

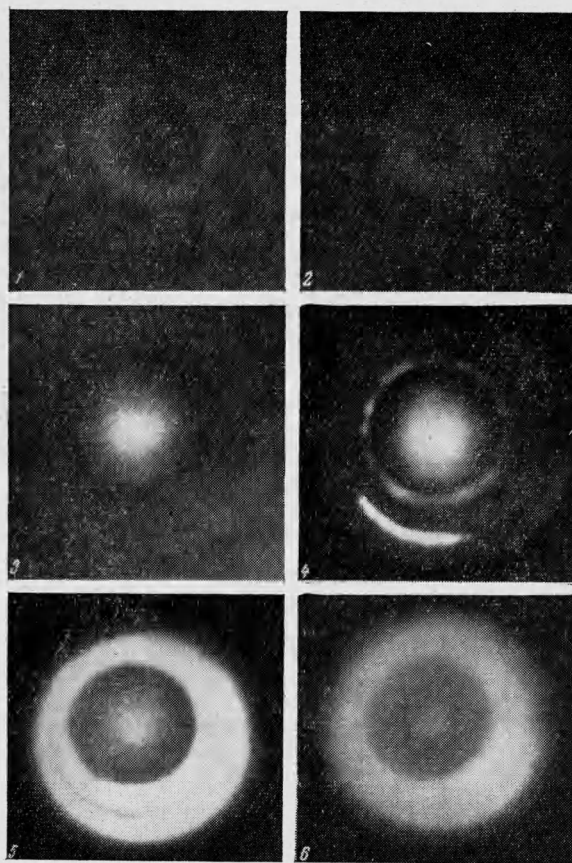
ВОЗБУЖДЕНИЕ СИЛЬНЫХ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН
В ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЕ

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

(Новосибирск)

В работе [1] было показано, что в разреженной плазме, находящейся в квазистационарном магнитном поле, можно возбудить ударные волны с шириной фронта, значительно меньшей длины свободного пробега ионов.

Из теории [2] следует, что для эффективного нагрева ионов необходимо выполнить, по крайней мере, два условия. Первое: $t < R / V_a$ (где t — характерное время



Фиг. 1

нарастания магнитного поля, V_a — альфвеновская скорость, R — поперечный размер камеры) и второе: $H > 2 - 3H_0$ (H — переменное магнитное поле, генерирующее волну, H_0 — квазистационарное поле).

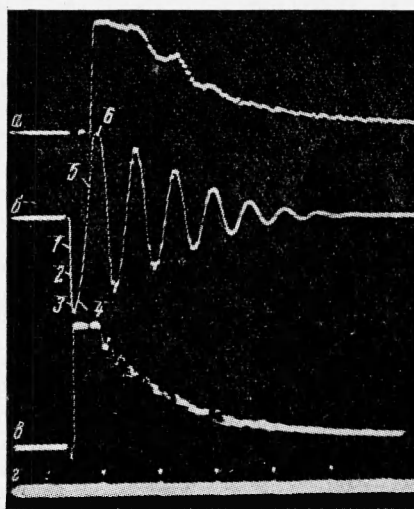
В данной работе приводятся предварительные результаты экспериментов по нагреву водородной плазмы при помощи сильных бесстолкновительных ударных волн.

Плазма создавалась в стеклянной вакуумной камере диаметром 16 см и длиной около 2.5 м, располагавшейся на оси системы с магнитными пробками (период квазистационарного поля магнитной ловушки 5 мсек, $H_0 = 0.5 - 2$ кэ, пробочное отношение $\alpha \sim 1.4$). Предварительная ионизация плазмы осуществлялась при помощи конечного θ -пинча с импульсным напуском дейтерия (0.1 см^3 при $p = 500 - 700 \text{ мм}$

