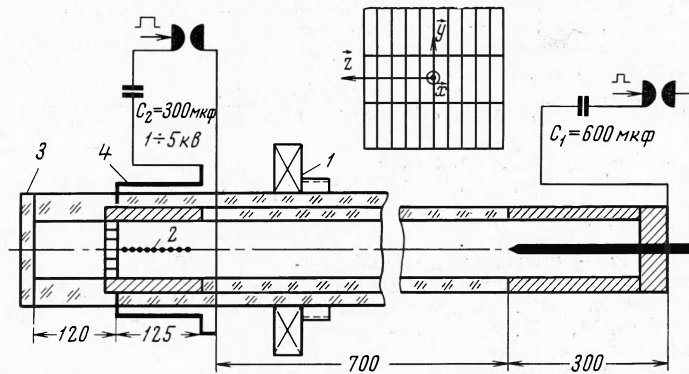


## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ТОКОВОЙ РЕШЕТКИ

В. А. Деревянко, Л. А. Заклязьминский, Е. Ф. Лебедев

(Новосибирск)

В работе изложены некоторые результаты экспериментального исследования отражения сильной ударной волны, созданной в электроразрядной ударной трубе с коаксиальным разрядником, от магнитного поля токовой решетки. Приводятся значения скоростей преломленной и отраженной ударных волн в зависимости от величины начального магнитного поля и деформации проводящим газом магнитного поля решетки. Показано, что при достаточно сильном магнитном поле через решетку проходит ударная волна, скорость которой в три раза меньше скорости падающей волны.



Фиг. 1

Идея токовой решетки состоит в следующем: на пути проводящего газа (ионизирующей ударной волны) равномерно по поперечному сечению канала натягивается несколько металлических проволок или лент, через которые пропускается электрический ток. Ток в решетке и его магнитное поле нормальны оси канала и скорости газа. Если расстояние между лентами  $\delta$  таково, что определенное по этому расстоянию и максимальным параметрам газа магнитное число Рейнольдса  $R_m(\delta) < 1$ , то проводящий газ не сможет при протекании между лентами раздвинуть поле и должен будет всюду двигаться нормально силовым линиям поля. Проводимость лент из меди на несколько порядков больше проводимости газа (при  $T \leq 5 \cdot 10^4$  °К), поэтому для магнитного поля решетки можно рассматривать как идеально проводящую стенку. В то же время решетка может занимать очень небольшую часть ( $\leq 0.1$ ) поперечного сечения канала и быть «прозрачной» для неэлектропроводного газа.

Для дальнейшего условимся в размерностях: время  $t$  в мкс/сек, линейные размеры в см, давление  $p$  в мм рт. ст., напряженность магнитного поля  $H$  в эрст, скорость в км/сек.

В экспериментальной установке сильная ударная волна создавалась при помощи коаксиального источника, через который разряжалась батарея из четырех конденсаторов ИМ-5-150. Получаемый сгусток электропроводного газа двигался по направлению к решетке в канале квадратного сечения ( $5 \times 5$  см<sup>2</sup>) из оргстекла.

Схема установки приведена на фиг. 1, где: 1 — измеритель электропроводности, 2 — магнитные зонды, 3 — торцовая стенка канала, 4 — полувиток, создающий начальное магнитное поле.

Установка наполнялась атмосферным воздухом при давлениях от 0.2 до 1.5 мм рт. ст. Как было установлено, для получения удовлетворительной повторяемости результатов эксперимента весь объем установки после каждого разряда необходимо продувать в течение нескольких минут потоком сжатого воздуха.

Для регистрации ударной волны, прошедшей сквозь решетку, за решеткой имелся участок канала длиной 12 см, оканчивающийся плоской торцовой заглушкой, что позволяло также исследовать свойства прошедшей волны по ее отражению от торца.

