

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

В. М. Евдокимов, М. М. Маликов, Изучение механизма движения неоднородностей в неравновесной плазме в магнитном поле,
TVT, 1972, Volume 10, Issue 2, 227–231

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt9606>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.175

May 14, 2025, 04:53:53



УДК 533.95

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА ДВИЖЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Б. М. Евдокимов, М. М. Маликов

Приводятся результаты измерений скорости перемещения неоднородностей в неравновесной плазме с развитой ионизационной турбулентностью. Показано, что неоднородности, расположенные вдоль среднего тока, движутся под действием поперечной силы, а градиентный механизм движения не вносит существенного вклада. Экспериментально показано, что при таком движении возможно возникновение флуктуаций давления газа.

В большинстве случаев неоднородное состояние неравновесной плазмы вызывается ионизационной неустойчивостью [1, 2]. В работах [3—5] в неравновесной плазме наблюдалась иная структура неоднородностей нежели описанная в [1, 2] — шнуры, вытянутые вдоль среднего тока. Природа такого типа турбулентности еще не выяснена, хотя многие исследователи предполагают ионизационный характер природы таких неоднородностей, которые могут описываться нелинейной теорией ионизационной неустойчивости [6]. Возникает ряд предположений о возможных причинах неионизационного характера. В случае, если шнуры вызваны акустической неустойчивостью [7], должны наблюдаться флуктуации давления нейтрального газа. Скорость перемещения неоднородностей v может равняться скорости звука или нулю (стоячая волна). В случае ионизационной неустойчивости возможен «градиентный» механизм перемещения неоднородностей [2, 8]:

$$v = (j \cdot T_e / en_e I) \cos \varphi, \quad (1)$$

где e , n_e , T_e — заряд, концентрация и температура электронов; j — плотность тока; I — потенциал ионизации; φ — угол между $\langle j \rangle$ и перпендикуляром к неоднородности. Если $\varphi = \pi/2$ (для шнуров), то $v = 0$. Неоднородности, расположенные вдоль среднего тока, как предполагают авторы [9], могут перемещаться под действием поперечной силы $\mathbf{j} \times \mathbf{H}$ (\mathbf{H} — магнитное поле). Для проверки таких предположений и более детального изучения природы возникновения шнуровой неустойчивости были предприняты исследования в данной работе.

Описание эксперимента. В специальной камере ($10 \times 35 \times 100$ мм, расстояние между электродами одной пары 35 мм) [4] создавался электрический разряд десяти пар электродов в чистом аргоне. Ток разряда каждой пары варьировался от 0 до 50 а. Давление аргона P задавалось от 15 до 200 мм рт. ст. Перпендикулярно среднему току накладывалось постоянное магнитное поле H до 9 кэ. Длительность тока ~ 1 мсек. Электрическое поле в плазме $\langle E_y \rangle$ вдоль среднего тока измерялось двойными зондами. По отношению $\langle E_y \rangle / P$ из литературных данных определялась скорость дрейфа электронов v_d . По фотографиям, сделанным с помощью скоростного фоторегистратора, определялись размер неоднородностей λ и плотность тока $\langle j \rangle$. Концентрация электронов n_e определялась по измеренным значениям $\langle j \rangle$ и v_d . Флуктуации давления газа измерялись специально скон-

струированным пьезодатчиком. Чувствительным элементом являлась шайба диаметром 5 мм из пьезокерамики ЦТС-19, размещенная в стенке камеры, перпендикулярной магнитному полю (см. схему в [4]). Шайба электрически изолирована от плазмы и упирается в тяжелый стержень. Чувствительность датчика 0,1 мв/мм рт. ст. Рабочая частота 10 гц — 100 кгц.

Результаты экспериментов. Без магнитного поля при сравнительно низком давлении газа 15—70 мм рт. ст. в первый момент после пробоя

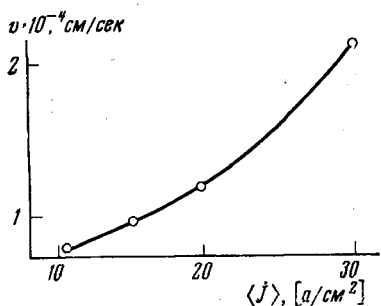


Рис. 1. Зависимость v от $\langle j \rangle$, $H = 8$ кэ, $P = 100$ мм рт. ст.

