

К 93

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР.

препринт 42

Р.Х.Куртмуллаев, В.И.Пильский

**Применение методов зондовой и
микроволновой диагностики для
исследования сильных ударных
волн в разреженной плазме**



НОВОСИБИРСК 1966

+

v

При исследовании сверхбыстрых процессов в плазме, например, ударных волн, существенную трудность представляют методы регистрации основных параметров процесса, к числу которых относятся магнитное поле и плотность плазмы. Это связано с тем, что пространственный масштаб неоднородностей имеет порядок нескольких миллиметров, а характерное время их изменения — несколько наносекунд [1].

Для локальных измерений магнитных возмущений использовался миниатюрный магнитный зонд, представляющий собой одиночную петлю диаметром 1 ± 3 мм, переходящую в согласованный фидер малого сечения ($1 \pm 1,5$ мм). Благодаря открытому отверстию петли магнитное поле измерялось непосредственно в плазме, протекающей через сечение зонда (что наиболее существенно для сверхбыстрых процессов). Стеклоянное покрытие изолировало зонд от электрического потенциала плазмы, а его весьма малая индуктивность ($\sim 5 \cdot 10^{-9}$ гн) практически устраняла электростатические наводки флюктуационных полей плазмы в интервале частот до сотен Мгц без применения экрана, хотя уровень электростатических полей достигал нескольких кв/см. Ёмкость половины петли зонда относительно плазмы могла составлять 1 пф. Совместно с индуктивностью петли зонда эта ёмкость образует на высоких частотах делитель, ослабляющий напряжение наводки. Например, на частоте 100 мггц это ослабление достигает $\frac{1}{500}$. Такого ослабления достаточно, чтобы сигнал помехи не превысил $0,1 \pm 0,01$ величины полезного сигнала. Значение индуктивности дано для петель в вакууме, наличие плазмы, естественно, может несколько изменить эту величину.

Применение зонда с открытой петлей кажется предпочтительней обычной конструкции, когда петля помещается внутри диэлектрической трубки. В последнем случае зонд измеряет магнитное поле вне плазмы. Моменту регистрации, таким образом, предшествуют диффузионные процессы на границе плазма-трубка, существенно зависящие от параметров плазмы, характера пограничного слоя, времени нарастания скачков магнитного поля. Возникающие искажения амплитуды и фронтов магнитных сигналов должны возрастать в области максимально быстрых флюктуаций магнитного поля (т.е. в области минимальных ширин фронта ударной волны).

Осциллограммы, одновременно снятые с зондов рассмотренных двух конструкций, действительно показывают искажения, возникающие при помещении зонда в трубку (рис. 1 а, б).

Для одновременного измерения концентрации плазмы n и эффективной проводимости σ была разработана схема, которая помимо фазы на той же осциллограмме регистрирует также и амплитуду зондирующего сигнала (рис.2). В схеме использовались три плеча: одно рабочее - для зондирования плазмы (П) и два - опорных, отвечающих часть мощности генератора (Г) для смещения опорного и зондирующего сигналов. Деление мощности осуществлялось с помощью направленных ответвителей (О) и согласованного тройника (Т), смещение сигналов с помощью двойного тройника (Т) и кристаллического детектора (Д). В одном из опорных плеч был установлен калиброванный фазовращатель (Φ), посредством которого вводился постоянный сдвиг фазы $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$ относительного второго опорного плеча. В результате напряжения, выделяющегося на смесителях, имеют вид

$$\begin{aligned} u_1 &= u_0 \rho(t) \sin \varphi(t) \\ u_2 &= u_0 \rho(t) \cos \varphi(t) \end{aligned} \quad (1)$$

где

$u_0 = u_1(0) = u_2(0)$ - амплитуда напряжений в отсутствие плазмы (балансируется с помощью аттенуаторов (А)).

$\rho(t) = \frac{\sqrt{u_1^2 + u_2^2}}{u_0} = \exp\left(-\frac{4\pi\sigma_{\text{вч}} l}{c\sqrt{\epsilon}}\right)$ - относительное затухание зондирующей волны в плазме

$\varphi(t) = 2\pi \frac{l}{\lambda} (1 - \sqrt{\epsilon})$ - относительный фазовый сдвиг в плазме.

l - эффективная длина плазменного слоя.

$\epsilon = 1 - \frac{4\pi n e^2}{m(2\pi f)^2}$ - диэлектрическая проницаемость плазмы

$\sigma_{\text{вч}}$ - в.ч. проводимость плазмы.

m, e - соответственно масса и заряд электронов.

