

7
АКАДЕМИЯ НАУК СССР СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

препринт 238

В.А.Капитонов, В.А.Корнилов, В.М.Лагунов
Ю.Е.Нестерихин, А.Н.Папырин, А.Г.Пономаренко
В.М.Федоров

ОПЫТЫ С СИЛЬНЫМИ
УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ
НА УСТАНОВКЕ "ВОДА 1"

Новосибирск
1968

В.А.Капитонов, В.А.Корнилов, В.М.Лагунов, Ю.Е.Нестерихин,

А.Н.Папырин, А.Г.Пономаренко, В.М.Фёдоров

ОПЫТЫ С СИЛЬНЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ
НА УСТАНОВКЕ "ВОДА 1"

А Н Н О Т А Ц И Я

Приводятся результаты экспериментов по возбуждению сильных бесстолкновительных ударных волн ($M \approx 5$) с последующим удержанием плазмы магнитным полем ударного витка. Магнитный поршень ~ 20 кэ создавался за $\sim 100 \cdot 10^{-9}$ сек генератором тока, представляющим собой длинную линию с водяной изоляцией на 250 кВ и волновым сопротивлением 1 ом.

Исследования по нагреву плазмы бесстолкновительными ударными волнами /1,2/ показали, что эффективность передачи энергии увеличивается с ростом $\frac{dH}{dt}$ и числа Маха.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по возбуждению сильных ударных волн (число Маха $M \approx 5$) с последующим удержанием плазмы магнитным полем ударного витка.

На рис.1 представлена блок-схема установки "Вода 1". Генератор тока /3/ - длинная линия с водяной изоляцией на 250 кв и волновым сопротивлением 1 ом, нагрузкой которого являлся одиночный виток диаметром 6 см и длиной 10 см создавал магнитное поле $H \approx 20$ кэ за время $\sim 100 \cdot 10^{-9}$ сек. спадавшее затем до значения $0,1H$ за 3-4 мксек.

1. Предварительная плазма создавалась в стеклянной камере ϕ 6 см разрядом типа Z-пинч в квазистационарном магнитном поле $H_0 = 1-5$ кэ. Плотность, рис.2, и температура предварительной плазмы определялась зондированием пучками нейтральных атомов H и He /4/. Исследование структуры ударных волн и эффективность нагрева при больших числах Маха проводились с помощью магнитных зондов 4.5 рис.1 диаметром 3 мм, скоростной съёмки (ЭОП 8), рентгеновского 9 и нейтронного спектрометров 11 /5/.

На рис.3 представлены осциллограммы двух магнитных зондов, иллюстрирующие формирование фронта ударной волны при прямой и обратной полярности начального магнитного поля H_0 . Полученные результаты показывают, что число Маха в описываемых опытах имело значение $M = \frac{u}{V_{\text{Алф}}} \approx 5$, где u - скорость ударной волны, а

$V_{\text{Алф}} = \frac{H_0}{\sqrt{4\pi n_0 M_i}} \approx 10^7 \frac{\text{см}}{\text{мкс}}$ - альфовская скорость в невозмущенной плазме. В момент прихода ударной волны к оси камеры, переменное магнитное поле в витке H достигало примерно 12 кэ. Существенная нестационарность процесса формирования волны, объясняемая малым поперечным размером камеры, затрудняет получение информации о ширине её фронта. Некоторые данные могут быть приведены для момента прохождения волны через периферийный зонд. Предполагая, что скорость ударной волны определяется соотношением

$u \approx \frac{H_0 + H}{2\sqrt{4\pi n_0 M_i}}$, из осциллограмм рис.3 находим значение ширины фронта $\delta \approx 0,6$ см. Поскольку число Маха к этому моменту равно примерно 3, то полученный результат, по-видимому,

