

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ В ПЛАЗМЕ

А. М. Искольдский, Р. Х. Куртмуллаев, Ю. Е. Нестерихин,
А. Г. Пономаренко

В ряде работ [1-4] обсуждалась возможность распространения в разреженной плазме ударных волн с толщиной фронта значительно меньшей длины свободного пробега. С такого рода явлениями связано, по-видимому,

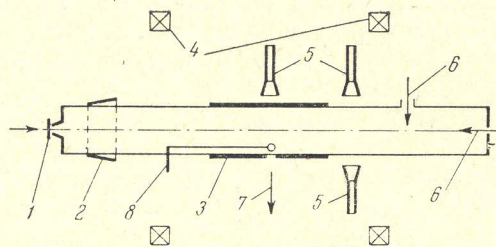


Рис. 1. 1 — электродинамический импульсный напуск нейтрального газа, 2 — конический вихрь, создающий предварительно ионизованную плазму, 3 — ударный виток магнитного поршня, 4 — катушки, создающие аксиальное магнитное поле. 5 — рупорные антенны СВЧ систем (радиошумы и плотность плазмы), 6 — сцинтилляционные датчики быстрых электронов и рентгеновского излучения, 7 — поперечная щель для электронно-оптической регистрации ударной волны, 8 — магнитный микрозонд 1 мм

распространение сильных гидромагнитных возмущений по межпланетной плазме, генерируемых солнечными вспышками. Предварительные оценки толщины фронта таких возмущений сделаны Моисеевым и Сагдеевым [5] на основании измерений на ракетах [6]. Попытка наблюдения подобного явления в лабораторной плазме была предпринята Патриком [7].

Позднее автор, однако, пришел к выводам о невозможности связать эти наблюдения с бесстолкновительной динамикой плазмы, так как в условиях его эксперимента ($n > 10^{15} \text{ см}^{-3}$, где n — плотность ионов плазмы, оказавшаяся одного порядка с плотностью нейтральных атомов) длина свободного пробега по отношению к перезарядке была меньше или равна толщине наблюдаемого фронта волны.

Ниже излагаются предварительные результаты изучения распространения ударных волн в плазме значительно меньшей плотности ($n < 10^{14} \text{ см}^{-3}$), при которой длина пробега по отношению к перезарядке существенно больше пути, проходимого ударной волной.

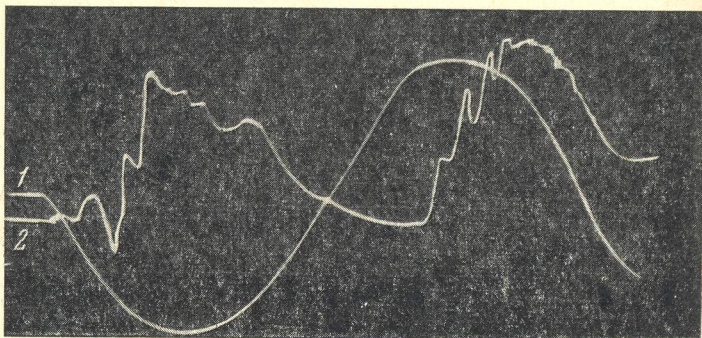


Рис. 3. 1 — осциллограмма тока ударного контура с периодом $1,4 \cdot 10^{-6}$ сек. 2 — осциллограмма изменения магнитного поля на фронте ударной волны, полученная с помощью магнитного зонда, расположенного на расстоянии 8 мм от оси камеры. Видна осцилляторная структура ударных волн, возникающих на первом и втором полупериодах тока

К статье А. М. Искольдского и др. «Эксперименты по бесстолкновительной ударной волне в плазме»