λ, f - длина и частота зондирующей волны.

2.

Полученной информации (I) достаточно для того, чтобы непосредственно, без применения растровой системы и дополнительных преобразований, регистрировать фазовый сдвиг волны $\varphi(t)$ (с учетом его знака) и затухание $\rho(t)$ [3,4]. Действительно, напряжения $u_1(t)$ и $u_2(t)$, поданные, соответственно, на вертикальные и горизонтальные пластины электронно лучевой трубки, смещают луч в точку, радиус - вектор которой представляет собой комплексную амплитуду прошедшего через плазму сигнала в полярной системе координат (радиус - амплитуда $\sim \rho u_0$, угол - фаза φ). При изменении параметров плазмы (n, σ) на экране описывается непрерывная кривая $\rho(t) \exp(i\varphi(t))$; временной масштаб задается с помощью темновых меток, накладываемых на траекторию луча (рис.3). Необходимое усиление напряжений u_1, u_2 осуществляется в широкополосных видеусилителях ($У_1, У_2$), имеющих идентичные частотные характеристики ($\Delta F = 10$ Мгц, с неравномерностью $\lesssim 5\%$).

Для яркостной модуляции луча ("время") используются калиброванные импульсы длительностью $\sim 0,02$ мксек и частотой следования 10; 1; 0,1 Мгц, формируемые генератором меток (ГМ). Область регистрации во времени выбирается с помощью модулирующего импульса ($T = 0,5 + 400$ мксек) поступающего с генератора подсвета (ГП), который в свою очередь запускается от синхронизирующего устройства.

Скорость регистрации фазы $\frac{d\varphi}{dt}$ в описанной схеме ограничена только полосой пропускания ΔF усилителей и составляет

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{\text{max}} \sim 2\pi \Delta F = 2\pi \cdot 10^7 \text{ рад/сек.}$$

При использовании индикации с растровым типом развертки [5] существуют дополнительные ограничения, связанные с применением усилителей промежуточной частоты с полосой $2\Delta F$ и быстродействующих формирующих каскадов.

Указанное значение $\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{\text{max}}$ позволяет регистрировать процессы со скоростью изменения концентрации плазмы

$$\frac{dn}{dt} \sim n_{\text{кр}} \frac{d\varphi}{dt} \sim 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ мксек}^{-1}$$

$$n_{\text{кр}} = \frac{m(2\pi f)^2}{4\pi e^2} \quad \text{при } \lambda = 0,8 \text{ см}$$

$$l \sim 2 + \frac{1}{3} \text{ см}$$

3.

Предельный диапазон измеряемых фаз в принципе ограничен лишь качеством записи процесса на фотопленке (в наших экспериментах легко регистрировались фазовые сдвиги $\sim 20\pi$ с точностью отсчета $\sim 5^\circ$).

В случае немонотонного характера процесса использовалось дополнительно горизонтальное смещение луча калиброванным пилообразным напряжением. Полученное "трехмерное" изображение полностью описывало процесс, включая интервалы времени, когда $\frac{d\varphi}{dt} = 0$ (рис. 3б)

Представляемые осциллограммы получены при возбуждении ударных волн. Устройство разрешает процесс, длительность которого порядка 10^{-7} сек.

Для регистрации еще более быстрых процессов применялся другой способ индикации с использованием промышленных широкополосных осциллографов. В этом случае сигналы со смесителей интерферометра регистрировались порознь на отдельных лучах осциллографов с линейной временной разверткой. В отличие от широко распространенного способа индикации одноплечной мостовой схемой, осциллограммы, полученные описанным выше способом, содержат полную информацию об изменении во времени значений фазы (с учетом её знака) и амплитуды зондирующего СВЧ сигнала, сказанное относится и к режимам работы, когда максимальное смещение фазы меньше $\pi/2$. По этим осциллограммам строится голограф комплексного значения $f_{exp}(t)$ величины сигнала, прошедшего через плазму или временная зависимость фазы $\varphi(t)$ и амплитуды $\rho(t)$ в прямоугольной системе координат.