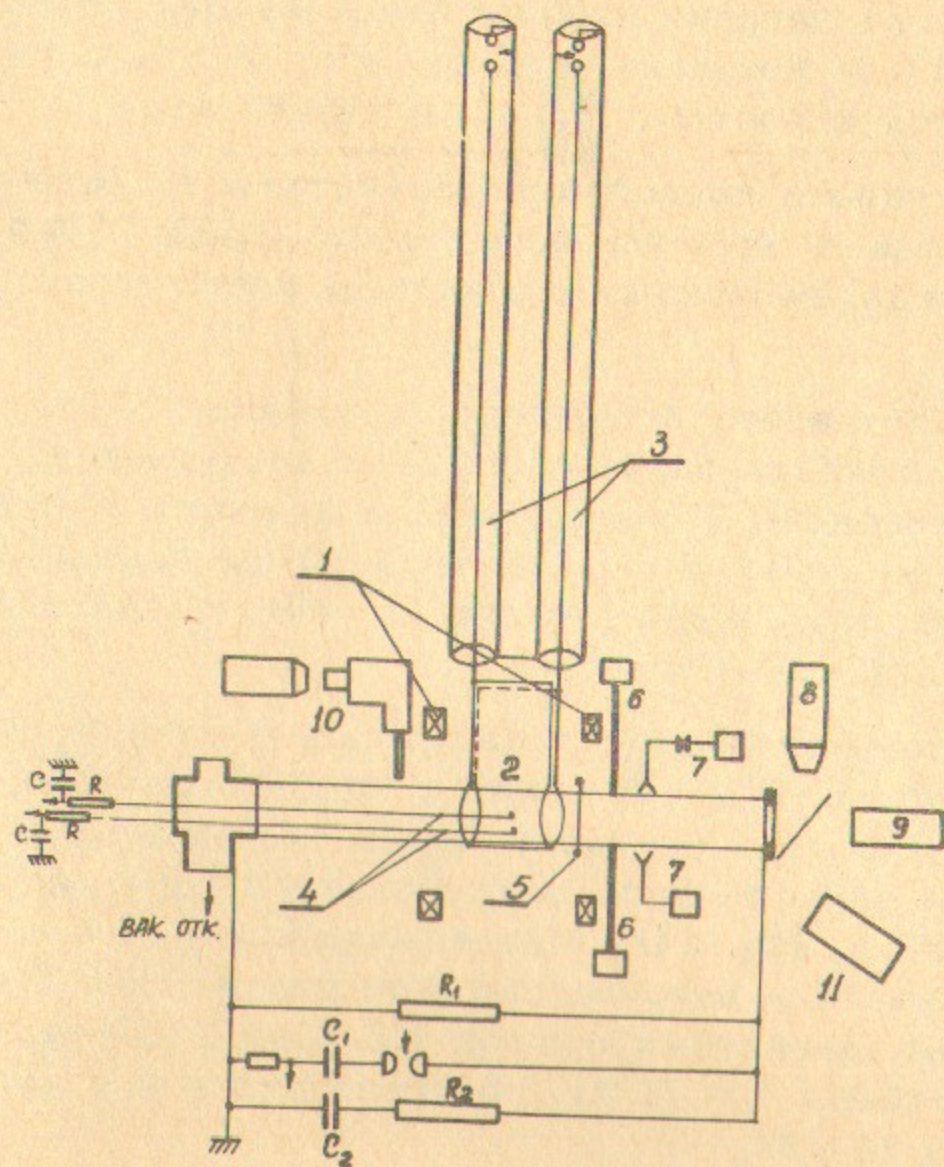


Рис.1. Блок схема установки:

1 - катушки квазистационарного магнитного поля, 2 - ударный виток, 3 - водяная накопительная линия, 4,5 - магнитные зонды (H_z), 6 - система зондирования атомными пучками, 7 - 4 мм - свч - зондирование, 8 - ЭОП, 9 - датчик рентгеновского излучения, 10 - система регистрации во времени спектра и ширины спектральных линий, 11 - датчик нейтронного излучения,
 $R_1 = 300$ мгом; $R_2 = 10$ ком; $C_1 = 0,1$ мкф, 30 кв;
 $C_2 = 0,1$ мкф, 30 кв.

