

**КРИТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ И СТРУКТУРА ИОННОЗВУКОВОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ ИНДУКЦИОННОГО ВЧ РАЗРЯДА
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В H_2 , He, Ar И Hg**

В.Л.Вдовин, В.Д.Русанов, Д.А.Франк-Каменецкий

Изучение слабоионизованной плазмы ВЧ разряда показало, что при достижении критического значения магнитного поля она становится неустойчивой как в индукционном разряде [1,2], так и в Е-разряде [3,4] (переменное поле $E_{\omega} \parallel H_0$). В работе [4] критические поля $H_{кр}$ в плазме водорода сравнивались с теоретическими значениями ионнозвуковой неустойчивости неоднородной плазмы [5,6] и получено хорошее согласие.

Так как ионный звук существенно определяется температурой электронов T_e и массой иона M_i , то для выяснения природы неустойчивости пред-

ставляет существенный интерес изучение плазмы разных газов. Кроме того, интересно сравнить структуру раскачивающихся колебаний с предсказанной в [5]:

$$\omega \approx -k_y \sqrt{T_e/M_i} > \Omega_i, \quad k_y \gtrsim \kappa(\Omega_i \tau_i)^{-1}, \quad k_z^2 \lesssim k_y^2 (b_i/b_e)$$

Магнитное поле направлено вдоль оси z , градиент плотности — по оси x , $\Omega_i = eH/M_i c$, τ_i — время между соударениями ионов с нейтралами, $\kappa = dn/n dx$.

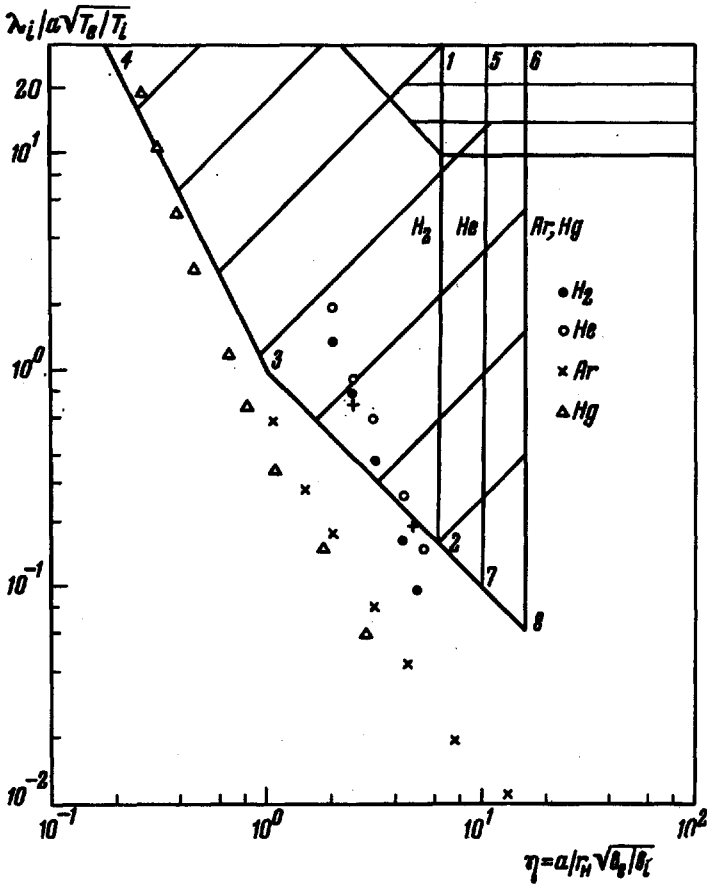


Рис.1. Граница наступления ионнозвуковой неустойчивости. Эксперимент: ● — водород, ○ — гелий, × — аргон, Δ — ртуть. Сплошной линией нанесены теоретические значения: H_2 — 1234, He — 5734, Ar и Hg — 6834 (по оси абсцисс отложена величина $\eta \sim H$, по оси ординат — $\xi \sim 1/\alpha p$)

В настоящей работе сообщаются результаты измерений в плазме индукционного ВЧ разряда в водороде, аргоне, гелии и парах ртути, причем электронная температура менялась в 12 раз, а масса ионов в 100 раз.

