

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4 — 1966

УДК 533.95.538.4

## Г. И. ГОРЯГА, А. И. КОКОРЕВ, Н. М. ПЕРСИАНЦЕВА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ФРОНТА СВЕЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ УДАРНОЙ ТРУБКЕ С ПОПЕРЕЧНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Исследовалась природа фронта свечения в электродинамических ударных трубках. Проведенные эксперименты по взаимодействию фронта свечения с поперечным магнитным полем показали, что фронту свечения соответствует передняя граница сгустка плазмы, выбрасываемого из разрядной камеры. Фронт ударной волны становится видимым только после его взаимодействия с каким-либо препятствием.

1. Большое значение для магнитогидродинамики и техники имеют исследования взаимодействия сильных ударных волн с магнитным полем. Интерес к этому вопросу в последнее время возрос [1—8]. Однако экспериментальные результаты, полученные в опытах на электродинамических ударных трубках, часто не согласуются друг с другом [3, 6]. В настоящей работе исследуется взаимодействие фронта свечения в электродинамической ударной трубке с поперечным магнитным полем и выясняется природа этого фронта свечения.

2. Схема установки приведена на рис. 1, а. В качестве камеры высокого давления использовались электродинамические ускорители двух типов: коаксиальная плазменная пушка и рельсовый инжектор. Коаксиальная плазменная пушка имела размеры: длина коаксиала 100 мм, диаметр центрального электрода 8 мм, внутренний диаметр наружного электрода 28 мм.

Ускоряющий зазор на рельсовом инжекторе создавался двумя медными пластинками размером  $1 \times 20 \times 350$  мм. Расстояние между пластинками 18 мм. камерой низкого давления служила стеклянная трубка внутренним диаметром 28 мм и длиной  $\sim 45$  см. Опыты проводились при давлении остаточного газа в камере  $p = 8 \cdot 10^{-1} - 3 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст. Электрическая энергия запасалась в накопителе, состоящем из четырех конденсаторов общей емкости  $6\mu\text{ф}$ , рабочее напряжение которого могло

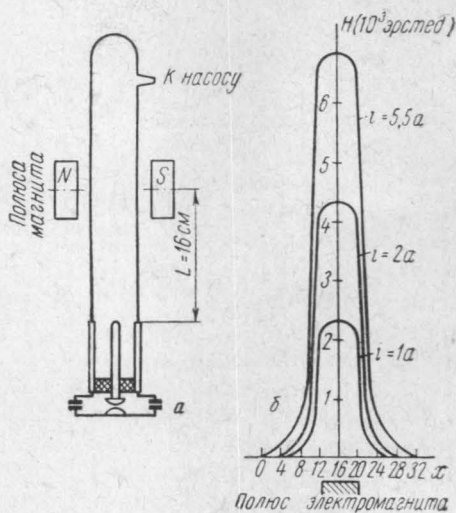


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

достигать 15 кв. Максимальный ток разряда составлял  $\sim 50$  ка, период разряда  $T=14$  мксек. Ток разряда измерялся поясом Роговского и осциллографом ОК-17. Магнитное поле, перпендикулярное направлению движения фронта свечения, создавалось электромагнитом. Поле в центре зазора между полюсными наконечниками можно было менять от  $10^3$  до  $7 \cdot 10^3$  эрст. Распределение магнитного поля вдоль оси разрядной трубки показано на рис. 1,б. Как видно из рисунка, градиент поля на границе области полюсных наконечников велик, так что с некото-