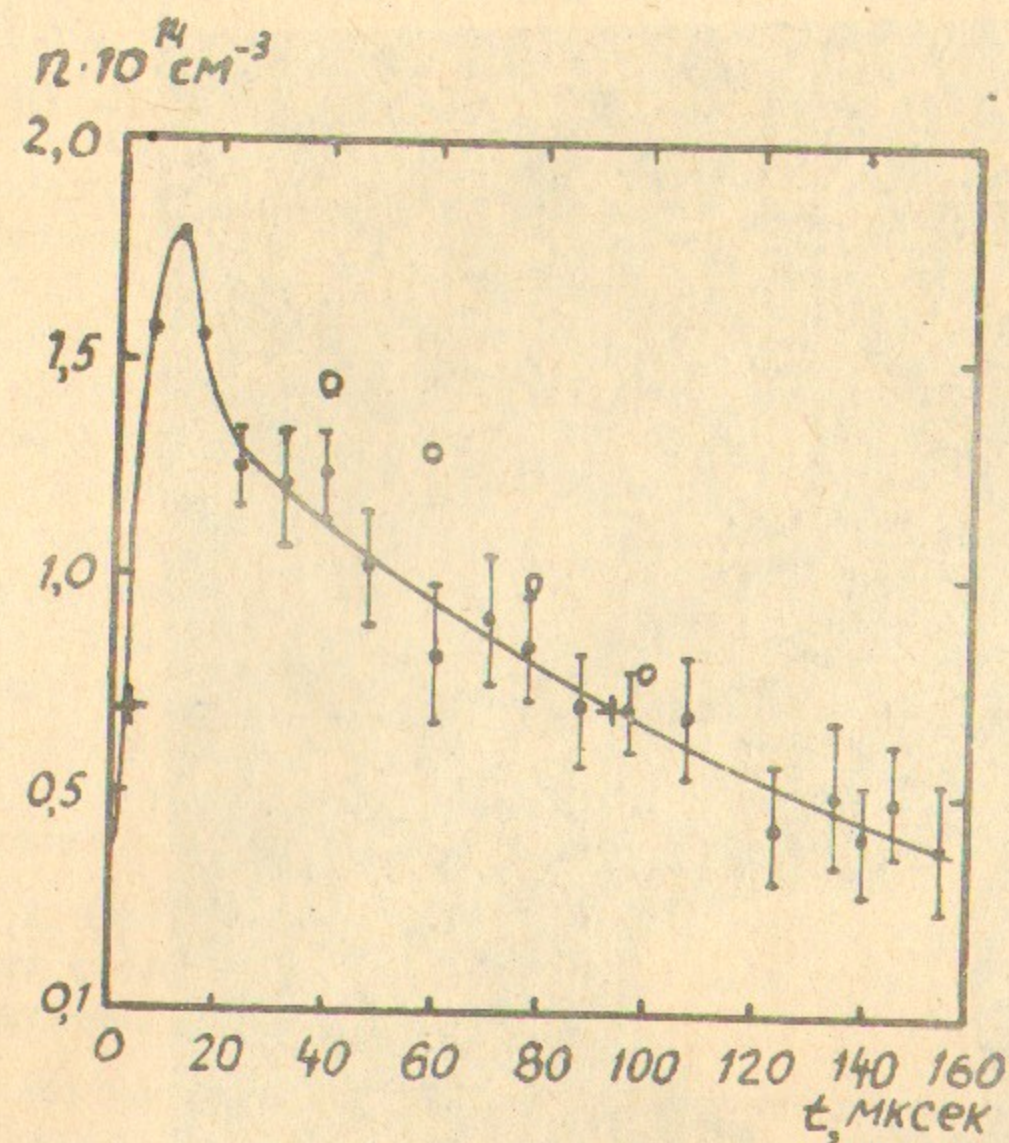


Рис.2. Изменение плотности предварительной плазмы.