Форма и размеры решетки приведены на фиг. 1. Она набрана из 11 медных пластинок толщиной 0,5 мм и шириной 10 мм. Для придания решетке необходимой жесткости перпендикулярно этим 11 пластинкам крепились еще две. Решетка припаивалась к электродам — медным пластинам толщиной 10 мм, расположенным заподлицо с внутренней поверхностью канала вдоль двух параллельных стенок на длине 125 мм навстречу потоку газа. При входе ударной волны в зону электродов индуцированная в га-

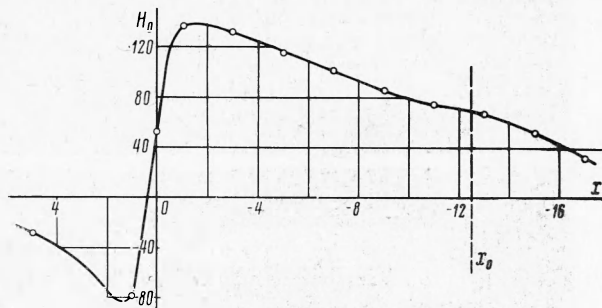
зе за волной э.д.с. замыкается через электроды на решетку. Таким образом, образуется замкнутый токовый контур, сжимаемый движущимся вдоль электродов электропроводным газом.

Для создания начального магнитного поля через решетку разряжалась вторая батарея конденсаторов, причем для получения более равномерного поля внутри канала в зоне электродов шины от решетки к батарее конденсаторов на длине электродов прокладывались вдоль наружных стенок канала. Такой разрядный контур имел длительность первого полупериода тока около 50 мксек при максимальном токе 60 кА.

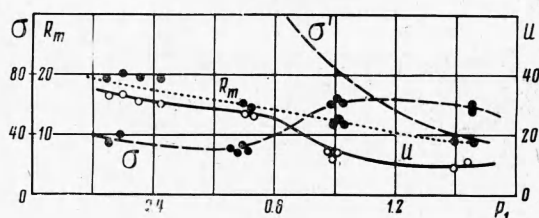
Синхронизация разрядов обеих батарей осуществлялась таким образом, чтобы фронт падающей ударной волны входил в область взаимодействия в момент максимума начального поля.

Вдоль электродов по оси канала напряженность  $H_0$  магнитного поля этого контура изменялась, как показано на фиг. 2 (линией  $x = x_0$  отмечено начало электродов, ток через решетку равен 1 кА). Поскольку  $H_0$  есть функция времени  $t$  и координаты  $x$ , то указанные в дальнейшем численные значения  $H_0$  отнесены к значениям  $x = -1$  см и  $t = t_1$  ( $t_1$  — момент подхода фронта падающей волны к концам электродов решетки).

Неоднородность поля  $H_{0z} = H_0$  (если токи в решетке направлены по оси  $y$ , а ударная волна движется по  $x$ ) по координатам  $y$  и  $z$  в области между электродами не превышает 20%, а составляющие поля  $H_{0x}$  и  $H_{0y}$  в 50—100 раз меньше  $H_{0z}$ . Вихревое электрическое поле  $E_{0y}$ , созданное нестационарным магнитным полем  $H_0$ , не превышало 0.2% величины поля  $c^{-1}uH_0$ , индуцированного при движении проводящего газа.



Фиг. 2



Фиг. 3

Прохождение сгустка электропроводного газа через магнитное поле решетки изучалось по фоторегистрограммам камеры СФР. Магнитные зонды, установленные в стенке канала в 2 мм от внутренней поверхности канала, регулировали возмущение  $z$ -компоненты магнитного поля. Ток через решетку от батареи конденсаторов измерялся интегрирующим поясом Роговского.