Измерены критические магнитные поля, частоты и пространственная структура развивающихся колебаний. Изучена пространственная корреляция колебаний и шумов. Полученные результаты идентифицируются как ионнозвуковая неустойчивость неоднородной плазмы.

Плазма ($f = 20 \text{ кГц}$, $n_e = 10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $H = 0 - 600 \text{ э}$, давление газа $p = 2 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^{-2} \text{ тор}$ в H_2 , He , Ar и $p = 4 \cdot 10^{-2} - 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$ в парах ртути) создавалась 6-витковым контуром длиной 10 см, одетым на стеклянную трубку диаметром $2a = 3,2 \text{ см}$ и длиной 100 см. T_e менялась в зависимости от давления. Например, при $p = 4 \cdot 10^{-2} \text{ тор}$ $T_{\text{H}_2} = 1,2 \text{ э}$, $T_{\text{Ar}} = 3,2 \text{ э}$, $T_{\text{H}_2} = 5 \text{ э}$, $T_{\text{He}} = 9 \text{ э}$.

1. Критические магнитные поля разных газов отложены на рис. 1 в коор-

динатах $\eta = a / r_H \sqrt{b_e / b_i}$ и $\xi = \sqrt{T_e / M_i} \kappa r_i = \lambda_i / a \sqrt{T_e / T_i}$, в которых теряется индивидуальность газа [5]. Здесь b_e, b_i — подвижности электронов и ионов, r_H — ларморовский радиус ионов, подсчитанный по электронной температуре. Сплошной линией указана теоретическая граница ионнозвуковой неустойчивости [5,6]. Значения T_e брались из эксперимента при $H = H_{\text{кр}}$, а b_e и b_i принимались [7] равными (с $\text{см}^2 / \text{сек} \cdot \text{э} \cdot \text{тор}$): а) водород — $b_i = 10^4 / p$, $b_e / b_i = 40$; б) гелий — $b_i = 8,2 \cdot 10^3 / p$, $b_e / b_i = 100$; в) аргон — $b_i = 1,22 \cdot 10^3 / p$, $b_e / b_i = 260$; г) ртутные пары — $b_i = 182 / p$, $b_e / b_i = 230 \sqrt{T_e}$.

2. Зависимость ионного тока на стенку от магнитного поля $I_w(H) / I_w(0)$ для водорода ($p = 10^{-1} \text{ тор}$) и ртути ($\mu_{\text{Hg}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$) показана на рис. 2. Начиная с $H = H_{\text{кр}}$ диффузия становится аномально большой, а при $H \gg H_{\text{кр}}$ стеночный ток насыщается, т. е. $D_{\text{турб}}$ примерно не зависит от H , что согласуется с теоретической оценкой $D_{\text{турб}} \sim \sqrt{T_e / M_i} \kappa^{-1}$ [6].

3. Частоты возбуждающихся в плазме колебаний существенно зависят от рода газа и довольно слабо зависят от давления. Первые возбуждающиеся частоты в интервале давлений $2 \cdot 10^{-1} + 3 \cdot 10^{-2} \text{ тор}$ примерно равны: 1) в водороде — 220 кГц, 2) в гелии — 110 кГц, 3) в аргоне — 40 кГц, 4) в ртутных парах — 10 кГц. Эти частоты несколько увеличиваются при уменьшении давления.

Более подробно зависимость частот от давления в плазме водорода и ртути приводится в таблице. Полученные результаты можно систематизировать, рассматривая величину $\sqrt{T_e / M_i} 1/f$ в зависимости от массы иона.