● - данные зондирования пучком H^0 ;
 ○ - данные из уширения бальмеровской линии D_β ;
 + - данные свч-зондирования:
 $U_{\text{пинча}} = 30$ кв; $N_0 = 1$ кэ; $\rho = 3,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.
 Период разряда $T = 2$ мксек.

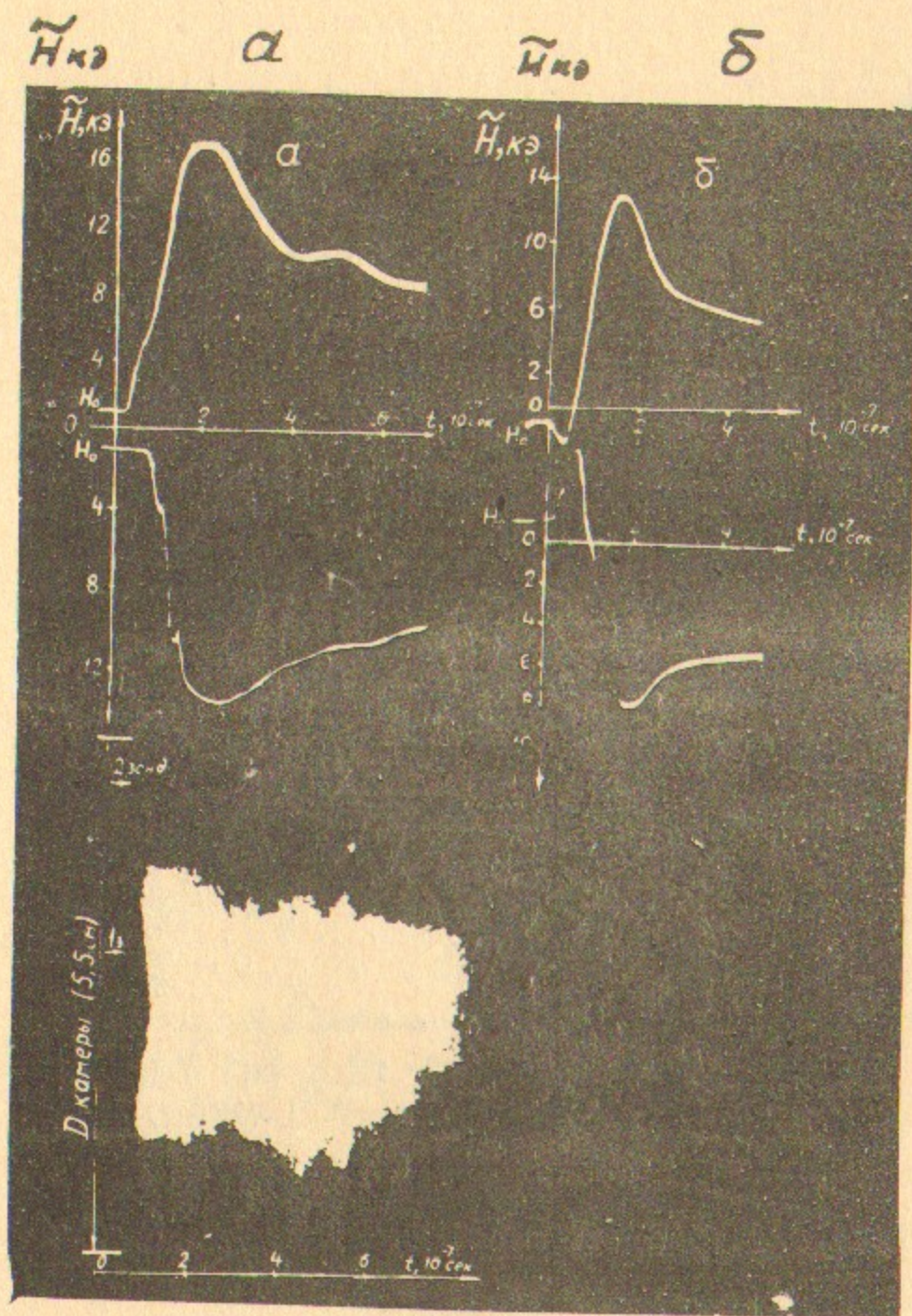


Рис.3. Формирование радиальной ударной волны.

