

**"ИЗОМАГНИТНЫЙ СКАЧОК" ВО ФРОНТЕ СИЛЬНОЙ
БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ**

Р.Х.Куртмуллаев, В.Л.Масалов, К.И.Мехлер, В.И.Пильский

Исследования бесстолкновительных ударных волн с помощью магнитных зондов обнаружили изменение структуры фронта и возрастание его ширины Δ при достижении критического числа Маха $M_{кр} \approx 3$ [1].

Значения Δ и $M_{кр}$ не противоречат теоретическим представлениям об опрокидывании сильной ударной волны [2]. Из теории и результатов математического моделирования на ЭВМ [3] следует, что опрокидыванию волны предшествует специфический эффект: возрастание относительной крутизны скачка плотности плазмы n . Кроме того, последующее нарушение однопотоковости течения должно изменить распределение физических параметров во фронте относительно исходного (при $M < M_{кр}$).

В настоящей работе излагаются результаты исследования распределения плотности и магнитного поля H при переходе через критическое значение числа Маха.

Эксперименты проводились на установке УН-4 [4]. Плазма ($n_0 \sim 10^{13} + 10^{14} \text{ см}^{-3}$), создаваемая в цилиндрическом объеме 16 см, помещенном в квазистационарное магнитное поле ($H_0 = 100 + 1000 \text{ э}$), подвергалась сжатию быстронарастающим полем ($H_{\omega}^0 = 2 + 3 \text{ кэ}$). Возникающая

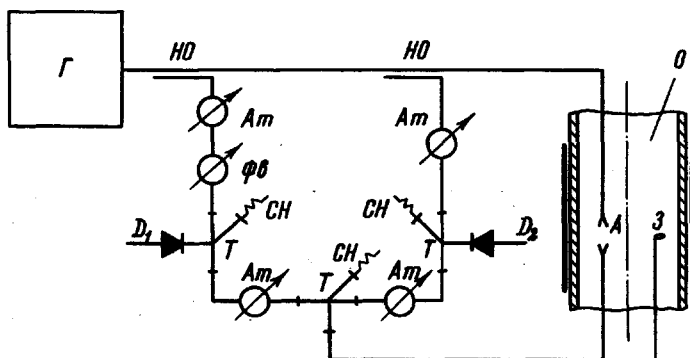


Рис.1. Схема микроволнового и магнитного зондирования. O – плазменный объем, 3 – магнитный зонд, A – СВЧ антенны с диэлектрическими излучателями, Γ – генератор СВЧ, HO – направленная ответвленная линия, Am – аттенюатор, $\Phi\phi$ – фазовращатель, D – детектор, T – двойной тройник, CH – согласованная нагрузка

цилиндрическая ударная волна распространялась к оси. Профиль магнитного поля в волне регистрировался магнитным зондом (одиночной петлей диаметром $2 + 3 \text{ мм}$; рис.1). СВЧ зондирование ($\lambda = 2 \text{ мм}$) осуществлялось в плоскости фронта волны с помощью миниатюрных диэлектрических антенн диаметром $1,5 \text{ мм}$, расстояние между которыми $\ell \sim 3\lambda$. Система обеспечивала пространственное разрешение внутри ударного скачка ($\Delta \sim 1 + 4 \text{ см}$). Магнитный зонд и СВЧ антенны располагались на одном расстоянии от оси ($r \approx R/2$) со сдвигом по азимуту на 30° .

Чтобы качественно проследить за перестройкой структуры фронта, первоначально измерения проводились с использованием схемы "отсечки" [5]. Детектор регистрировал ослабление СВЧ мощности, вызван-

ное как затуханием, так и "запираем" сигнала вблизи критической плотности ($n_{кр} \approx 2,1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). На рис.2 представлена последовательность переходных фаз перестройки фронта по мере возрастания числа Маха M . При $M < M_{кр}$ магнитный зонд регистрирует аperiодический фронт волны (рис.2, *а*, $M \sim 2$), измеренная ширина которого $\Delta \sim 10 c / \omega_0$ (c — скорость света, ω_0 — электронная плазменная частота). Сигнал с детектора СВЧ (рис.2, *б*) в этом режиме всегда нарастает монотонно и подобен магнитному профилю фронта. При достижении критической амплитуды волны ($M \gtrsim 3$) сигнал с детектора качественно изменяется (рис.2, *в*, *е*). От основного скачка во в фронте отделяется слой плазмы, который непрерывно уширяется по мере увеличения числа Маха. Одновременно магнитный зонд регистрирует появление перед основным скачком "подножия" — области со слабым изменением H (рис.2, *в*, *д*). Резкое уменьшение скорости нарастания маг-