Результат приводится на рис. 3: несмотря на то, что T_e меняется в 12 раз ($T_{He}/T_{H_2} \approx 12$), масса M_i меняется в 100 раз, а частота f в 25 раз, величина $\sqrt{T_e/M_i} \cdot 1/f$ остается примерно постоянной и составляет в водородо-

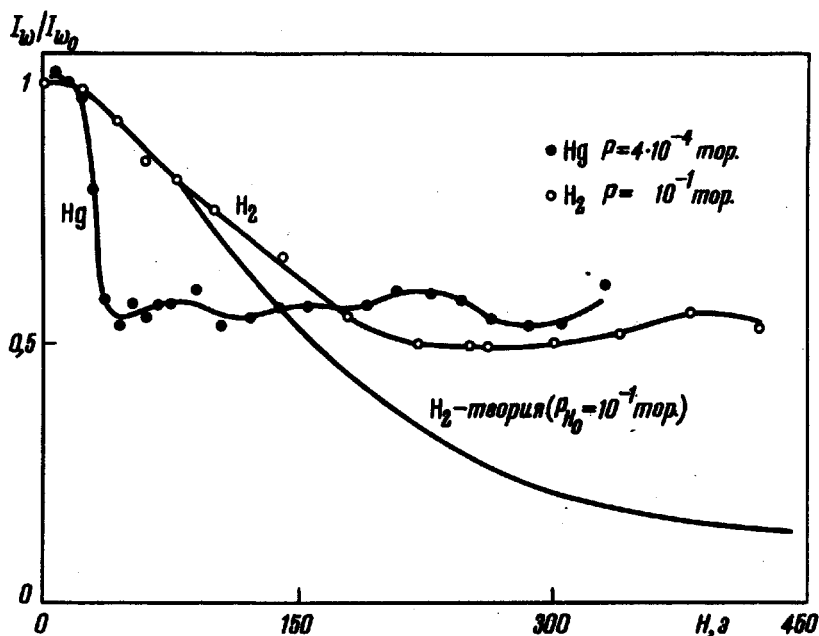


Рис.2. Ионный ток на стеночный зонд с охраняющим кальцом в зависимости от магнитного поля в диффузионном (водород) и бесстолкновительном (ртуть) режимах.

H ₂		Hg	
$p, \text{ тор}$	$f, \text{ кГц}$	$p, \text{ тор}$	$f, \text{ кГц}$
$1,8 \cdot 10^{-1}$	200	$3,6 \cdot 10^{-2}$	8,6
$1,2 \cdot 10^{-1}$	200	$1,8 \cdot 10^{-2}$	9,1
$9 \cdot 10^{-2}$	220	$5,8 \cdot 10^{-3}$	16,7
$7 \cdot 10^{-2}$	235	$3,6 \cdot 10^{-3}$	33
$6,5 \cdot 10^{-2}$	240	$2,1 \cdot 10^{-3}$	36
$5,4 \cdot 10^{-2}$	250	$1,4 \cdot 10^{-3}$	60
$3,4 \cdot 10^{-2}$	440	$2,6 \cdot 10^{-3}$	36
$3 \cdot 10^{-2}$	480	$1,6 \cdot 10^{-3}$	60

де, аргоне и ртути $6 + 6,5 \text{ см}$, а в гелии 11 см . Заметим, что длина окружности разрядной трубки равна 10 см . Наконец, принимая во внимание значения критических полей, видим, что для всех газов $\omega > \Omega_i$.

4. Изучение сдвига фаз сигналов из разных точек плазмы показало, что в плазме возбуждаются волны, стоячие вдоль оси трубки и бегущие по азимуту. Эти волны характеризуются целыми числами m и k , где m определяется соотношением $2\pi r = m\lambda_\phi$, а k равно числу узлов вдоль оси трубки. При давлениях больших $3 \cdot 10^{-2}$ тор первым возбуждается колебание с $m = 1$ и $k = 3$ (плазма неоднородна вдоль оси трубки). При меньших давлениях первым возбуждалось колебание с $m = 2$, а в ртутной плазме наблюдалось возбуждение моды с $k = 3$. Продольная длина волны была примерно в шесть раз больше азимутальной.