Вверху приведены осциллограммы магнитных зондов, расположенных на $z = 2,5$ см, внизу - $z = 0,5$ см. а - $H \uparrow H_0$.
Внизу фоторазвёртка свечения поперечного размера плазмы, полученная ЭОП. б - $H \uparrow H_0$. $H_0 = 1$ кэ.

согласуются с данными работ [2,6,7], в которых ширина фронта при $M > 3$ удовлетворительно описывается соотношением

$$\delta \approx 10 \cdot \frac{c}{\omega_{ce}}$$
. Из рис.3 видно, что при обратной полярности начального поля ($H \uparrow H_0$) ударная волна, пересекая зонд, расположенный на расстоянии $z = 0,5$ см, имеет амплитуду 5 кэ. Используя эти данные, можно оценить конечный размер плазменного шнура, необходимый для определения энергии ионов по выходу нейтронов в момент кумуляции. Полное число нейтронов, зарегистрированное спектрометром, работавшим в режиме счёта отдельных квантов, после калибровки на нейтронном генераторе оказалось равным $\sim 10^7$. Отсюда получаем значение температуры ионов дейтерия ~ 2 кэВ. Результаты измерения температуры электронов находятся еще в стадии обработки. Предварительные данные, полученные на двухканальном рентгеновском спектрометре дают значение $T_{ex} \approx 1$ кэВ. Нейтронное и рентгеновское излучение плазмы, возникающие при прохождении ударной волны для случая $H \uparrow H_0$ представлены на рис.4.

2. Остановимся на некоторых результатах исследования вытекания плазмы вдоль магнитного поля после кумуляции волны под витком.

На развертке свечения поперечной щели, полученной ЭОП, рис.5, видно, что плазменный шнур в стадии максимального сжатия имеет размер ~ 1 см, что согласуется с показаниями зондов для случая $H \uparrow H_0$. Ввиду отсутствия пробочной конфигурации магнитного поля в ударном витке нагретая плазма имела возможность свободно вытекать в аксиальном направлении. На рис.6 представлены осциллограммы с магнитного зонда, расположенного на расстоянии ~ 6 см от края ударного витка, на которых видно, что сверхзвуковое движение горячей плазмы

$v_{II} \approx 3 V_{A0}$ генерирует магнитное возмущение, имеющее вид ударной волны [8]. Оценка ширины фронта описываемого возмущения даёт величину $\delta \sim 5$ см, что совпадает с поперечным размером камеры. Это обстоятельство, по-видимому, ограничивало максимальную амплитуду возбуждаемого магнитного поля.

Авторы выражают признательность члену-корреспонденту АН СССР Сагдееву Р.З. за внимание и интерес к работе и Шаламову С.П. за конструирование установки.