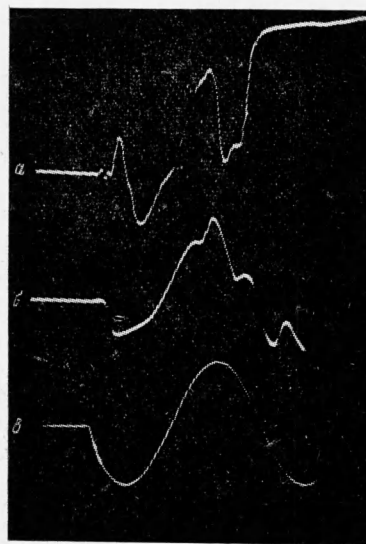
рт. ст.), установленного вне пробкотрона [3]. За несколько десятков *мксек* плазма, пройдя через пробку, равномерно заполняла объем магнитной ловушки, в центральной части которой находился цилиндрический виток длиной 30 см, генерирующий ударные волны. На последний разряжался специальный накопитель емкостью 0.6 *мкф* при напряжении от 60 до 100 *кв*. Величина переменного магнитного поля на оси витка достигала 4—6 *кэ* за время ~ 0.3 *мксек*.

Исследование параметров плазмы проводилось при помощи известных методов диагностики: СВЧ-зондирования ($\lambda = 0.4, 0.8$ и 3 см), датчиков рентгеновского и нейтронного излучений, анализаторов заряженных частиц по энергиям.

При изучении процессов образования, движения «магнитного поршня» и связанной с ним ударной волны были использованы скоростные методы съемки при помощи



Фиг. 2



Фиг. 3

электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и магнитные зонды [1], располагавшиеся на различных расстояниях по радиусу.

Так как в необходимом диапазоне концентраций ($n = 5 \cdot 10^{12} - 3 \cdot 10^{13}$ *см⁻³*) интенсивность свечения дейтериевой плазмы в первой четверти периода разряда оказалась недостаточной для уверенной оптической регистрации начальных стадий процесса, в качестве рабочего газа был использован гелий (сравнение кадров, сделанных в последующие моменты времени, показало, что картина поведения плазмы от этого практически не меняется).

На фиг. 1 представлены фотографии свечения плазмы, полученные при помощи ЭОП через торец вакуумной камеры. На кадрах 1 и 2 видна эволюция сформировавшегося токового слоя («магнитного поршня»), возбуждающего ударную волну, возникновение которой регистрировалось магнитными зондами.

Моменты экспозиции указаны на осциллограмме тока (фиг. 2, б) (время экспозиции $t \approx 15 \cdot 10^{-9}$ сек); на этой фигуре *a* и *в* — излучение нейтронов; *г* — метки времени, равные 2 *мксек*. На осциллограмме фиг. 3, *a*, сигналы, соответствующие ударной волне и токовому слою, имеют различную полярность, так как направления полей *H* и *H₀* были выбраны противоположными.

В условиях эксперимента скорость ударной волны, определенная по запаздыванию магнитных сигналов, изменялась в пределах от 10^7 до 10^8 *см / сек* при ширине фронта от 1 до 3 см. Из обработки полученных осциллограмм и скоростных фотографий следует, что в течение первой четверти периода ударная волна кумулирует на оси камеры, а токовый слой эффективно сжимает нагретую плазму. Конфигурация магнитного поля ударного витка позволяет плазме частично вытекать по магнитным силовым линиям, чем, по-видимому, объясняется характер свечения, зарегистрированный на фиг. 1 (кадр 4).

В начале второго полупериода наступает пробой у стенки камеры (в экспериментах на дейтерии при плотности $n \leq 10^{13}$ *см⁻³* момент пробоя смещался к началу третьего полупериода), а возрастающее магнитное поле продолжает сжатие плазмы