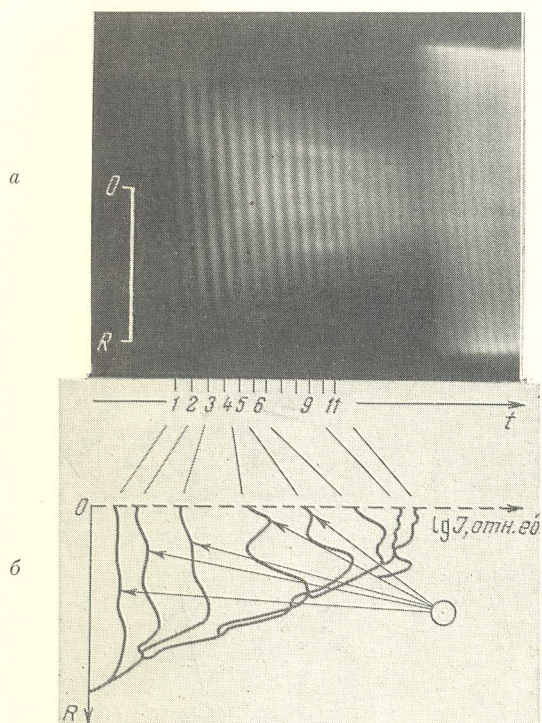


Рис. 2. *a* — ударная волна в гелиевой плазме. Вертикальные полосы следуют через 0,03 мксек, *б* — результаты микрофотометрирования изображения в радикальном направлении. Стрелками указана осцилляция, отцепляющаяся от основного фронта. Кривые относятся к моментам, отмеченным на рис. 2, *a* цифрами, и характеризуют временной ход процесса. По оси абсцисс отложена величина логарифма интенсивности регистрируемого свечения в относительных единицах

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В стеклянной трубке диаметром 166 мм и длиной 2500 мм, помещенной в аксиальное магнитное поле $H_0 \sim 2000$ Ое создавалась предварительно ионизованная плазма, плотность которой контролировалась с помощью СВЧ-диагностики. В момент, когда плазма заполняла объем под витком Z , на последний разряжалась батарея малоиндуктивных конденсаторов, так что на границе плазмы возникало быстро нарастающее магнитное поле (характерное время нарастания $0,2 \times 10^{-6}$ сек) с амплитудой $(2 \div 3) H_0$. Картина сходящегося цилиндрического гидромагнитного возмущения, генерируемого таким «магнитным поршнем», исследовалась с помощью электронно-оптического преобразователя (ЭОП). Съемка производилась через поперечную щель в витке (см. рис. 1).

На рис. 2, *a* представлена развертка во времени свечения ударной волны в гелиевой плазме ($n \sim 3 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, $H_0 \approx 10^3$ Ое). На пилообразное развертывающее напряжение наложен калибровочный синусоидальный сигнал малой амплитуды с периодом $0,03 \cdot 10^{-6}$ сек. На фотографии виден фронт сходящейся волны, движущейся к центру со скоростью $4 \cdot 10^7$ см/сек. Последующая микрофотометрия пленки с помощью прибора МФ-4 позволила разрешить некоторое увеличение интенсивности света впереди основного фронта, которое может быть идентифицировано как опережающая его дополнительная осцилляция (см. рис. 2, *б*). Микрофотометрирование полученного изображения в последующие моменты времени позволяет оценить скорость распространения этого возмущения ($4,6 \cdot 10^7$ см/сек).

На аналогичной установке были проведены эксперименты по исследованию структуры магнитного поля внутри фронта гидромагнитного возмущения с помощью магнитных зондов.

На рис. 3 приведена типичная осциллограмма фронта магнитного возмущения ($n \sim 4 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$, $H_0 \sim 300$ Ое), полученная с помощью магнитного зонда (диаметром 0,8 мм), располагавшегося на расстоянии 8 мм от оси камеры. На фотографии видно запаздывание момента прихода ударной волны, связанное с ее конечной скоростью распространения, одновременно зарегистрирован характер изменения магнитного поля на фронте основной волны (осцилляции). Таким образом, описанные выше изме-