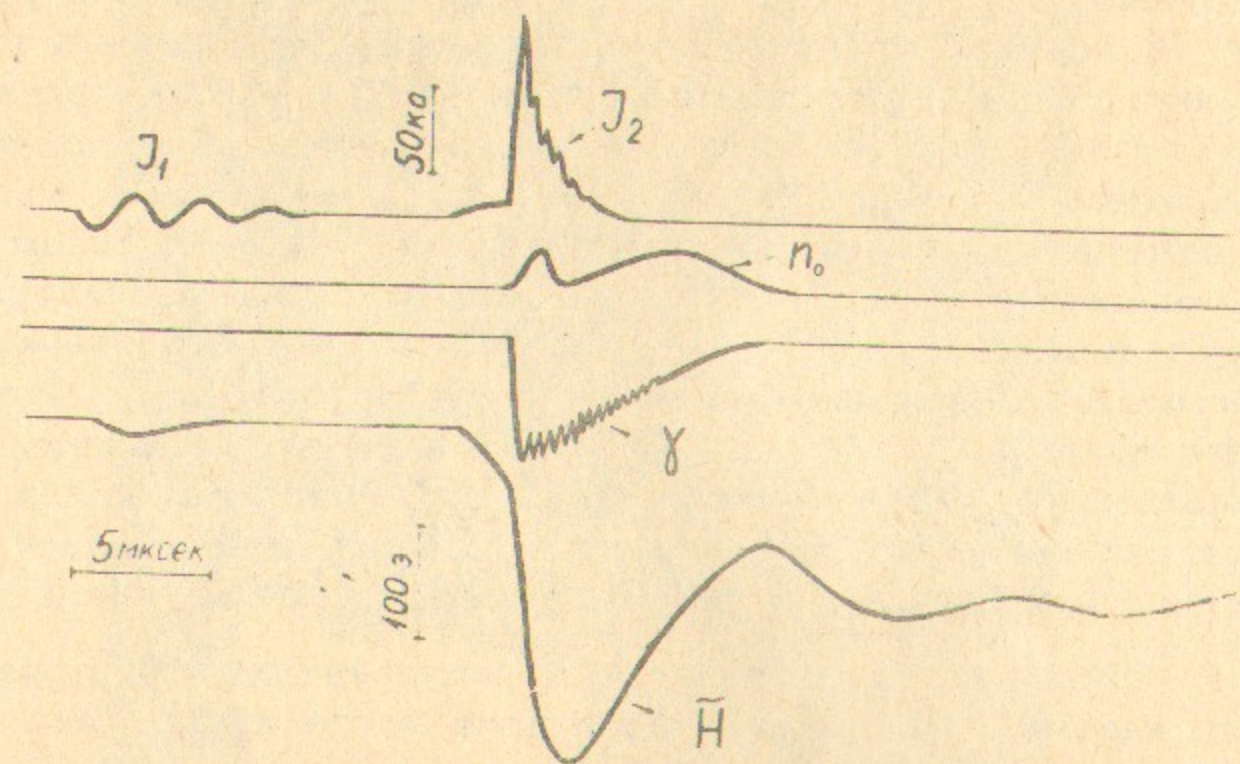


Рис.4. Нейтронное и рентгеновское излучение плазмы, возникающей при прохождении ударной волны ($\tilde{H} \uparrow \uparrow H_0$).

- J_1 - ток предварительной ионизации;
- J_2 - ток ударного витка;
- n_0 - нейтроны;
- γ - рентгеновское излучение;
- \tilde{H} - сигнал магнитного зонда Б.