Усилители вертикального отклонения использовавшихся осциллографов имеют полосу рабочих частот до $60 + 150$ мГц (на уровне ± 3 дБ). Таким образом мы имели возможность регистрировать изменения фазы сигнала со скоростью, не превышающей величины:

$$\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{max} \leq 2\pi \Delta f \approx 3\pi \cdot 10^8 \text{ рад/сек}$$

что соответствует скорости изменения плотности $\frac{dn}{dt} \sim 10^{15} \text{ см}^{-3} \cdot \text{мксек}^{-1}$

Последняя система индикации связана с весьма жесткими требованиями на синхронизацию движения лучей обоих осциллографов по времени.

При максимальной скорости измерения фазы $\frac{d\varphi}{dt} = 2\pi \cdot 10^8$ рад/сек требуется учет сдвигки сигналов между собой (например, в подводных кабелях) с точностью до $\pm 1,5$ нсек. Для точной синхронизации начала отсчета времени на осциллограмме использовался синхронизирующий прямоугольный импульс длительностью 30 нсек с крутым фронтом. Импульс подавался за 100 нсек до начала процесса и складывался с сигналом на входе усилителей. Таким образом уменьшалось влияние нелинейности развертки осциллографа, нестабильности её запуска и скорости, полностью исключалось влияние запаздывания самого сигнала внутри осциллографа.

Электрические длины подводных кабелей предварительно измерялись с точностью до нескольких десятков сантиметров и учитывались при обработке осциллограмм. Точность измерения фазы в основном ограничивалась точностью синхронизации лучей осциллографов и неравномерностью их частотной характеристики.

Описанные схемы могут быть использованы и для непрерывной регистрации положения границы плазмы (слой с плотностью выше критической $N_{кр}$). В этом случае оба рупора располагаются по одну сторону от исследуемого объема так, что приемный рупор ориентирован на отраженный луч и отсутствует связь между рупорами. Предпочтительней для этой цели использование ферритового циркулятора.

При определенных условиях эксперимента, когда плазменный объем достаточно хорошо удовлетворяет приближению плоского слоя (т.е. эффекты рассеяния, дифракция и др. пренебрежимы), полученные при помощи описанного устройства величины $\varphi(t)$, $\rho(t)$ достаточны для расчета ряда параметров плазмы: средних значений плотности N , проводимости σ , эффективной частоты столкновений электронов $\nu_{эф}$, оценок пространственного распределения плотности, а также для установления геометрии плазмы и закона движения её границ.

Зондирование плазмы проводилось как поперек плазменного столба (с помощью внешних антенн), так и внутри объема плазмы (с помощью миниатюрных диэлектрических и рупорных антенн).

На рис. 4 а, б представлены результаты обработки осциллограмм, полученных при "внутреннем" зондировании плазмы вдоль магнитного поля.

Ширина фронта плотности по порядку величины соответствует ширине фронта ударной волны.

Авторы признательны Ю.Б.Нестерихину за полезные обсуждения и К.Н.Меклеру и Ю.М.Молявину за помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

1. Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Доклад с № 2I/2I8 Международной конференции по физике плазмы, Калем (Англия), 1965 г.
2. M. Camac et al *Nucl Fusion* p2, 423 (1962)
3. ED Ginzton *Microwave measurements* New York, Toronto London 1957
4. FJ Fitz Osborne, *Canad J Phys*, 40, N11 1620 (1962)
5. Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, А.Г.Пономаренко ТВТ, № 6, 837 (1964).