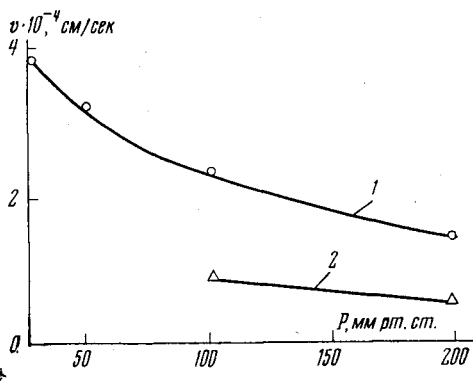


Рис. 2. Зависимость v от P , $H = 8$ кэ: 1 — $\langle j \rangle = 30$ а/см²; 2 — 15

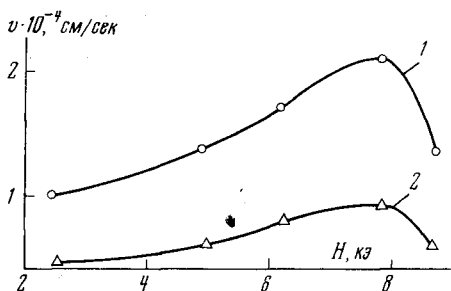


Рис. 3. Зависимость v от H , $P = 100$ мм рт. ст.:

1 — $\langle j \rangle = 30$ а/см²; 2 — 15

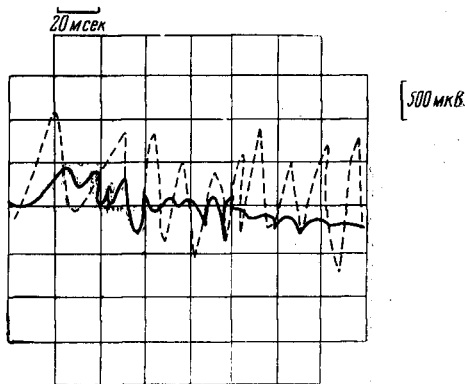


Рис. 4. Осциллограмма флуктуаций давления $P = 50$ мм рт. ст., $\langle j \rangle = 30$ а/см², $t_{\text{задержки}} = 200$ мксек:

1 — $H = 8$ кэ; 2 — $H = 0$

(0 — 200 мксек) наблюдались шнуры, вытянутые от анода к катоду, затем сгусток плазмы становился однородным. При давлении 70 — 200 мм рт. ст. плазма в начальный момент после пробоя образовывалась в виде двух сгустков, которые впоследствии сливались и плазма становилась однородной (при $t \geq 150 \div 200$ мксек).

При наложении магнитного поля неоднородности, вытянутые вдоль среднего тела, наблюдались в течение всего времени существования плазмы в трубке. Фотографии такого вида плазмы приведены в [4].

Размеры неоднородности (расстояние между максимумами почернения на фотопленке) при различных параметрах приведены в таблице. Величина $\langle n_0 \rangle$ составила $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ при $\langle j \rangle = 25$ а/см², величина флуктуации $\langle (\Delta j / \langle j \rangle)^2 \rangle^{1/2}$, оцененная по флуктуациям плотности почернения пленки (см. [4]), составила в среднем $\sim 0,5$.

Анализ СФР-грамм показал, что шнуры перемещаются в направлении силы $\mathbf{j} \times \mathbf{H}$ со скоростью v , которая определялась экспериментально как $v = \lambda \cdot f$, где f — частота прохождения неоднородностей (шнуров) мимо отверстия диаметром 1 мм в экране, через которое свет от плазмы поступал на фотоумножитель (ток ФЭУ осциллографировался). На рис. 1—3 представлены зависимости v от $\langle j \rangle$, P , H . Среднеквадратичный разброс v в разных экспериментах при одинаковых условиях составлял $\sim 30\%$.

P , мм рт. ст.	200		100						50	30	
	30	15	30			15			30	15	
$\langle j \rangle$, а/см ²											
H , кэ	8	8	2,5	6,3	8	8,5	2,5	8	8,5	8	8,5
λ , см	0,7	0,5	0,9	0,8	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7

Скорость перемещения центра всего плазменного сгустка, определенная по СФР-граммам, составила в среднем $(2 - 5) \cdot 10^3$ см/сек, т. е. меньше скорости перемещения неоднородностей.

Для измерения флуктуаций давления выбрали рабочую частоту $f = 50$ кГц ($P = 50$ мм рт. ст., $H = 6$ кэ, $\langle j \rangle = 30$ а/см²).