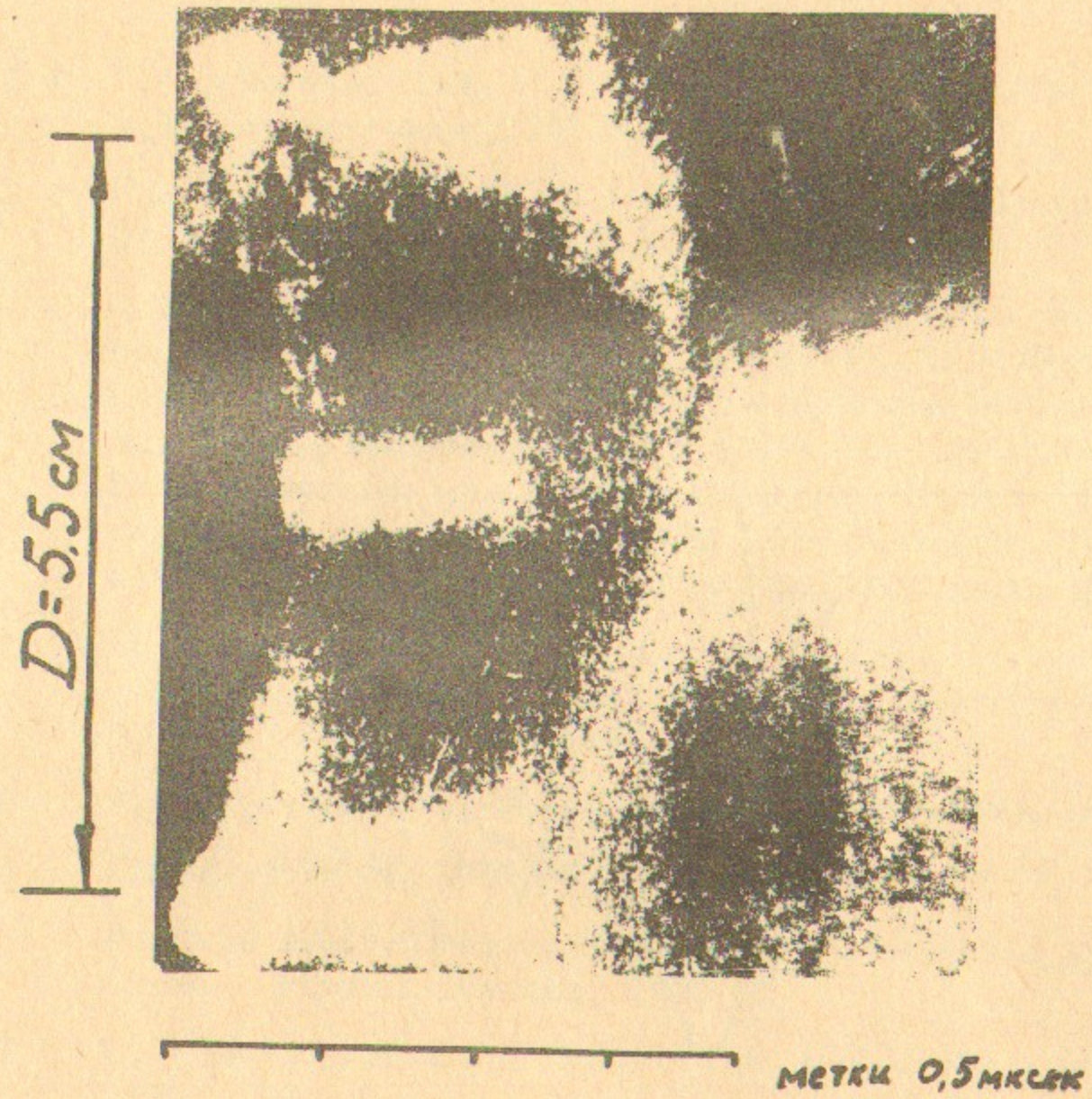


Рис.5. Развертка свечения поперечной щели под ударным витком, полученная ЭОП.

$\tilde{H} \uparrow \uparrow H_0$; $H_0 = 1$ кэрст; $\rho = 6,7 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.