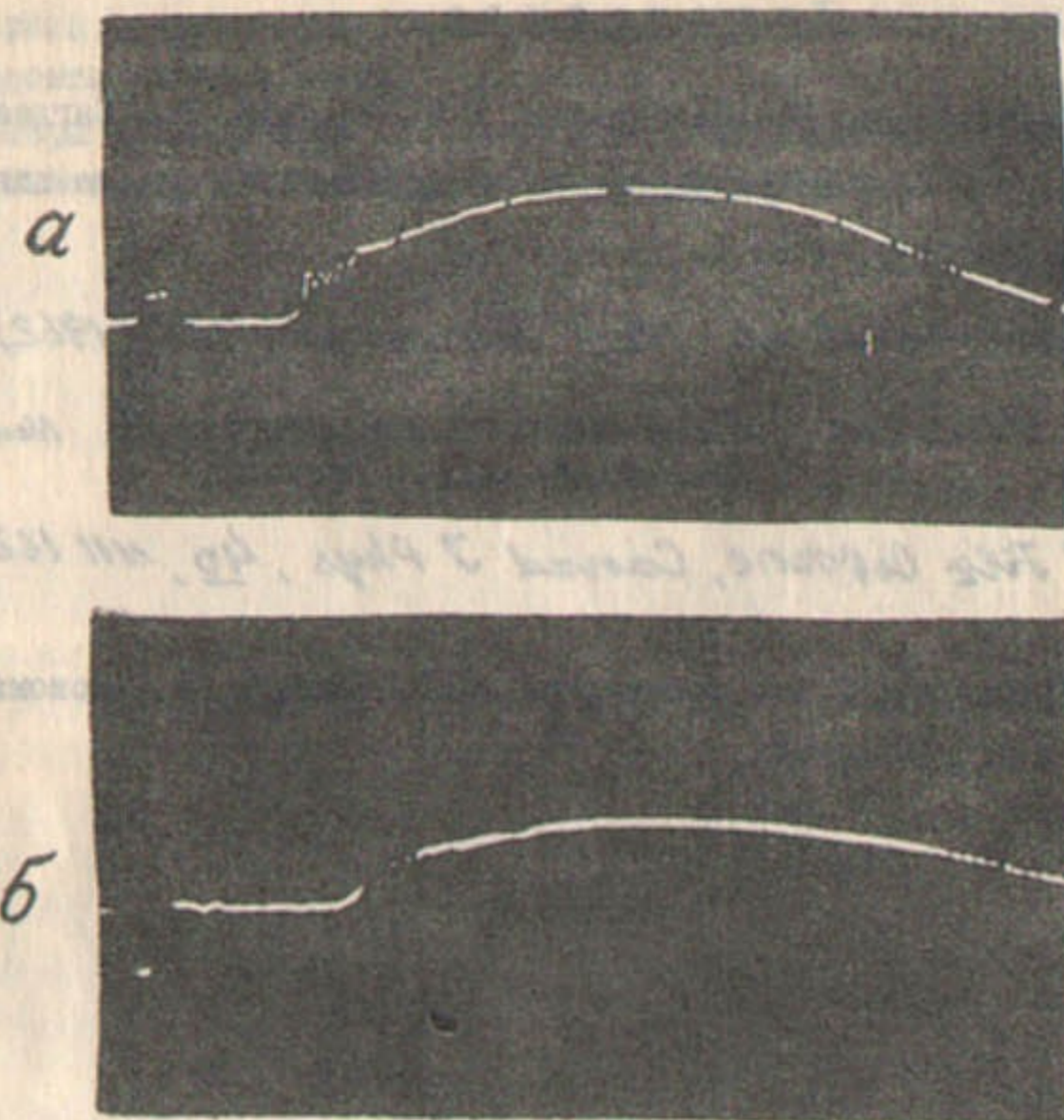


Рис.1. Осциллограммы ударной волны с минимальной шириной фронта, полученные с магнитных зондов:
 а - зонд с открытой петлей
 б - зонд заключен в трубку

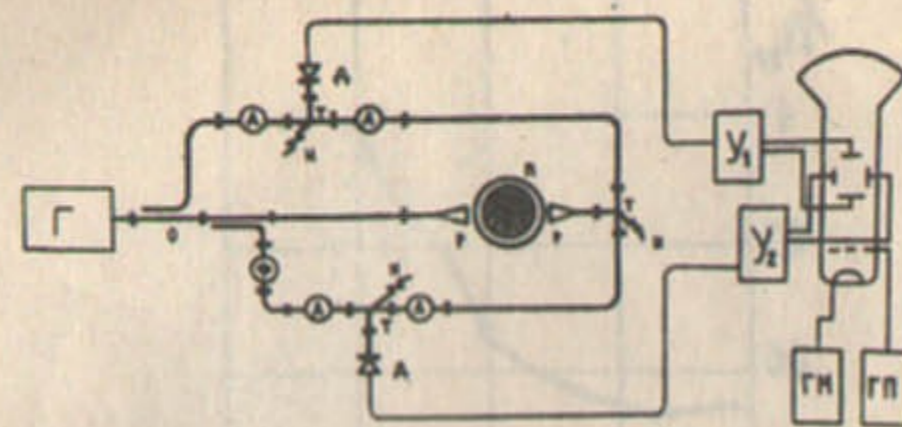


Рис.2. Микроволновая схема непрерывной регистрации фазы и амплитуды зондирующего сигнала.

