

03; 04

© 1991

ВЗРЫВНЫЕ ВОЛНЫ В РАЗВИВАЮЩЕМСЯ
ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕЮ.И. Ч у т о в, В.Н. П о д о л ь с к и й,
Д.А. Б р а й о н

Свойства ударных волн (УВ), возбуждаемых коротким импульсным разрядом в газоразрядной плазме, впервые экспериментально исследовались в [1-3]. При этом экспериментально показано [2], что УВ ускоряется при переходе из нейтрального газа в газоразрядную плазму, где газ оказывается нагретым до более высокой температуры. Кроме того, во фронте ударной волны наблюдается дополнительная ионизация газа в результате протекания газоразрядного тока через возникающий здесь скачок потенциала. Последующие эксперименты [4, 5] показали, что в широком интервале параметров в газоразрядной плазме возбуждаются взрывные волны (ВВ), или, другими словами, ударные волны N -типа.

В дальнейшем были начаты интенсивные исследования УВ в газоразрядной молекулярной плазме [6-8], в которых также наблюдалось ускорение УВ в плазме. Дополнительная ионизация во фронте УВ в молекулярной газоразрядной плазме наблюдалась в [9]. Было установлено, что на свойства УВ в молекулярной газоразрядной плазме оказывает влияние не только нагрев газа протекающим током [2, 6] или ионно-звуковыми волнами, возбуждаемыми перед ударным фронтом [10], но и VT -релаксация в колебательно-возбужденном газе при прохождении УВ [6, 11-13].

Исследования ударных волн проводились как в стационарной (квазистационарной) [1-9], так и распадающейся плазме [14]. Однако до настоящего времени практически не были исследованы в идентичных экспериментальных условиях ударные волны в атомарной и молекулярной газоразрядной плазме во время ее развития. Это тем более интересно, что в молекулярной плазме установление равновесия может продолжаться достаточно долго и нетривиально [15, 16]. Опубликованная недавно работа [17] охватывает только некоторые стороны этого вопроса.

Эксперименты проводились в стеклянной электрической ударной трубе (ЭУТ) $D \sim 2$ см, разрядная часть которой и газоразрядная секция разделялись секцией формирования взрывной волны длиной 20-30 см. Газоразрядная плазма создавалась при разряде конденсаторной батареи через омическое сопротивление при $RC = 0.5$ с. Время включения этого разряда составляло около 100 мкс, а начальная плотность разрядного тока не превышала 0.7 А/см².

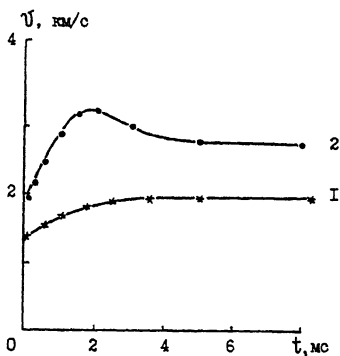


Рис. 1.

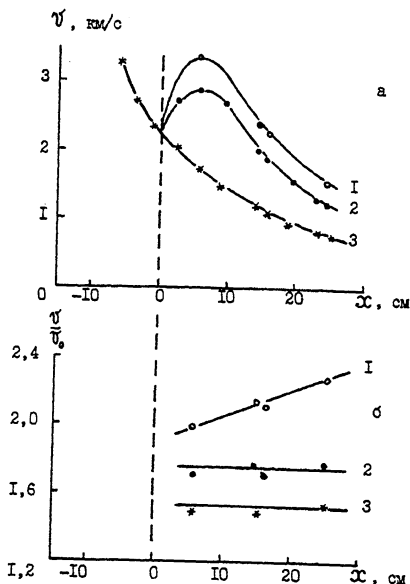


Рис. 2.

ЭУТ наполнялась азотом или аргоном при давлении 1 Тор. ВВ генерировались быстрым импульсным разрядом конденсаторной батареи подобно [9] и регистрировались лазерной шпирен-системой как в секции формирования, так и в области газоразрядной плазмы. Схема синхронизации позволяла генерировать ВВ через любое заданное время t после начала квазистационарного разряда.

На рис. 1 представлены зависимости скорости ВВ V от времени t , прошедшего после начала квазистационарного разряда. Эти зависимости получены в аргоне (кривая 1) и азоте (кривая 2) при плотности газоразрядного тока 0.3 A/cm^2 в точке, отстоящей от анода разряда на 6 см, при условии, что УВ входит в газоразрядную плазму со стороны анода. Отчетливо видна разница между этими кривыми. Если в аргоне скорость ВВ монотонно нарастает во времени (кривая 1), то в азоте наблюдается максимум скорости ВВ $V = V_m$ при $t \sim 2 \text{ мс}$. Аналогичные зависимости имеют место и при других x . При этом существенно, что максимум V при разных x достигается практически при одних и тех же $t \sim 2 \text{ мс}$. Однако и в том, и в другом случае скорость ВВ достигает своего установившегося значения $V_{уст}$ при $t \approx 4 \text{ мс}$.