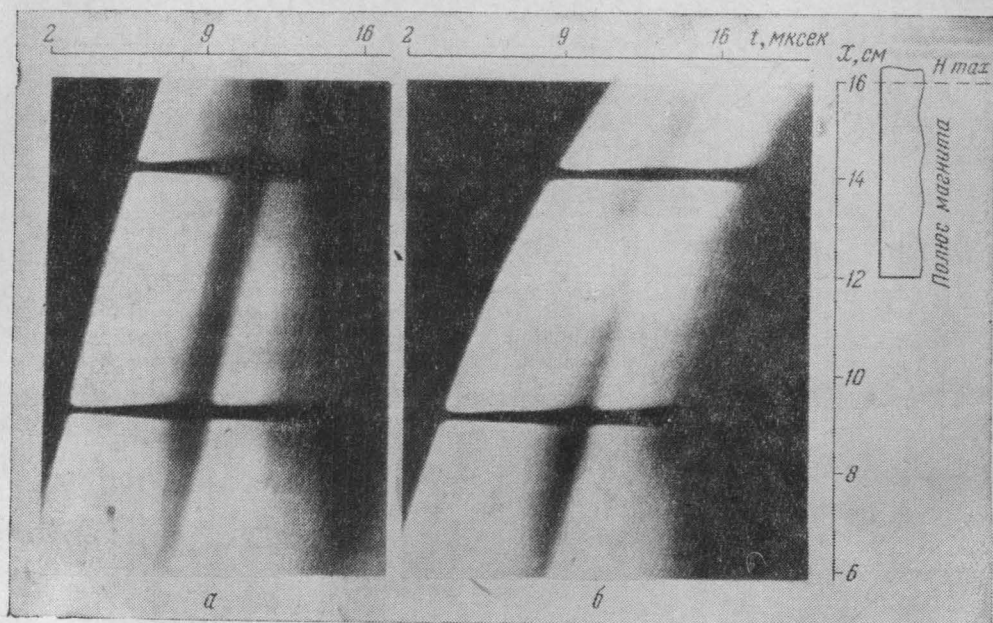


Рис. 2. Распространение фронта свечения в ударной трубке с коаксиальной пушкой. а —  $r=7 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.,  $u=14$  кв,  $H=0$ , б —  $r=7 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.,  $u=14$  кв,  $H=7000$  эрст

рым приближением его можно рассматривать как магнитную стенку. Для регистрации исследуемых процессов использовался ждущий фоторегистр (ЖФР) в режиме непрерывной развертки.

3. На рис. 2 приведены типичные фотографии процесса в ударной трубке (щель фоторегистра параллельна оси трубки). Без магнитного поля скорость распространения возмущения в электродинамической трубке, измеренная по переднему фронту свечения, зависит от координаты, давления остаточного газа, рабочего напряжения батареи. Она увеличивается при уменьшении давления, монотонно уменьшается с увеличением расстояния фронта свечения от разрядной камеры.

При наложении магнитного поля картина распространения фронта свечения становится несколько иной (см. рис. 2,б). Вдали от магнитной стенки (на расстоянии 4—6 см от разрядной камеры) фронт свечения распространяется приблизительно с такой же скоростью, что и при  $H=0$ . В области сильного магнитного поля (где  $H \geq 3000$  эрст) скорость распространения фронта свечения заметно уменьшается, а интенсивность свечения увеличивается.

На рис. 3 в качестве примера приведен типичный график зависимости скорости фронта свечения от координаты. При изменении вели-

чины напряженности магнитного поля от  $2 \cdot 10^3$  до  $7 \cdot 10^3$  эрст характер взаимодействия свечения с полем не изменяется. Единственное различие состоит в том, что при больших полях наблюдаемое падение скорости увеличивается и начинается раньше. Последнее легко понять. С ростом  $H$  область рассеянного магнитного поля (см. рис. 1,б), а следовательно, зона взаимодействия увеличивается.

Если считать, как это делают многие авторы [3, 6, 9, 11], фронт свечения фронтом ударной волны, то в условиях нашего эксперимента,

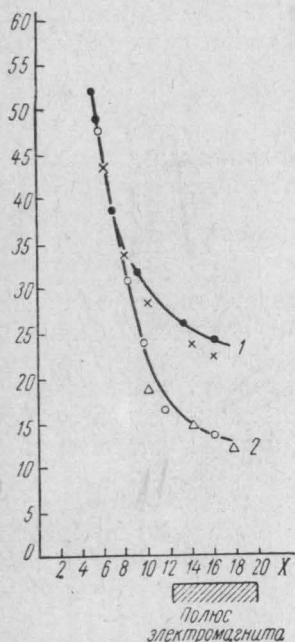


Рис. 3. График зависимости скорости фронта свечения от координаты.  $p=5 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст.,  $u=14$  кэв. 1 — при  $H=0$ , 2 — при  $6,8 \cdot 10^3$  эрст (кривые рассчитаны по формуле (2))

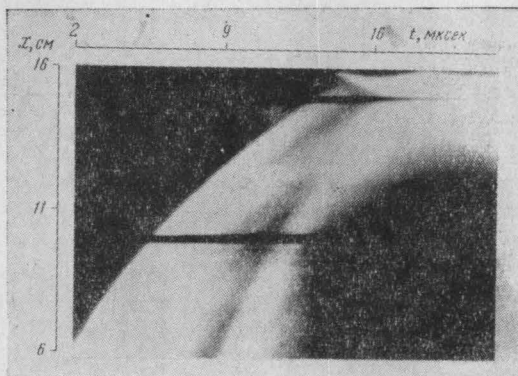


Рис. 4. Взаимодействие фронта свечения с препятствием.  $p=0,8$  мм рт. ст.,  $u=14$  кэв

согласно расчетам и результатам [3], должно наблюдаться расслоение и возникновение отраженной ударной волны. Однако в этой серии экспериментов нами не было зарегистрировано расслоение и отражение фронта свечения от магнитной стенки.

