

УДК 533.6.011.72

© 1994 г. П. Н. БАРОНЕЦ

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ ИСКРОВОМ РАЗРЯДОМ, И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ИМПУЛЬСНОГО ИНДУКЦИОННОГО РАЗРЯДА

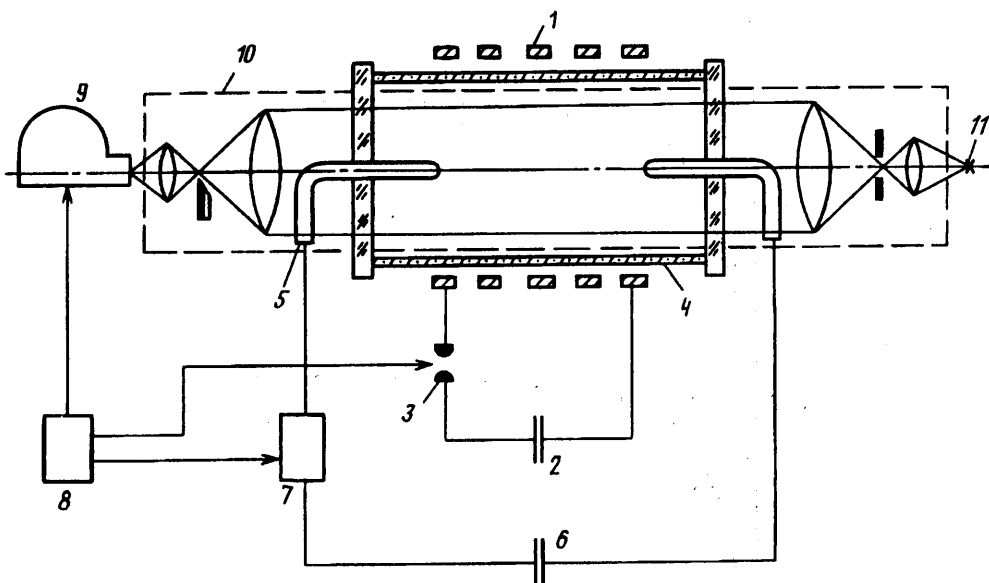
Экспериментально исследуется искровой разряд в аргоне. Показано наличие ударной волны и распространяющейся вслед за ней тепловой волны. Получен экспериментальный закон распространения фронта тепловой волны. Изучается влияние параметров разряда на динамику движения обеих волн. Рассматривается взаимодействие цилиндрических ударных волн, генерируемых импульсным индукционным разрядом, с ударными волнами, возникающими в искровом разряде.

Исследованию искрового разряда посвящено значительное количество работ. В ряде экспериментальных исследований [1, 2] отмечалось наличие ударной волны и так называемой «оболочки» разряда, которая в более поздних теоретических работах [3, 4] была определена как тепловая волна.

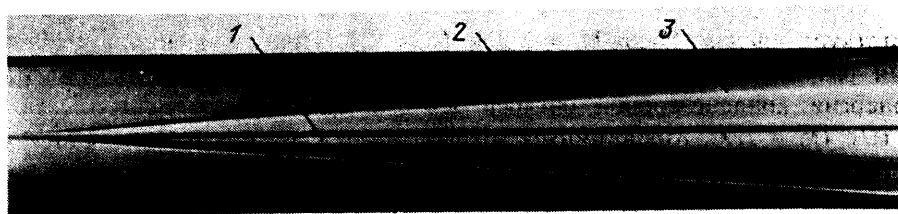
Экспериментальное изучение цилиндрических ударных волн, возбуждаемых совместно или раздельно искровым и индукционным разрядами в аргоне в диапазоне давлений от 10 до 60 мм рт. ст., проводилось на установке, схема которой представлена на фиг. 1. Здесь показаны ее основные элементы: 1 — пятивитковый соленоидальный индуктор; 2 — батарея конденсаторов индукционного разряда; 3 — коммутирующий управляемый разрядник; 4 — разрядная трубка диаметром 8 см, выполненная из кварца с оптическими окнами в торцах, через которые велись измерения; 5 — электроды искрового разряда, расположенные по оси разрядной трубки; 6 — батарея конденсаторов искрового разряда; 7 — блок запуска искрового разряда; 8 — блок управления установкой; 9 — высокоскоростная фоторегистрирующая установка ВФУ-1; 10 — теневой прибор для регистрации неоднородностей; 11 — импульсный источник света.