На рис. 2, а приведены зависимости скорости ВВ V в азоте от расстояния x , отсчитанного от анода квазистационарного разряда, где УВ переходит из секции формирования в газоразрядную плазму. Отрицательные x соответствуют области формирования ВВ. Кривая 1 представляет собой зависимость максимальной скорости V_m от x , кривая 2 – зависимость устано-

вившейся скорости $v_{уст}$ от x (см. рис. 1), а кривая 3 – зависимость скорости $ВВ$ V_0 от x в нейтральном азоте без квазистационарного разряда. В последнем случае хорошо прослеживается непрерывное затухание $ВВ$ за счет работы по нагреву, сжатию и ускорению нейтрального газа взрывной волной $ВВ$. В случае, если $ВВ$ входит в газоразрядную плазму (кривые 2 и 1), на некотором участке $\Delta x \sim 5$ см наблюдается ускорение, которое затем сменяется затуханием.

Интересной особенностью характеризуются зависимости $\frac{V_m}{V_0}$ и $\frac{V_{уст}}{V_0}$ от x , где V_0 – скорость $ВВ$ в соответствующей точке без газоразрядной плазмы, которые приведены для азота на рис. 2, б прямыми 1, 2 соответственно. Прямая 3 представляет собой зависимость $\frac{V_{уст}}{V_0}$ от x в аргоне. Тот факт, что в случае аргона $\frac{V_{уст}}{V_0}$ практически не зависит от x , указывает на то, что нагрев газа и связанное с ним уменьшение плотности газа в области разряда практически не влияет на затухание $ВВ$. Аналогичная ситуация имеет место и после установления разряда в азоте, т.е. при $t \gtrsim 4$ мс (прямая 2 на рис. 2, б). Вместе с тем, отношение $\frac{v}{v_0}$ на начальных этапах развития разряда увеличивается с ростом x , о чем свидетельствует прямая 1 на рис. 2 и аналогичные зависимости для $0 \leq t \leq 3$ мс. Этот рост, вероятнее всего, обусловлен выделением тепловой энергии за фронтом $ВВ$ на начальных этапах развития квазистационарного разряда. Наиболее вероятным источником этой энергии является колебательное возбуждение молекул азота, относительное энергосодержание которого на начальном этапе развития разряда в азоте может быть достаточно большим вследствие медленности VT -релаксации в холодном азоте, подобно [16].

Таким образом приведенные экспериментальные результаты свидетельствуют о повышенном влиянии колебательного возбуждения молекул на распространение $ВВ$ в газоразрядной азотной плазме на начальных стадиях развития разряда.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ч у т о в Ю.И. // Украинский физический журнал. 1969. Т. 14. № 3. С. 514–517.
- [2] Ч у т о в Ю.И. // Украинский физический журнал. 1970. Т. 15. № 4. С. 682–685.
- [3] Ч у т о в Ю.И. // ПМТФ. 1970. № 1. С. 124–130.
- [4] Подольский В.Н., Ч у т о в Ю.И. // ЖТФ. 1972. Т. 17. В. 3. С. 638–641.
- [5] Ч у т о в Ю.И., Подольский В.Н., Палкин В.Ю. Мат. УШ Междунар. конф. по МГД-преобразованию энергии. Москва, 1983. Т. 5. С. 132–135.

- [6] Климов А.И., Коблов А.Н., Мишин Г.И., Серов Ю.П., Явор И.П. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. В. 7. С. 439-443.
- [7] Евтюхин И.В., Марголин А.Д., Шмелев В.М. // Химическая физика. 1984. Т. 3, № 9. С. 1322-1327.
- [8] Басаргин И.В., Мишин Г.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 4. С. 209-215.
- [9] Чутов Ю.И., Подольский В.Н., Палкин В.Ю. Мат. Ш Всесоюз. конф. по физике газового разряда. Киев, 1986. Т. 3. С. 466-468.
- [10] Авраменко Р.Ф., Рухадзе А.А., Теселкин С.Ф. // Письма в ЖЭТФ. 1981. Т. 34. В. 9. С. 485-488.
- [11] M n a t s a k a n y a n A. K h., N a i d i s G. V., R u m y a n t s e v S. V. Shock Tubes and Waves Proc. XVIII Int. Symposium. Aachen, 1987. P. 201-205.
- [12] Рухадзе А.А., Силаков В.П., Чеботарев А.В. // Краткие сообщения по физике. 1983. № 6. С. 18-23.
- [13] Бакшт Ф.Г., Мишин Г.И. // ЖТФ. 1983. Т. 53. В. 5. С. 854-857.
- [14] Александров А.Ф., Видекин Н.Г., Лакутин В.А., Скворцов М.Г., Тимофеев И.Б., Черников В.А. // ЖТФ. 1986. Т. 54. В. 4. С. 771-774.
- [15] Попак Л.С., Словецкий Д.И., Урбас А.Д., Федосеева Т.В. В кн.: Химия плазмы. Москва: Атомиздат, 1978. В. 5. С. 242-279.
- [16] Бычков В.Л., Гуреев К.Г., Кибовская Т.Т. // Химическая физика. 1988. Т. 7, № 1. С. 109-114.
- [17] Климов А.И., Мишин Г.И., Федотов А.Б., Шаховатов В.А. // Письма в ЖТФ. Т. 15. В. 20. С. 31-36.

Поступило в Редакцию

17 апреля 1990 г.

В окончательной редакции

11 декабря 1990 г.