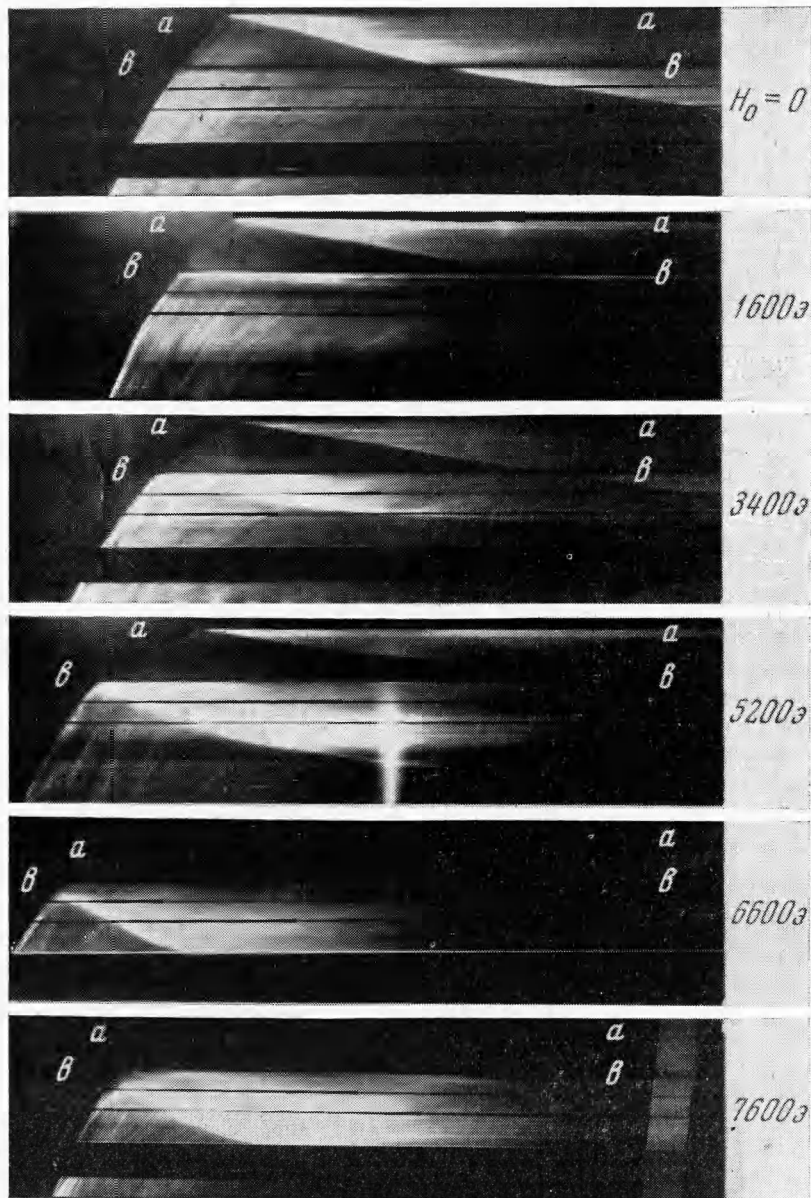
Максимальная электропроводность ионизованного сгустка

измерялась методом вытеснения стационарного магнитного поля движущимся газом [1,2]. Калибровка измерительной  $\sigma$ -системы производилась медным бруском сечением  $5 \times 5$  см<sup>2</sup>. Временная синхронизация сигналов достигалась записью на осциллограммах и СФР-снимках импульса синхронизации и возбуждаемой им искровой вспышки.

Как установлено в ряде работ (см., например, [3,4]), в электроразрядных источниках нагретый ударной волной газ может быть перемешан с ионизованным газом разряда. В частности, это приводит к тому, что параметры образующегося электропроводного сгустка отличаются от рассчитанных за фронтом ударной волны.

Основные эксперименты работы были проведены для начального давления воздуха более 0.7 мм рт. ст. В этих условиях, как обнаружено в работе [4], за фронтом ударной волны имеется пробка нагретого ударной волной газа, за которой следует ионизованный газ разряда. Проведенные в данной работе измерения показали, что максимальная электропроводность газа достигается вблизи фронта свечения, далее вдоль сгустка  $\sigma$  уменьшается медленно, а на длине около 10 см резко падает наполовину от максимального значения. Наличие довольно резкого изменения параметров проводящего газа в конце сгустка заметно также и по ускорению волны, отраженной от торцовых стенок трубы, при встрече ее с концом падающего сгустка.