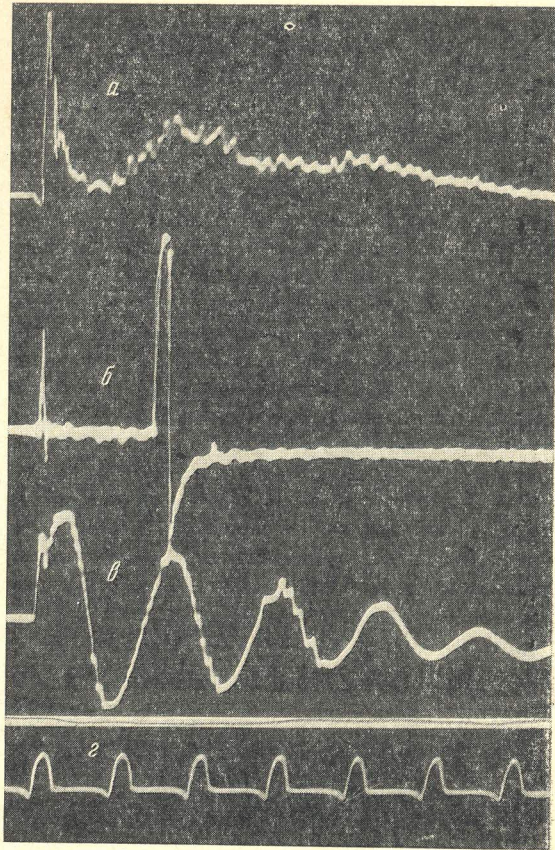


Рис. 4. Излучение из плазмы. *a* — сигнал, регистрируемый сцинтилляционным датчиком; *б* — радиоизлучение с длиной волны 0,8 см, *в* — ток ударного контура, *г* — метки времени $1 \cdot 10^{-6}$ сек

рения с помощью ЭОП и магнитных зондов позволяют сделать вывод о существовании осцилляций внутри фронта бесстолкновительной ударной волны. Качественно результаты этих предварительных экспериментов подтверждают предсказанную теорией осцилляторную структуру фронта [8, 9]. Так, в случае волны, распространяющейся под близким к $\pi/2$ углом φ по отношению к направлению начального магнитного поля ($1 \gg \pi/2 - \varphi > \sqrt{m/M}$, где m , M — соответственно массы электрона и иона), теория дает пространственный масштаб осцилляций, опережающих основной фронт, порядка величины $c\theta/\Omega_0$, где $\Omega_0 = (4\pi ne^2/M)^{1/2}$ — плазменная ионная частота, $\theta = |\pi/2 - \varphi|$. При $n \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для гелиевой плазмы отождествление размеров наблюдаемых осцилляций с $c\theta/\Omega_0$ в пределах накопленного экспериментального материала оказалось непротиворечивым, если за θ принять средний угол между силовыми линиями начального магнитного поля и магнитного поля ударного витка порядка $1/10$, что определяется отношением радиуса витка к его длине.

В этих же экспериментах были зарегистрированы дополнительные явления, сопровождающие схождение ударной волны на оси камеры. Так, в момент кумуляции регистрировался всплеск радиоизлучения в диапазоне 3 см и $0,8 \text{ см}$ (рис. 4, б). Исследования пространственного распределения источников излучения в диапазоне $0,8 \text{ см}$ с помощью антенны с узкой диаграммой направленности обнаружили их локализацию вблизи оси системы. Одновременно с радиоизлучением были зафиксированы сигналы на сцинтилляционном датчике (стильбен, закрытый медной фольгой толщиной 60 м) (рис. 4, а). Характерная длительность этих сигналов $\sim 30 \cdot 10^{-9} \text{ сек}$ соответствует времени прохождения гидромагнитным возмущением расстояния порядка $1-2 \text{ см}$, что коррелирует с оценкой фронта волны, полученной с помощью оптических и магнитных измерений.

В настоящее время ведутся систематические исследования тонкой структуры фронта ударных волн.

Авторы благодарят Г. И. Будкера за постоянное внимание и интерес к работе, Р. З. Сагдеева и А. А. Галеева за обсуждение и помощь в работе.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения Академии наук СССР

Поступило в редакцию
9 мая 1964 г.

Литература

- [1] Р. З. Сагдеев. сб. Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, 4, М., Изд. АН СССР, 1958, стр. 384; ЖТФ, 31, 1185, 1964.
- [2] C. Gardner et al. Доклад № 374 на 2-й Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии, 1958.
- [3] E. Parker. Phys. Rev., 112, 1429, 1958.
- [4] M. Samac et al. Nucl. Fusion, Suppl., p. II, 423, 1962.
- [5] S. Moiseev, R. Sagdeev. Plasma Phys. (J. of nucl. Energy, Part C), 5, 43, 1963.
- [6] M. Neugebauer, C. W. Snyder. Science, 138, 1095, 1962.
- [7] R. Patrick. Phys. Fluids, 3, 321, 1960.
- [8] R. Sagdeev. Magnetohydrodynamic shock waves in low-density ionised gas, Symposium on Electromagnetics and Fluid Dynamics of Gaseous Plasma, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1961. В. И. Карман. ЖТФ, 33, 959, 1963.
- [9] R. W. Morton. Finite Amplitude Compression Waves in Collision Free Plasma, препринт NYO-10434, Нью-Йоркский университет, 1964.