

## НЕУСТОЙЧИВОСТЬ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

М.А.Власов

I. Теоретически показано [1], что в случае неоднородной плазмы возможна раскачка колебаний с фазовыми скоростями порядка скоростей ларморовского дрейфа частиц в магнитном поле. Наблюдаемая при этом неустойчивость получила название дрейфовой (универсальной). Несмотря на значительный успех, достигнутый в области теории, экспериментально этот вид неустойчивости исследован мало. Целью настоящей работы было исследование неоднородной плазмы, образующейся в дуговом разряде низкого давления с накаленным катодом [2]. Результаты первой серии работ [3] посвящены изучению поведения такого разряда при низких давлениях (от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $10^{-4}$  тор). Было показано, что в этом случае образуется отрицательно заряженный столб, который при определенных условиях становится неустойчивым. Это выражается в появлении стационарно вращающегося в электронную сторону факела, вырывающегося из области первичного пучка. Неустойчивость носит дрейфовый характер, появление факела является результатом поляризации плазмы в пучке первичных электронов при наличии азимутальной неоднородности в плотности и различия в дрейфовых скоростях ионов и электронов. В настоящем сообщении

дается краткое описание основных экспериментальных результатов, относящихся к области более высоких давлений (от  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $10^{-2}$  тор).

2. Плазма создавалась в экивотенциальном объеме диаметром 76 мм и длиной  $\ell = 400$  мм, диаметр катода - 10 мм. В качестве рабочего газа использовался в основном водород, а в ряде случаев  $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ne}$  и  $\text{Ar}$ . Магнитное поле менялось от 100 до 3000 э. В камере осуществлялся стационарный разряд при  $U_a$  от 100 до 400 вольт и  $I_a$  до 600 ма. Определение параметров плазмы, а также регистрация колебаний, сопровождающих неустойчивость, проводились с помощью ленгмировских зондов, в ряде случаев использовался плазмоскоп [2].

3. Исследование неустойчивости плазмы показало, что существуют две характерные области. В первой - в плазме отсутствуют колебания и диффузия носит классический характер. Во второй - наблюдается возникновение колебаний, спектр которых зависит от параметров плазмы, а диффузия может носить как классический, так и аномальный характер. Условия возникновения неустойчивости плазмы, ее характер сильно зависят от начальных поперечных градиентов плотности, потенциала и температуры. Для определения этих величин были поставлены эксперименты в режимах, предшествующих появлению неустойчивости. Измерение распределения плотности и потенциала по радиусу показало, что вне дугового столба существуют две характерные области. Вблизи столба до расстояний порядка ларморовского радиуса иона  $\zeta_i$  имеется значительный градиент температуры электронов  $T_e$ , связанный с их остыванием за счет столкновений при движении поперек поля. Это обуславливает наличие в данной области градиента потенциала и резкого падения плотности с постоянной спада  $q_1$  порядка нескольких миллиметров. Во второй области, отстоящей от границы пучка на расстоянии в несколько  $\zeta_i$ , градиент температуры практически отсутствует и  $T_e$  невелико. Это приводит к постоянству потенциала и к более пологому спаду плотности с постоянной  $q_2$  порядка нескольких сантиметров. Как показали измерения, значения постоянной спада  $q_1$  и электрические поля

на границе дугового столба слабо меняются с параметрами разряда, а зависимость постоянной спада  $q_{\lambda_2}$  хорошо описывается известным выражением [4] :  $q_{\lambda_2} = \ell/\pi (\omega_i \tau_i)^{-1}$ .

4. При значениях магнитного поля ( $H_{kp}^{38}$ ) в плазме возникали колебания с частотами в несколько десятков кгц. Наблюдаемые колебания плотности и потенциала плазмы, как правило, не

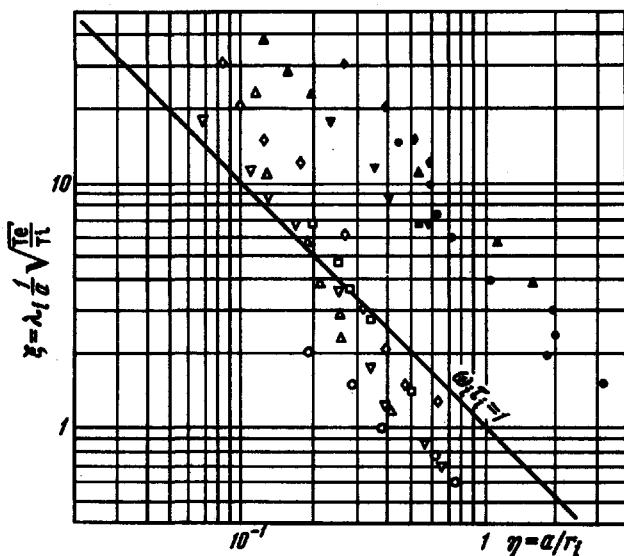


Рис. I. Для  $H_2$ : о - ион.звук.н., • - дрейф.н.; для  $\text{He}$ :  $\Delta$  - ион.звук.н.,  $\blacktriangle$  - дрейф.н.; для  $N_2$ :  $\nabla$  - ион.звук.н.,  $\nabla$  - дрейф.н.; для  $\text{Ne}$ :  $\diamond$  - ион.звук.н.,  $\blacklozenge$  - дрейф.н.; для  $\text{Ar}$ :  $\square$  - ион.звук.н.,  $\blacksquare$  - дрейф.н.

