

### НИЗКОЧАСТОТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ, ВРАЩАЮЩЕЙСЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

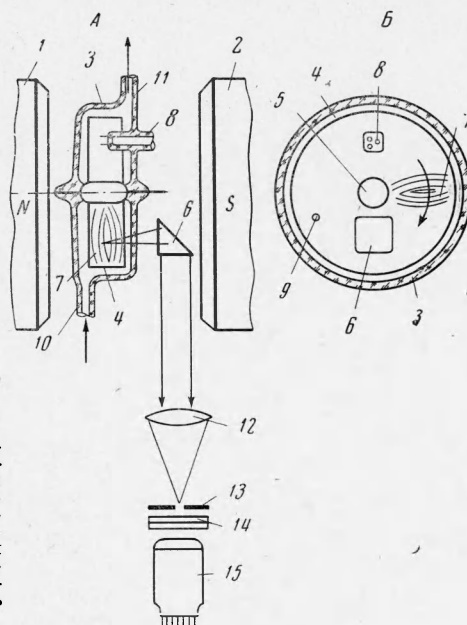
В. Г. Андропов, Г. С. Лопцкий, Г. Д. Петров,  
В. И. Черныш, Э. Ф. Юрчук

(Москва)

В последние годы вновь пробудился интерес к дугам в магнитном поле, перемещающимся относительно газового потока [1-4]. Хотя такие дуги находят применение в экспериментальной практике, происходящие в них явления изучены сравнительно мало.

Удобным объектом для исследования процессов в движущейся плазме являются дуги, вращающиеся в стационарных магнитных полях. В [3,4] проводились раздельно измерения скорости распространения фронта ионизации и частот колебаний, возникающих в плазме. К сожалению, условия опытов были не сопоставимы. Одновременно исследованию этих связанных между собой явлений и посвящена данная работа.

Экспериментальная установка была собрана по схеме фиг. 1. Параметры колебаний в столбе дуги и скорость его вращения определялись по флуктуациям радиальной и азимутальной компоненты электрического поля и осцилляции яркости собственного излучения дуги в диапазоне  $6328 \pm 40 \text{ \AA}$ . Диаметр светящейся площадки, с которой собирался свет, составлял 1.5—2 мм, давление от 5 до 20 торр, ток разряда менялся от 0.05 до 0.40 а. В качестве рабочего тела использовался аргон.



Фиг. 1. На схеме установки 1, 2 — полюса электромагнита, 3 — стеклянный баллон, 4 — полый цилиндрический анод с внутренним диаметром 80 мм, 5 — подогревной катод с наружным диаметром 25 мм, 6 — поворотная призма для вывода собственного излучения дуги, 7 — дуга, 8 — трехэлектродный зонд с расстояниями между электродами 2,5 мм, 9 — термомпара, 10, 11 — патрубки для входа и выхода аргона, 12 — собирающая линза, 13 — диафрагма поля зрения, 14 — интерференционный светофильтр, 15 — фотоумножитель

При наложении магнитного поля дуга приходила во вращение. На фиг. 2,а приведена осциллограмма собственного свечения, по которой определялся период вращения дуги. Аналогичные осциллограммы были получены с помощью двойных зондов. Частота вращения  $\omega$  и линейная скорость  $V$  движения дуги в зависимости от напряженности магнитного поля приведены на фиг. 3,а. В этих экспериментах давление газа составляло 10 торр, ток дуги — 0.11 а, падение напряжения на дуге 50—60 в.

Линейная скорость вращения дуги близка к скорости движения фронта ионизации (фиг. 3,б), измеренной в аналогичных условиях [3], хотя и несколько превышает ее. Последнее может быть объяснено увлечением газа вращательным движением дуги.