Скорость  $u$  в км/сек переднего фронта сгустка, его электропроводность  $\sigma$  в ом<sup>-1</sup>см<sup>-1</sup>, магнитное число Рейнольдса  $R_m$  (для характерного размера, равного длине электродов 12.5 см) изменялись для разных начальных давлений  $p_1$ , как показано на фиг. 3 (пунктирная кривая  $\sigma^1$  — расчетное равновесное значение электропроводности за плоской ударной волной, движущейся со скоростью фронта свечения сгустка). При  $p_1 >$



Фиг. 4

$> 1$  мм рт. ст. уже наблюдается некоторое согласие расчетных и экспериментально полученных значений  $\sigma$ . Применение электроразрядного источника позволило получить в данной работе сильную ударную волну и высокое значение магнитного числа Рейнольдса (10—15) ступка электропроводного газа.

Картина взаимодействия ударной волны с магнитным полем решетки показана на фоторегистрограммах фиг. 4 (масштаб по оси времени 1.5 мм/мк·сек; начальное давление воздуха 0.7 мм рт. ст.,  $H$  в эрст; экспозиции снимков не одинаковы;  $aa$  — торцовая стенка,  $bb$  — решетка). По мере увеличения начального магнитного поля скорость ударной волны, прошедшей через решетку преломленной ударной волны, уменьшается. Возникает отраженный от магнитного поля решетки фронт свечения, который движется навстречу набегающему потоку. В дальнейшем будем называть этот отраженный светящийся фронт ударной волной, хотя для установления его структуры необходимо проведение дополнительных исследований.

При напряженности начального поля более 5000 эрст за падающей волной в пространстве между электродами становится заметным слой светящегося газа, движущийся с несколько меньшей скоростью, чем падающая волна (фиг. 4). Поскольку этот слой далее резко тормозится, не доходя до решетки при больших полях, следовательно, в нем сосредоточен основной ток, протекающий через газ, и этот слой имеет максимальную электропроводность и температуру. Так как в данном случае нет резкой границы магнитного поля (фиг. 2) и возникновение этого слоя не связано с началом электродов, то возможно, что образование такого слоя есть проявление неустойчивости нестационарного течения проводящего газа в магнитном поле, описанное в работе [5], и светящийся слой есть *T*-слой. Резкое торможение *T*-слоя приводит к возникновению сильной отраженной ударной волны и к замедлению преломленной ударной волны.

При магнитных полях менее 5000 эрст *T*-слой значительно тормозится только вблизи решетки и поэтому отраженная ударная волна отходит как бы от решетки (фиг. 4,  $H_0 = 3400$  эрст). Уменьшение скорости преломленной волны и образование интенсивной отраженной волны становятся заметны уже при магнитном поле  $H_0 = 1500$  эрст.

При значении поля  $H_0 \approx 3400$  эрст скорость отраженной от поля решетки ударной волны возрастает до скорости волны, отраженной от твердой стенки. Это достигается при небольшом отношении магнитного давления начального магнитного поля к скоростному напору за падающей ударной волной

$$P = \frac{H_0^2}{8\pi\rho_1 u^2} \approx 0.1.$$

Преломленная волна в этом случае еще довольно сильная. При еще больших значениях магнитного поля точка полного торможения токового слоя отходит от решетки на расстояние до 5 см.

Движение ударных волн в поперечном магнитном поле исследовалось в ряде работ. В работах [6,7] были проведены опыты в радиальном (дисковом) канале с концентрическими короткозамкнутыми линиями тока. В устройстве с токоснимающими электродами, нагруженными на малое сопротивление, осуществлен эксперимент для  $R_m < 1$  в работе [8]. Авторы работы [8] обнаружили незначительное изменение скорости преломленной волны, в то время как скорость отраженной от магнитного поля волны достигла (и не превышала) скорости волны, отраженной от жесткой стенки в отсутствие магнитного поля.