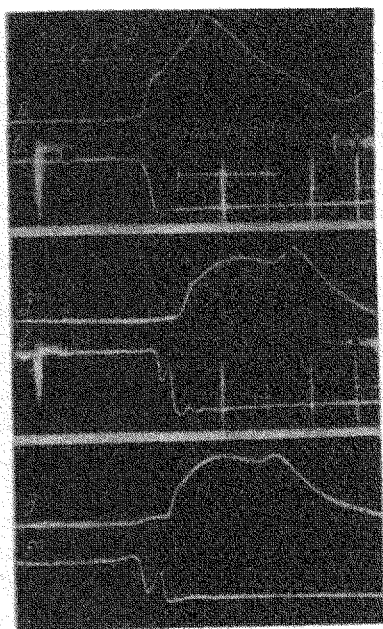


Рис.2. Влияние числа Маха на структуру фронта волны: *а*, *в*, *д* — сигналы магнитного зонда; *б*, *г*, *е* — сигналы с детектора СВЧ; *а*, *б* — $M = 2$; *в*, *г* — $M \approx 3,2$; *д*, *е* — $M \approx 3,5$

нитного поля в этой области указывает на проявление механизма, отличного от турбулентной проводимости, определявшей профиль волны при $M < M_{кр}$.

Количественное измерение распределения плотности и проводимости плазмы во фронте волны были проведены с помощью скоростного СВЧ интерферометра [4]. Схема (рис.1) имеет два опорных плеча, электрические длины которых отличаются на $\lambda/4$. Это позволяет по напряже-

ниям $U_1(t)$ и $U_2(t)$ на детекторах D_1 и D_2 построить голограф величины $\sqrt{U_1(t)^2 + U_2(t)^2} e^{i\Delta\phi(t)}$ (рис.3). Концентрация $n(t)$ и ВЧ проводимость σ ВЧ плазмы находятся непосредственно по изменению угла $\Delta\phi(t)$ и радиус вектора $\rho(t)$

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi\ell}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{n(t)}{n_{кр}}}\right); \quad \rho(t) = \sqrt{\frac{U_1^2(t) + U_2^2(t)}{U_0^2}} = \exp\left(-\frac{4\pi\ell\sigma_{ВЧ}}{c\sqrt{\epsilon}}\right)$$

(U_0 - значение $\sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ в отсутствие затухания, $\epsilon = 1 - n/n_{кр}$ диэлектрическая проницаемость плазмы).

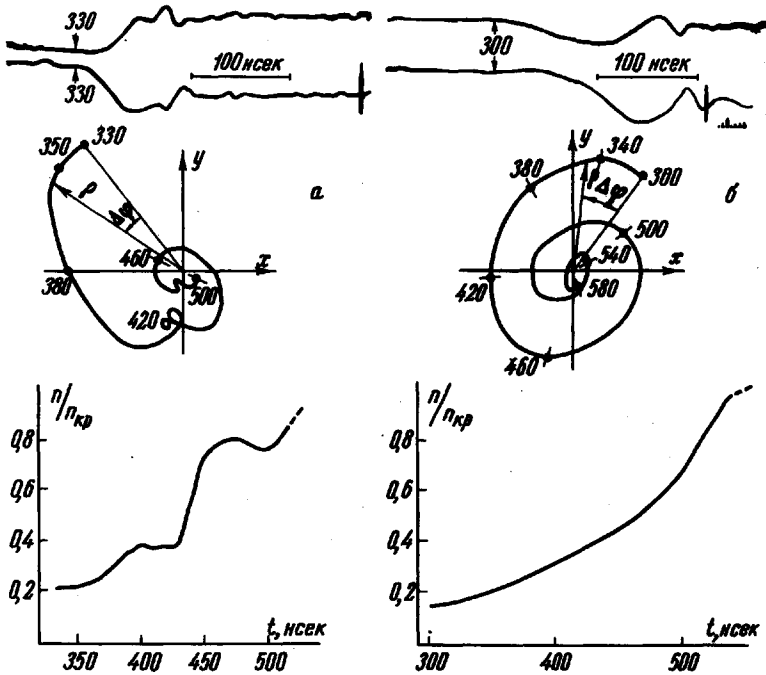


Рис.3. Напряжения на детекторах интерферометра, голографы и построенные по ним профили плотности во фронте волны. а - $M \approx 3,2$; б - $M \approx 4,5$; $t=0$ - момент включения магнитного поршня