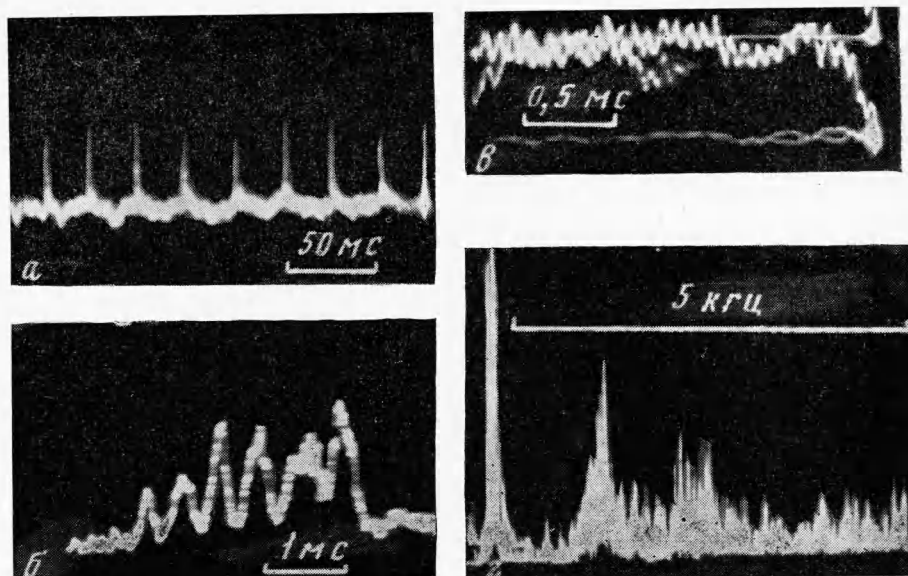
Так как давление газа и плотность тока дуги невелики, то, как следует из работы [3], дуга должна продуваться потоком нейтрального газа. Такую дугу лучше всего описывает так называемая модель пористого цилиндра.

Зависимость скорости вращения дуги от напряженности магнитного поля, рассчитанная по соотношению

$$\frac{1}{c} j \times H = n_i \sum_k m_k v_{ka} (V - V_a)$$

оказалась близкой к представленной на фиг. 3, а.

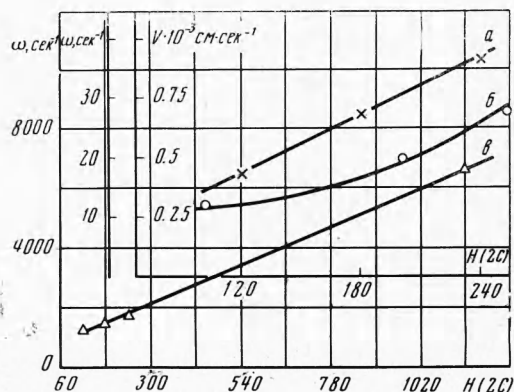
Здесь  $j$  — плотность тока дуги,  $H$  — напряженность магнитного поля,  $c$  — скорость света,  $n_i$  — концентрация заряженных частиц,  $m_k$  — приведенная масса,  $v_{ka}$  — частота соударения заряженных частиц с нейтральными,  $V_a$  — скорость нейтрального газа, возникающая вследствие увлечения его вращательным движением дуги.



Фиг. 2. Осциллограммы: а — импульсов собственного свечения дуги, б — структуры импульса собственного свечения, в — высокочастотных колебаний свечения плазмы, г — частотного спектра колебаний светимости

При исследовании отдельных импульсов светимости была обнаружена структура (фиг. 2, б и в), соответствующая внутренним, сравнительно низкочастотным (1—10 кгц) осцилляциям плазмы внутри дугового столба.

Характерный спектр этих колебаний, полученный с помощью анализатора спектра, представлен на фиг. 2, г. Частота колебаний  $\omega$  линейно связана с напряженностью магнитного поля (фиг. 3, в). При зондовых измерениях эти колебания наблюдались только при частотах, близких к 10 кгц. Аналогичные колебания ранее наблюдались методом зондов и были интерпретированы как колебания дрейфового типа [4].



Фиг. 3. Зависимость: а — частоты вращения дуги, б — скорости движения фронта ионизации, в — частоты внутренних колебаний плазмы дуги, от напряженности магнитного поля

В наших экспериментах могли возникать как дрейфовые, так и магнитоакустические колебания [5-7]. Для выяснения природы осцилляций были предприняты измерения амплитуды колебаний градиента плотности плазмы дуги методом Теплера с использованием гелий — неоновый лазер. Ввиду малости степени ионизации влиянием электронной компоненты можно было пренебречь. Чувствительность установки по аргону составляла  $10^{16} \text{ см}^{-4}$  атомов. Амплитуда колебаний была ниже указанной величины, произвести надежные измерения ее не удалось.

Таким образом, в работе показано следующее: 1) скорость вращения дуги весьма близка к скорости распространения фронта ионизации, 2) как скорость вращения дуги, так и частоты собственных колебаний линейно связаны с напряженностью внешнего магнитного поля, 3) амплитуды колебаний плотности весьма малы и для нейтральной компоненты составляют менее 10% средней величины.