превышали 1% от средних значений этих величин. При этом характер диффузии поперек магнитного поля оставался классическим.

Величина ( $H_{kp}^{38}$ ) зависит от рода газа и давления и не меняется с анодным током или напряжением разряда. На рис. I в координатах  $\eta = a_0 / r_i \sim H a_0$  и  $\xi = (\lambda_i / a_0) \sqrt{T_e / T_i} \sim 1 / p a_0$  показана граница этой неустойчивости. Величина  $a_0 = 5$  мм - радиус дугового столба,  $T_e$  полагалось равным 10 эв, а величины сечений столкновений ионов с нейтралами взяты из [5] для  $T_i = 1$  эв. Исследование пространственного распределения амплитуды и фазы колебаний показало, что в плазме распространяется волна, стоячая по длине установки и бегущая по азимуту. С целью выяснения приро-

ды неустойчивости были поставлены эксперименты по определению зависимости частоты колебаний от параметров разряда. При этом была обнаружена перестройка мод колебаний, при которой всегда выполнялось условие  $n/m = \text{const} \ell/a_0 (T_e A)^{1/2} \omega$ , где  $A$  - атомный номер газа,  $\omega = d \ln n_i / d\tau$ , а  $n$  и  $m$  - значения моды колебаний по длине и азимуту. Зная величины  $n$  и  $m$ , можно было в каждом случае определить основную частоту колебаний и фазовую скорость волны. Оказалось, что частота практически не меняется с условиями разряда и лежит для водорода в пределах от 20 до 30 кГц, при этом фазовая скорость равна  $2,2 \cdot 10^6$  см/сек и по порядку величины совпадает со скоростью звука в плазме  $C_s = \sqrt{T_e/m_i} = 4,5 \cdot 10^6$  см/сек. Проведенные эксперименты на различных газах хорошо подтверждают зависимость  $\sim 1/\sqrt{m_i}$ . Эти результаты позволили высказать предположение, что в данном случае имеет место возбуждение продольных ионнозвуковых волн.

5. Увеличение магнитного поля до значений ( $H_{kp}^{sp}$ ) приводит к резкому изменению характера поперечной диффузии и развитию в плазме интенсивных колебаний. Значения ( $H_{kp}^{sp}$ ) практически зависят только от давления и рода газа. Анализ фазовых соотношений в колебаниях на зондах и наблюдение плазмограмм показало, что в этом случае из первичного столба вырываются факелы, распространяющиеся поперек магнитного поля на значительные расстояния. На рис. I отложены экспериментальные значения ( $H_{kp}^{sp}$ ) для различных газов. С изменением магнитного поля характер неустойчивости меняется. Вблизи критического поля, как правило, наблюдается устойчивая факельная структура (рис. 2, см. вклейку), стационарно вращающаяся в ионную сторону. С увеличением поля стационарность вращения пропадает, однако в спектре колебаний все еще можно выделить на фоне широкого спектра шумов частоту, соответствующую вращению. Дальнейшее увеличение  $H$  приводит к сильной хаотизации колебаний (рис. 3, см. оборот вклейки). Проведенный анализ неустойчивости показал, что ее можно отождествить с развитой дрейфово-диссипативной неустойчивостью, описанной в работе [6]. Граница этой неустойчивости от-

вечают условию  $\omega_i \tau_i > 1$ , что хорошо подтверждается экспериментально (рис. 2, см. вклейку).

Следует отметить, что с возникновением этой неустойчивости ионнозвуковые колебания не пропадают, а число образующихся факелов всегда совпадает со значениями моды  $m$  для ионного звука вблизи границы неустойчивости.

Автор благодарен Е.И.Доброхотову и А.В.Харинову за полезные дискуссии.

Поступило в редакцию

21 июля 1965 г.

#### Литература

- [1] А.Б.Михайловский. Вопросы теории плазмы, З. М., 1964.
- [2] Л.И.Елизаров, А.В.Харинов. Nuclear Fusion, Suppl., p.2, 699, 1961.
- [3] М.А.Власов, Е.И.Доброхотов, А.В.Харинов. Ядерный синтез, 1965 (в печати).
- [4] L.Tonks. Phys. Fluids, 3, 758, 1960.
- [5] McDowell. Proc. Phys. Soc.(London), A72, 1087, 1958.
- [6] А.В.Тимофеев. Докл. АН СССР, 152, 84, 1963.