Емкость C конденсаторной батареи искрового разряда могла меняться в пределах от 2 до 600 мкф при напряжении заряда $U = 900$ В. Параметры установки импульсного индукционного разряда аналогичны описанным в [5]. При подаче управляющего импульса с блока управления на коммутирующий разрядник происходит запуск индукционного разряда, который формирует сходящуюся цилиндрическую ударную волну [6]. По команде с того же блока управления одновременно или с необходимой задержкой, или совершенно обособленно запускается искровой разряд, возбуждающий расходящуюся цилиндрическую волну.

Расходящиеся цилиндрические ударные волны, формируемые искровым разрядом, несколько отличаются по своей структуре от ударных волн, возбуждаемых импульсным индукционным разрядом. На фиг. 2 представлена теневая фоторазвертка искрового разряда, на которой след от электродов на оси трубки регистрируется в виде темной горизонтальной полосы (фиг. 2, линия 1), разделяющей фоторазвертку на совершенно симметричные верхнюю и нижнюю части. Рассматривая, например, верхнюю часть, можно сказать, что в момент пробоя межэлектродного промежутка возникает расходящаяся цилиндрическая ударная волна (линия 2), регистрирующаяся в виде темного теневого следа, а вслед за



Фиг. 1

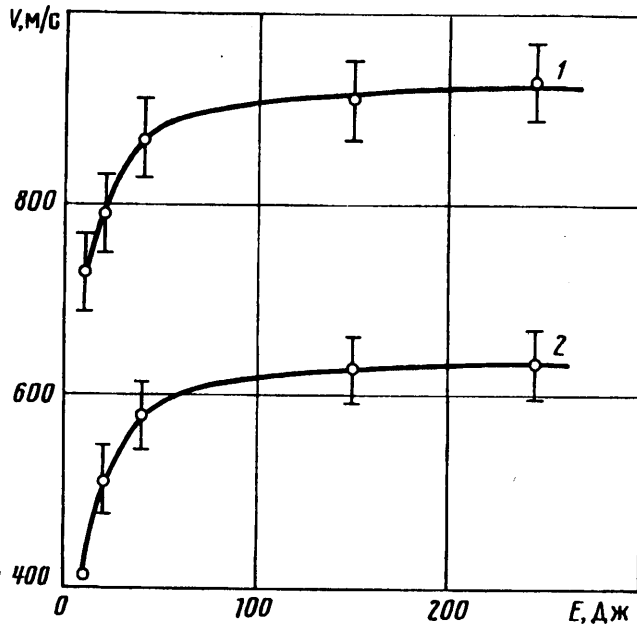


Фиг. 2

ней уже с меньшей скоростью движется второй скачок плотности (линия 3). Резкая граница фронта второго скачка позволяет судить о наличии сильного градиента показателя преломления, который имеет обратный знак по отношению к градиенту показателя преломления во фронте ударной волны. Это дает основание предполагать существование в разряде тепловой волны, перед которой по невозмущенному газу распространяется ударная волна. Впервые подобная картина наблюдалась в экспериментальных работах [1, 2], в которых исследовался искровой разряд.

Анализируя фоторазвертку на фиг. 2, можно сказать, что скорость ударной волны строго постоянна на всем пути ее распространения, а скорость тепловой волны уменьшается по мере ее продвижения к стенке разрядной трубки, о чем свидетельствует кривизна ее траектории. Поэтому, говоря в дальнейшем о скорости тепловой волны, следует иметь в виду ее среднюю скорость за время, в течение которого ударная волна проходит расстояние от оси разрядной трубки до ее стенки.

На фиг. 3 приведены результаты измерения скоростей V расходящейся ударной волны (кривая 1) и тепловой волны (кривая 2) в зависимости от энергии E батареи конденсаторов, разряжающейся на осевые электроды при исходном давлении $p_0 = 20$ мм рт. ст. Характерно резкое нарастание скорости ударной волны при малых энергиях разряда. Так, при увеличении энергии конденсаторной батареи с 10 до 40 Дж ее скорость возрастает с ≈ 730 до ≈ 870 м/с, что



Фиг. 3

соответствует числам Маха $M \approx 2,3$ и $M \approx 2,7$. При дальнейшем увеличении энергии разряда скорость ударной волны возрастает значительно медленнее и при энергии конденсаторной батареи $E = 245$ Дж составляет всего величину ≈ 930 м/с ($M \approx 2,9$). Аналогичным образом ведет себя и тепловая волна, с той лишь разницей, что скорость ее примерно в 1,5 раза меньше скорости ударной волны.

