

160

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

**“Изомагнитный скачок” во фронте
сильной бесстолкновительной ударной
волны**

г.Новосибирск 1967

Р.Х.Куртмуллаев, В.Л.Масалов,
К.И.Меклер, В.И.Пильски.

"ИЗОМАГНИТНЫЙ СКАЧОК" ВО ФРОНТЕ СИЛЬНОЙ
БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

А Н Н О Т А Ц И Я

В данной работе излагаются результаты исследования распределения плотности плазмы во фронте бесстолкновительной ударной волны вблизи критического числа Маха, проведенные одновременно с магнитными измерениями и осуществленные методом скоростной СВЧ интерферометрии.

Показано, что фронт волны, имеющий при $M < M_{кр}$ аperiodический характер для H и n , при достижении критического значения $M \approx 3$ "расщепляется" на две области.

Область, появляющаяся при $M > M_{кр}$ перед основным скачком, уширяется с возрастанием числа Маха и характеризуется значительно более медленным нарастанием магнитного поля. Ширина скачка плотности становится меньше аperiodического участка магнитного профиля в согласии с результатами моделирования задачи на ЭВМ при $M \rightarrow M_{кр}$. Такая структура фронта подобна "изомагнитному скачку". При дальнейшем возрастании числа Маха ($M \approx 4 \div 5$) профили плотности и магнитного поля уширяются до размера $\Delta \sim M \frac{c}{\Omega_0}$ и становятся подобными.

Наблюдающиеся "изомагнитные скачки" плотности при $M > M_{кр}$ и последующая трансформация фронта согласуются с развитием физических процессов при опрокидывании ударной волны.

Экспериментальные 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 критичности скачка плотности плазмы n . Кроме того, последующее нарушение однопоточности течения должно изменить распределение физических параметров во фронте относительно исходного (при $M < M_{кр}$). Экспериментальная проверка этих закономерностей может с достаточной определенностью установить физическую природу явления при $M \approx M_{кр}$.

В настоящей работе излагаются результаты исследования распределения плотности и магнитного поля 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 магнитным полем ($H_{\omega} = 2 + 3 \text{ кэ}$). Возникающая цилиндрическая ударная волна распространялась к оси. Профиль магнитного поля в ударной волне регистрировался магнитным зондом (одиночной петлей диаметром 2 + 3 мм; рис.1). СВЧ зондирование ($\lambda = 2 \text{ мм}$) осуществлялось в плоскости фронта волны с помощью миниатюрных диэлектрических антенн диаметром 1,5 мм, расстояние между которыми $l \sim 3\lambda$. Эффективный диаметр зондирующего луча достаточно мал по сравнению с шириной фронта ($\Delta \sim 1 + 4 \text{ см}$), что обеспечивало пространственное разрешение внутри ударного скачка. Магнитный зонд и СВЧ антенны располагались на одном расстоянии от оси ($z \sim R/2$) со сдвигом по азимуту на 30° .

Чтобы качественно проследить за изменением распределения плазмы во фронте волны, первоначально измерения проводились с использованием схемы "отсечки" /5/. Детектор регистрировал ослабление СВЧ мощности, прошедшей через плазму, вызванное как затуханием, так и "запиранием" 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 апериодический фронт волны (рис.2а, $M \sim 2$), измеренная ширина которого $\Delta \sim 10 c/\omega_0$ (c - скорость света, ω_0 - электронная плазменная частота). Сигнал с детектора СВЧ (рис.2б) в этом режиме всегда нарастает монотонно и подобен магнитному профилю фронта. При достижении критической амплитуды волны ($M \approx 3$) сигнал с детектора качественно изменяется (рис.2 г,е). От основного скачка во фронте отделяется слой плазмы, который непрерывно уширяется по мере возрастания числа Маха. Одновременно магнитный зонд регистрирует появление перед основным скачком "подножия" - области со слабым изменением H (рис.2 в,д). Резкое уменьшение скорости нарастания магнитного 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 $\lambda/4$, в результате чего регистрируемые сигналы U_1 и U_2 на детекторах D_1 и D_2 имеют постоянный фазовый сдвиг на $\pi/2$. Можно построить годограф комплексной величины $\tilde{u}(t) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} e^{i\varphi}$ откладывая по осям X и Y прямоугольной системы координат мгновенные значения напряжений $u_1(t)$ и $u_2(t)$. Концентрация $n(t)$ определяется по изменению фазы (угла)

$$\Delta\varphi(t) = \frac{2\pi e}{\lambda} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{n(t)}{n_{кр}}} \right)$$

а в.ч. проводимость плазмы σ в.ч. по изменению нормированной амплитуды (радиус - вектора)

$$\rho(t) = \sqrt{\frac{u_1(t)^2 + u_2(t)^2}{u_0^2}} = \exp\left(-\frac{4\pi\sigma_0 l}{c\sqrt{\epsilon}}\right)$$