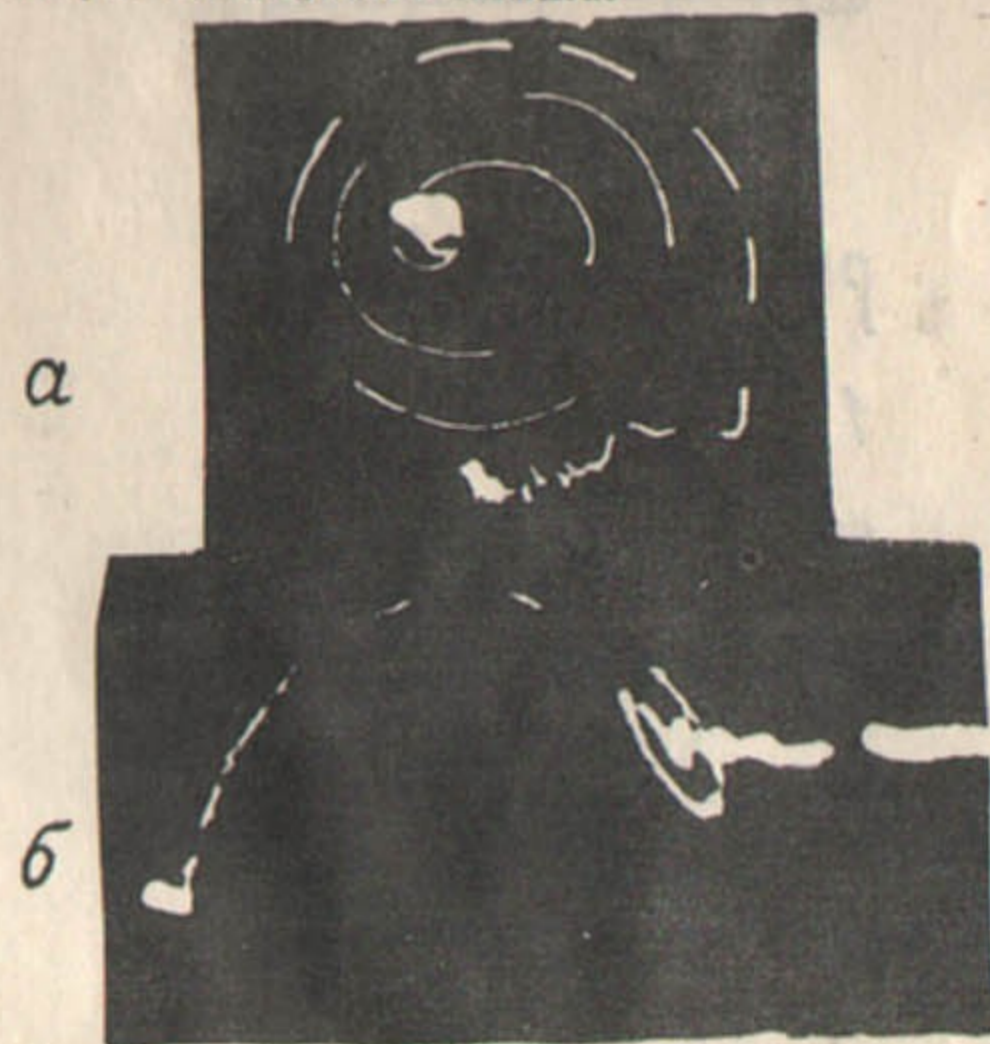


Рис.3. Интерферограммы профиля плотности ударной волны (метки 0,1 мксек)
 а - при поперечном зондировании
 б - при продольном зондировании с применением горизонтального смещения луча