Авторы должны отметить, что с некоторыми результатами тщательного исследования структуры стационарного течения газа, образованного ударной волной, в поперечном поле для  $R_m < 1$  при замыкании индуцированной в газе э. д. с. на малую внешнюю нагрузку их любезно познакомил С. Г. Зайцев.

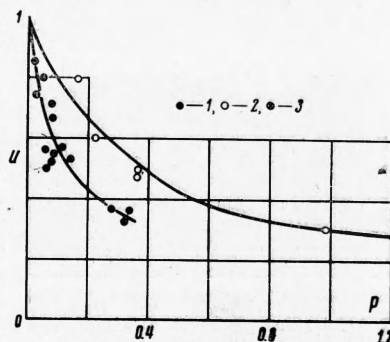
Опыты, описание которых приводится в данной статье, поставлены для значений магнитного числа Рейнольдса  $R_m > 1$ ; причем для устранения возможного «раздвигания» силовых линий магнитного поля [9] применена токовая решетка с характерным размером, таким, что рассчитанное по нему магнитное число Рейнольдса будет меньше единицы.

Пусть  $u_0$  — скорость ударной волны при  $H_0 = 0$ , а  $u_1$  и  $u_2$  — скорости преломленной и отраженной ударных волн при наличии магнитного поля ( $H_0 \neq 0$ ).

Полученная для указанных выше условий зависимость относительной скорости  $u = u_1 / u_0$  преломленной ударной волны от параметра взаимодействия  $P$  приведена на фиг. 5. Экспериментальные точки соответствуют следующим комбинациям параметров: 1 ( $R_m = 15$ ,  $p_1 = 0.7$ ), 2 ( $R_m = 12.5$ ,  $p_1 = 1.0$ ), 3 ( $R_m = 10$ ,  $p_1 = 1.5$ ).

Замедление ударной волны в решетке  $(u_0 - u_1) / u_0$  составляет 30–60% при величине параметра  $R_m P$  (характеризующего отношение пондеромоторной силы торможения потока к давлению газа) равной трем, в то время как в работе [8] при таких же значениях  $R_m P$  замедление не являлось четкой функцией магнитного поля и не превышало 10%. В опытах данной работы максимальное значение замедления ударной волны  $(u_0 - u_1) / u_0$  достигало 70%.

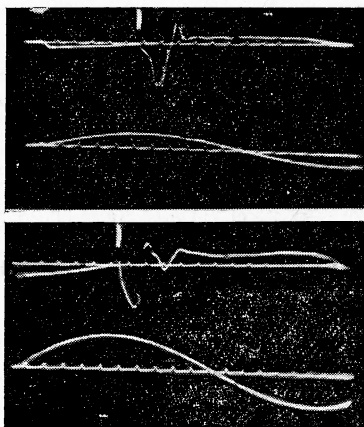
Магнитные зонды отчетливо фиксировали момент подхода ударной волны к электродам. В этот момент электропроводный газ за ударной волной замыкает цепь электроды — решетка, и в нее включается э. д. с.  $c^{-1}uH_0d$  ( $d = 5$  см — ширина канала между электродами), которая вызывает в этой цепи скачок тока (и поля). На фиг. 6 приведены осциллограммы сигналов  $\partial H / \partial t$  магнитных зондов при значениях начального поля



Фиг. 5

3400 эрст (верхний снимок) и 7600 эрст (нижний снимок). На нижних лучах осциллограмм записан ток, создающий начальное магнитное поле. Белым штрихом отмечено время  $t_1$  — момент касания электродов фронтом падающего сгустка (метки времени через 5 мк/сек). Из осциллограмм этой фигуры следует также, что ток в цепи электроды — решетка — ионизованный газ очень мало изменяет ток в цепи батарея конденсаторов — решетка.