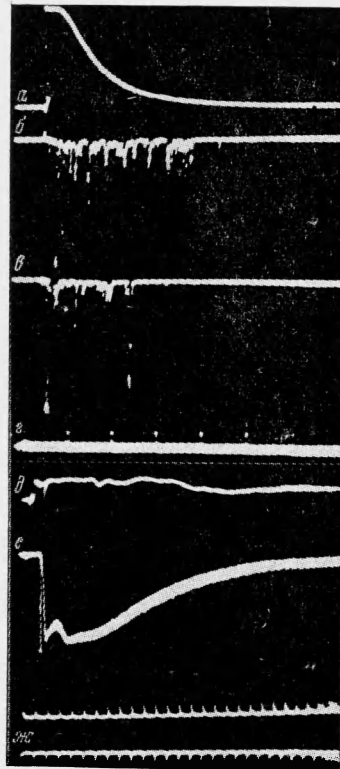
в центре камеры. В момент достижения током своего максимального значения плазма имеет диаметр от 2 до 3 см (фиг. 1, а, кадр б). Процесс сжатия сопровождается появлением нейтронного излучения, одновременно с возникновением которого электростатический анализатор, установленный за пробкой магнитной ловушки, фиксирует ионы и электроны с продольной энергией до 15 кэв (см. фиг. 4, а, б и в).

В экспериментах с ударным витком, составленным из двух усеченных конусов с углом между образующейся и осью $\sim 5^\circ$, появление нейтронного сигнала происходило на первой четверти периода тока (фиг. 2, в). На фиг. 3 дана осциллограмма сигналов с магнитных зондов, установленных в плазме под витком на расстояниях: а — 0.25 R и б — 0.7 R от оси камеры; в — осциллограмма тока в ударном витке $T=1.8$ мксек.

Длительность нейтронного излучения составляла от 15 до 100 мксек при полном числе нейтронов от 10^6 до 10^7 за разряд. Исследования пространственного распределения нейтронного излучения, проведенные при помощи ядерных фотоэмульсий, позволили определить продольный размер источника излучения, оказавшийся равным 20 см. Отклонений в пространственном распределении, свидетельствовавших о наличии ускорительных механизмов, не было обнаружено. При помощи фотоэлектрической методики (фольга, кристалл, ФЭУ) была произведена оценка поперечной энергии электронов — основная доля регистрируемых γ -квантов приходится в этом случае на интервал энергий от 7 до 10 кэв. На фиг. 4 приведено излучение нейтронов, скоррелированное с показаниями анализатора заряженных частиц: а — n° ; б — ионы 1 кэв; в — ионы 10 кэв; г — метки времени 10 мксек; д — «запирание» СВЧ с $\lambda = 3$ см; е — рентгеновское излучение, вызванное уходом электронов поперек магнитного поля; ж — метки времени 50 мксек.

Результаты экспериментов подтверждают, что в условиях возбуждения сильных бесстолкновительных ударных волн и последующего сжатия плазмы токовым слоем может быть осуществлен интенсивный нагрев ионов. Оптические и магнитные измерения на первых полупериодах не обнаруживают заметных неустойчивостей, что, по нашему мнению, чрезвычайно существенно при выяснении механизма образования нейтронов. Температура ионов, рассчитанная в предположении термоядерного механизма образования нейтронов, оказывается ~ 10 кэв при $n \leq 10^{13}$ см $^{-3}$, что соответствует данным, полученным при помощи анализатора заряженных частиц по энергиям и магнитных зондов.

Авторы благодарят Г. И. Будкера за постоянное внимание и интерес к работе, и Р. З. Сагдеева — за участие и помощь в обсуждении результатов экспериментов.



Фиг. 4

Поступила 17 XI 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Искольдский А. М., Куртмуллаев Р. Х., Нестерихин Ю. Е., Пономаренко А. Г. Эксперименты по бесстолкновительной ударной волне в плазме. Ж. эксперим. и теор. физ., 1964, т. 47, № 8, стр. 774.
2. Сагдеев Р. З. О тонкой структуре фронта ударной волны, распространяющейся поперек магнитного поля в разреженной плазме. Ж. техн. физ., 1961, т. 31, стр. 1185.
3. Алиновский Н. И., Искольдский А. М., Нестерихин Ю. Е., Пономаренко А. Г. Ж. техн. физ. (в печати).