4. Для выяснения вопроса о природе фронта свечения в электродинамической трубке были выполнены опыты по взаимодействию фронта свечения с препятствием (диском, расположенным перпендикулярно оси трубки). Результаты этих опытов ( $H=0$ ) представлены на рис. 4. Из снимка видно, что еще до прихода падающего фронта свечения к препятствию от последнего отходит отраженный фронт свечения. Аналогичную картину наблюдали [2, 10]. Авторы этих работ считают, что впереди фронта свечения движется не фиксируемая на снимках ударная волна и преждевременное появление отраженного светящегося фронта является следствием взаимодействия падающей ударной волны с препятствием.

Клуно [12, 13] исследовал природу фронта свечения спектроскопическим методом. Его эксперименты показали, что фронт свечения в электродинамической ударной трубке соответствует плазме, выбрасываемой в трубку из разрядного устройства, а не газу камеры низкого давления. Мы полагаем, что в условиях нашего опыта фронту свечения соответствует не фронт ударной волны, а передняя граница движущегося плазменного сгустка. Вероятно, этим объясняется качественное совпадение результатов наших опытов с экспериментами [14] и их резкое несоответствие расчетам [3].

Допустим, что в процессе движения сгустка его энергия сохраняется

(т. е. пренебрегаем потерями на трение, ионизацию, диссоциацию, излучение), а изменение его скорости происходит только за счет присоединения к нему встречной массы газа. Для любого момента времени должно быть справедливо:

$$\frac{m_0 v_0^2}{2} = \frac{(m_0 + \Delta m) v^2}{2}, \quad (1)$$

где  $m_0$ ,  $v_0$  — масса, скорость сгустка в момент времени  $t=0$ ;  $\Delta m$ ,  $v$  — приращение массы, скорость сгустка в момент времени  $t$ . Приращение массы оценим с помощью равенства  $\Delta m = \rho_0 S x$ , где  $\rho_0$  — плотность газа,  $S$  — площадь сечения трубки,  $x$  — расстояние, пролетаемое сгустком за время  $t$ . Тогда получим

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{1 + ax}}, \quad \text{где } a = \frac{\rho_0 S}{m_0}. \quad (2)$$

В нашем приближении можно положить, что влияние магнитного поля на движение сгустка сведется к кажущемуся увеличению плотности газа в области поля, т. е. к увеличению постоянной  $a$ . Степень согласия такой оценки зависимости  $v=v(x)$  с экспериментом видна из рис. 3.

Таким образом, можно считать, что фиксируемый с помощью скоростной фотографии фронт свечения соответствует передней границе сгустка плазмы, выбрасываемой из коаксиальной плазменной пушки, а не фронту ударной волны.

5. В экспериментах с рельсовым инжектором использовалось поперечное импульсное магнитное поле, создаваемое при разряде батареи конденсаторов ( $c = 2 \mu\text{ф}$ ,  $u = 10 \text{ кВ}$ ) на две катушки. Максимальная напряженность магнитного поля  $\sim 3000 \text{ эрст}$ ; период изменения поля  $\sim 30 \text{ мксек}$ ; период разряда в инжекторе  $\sim 14 \text{ мксек}$ . На рис. 5 представлены типичные снимки движения светящегося фронта в ударной трубке. Как видно из снимка (рис. 5,а), через каждые  $7 \text{ мксек}$  вдоль трубки начинает двигаться фронт свечения, причем его скорость при  $H=0$  изменяется незначительно вдоль трубки и равна  $\sim 40 \text{ км/сек}$ . Вверху снимка видны результаты взаимодействия фронта свечения с препятствием (диском), а также взаимодействие последующих падающих фронтов с отраженным фронтом свечения. Встрече падающего фронта с препятствием предшествует появление у препятствия отраженного фронта свечения. Аналогичная картина наблюдается в моменты, предшествующие встрече повторных падающих фронтов свечения с отраженным фронтом. При включении импульсного магнитного поля характер распространения фронтов свечения вдоль ускоряющего зазора изменяется (см. рис. 5,б). В момент прохождения первым фронтом свечения области магнитной стенки напряженность поля мала\*, оно практически не оказывает влияния на движение фронта. Второй фронт свечения, встречаясь с магнитной стенкой в момент времени, когда  $H = H_{\text{макс}} \approx 3000 \text{ эрст}$ , через область поля не проникает. Однако на отраженном фронте возникает яркая полоска вблизи точки, где в случае  $H=0$  вторичный фронт встречался с отраженным. Третий фронт свечения слабо взаимодействует с полем; он проходит через область магнитной стенки тогда, когда  $H$  мало.