Поступила 23 IV 1969

## ЛИТЕРАТУРА

1. Широков М. Ф., Ваулин Е. П. Течения низкотемпературной плазмы с большими скоростями. В сб. «Исследования при высоких температурах», М., «Наука», 1967.
2. Одицова Г. А., Ваулин Е. П. Измерение скоростей частиц во вращающейся плазме при помощи интерферометра Фабри — Перо с фотоэлектрической регистрацией. Ж. прикл. спектроскопии, 1965, т. 3, № 2.
3. Вагапов V. U., Vasilieva I. A., Ulianov K. N. Arc in a gas flowing through a magnetic field. In: Electricity from MHD, Vienna 1966, vol. 1.
4. Saito S., Saton N., Hattay Y. Low — frequency oscillations in a weakly ionized plasma in crossed electric and magnetic fields. J. Phys. Soc. Japan, 1966, vol. 21, No. 12, p. 2695.
5. Velikhov E. P. Hall instability of current — carrying slightly ionized plasmas. First Intern. Symp. on Magnetoplasmodynamic, Newcastle. 1962.
6. McCune J. E. Wave growth and instability in partially — ionized gases. Second Intern Symp. on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation, Paris, 1964.
7. Trigher S. A. The theory of the stability of sound in a nonhomogeneous plasma. In: Electricity from MHD, Vienna, 1966, vol. 2.

**ЧАСТНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МГД-УРАВНЕНИЙ  
С УЧЕТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ КОНЕЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ  
МАГНИТНОГО ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА**

*А. Н. Черепанов, В. И. Яковлев*

(Новосибирск)

Рассматриваются нестационарные плоскосимметричное и осесимметричное движения теплопроводного газа конечной проводимости в магнитном поле, нормальном направлению движения среды.

Решение ищется с полем скоростей, имеющим линейную зависимость от пространственной координаты. Полученная система уравнений решается методом разделения переменных.

Приведены некоторые численные расчеты для задачи о плоскосимметричном расширении проводящего газа в магнитном поле в случае, когда проводимость и теплопроводность зависят только от температуры. Приведены распределения температуры, плотности и магнитного поля по сечению слоя в зависимости от магнитного числа Рейнольдса и безразмерного коэффициента теплопроводности.

Рассматриваются одномерные плоскосимметричное и осесимметричное расширения проводящего газа в магнитном поле, направленном по оси  $Z$  (перпендикулярно направлению движения газа). В начальный момент  $t = 0$  газ занимает пространство  $-a_0 \leq x \leq a_0$  между двумя плоскостями (в плоскосимметричном случае), либо представляет собой бесконечный по оси  $Z$  цилиндрический столб радиуса  $a_0$ .

Приняты следующие предположения.

- 1) Газ удовлетворяет уравнению состояния идеального газа, вязкость отсутствует.
- 2) Токи смещения пренебрежимо малы. Магнитное поле на внешней границе проводящего газа можно задавать, не рассматривая волновых процессов в пустоте (квазистационарное электромагнитное поле).
- 3) Электропроводность  $\sigma_1$  и теплопроводность  $\lambda_1$  газа зависят от температуры и плотности по степенным зависимостям

$$\sigma_1 = \sigma_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^r, \quad \lambda_1 = \lambda_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^m \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^k \quad (1)$$

- 4) Рассматривается равномерное расширение со скоростью  $v_x = xa'(t)/a(t)$ , линейно зависящей от пространственной координаты. Здесь  $a(t)$  — неизвестный закон движения границы газа.

При сделанных предположениях безразмерные уравнения магнитной гидродинамики в лагранжевых координатах  $(\xi, \tau)$  имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} [\mu^{\gamma+1} \rho(\xi, \tau)] &= 0, & \kappa \xi \rho(\xi, \tau) \mu \mu' &= - \frac{\partial}{\partial \xi} [p(\xi, \tau) + h_1^2(\xi, \tau)] \\ \frac{\partial}{\partial \tau} [\mu^{\gamma+1}(\tau) h_1(\xi, \tau)] &= \frac{1}{R_m \xi^\gamma \mu^2} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{\xi^\gamma}{\Theta_1^n \rho^r} \frac{\partial}{\partial \xi} (\mu^{\gamma+1} h_1) \right], & p &= \rho \Theta_1 \end{aligned}$$