Эксперименты по возбуждению ударной волны искровым разрядом при постоянной энергии E конденсаторной батареи и при разных исходных давлениях p_0 в разрядной трубке показывают (фиг. 4), что скорость фронта ударной волны (линия 1) и скорость тепловой волны (линия 2) линейно уменьшаются с увеличением давления. С учетом повторяемости результатов экспериментов ошибка в измерении скоростей составила величину $\sim 5\%$.

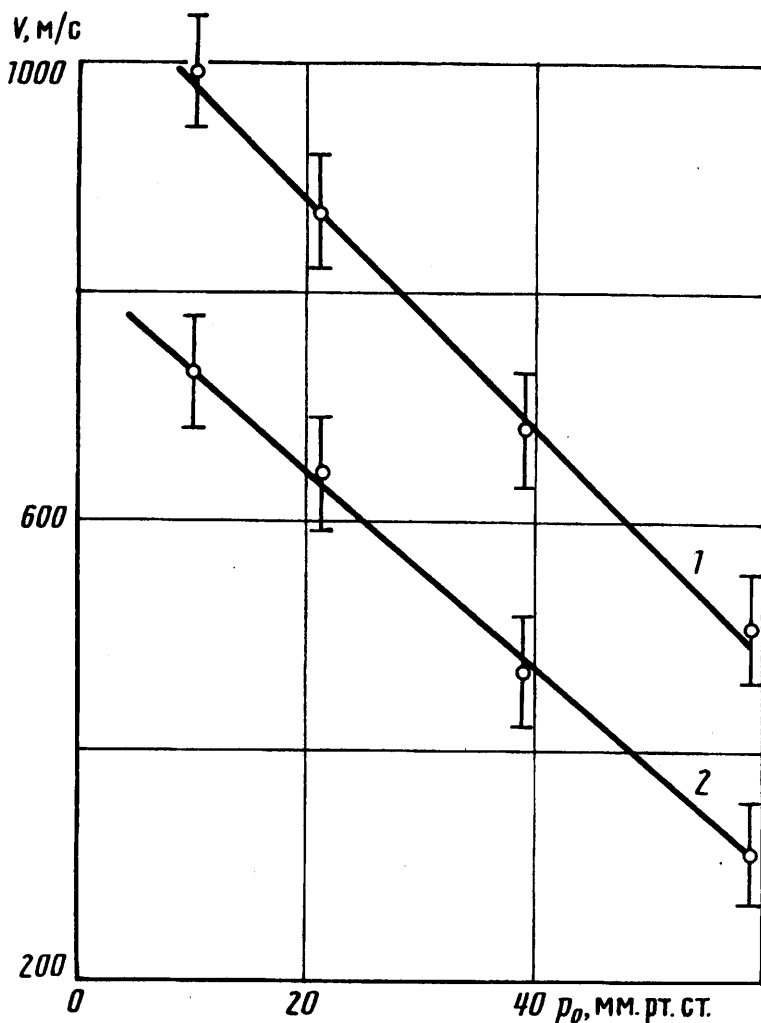
Как уже отмечалось выше, наблюдаемая в эксперименте траектория движения фронта r_φ тепловой волны нелинейна, что позволяет записать ее в виде степенной функции

$$r_\varphi = Kt^\beta, \quad K = \text{const}$$

По теневой фоторазвертке для различных значений t измерялась величина радиуса фронта r_φ тепловой волны и после нанесения результатов измерений на координатную плоскость $\lg r_\varphi, \lg t$ определялись величины K и β . Ниже приведены результаты измерения величины β в зависимости от энергии разряда E конденсаторной батареи при исходном давлении аргона в разрядной трубке $p_0 = 20$ мм рт. ст.:

$E, \text{ Дж}$	40	80	160	240
β	0,84	0,86	0,82	0,83

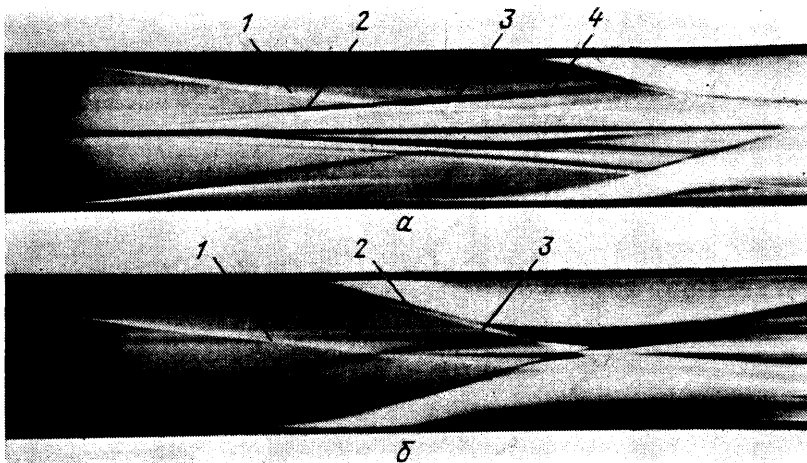
Отсюда следует, что β практически не зависит от энергии разряда и различие их значений вызвано ошибкой при измерениях, которая не превышает 15% и



Фиг. 4

в основном связана с погрешностями при фотометрировании. Средняя измеренная величина $\beta = 0,84$.

В работе проводились эксперименты по взаимодействию ударных волн. С этой целью одновременно возбуждались индукционный и искровой разряды, при этом сходящаяся ударная волна от первого индукционного пробоя (фиг. 5, а, линия 1) взаимодействовала с расходящейся ударной волной от искрового разряда (линия 2). После взаимодействия образовывались сходящаяся и расходящаяся ударные волны. Сходящаяся волна (линия 3) имела один только передний фронт, и теневого след ее повторял след сходящейся волны от индукционного пробоя до взаимодействия, но двигалась она уже с меньшей скоростью. Расходящаяся ударная волна (линия 4) подобна расходящейся волне от искрового разряда. Передний фронт ее имел ту же скорость, что и до взаимодействия, а теневого след тепловой волны после взаимодействия резко ослабевал. Рассматривалось также встречное взаимодействие ударных волн, генерируемых только индукционным разрядом. Например, сходящаяся волна от первого пробоя (фиг. 5, б, линия 1) после схлопывания на оси превращалась в расходящуюся волну (линия 2) и взаимодействовала со сходящейся ударной волной от второго пробоя (линия 3).



Фиг. 5

После взаимодействия образовывались сходящаяся и расходящаяся волны, причем, так же как и в случае взаимодействия ударных волн от искрового и индукционного разрядов, расходящаяся ударная волна не меняла своей скорости, а скорость сходящейся волны уменьшалась.

В заключение отметим, что при генерации ударных волн с помощью импульсного индукционного разряда тепловых волн не наблюдалось. В то же время при искровом разряде и в других газах (воздух, Кг, Хе) вместе с ударной волной всегда возникала тепловая волна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамсон И. С., Гегечкори Н. М., Дробкина С. И., Мандельштам С. Л. О канале искрового разряда//ЖЭТФ. 1947. Т. 17. Вып. 10. С. 862—867.
2. Гегечкори Н. М. Экспериментальное исследование канала искрового разряда//ЖЭТФ. 1951. Т. 21. Вып. 4. С. 493—506.
3. Басов Н. Г., Борович Б. Л., Зуев В. С. и др. Сильноточный разряд в газах. 2. Описание динамики мощного разряда в газе автомодельным решением уравнений газодинамики с нелинейной теплопроводностью//Журн. техн. физики. 1970. Т. 40. № 4. С. 805—813.
4. Бобров Ю. К. Дефлаграционная модель импульсной дуги в автомодельном приближении//Журн. техн. физики. 1980. Т. 50. № 8. С. 1621—1629.
5. Баронец П. Н., Сапрыкин А. И., Якушин М. И. Образование и распространение цилиндрических ударных волн в импульсном индукционном разряде//Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 1. С. 129—133.
6. Баронец П. Н. Сходящиеся волны в импульсном индукционном разряде//Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 3. С. 182—188.

Москва

Поступила в редакцию
25.VIII.1992