где u_0 - значение $\sqrt{u_1(t)^2 + u_2(t)^2}$ в отсутствие затухания, $\epsilon = 1 - \frac{n(t)}{n_{кр}}$ - диэлектрическая проницаемость плазмы. Регистрируемая скорость изменения фазы $\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)_{max}$ ограничивалась полосой пропускания аппаратуры ($\Delta f \sim 150$ мгц) и равнялась $\sim 3 \cdot 10^8$ рад/сек. Это позволяло регистрировать скачки плотности

$$\Delta n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ для время } \Delta t \sim 10 \text{ нсек} \left(\left(\frac{dn}{dt}\right)_{max} \sim 10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ сек}^{-1} \right).$$

Эксперименты, проведенные в широком диапазоне параметров (n_0, N_0, N_{\sim}) показали, что сигналы с детекторов, имеющие в случае апериодического 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.3а иллюстрирует зондирование плотности в режиме, соответствующем рис.1 в,г ($M \approx 3$). Особенностью полученного распределения $n(t)$, свойственной вообще "критическому" режиму, является его резко изломанный характер. Ширина скачка меньше ширины апериодического участка магнитного профиля фронта, в согласии с результатами моделирования задачи при $M \approx M_{кр}$ [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 $M \approx M_{кр}$, когда турбулентная диссипация оказывается недостаточной для компенсации нелинейного укручения [2]. Нарушение однопотоковости движения ионов и появление вязкостного механизма в этой области 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.3б), по-видимому, соответствует "установившемуся" состоянию фронта после его опрокидывания. Характерно, что при этом скорость нарастания магнитного поля по всему фронту ($\Delta \sim M \frac{c}{\Omega_0}$, где 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.Молявину, Ю.Л.Козьминих 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 - 21/218 на II Международной конференции по физике
плазмы, Калэм, 1965 г. *Conferezes Proceedings VII, 367.*
J.M.Paul, L.S.Holms, M.J.Parkinson, J.Sheffield.
Report on Int. Conf. on Phenomena in Ionized
gases, Belgrad 22nd-27th August 1965
2. Р.З.Сагдеев. Вопросы теории плазмы, т.4, 20, Москва, Атом-
издат, 1964 г.
3. Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев. Физика горения и взрыва, 3,3,
1966 г.
4. Р.Х.Куртмуллаев. Диссертация, Новосибирск, 1965 г.
5. В.Д.Русанов. Современные методы исследования плазмы. Гос -
атомиздат, 1962, стр.41.
6. *W.Marshall, "Proc. Roy. Soc."* 233A, 367-376,
1955.

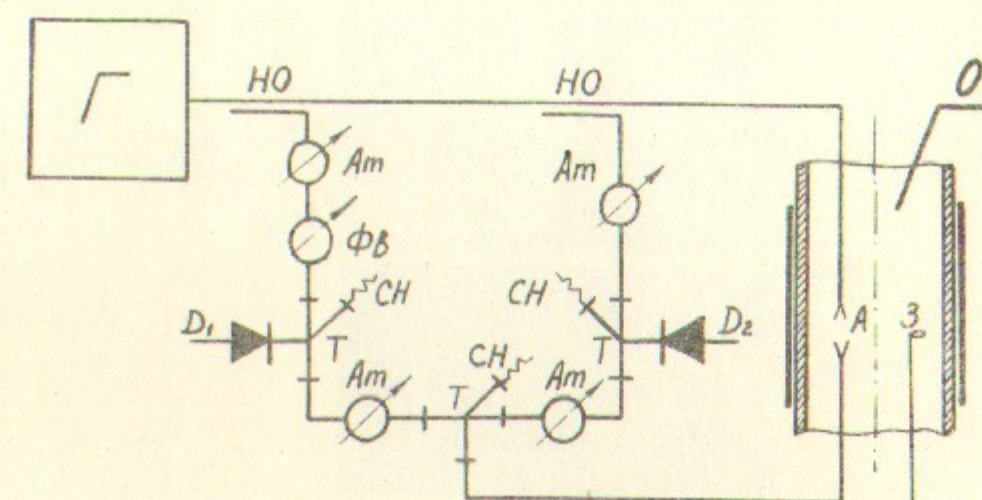


Рис. I.

Схема микроволнового и магнитного зондирования.
 О - плазменный объем, З - магнитный зонд, А - СВЧ антенны с
 диэлектрическими излучателями, Г - генератор СВЧ, НО - направ-
 ленный ответвитель, Am - аттенюатор, ФВ - фазовращатель,
 Д - детектор, Т - двойной тройник, СН - согласованная
 нагрузка.