Чтобы исключить низкочастотные (50 гц — 1 кГц) электрические наводки использовались фильтр и дифференциальный блок осциллографа С1-17 с полосой пропускания 500 гц ÷ 100 кГц. С выхода блока сигнал подавался на осциллограф с памятью С1-29. Полезный сигнал был в два-три раза больше уровня шумов.

Флуктуации колебаний давления плазмы наблюдались на частоте 50 кГц (типичная осциллограмма показана на рис. 4) при прижатом подпирателем стержню к шайбе. При отжатии стержня полезный сигнал исчезал. Это подтверждает тот факт, что наблюдаемый сигнал обусловлен пьезоэффектом, а не является наводкой (пьезодатчик работает только с прижатым стержнем).

Величина ΔP , определенная по осциллограммам, колебалась в среднем от 5 до 30 мм рт. ст.

Обсуждение результатов. Плазма в магнитном поле имеет структуру неоднородностей в виде шнуров, вытянутых вдоль среднего тока. Неоднородности в начальный момент при $H = 0$ могут служить в качестве начальных возмущений для последующего развития их в магнитном поле, что отличает условия эксперимента авторов от работ [3—5]. Так как при $H = 0$ и $t > 150$ мксек неоднородности не наблюдаются, а при $H \neq 0$ наблюдаются в течение всего времени разряда, можно считать, что авторы наблюдали то же явление, что и в [3—5], поскольку оно проявляется только в магнитном поле (при $t > 100 \div 200$ мксек).

Скорость движения всего плазменного сгустка была меньше скорости движения шнуров. Скорость шнуров составляла $(0,5 \div 2) \cdot 10^4$ см/сек, что заметно меньше скорости звука $(3,3 \div 5,7) \cdot 10^4$ см/сек.

Величина скорости шнуров, обеспечиваемая градиентным механизмом в нашем случае по (1) $\sim \pm 8 \cdot 10^2$ см/сек; в (1) $\varphi \leq 90^\circ \pm 10\%$.

Эта скорость также не объясняет измеренную величину v . При изменении P , H величина T_e меняется слабо и скорость была бы $v = \text{const}$, что не соответствует данным эксперимента.

Объяснить движение шнуров можно, по-видимому, «силовым» механизмом, т. е. движением шнуров под действием пондеромоторной силы ($\mathbf{j} \times \mathbf{H}$).

Сделаем следующие оценки. Пусть шнур движется как твердое тело, т. е. нейтральные атомы внутри шнура стоят, а газ обтекает шнур. Это возможно в том случае, если ионы не замагничены ($\beta_i \beta_e < 1$, где β_i , β_e — параметр Холла для ионов и электронов соответственно). Предположим

также, что плотность тока в шнуре $j_{ш}$ больше плотности тока в остальной части плазменного сгустка, иными словами, пренебрегаем скоростью движения всего сгустка в целом. Тогда можно записать уравнение для движущегося шнура:

$$\rho_{ш} S_{ш} L \frac{dv_{ш}}{dt} \approx I \times H - \Delta P S_{\Phi}, \quad (2)$$

где $S_{ш} = \pi r^2$ — площадь поперечного сечения шнура; $I = j_{ш} \cdot S_{ш}$, r — радиус шнура (см. рис. 5); $S_{\Phi} = 2rL$ — площадь продольного сечения шнура.

Уравнение для газа, обтекающего шнур (в системе координат, связанной со шнуром),

$$\rho_0 v_0 \frac{\partial v_0}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} \sim \rho_0 \frac{v_0^2}{\Delta x} \approx \frac{\Delta P}{\Delta x}, \quad \partial/\partial y = 0. \quad (3)$$

Уравнение непрерывности:

$$\rho_0 v_0 S_0 = \rho_1 v_1 (S_0 - S_{\Phi}), \quad (4)$$

где $v_0 \equiv v_{ш}$ — скорость движения системы координат, связанной со шнуром; $S_0 = hL$ — площадь сечения канала, перпендикулярная потоку (см. рис. 5); v_1 — скорость газа при $x = 0$ (под шнуром, см. рис. 5); h — высота канала.