В случае постоянного магнитного поля напряженности  $H = 3000 \text{ эрст}$ , вседвигающиеся по рельсовому инжектору фронты отражаются от области магнитной стенки (см. рис. 5,в).

Считаем, что изложенные результаты указывают на то, что интенсивному фронту свечения в рельсовом инжекторе соответствует токо-

\* Поперечная фронту светлая полоса (см. рис. 5) — газовый разряд, индуцированный импульсным магнитным полем. Ширина, интенсивность свечения полосы пропорциональны току разряда, напряженности магнитного поля.

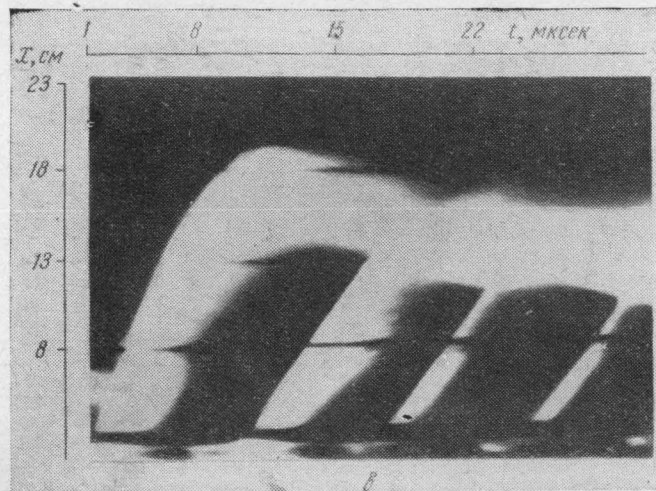
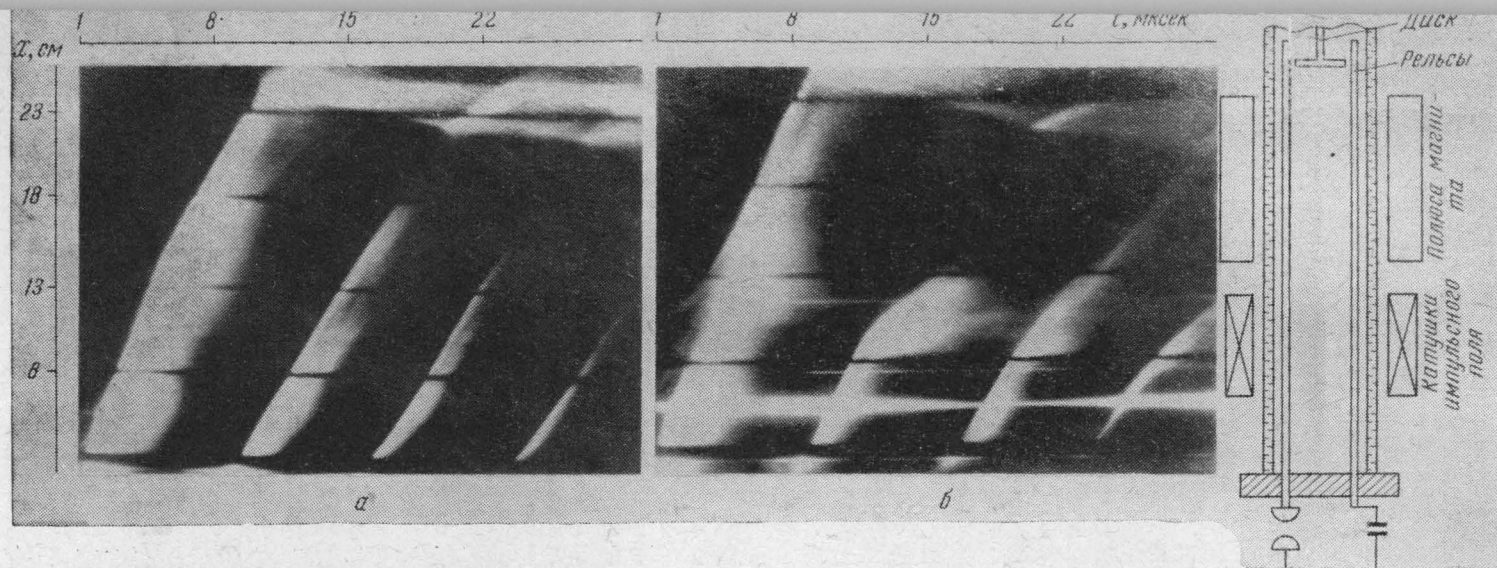