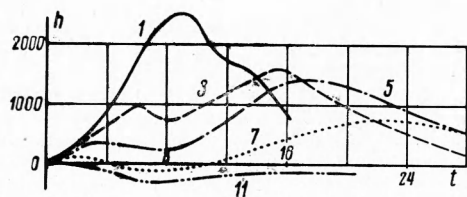
Обнаружено, что вместе с отраженной волной навстречу набегающему потоку передвигается и максимум волны возмущенного магнитного поля  $h$ , т. е. поля, связанного



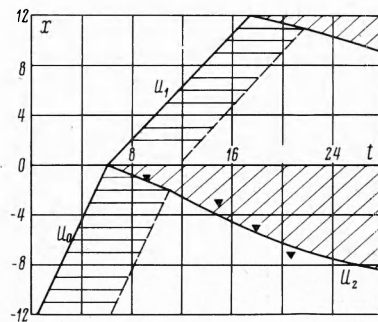
Фиг. 6

с токами в цепи газ — электроды — решетка. При этом магнитное поле во фронте отраженной волны изменяется плавно. Иллюстрацией этого служит фиг. 7, на которой приведены для начального поля  $H_0 = 2600$  и  $p = 0.7$  зависимости  $h(t, x = \text{const})$ , а также фиг. 8, на которой дана диаграмма движения ударных волн: падающей  $u_0$ , преломленной  $u_1$ , отраженной от решетки  $u_2$ , а также ударной волны, отраженной от торцевой стенки трубы (цифры 1, 2, 3, 5, 7, 11 у кривых  $h(t)$  суть значения координаты  $x = -1, -3, -5, -7, -11$  см соответственно). Увеличение полного поля  $H = H_0 + h$  становится заметным лишь в области  $x > -7$  см, причем первый максимум  $h(t)$  достигается в момент прихода в точку наблюдения переднего фронта свечения; затем поле в области, уже занятой электропроводным сгустком, уменьшается. Возникновение отраженной от решетки волны и распространение ее навстречу падающему потоку вызывает новое увеличение магнитного поля. Появляющийся второй максимум кривой  $h(t)$  также соответствует прохождению фронта свечения этой волны (на  $x-t$  диаграмме треугольниками отмечены моменты времени, когда  $h(t)$  имеет максимальное значение). Таким образом, картины изменения магнитного поля при движении вдоль электродов падающей и отраженной ударных волн качественно аналогичны.

Из сигналов магнитных зондов установлено, что наибольшее увеличение поля ( $h_{\text{max}} \approx H_0$ ) наблюдается непосредственно вблизи решетки ( $x = -1$  см). Далее вдоль электродов отношение  $h/H_0$  уменьшается (для  $x = -3$  см,  $h_{\text{max}}$  не превышает  $0.35H_0$ ).



Фиг. 7



Фиг. 8

В заключение сделаем некоторые выводы. Как установлено, при  $R_m \approx 10-15$  и  $P \ll 1$  наблюдается сильное взаимодействие движущегося за ударной волной электропроводного газа с магнитным полем токовой решетки с присоединенными к ней электродами. Преломленная ударная волна замедляется при  $H_0 \approx 8000$  эрст до 6 км/сек (скорость падающей волны 25 км/сек) и становится слабоионизирующей. От решетки при  $H_0 \geq 1500$  эрст начинает двигаться навстречу течению отраженная волна, фронт свечения которой переносит максимум возмущенного магнитного поля. Наблюдающийся при  $H_0 \geq 5000$  эрст за падающей волной слой светящегося газа, резко тормозящийся при дальнейшем движении, может быть связан с описанным в работе [5] проявлением неустойчивости нестационарного движения проводящего газа в магнитном поле. Возникновение такого T-слоя может быть одной из причин наблюдаемого сильного замедления преломленной волны и образования интенсивной отраженной волны.