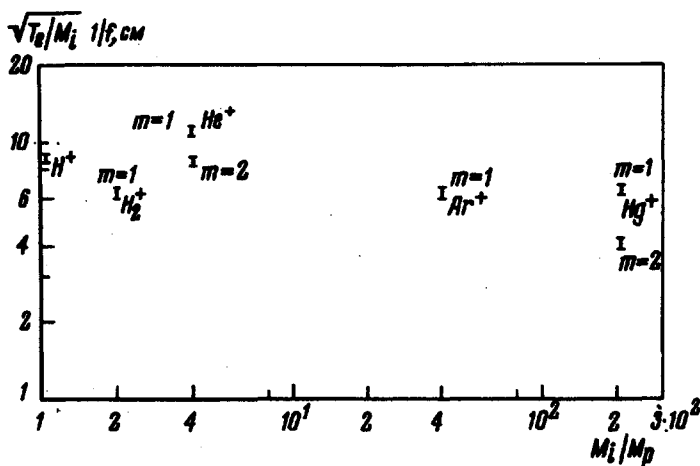


Рис.3. Зависимость величины $\sqrt{\frac{T_e}{M_i}} \frac{1}{f}$ от массы иона для водорода, гелия, аргона и ртути

Наконец, было установлено, что волна бежит в направлении вращения электронов в магнитном поле. При значительной надкритичности $H \gg H_{кр}$ когда имелась развитая турбулентность (шум), с помощью коррелятора определялся пространственный коэффициент корреляции шумов $R(\phi)$. Оказалось, что шумы хорошо коррелированы во всем объеме плазмы, т. е. отсутствует "масштаб перемешивания", постулированный [6].

Таким образом показано, что в плазме индукционного ВЧ разряда в широком интервале электронных температур и масс ионов (H_2 , He, Ar и Hg) критические магнитные поля, диффузия, характерные частоты колебаний, структура неустойчивых возмущений и направление их движения хорошо соответствуют теории ионнозвуковой неустойчивости неоднородной плазмы [5,6].

Отметим, что рассмотренная здесь неустойчивость существенно отличается от ионнозвуковой неустойчивости разряда с накаливаемым катодом

[8], в котором наблюдалась раскачка продольного "амбиполярного" звука, а диффузия оставалась классической.

Авторы признательны Б.Б. Кадомцеву и А.В. Тимофееву за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию

12 июня 1969 г.

Литература

- [1] C.I.Ransom, H.Schlüter. *Phys. Lett.*, 13, 313, 1964.
 - [2] В.Л.Вдовин, В.Д.Русанов, Д.А.Франк-Каменецкий. *Ядерный синтез* 6, 169, 1966.
 - [3] Б.Швилкин, А.А.Зайцев. *Изв. высш. уч. зав., сер. радиофизика*, 7, 844, 1964; E.I.Powers. *Phys. Fluids*, 8, 1155, 1965.
 - [4] I.Polman. *Phys. Lett.*, 15, 48, 1965; *Plasma Phys.*, 9, 471, 1967.
 - [5] А.В.Тимофеев, *ДАН СССР*, 152, 84, 1963.
 - [6] Б.Б.Кадомцев в кн. "Вопросы теории плазмы" т. 4 стр. 291, 300, М., Госатомиздат, 1964.
 - [7] И.Мак-Даниель. *Процессы столкновений в ионизованных газах*. Изд. Мир, М., 1967.
 - [8] М.Власов. *Письма в ЖЭТФ*, 2, 274 1965; М.Власов, диссертация, М., 1966.
-