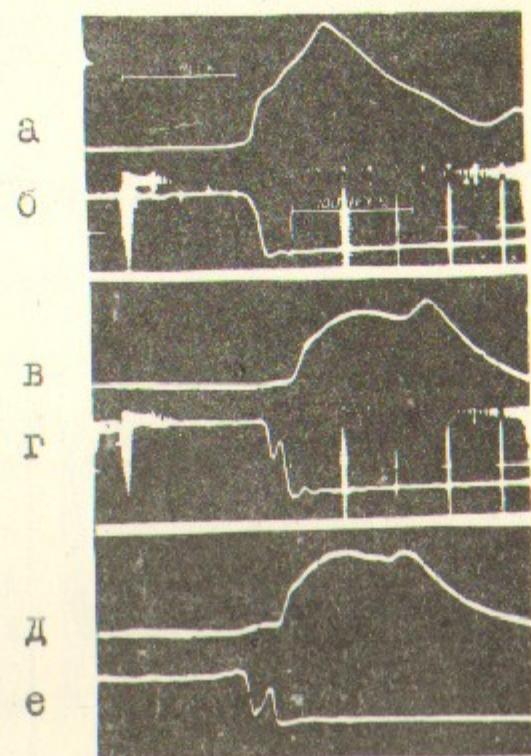


Рис.2.

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 - $M \approx 3,5$.

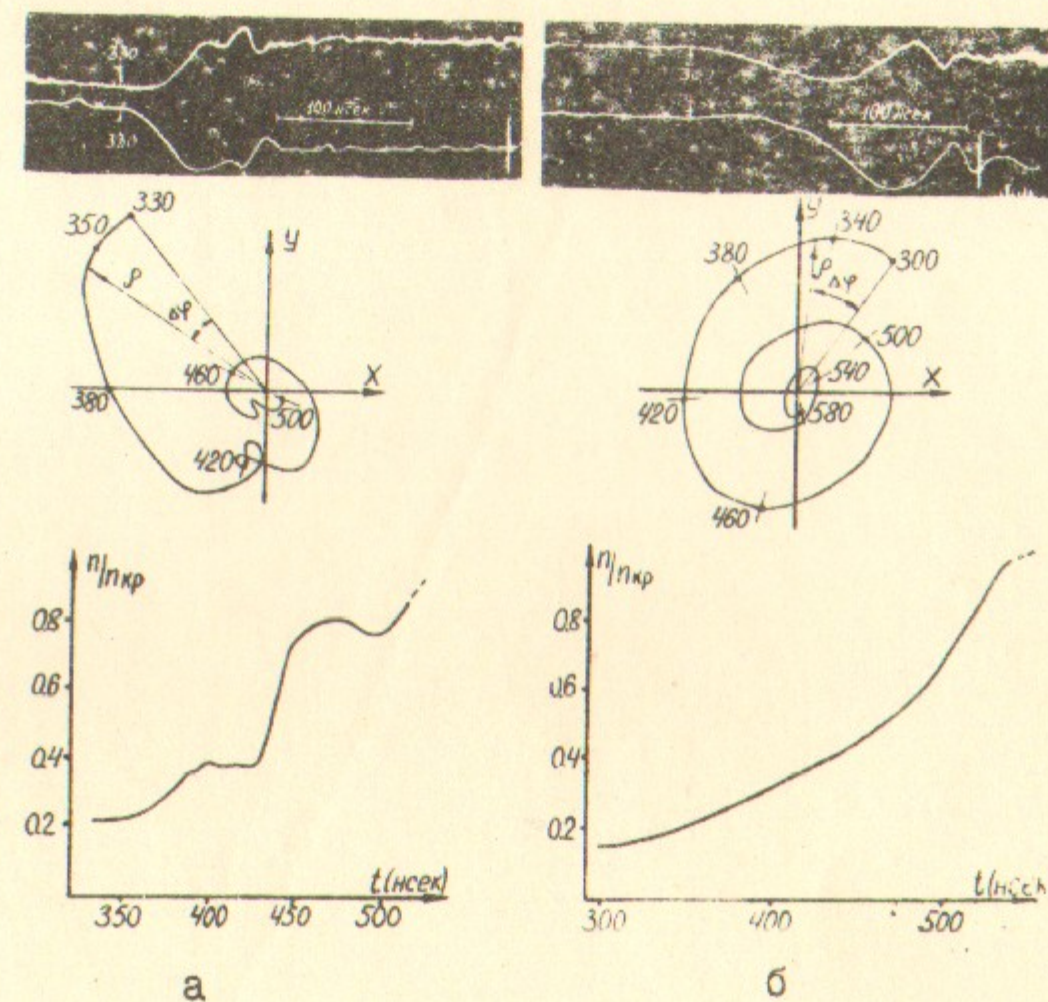


Рис.3.

Напряжения на детекторах интерферометра, годографы 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.

Ответственный за выпуск Р.Х.КУРТМУЛЛАЕВ
Подписано к печати 17.X-1967 г.
Усл. 0,5 печ. листа, тираж 250 экз.
Заказ № 160, Бесплатно

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР