первом варианте опытов длина L изменялась удалением от конца катушки одного из концов трубки, в которые впаяны анод и катод. За длину L принималась длина того участка положительного столба, который находился в области однородного магнитного поля. (Области неоднородности магнитного поля находились на 5 см от краев катушки.) В случае удаления от катушки анодного конца трубки катодная область попадала внутрь соленоида.

Магнитное поле, уменьшая поперечную диффузию носителей зарядов, увеличивает протяженность катодной области (d) на множитель $\left(\frac{D_{\parallel}}{D_{\perp}}\right)^{1/2}$, где D_{\parallel} и D_{\perp} — коэффициенты продольной и поперечной амбиполярной диффузии [13, 14]. Например, для трубки радиусом 1,25 см при давлении 0,8 мм рт. ст. и магнитном поле 1800 гц протяженность катодной области составляет 5 см. Это изменение величины d в магнитном поле учитывалось при оценке значения L . Во втором варианте опытов с трубкой радиусом 1,25 см длина L менялась путем перемещения анода. Кроме того, были проведены также измерения с трубками длиной 40 и 30 см, радиусом 1,25 см при давлении 0,8 мм рт. ст. Эти трубки полностью помещались внутри катушки в области однородного магнитного поля. При этом анод и катод располагались симметрично относительно середины катушки.

Во всех опытах была обнаружена одна общая черта: при уменьшении L критическое магнитное поле сначала практически неизменно, пока L не достигает некоторого значения L_k , зависящего от радиуса трубки и давления, затем начинается крутое возрастание критического поля. При еще меньших значениях L положительный столб оставался в устойчивом состоянии при наибольших использованных полях (2,5 кгс). Следует отметить, что в области постоянного значения B_k частота вращения винта также оставалась постоянной. Результаты для случая, когда изменение L производилось удалением от катушки катодного конца, приведены на рис. 4. По оси ординат нанесено отношение B_{kL}/B_{kL0} , где B_{kL0} означает критическое магнитное поле, измеренное в трубках с удаленными от концов катушки электродами [7]. В табл. 1

Таблица 1

Изменение L_k и длины корреляции пульсаций электрического поля в различных трубках.
Разрядный ток 50 ма

R , см	l , см	L_k , см	p , мм рт. ст.
1,5	52	40	0,2
1,25	48	35	
0,9	44	28	
1,25	24	23	0,8

сопоставлены измеренные и вычисленные по формуле (2) значения и длины корреляции l для различных трубок. Из табл. 1 следует, что L_K грубо изменяется как величина l .

В тех случаях, когда катодная область попадает внутрь соленоида, измеренные значения B_K становятся меньшими по сравнению с теми

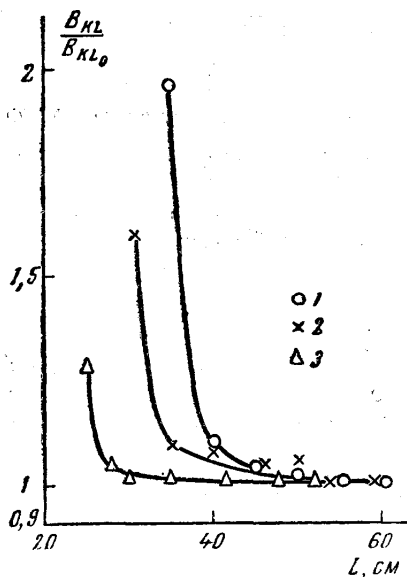


Рис. 4. Отношение B_{KL}/B_{KL0} в зависимости от длины положительного столба L . Гелий, $p = 0,2$ мм рт. ст., ток разряда 300 ма R (см): 1—1,5; 2—1,25; 3—0,9

Таблица 2

Зависимость B_K от I_p для трубки радиусом 1,25 см и давлением 0,8 мм рт. ст.

I_p , ма	B_K , гц	
	$L = 60$	$L = 50$
20	1850	1780
50	1830	1740
100	1790	1660
150	1750	1580
200	1710	1530
300	1680	1480

случаями, когда эта область удалена от соленоида. Расхождение в значениях B_K растет с силой разрядного тока. Этот эффект отмечался ранее [15, 16]. Зависимость B_K от силы разрядного тока для двух значений L приведена в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что эффект больше, когда катодная область находится в однородной части соленоида.

Возможно, что в этом случае на результатах сказывается наличие в катодной области быстрых электронов, ускоренных в области катодного падения потенциала. Если это так, то можно ожидать, что эффект будет возрастать с уменьшением давления.

Выводы

Результаты работы находятся в согласии с выводами теории [1, 12, 13] и подтверждают их. В частности, на основе наших измерений можно сказать, что в достаточно коротких трубках проявляются эффекты, стабилизирующие положительный столб. Длина положительного столба, при котором эти эффекты начинают сказываться, изменяется в различных трубках приблизительно как длина релаксации пульсаций электрического поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kadomtsev V. B., Nedospasov A. V. J. Nucl. Energy., 1, 230, 1960.
2. Ахмедов А. Р., Зайцев А. А. Доклад на Всесоюзной конференции по новой технике в МАИ в январе 1962 г. Изд-во НИИ научной информации, 1963.
3. Gierke G. V., Wohler K. H. Nucl. Fusion. Suppl., 1, 47, 1962.
4. Hoh F. C., Lehnert B., Phys. of Fluids., 3, 600, 1960.
5. Simon A. Proc. of 2d Intern. Conf. on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1958, vol. 32, p. 343.

6. Зайцев А. А., Васильева М. Я. «Изв. вузов», радиофизика, **5**, 523, 1962.
7. Ахмедов А. Р., Зайцев А. А. ЖТФ, **33**, 177, 1963.
8. Bickerton R. J. A. von Engel. Proc. Phys. Soc., **B 69**. London, 468, 1956.
9. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. Физматгиз, М., 1961.
10. Головановский К. С., Кузовников А. А. «Изв. вузов», радиофизика, **5**, 933, 1962.
11. Перель В. И., Пинский Я. М. ЖТФ, **33**, 268, 1963.
12. Кадомцев Б. Б. ЖТФ, **31**, 1273, 1961.
13. Вдовин В. Л., Недоспасов А. В. ЖТФ, **32**, 817, 1962.
14. Недоспасов А. В. ЖЭТФ, **34**, 1338, 1958.
15. Васильева И. А., Грановский В. Л., Черноволенко А. Ф. «Радиотехника и электроника», **5**, 1508, 1960.
16. Paulikas G. A., Pyle R. V. Phys. of Fluids., **5**, 348, 1962.

Поступила в редакцию

27. 4 1962 г.

После переработки

14. 10 1963 г.

Кафедра
электроники