Рис. 5. Распространение фронта свечения в рельсовом инжекторе: а —  $r=2 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст.,  $u=14$  кэв,  $H=0$ ; б —  $r=2 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст.,  $u=14$  кэв,  $H=3000$  эрст,  $T=30$  мксек; в —  $r=4 \times 10^{-1}$  мм рт. ст.,  $u=14$  кэв,  $H=3000$  эрст = const

несущая плазма. Сопутствующая ей ударная волна непосредственно фоторегистром не фиксируется, доступно наблюдению только ее взаимодействие с препятствием и с отраженной волной. В опытах с магнитным полем токонесущий слой отражается от магнитной стенки, а ударная волна проходит через область поля, поскольку его напряженность меньше критической. В [15] с помощью магнитных зондов и фотоумножителей изучалось распределение токов в токонесущей плазме и движение области свечения в рельсовом ускорителе. Автор показал, что зона фронта свечения совпадает с токонесущей зоной.

Таким образом, есть основания считать, что интенсивный фронт свечения в электродинамической ударной трубке совпадает не с ударной волной, а с токонесущей газоразрядной плазмой. Для проверки этой точки зрения был выполнен следующий опыт. Внутри ударной трубки на расстоянии  $\sim 7$  см от коаксиальной плазменной пушки размещались две тонкие, прилегающие к стенкам трубки шины. В конце трубки они крепились к проводящему диску. Распространяющийся от коаксиальной плазменной пушки фронт свечения замыкал контур. Плоскость шин располагалась параллельно магнитному полю; наблюдение велось через щели в одной из них. При  $H=0$  фронт свечения движется вдоль контура с медленно уменьшающейся скоростью. При  $H=7000$  эрст фронт свечения резко тормозится и отражается от области сильного поля.

Результаты последней и первой серий опытов можно понять, предположив, что наблюдаемый интенсивный фронт в ударных трубках с коаксиальной плазменной пушкой соответствует переднему фронту выбрасываемого из инжектора сгустка плазмы. Отражение светящегося фронта от магнитной стенки в последней серии опытов связано с индукционными токами, возникающими в сжимающемся вследствие движения сгустка контуре. При использовании как коаксиальной плазменной пушки, так и рельсового инжектора фиксируемый скоростной фотографией интенсивный фронт свечения соответствует переднему фронту движущегося сгустка плазмы.

Расхождение между опытами [10], нашими результатами и экспериментами [3] таковы. В экспериментах [3] с помощью скоростной фотографии фиксировалось движение переднего фронта газоразрядной плазмы, представляющей собой сжимающийся к оси кольцевой токонесущий контур. Взаимодействие этого контура с поперечным магнитным полем приводит к наблюдаемым авторами [3] результатам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Fowler, Turner. Phys. Fluids., 4, No. 5, 1961.
2. Chong. Phys. Fluids., 4, No. 9, 1961.
3. Гребенщиков С. Е., Райзер М. Д. и др. ЖТФ, 31, № 5, 1961.
4. Любимов Г. А. ДАН СССР, 126, № 2, 1959.
5. Mitchner. Phys. Fluids., 2, No. 1, 1959.
6. Atkinson, Holden, Fowler J. Appl. Phys., 30, No. 6, 1959.
7. Kemp, Petschek. Phys. Fluids., 2, No. 6, 1959.
8. Varach. Phys. Fluids., 4, No. 12, 1961.
9. Josephson. J. Appl. Phys., 29, No. 1, 1958.
10. Блекман, Ниблет. Сб. «Движущаяся плазма». М., ИЛ, 1961, стр. 313.
11. Скотт, Бэсман и др. Сб. «Движущаяся плазма». ИЛ, 1961, стр. 358.
12. Cloureau. Comptes rendus., 251, No. 7, 1960.
13. Cloureau. Comptes rendus., 253, No. 9, 1961.
14. Демичев В. Ф., Струнников В. М. ДАН СССР, 150, № 3, 1963.
15. Liebing. Phys. Fluids., 6, No. 7, 1963.