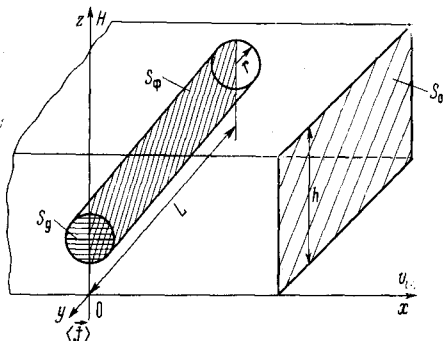


Рис. 5. Схематическое изображение одного шнура

Далее, в стационарном состоянии из уравнения (2) можно оценить увеличение «давления» газа перед шнуром ΔP (динамический напор)

$$\Delta P \sim (\pi/4) H j_{ш} d_{ш} \quad (d_{ш} = 2r). \quad (5)$$

При малых скоростях можно считать, что $\rho_1 \approx \rho_0 = \rho$. Тогда, подставляя (5) в (3), получаем

$$v_{ш} \sim \sqrt{\pi H j_{ш} d_{ш} / 4\rho} \sim 10^4 \text{ см/сек}, \quad (6)$$

из (4) получаем

$$v_1 \sim v_{ш} \cdot S_0 / (S_0 - S_{\Phi}).$$

Формула (6) описывает зависимость $v \equiv v_{ш}$ от $\langle j \rangle$, P , H , наблюдающуюся экспериментально. Величина, вычисленная по (6), также близка к экспериментальной.

Из (5) видно, что при силовом механизме движения шнуров может возникать флуктуация давления порядка динамического напора ~ 10 мм рт. ст. При наших условиях пьезодатчик может зафиксировать изменение давления, поскольку при движении дуги газ будет расталкиваться шнуром к стенкам (т. е. $v_{\perp} \sim v_{ш}$). Кроме того, возможно также изменение статического давления в области между шнуром и датчиком, так как $v_1 > v_{ш}$, если считать газ несжимаемым

$$\Delta P_{ст} \sim \rho(v_1^2 - v_{ш}^2) \sim j_{ш} H d_{ш} \cdot S_{\Phi} / (S_0 - S_{\Phi}) \sim 10 \text{ мм рт. ст.}$$

Такого порядка флуктуация давления и была обнаружена экспериментально. Частота флуктуации P соответствует скорости движения шнуров. Следует отметить, что при наших условиях флуктуация ΔP может возникнуть также из-за различной степени нагрева газа джоулевым теплом за короткое время $t < r/v_3 \approx (4-8) \cdot 10^{-6}$ сек:

$$\Delta P / \langle P \rangle \sim \gamma \cdot \Delta(jE) \delta t / (\gamma - 1) c_{op} \langle T \rangle \approx 10^{-2} \div 10^{-1}.$$

Здесь v_s , c_v — скорость звука и теплоемкость газа соответственно, $\delta \sim 0,1$ для аргона, $\gamma = 1,67$.

При $t \gg r/v_s$ давление в шнурах успеет выравняться с внешним давлением и пьезодатчик будет измерять величину ΔP , вызванную только движением шнуров.

Эксперименты говорят в пользу ионизационного механизма возникновения шнуров, поскольку акустический механизм движения шнуров не подтверждается экспериментально. Из эксперимента следует также, что в таком ионизационном механизме следует учитывать влияние флуктуаций давления газа.

Авторы выражают благодарность В. С. Голубеву и Ю. А. Карееву за полезные обсуждения и А. В. Недоспасову за проявленный интерес к работе.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова

Поступила в редакцию
3 VI 1971

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Велихов, А. М. Дыхне. Comptes rendus de la VI Conf. inter. sur les phenomenes d'ionisation dans les gas, Paris, 2, 1963.
2. J. L. Kerrebroek. AIAA J., 2, 1072, 1964; В. Н. Белоусов, В. А. Елисеев, И. Я. Шипук. Electricity from MHD, 2. IAEA, Vienna, 1966.
3. И. С. Глушков, В. Т. Карпухин, А. В. Недоспасов. Теплофизика высоких температур, 7, № 2, 1969.
4. М. М. Маликов. Теплофизика высоких температур, 8, № 2, 1970.
5. H. Zinko, G. Brederlow. 11-th Symp. Eng. Aspects of Magnetohydrodynamics. Pasadena, 1970, p. 90.
6. А. М. Дыхне. Докл. на V Междунар. симп. по МГДГ, Мюнхен, 1971.
7. Е. П. Велихов. Proc. of I Inter. Symp. on MHD-gen. Newcastle, 1962, p. 135.
8. А. В. Недоспасов. Electricity from MHD, 2. IAEA, Vienna, 1966.
9. Ю. А. Кареев, В. Т. Карпухин, А. В. Недоспасов. Electricity from MHD. 1. IAEA, Vienna, 1968, p. 547.