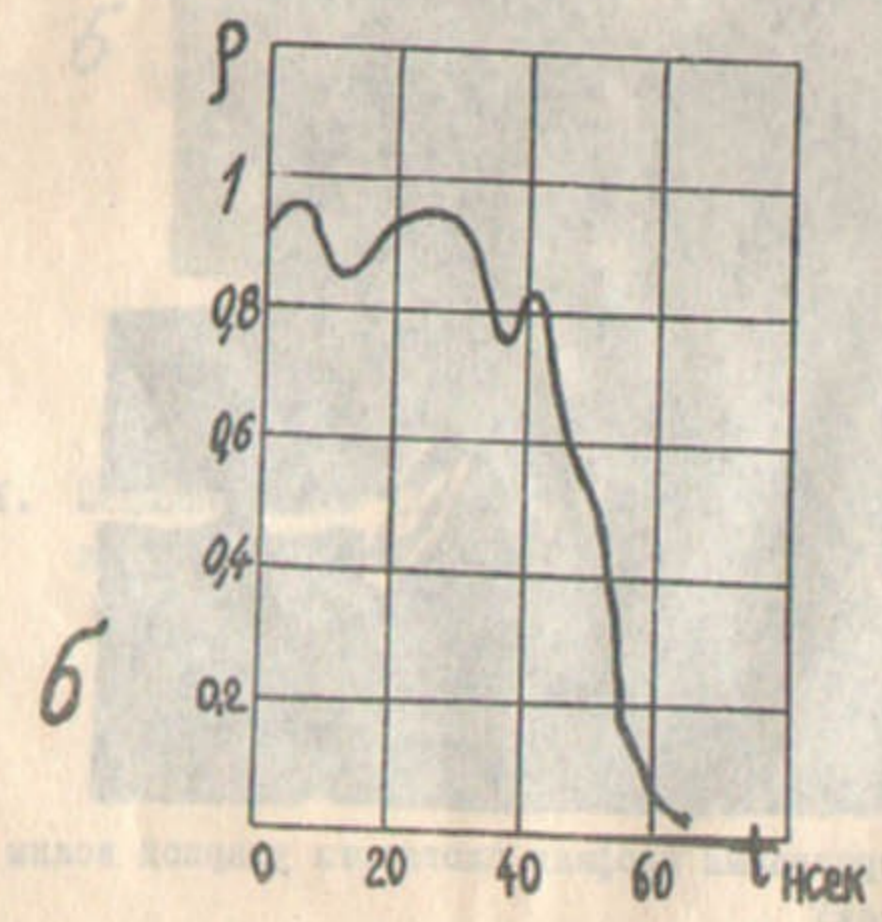
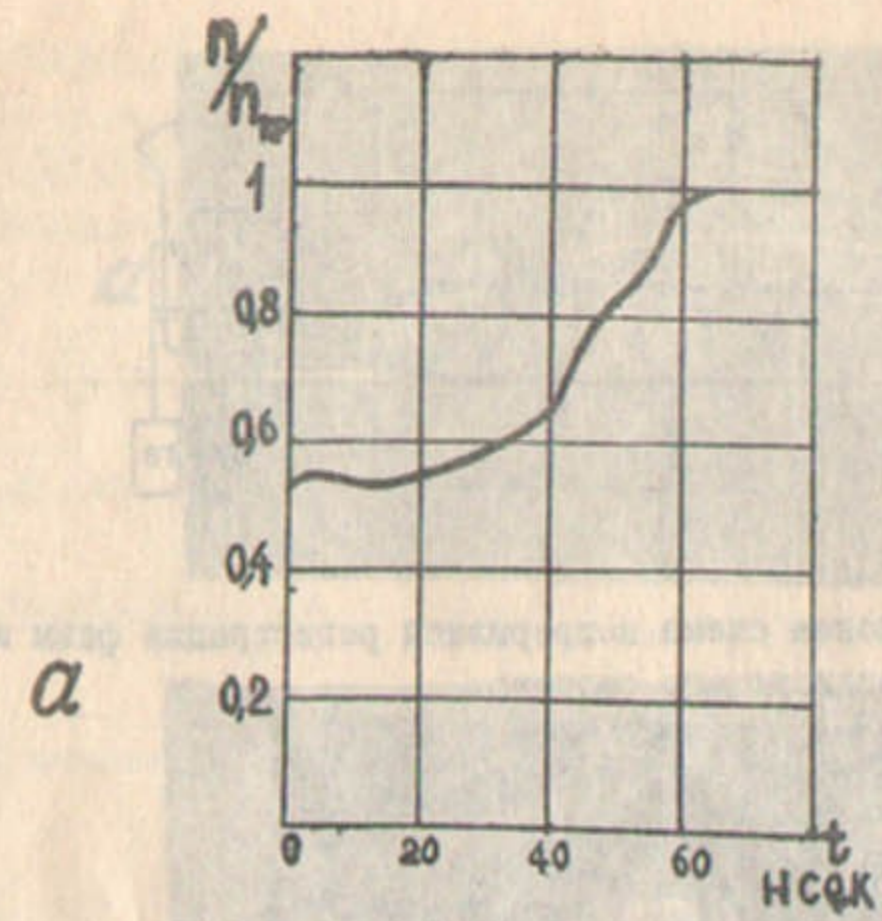


Рис.4. Плотность плазмы (а) и затухания СВЧ сигнала (б) во фронте ударной волны.