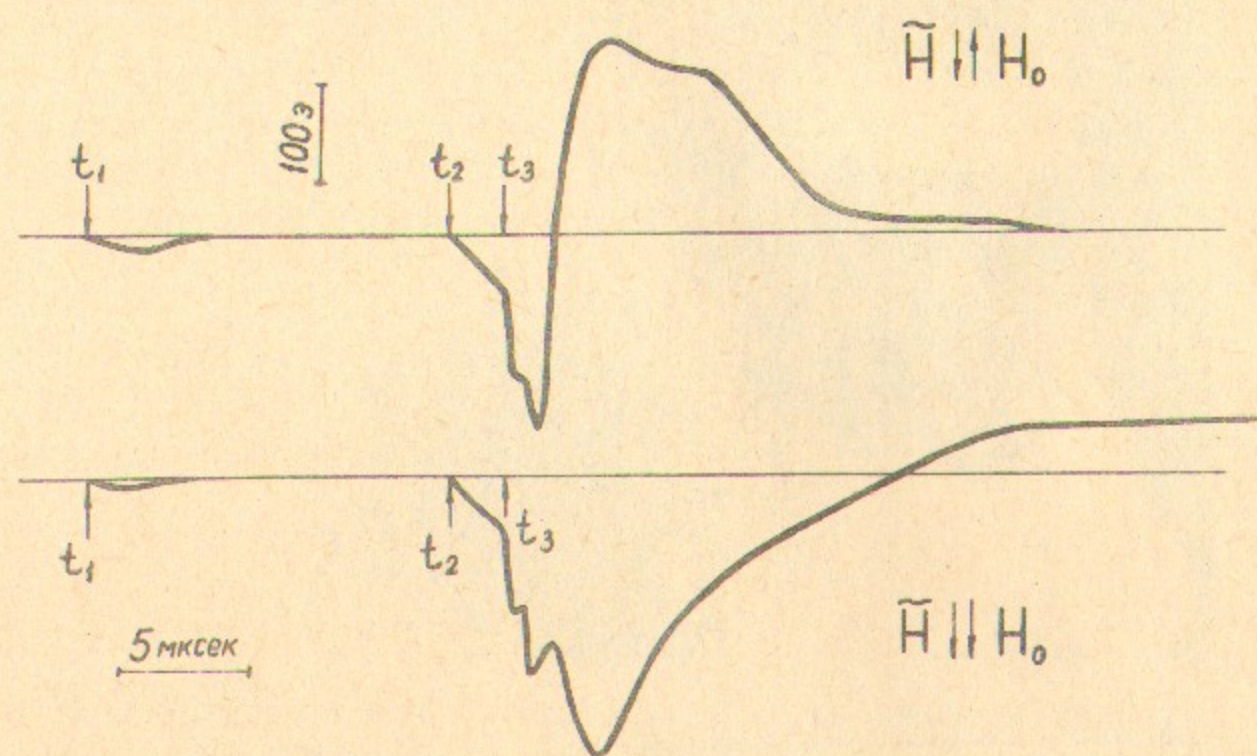


Рис.6. Формирование продольной ударной волны.

t_1 - момент включения тока предионизации;
 t_2, t_3 - моменты начала зарядки и срабатывания линии.
 $H_0 = 1 \text{ кэ}$

Л и т е р а т у р а

- / 1 / А.М.Искольдский, Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко, ПМТФ, 6, 119, 1965.
- / 2 / Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Доклад С-21/218, Калэм, 1965, II, 367.
- / 3 / А.М.Искольдский, В.А.Капитонов, В.М.Лагунов, Ю.Е.Нестерихин, В.Н.Понуров, Г.А.Потёмкин, В.М.Федоров. Ёмкостные накопители и генераторы импульсных магнитных полей, разработанные в ИЯФ СО АН СССР. Доклад на Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по вопросам создания и методам испытания высоковольтной физической аппаратуры, г.Томск, 1967.
- / 4 / Н.И.Алиновский, Ю.Е.Нестерихин, Б.К.Пахтусов. Доклад на Международной конференции по явлениям в ионизированных газах, Вена, 1967, 515.
- / 5 / А.Г.Пономаренко, В.Н.Стибунов. Отчёт ИЯФ № 414, 1968.
- / 6 / Paul F.W.M., Sheffild F., Parkinson M., Holmes L. Доклад на 2-й Международной конференции по физике плазмы, Калэм, Англия, 1965.
- / 7 / С.П.Загородников, Г.Е.Смолкин, Г.В.Шолин, ЖЭТФ, 52, 5, 1178, 1967.
- / 8 / Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко, Б.А.Яблочников. Письма ЖЭТФ, 4, 403, 1966.

Ответственный за выпуск КОРНИЛОВ В.А.

Подписано к печати 1.УШ.68г.

Усл. 0,6 печ.л., тираж 250 экз.

Заказ № 238 бесплатно.

Отпечатано на ротационной печати в ИЯФ СО АН СССР.