Использование широкополосной аппаратуры ($\Delta f \sim 150 \text{ МГц}$, $(d\phi/6t)_{\max} \sim 3 \cdot 10^8 \text{ рад/сек}$) позволило регистрировать скачки плотности $\Delta n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ за время $\Delta t \sim 10 \text{ нсек}$ ($dn/dt)_{\max} \sim 10^{22} \text{ см}^3 \text{ сек}^{-1}$).

Эксперименты, проведенные в широком диапазоне параметров (n_0 , H_0 , H_{∞}^0) показали, что сигналы с детекторов, имеющие в случае аperiodического фронта (при $M < M_{кр}$) вид затухающих синусоид (соответственно монотонному нарастанию плотности) при достижении критического числа Маха резко изменяются и приобретают характер нерегулярных кривых. Рис.3,а иллюстрирует зондирование плотности в режиме, соответствующем рис.1,с,г ($M \gtrsim 3$). Особенностью полученного распределения $n(t)$, свойственной вообще "критическому" режиму, является его резко изломанный характер. Ширина скачка меньше ширины аperiodического участка магнитного профиля фронта, в согласии с результатами моделирования задачи при $M \gtrsim M_{кр}$ [3]. Такая структура фронта подобна "изомагнитному скачку", известному в магнитной гидродинамике для волн в условиях низкой проводимости [6], где температура и скорость претерпевают скачок, в то время как фронт магнитного поля "размазан". Пользуясь представлением об опрокидывании волны можно объяснить также образование "опережающего" слоя возмущенной плазмы перед скачком, как результат "перехлеста" фронта при $M \gtrsim M_{кр}$, когда турбулентная диссипация оказывается недостаточной для компенсации нелинейного укрупнения [2]. Нарушение однопоточности движения ионов и появление вязкостного механизма должно изменить скорость нарастания H , что и наблюдается в эксперименте. С возрастанием числа Маха ($M \sim 4+5$) область "подножия" расширяется, а участок резкого скачка исчезает. Образующийся относительно гладкий профиль $n(t)$ (рис.3,б), по-видимому, соответствует "установившемуся" состоянию фронта после его опрокидывания. Характерно, что при этом скорость нарастания магнитного поля по всему фронту ($\Delta \rightarrow M(c/\Omega_0)$, Ω_0 — ионная плазменная частота) устанавливается примерно такой, какой она была в области "подножия".

Измерения проводимости плазмы и исследование закономерностей электрических и магнитных флуктуаций во фронте волны согласуются с изложенной картиной перестройки структуры фронта.

Авторы искренне признательны Р.З.Сагдееву и Ю.Е.Нестерихину за обсуждения, В.Г.Еселевичу, Ю.М.Малявину, Ю.Л.Козьминых за помощь в работе.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступило в редакцию
24 ноября 1967 г.

Литература

- [1] Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Доклад — 21/218 на II Международной конференции по физике плазмы. Калэм, 1965 г.; Conferens Proseeding VII, 367; I.M.Paul, L.S.Holms, M.I.Parkinson, I.Sheffield. Report on Int. Conf. on Phenomena in Ionized gases, Belgrad 22nd-27th, August, 1965.
- [2] Р.З.Сагдеев. Вопросы теории плазмы, 4, 20, Атомиздат, М., 1964.

- [3] Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев. Физика горения и взрыва. 3, 3, 1966.
- [4] Р.Х.Куртмуллаев. Диссертация, Новосибирск, 1965.
- [5] В.Д.Русанов. Современные методы исследования плазмы. Госатомиздат, 1962, стр.41.
- [6] W.Marshall. Proc. Roy. Soc., 233A, 367, 1955.