

03; 04; 12

© 1991

ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ И ПЛОТНОСТИ
В УДАРНЫХ ВОЛНАХ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

Г.И. Мишин, А.И. Климов, А.Ю. Гридин

В настоящей работе были продолжены экспериментальные исследования структуры ударной волны (УВ) в низкотемпературной слабоионизированной плазме, начатые в [1-5].

Эксперименты проводились на однодиафрагменной ударной трубе прямоугольного сечения $10 \times 10 \text{ см}^2$ [1]. В рабочей секции (РС) трубы создавался нестационарный тлеющий разряд (ТР) со средней плотностью тока $j = 40 \text{ МА/см}^2$ и временем горения $t_{гор} \ll 1 \text{ мс}$. Секционированный катод располагался в нижней части РС, а сплошной анод - в верхней. Рабочим газом являлся воздух при давлении $P_0 = 3-6 \text{ Тор}$.

При этих условиях во всей области РС, за исключением прикаточной области, получалась холодная плазма с газодинамической температурой $T_0 \ll 350 \text{ К}$, температурой электронов $T_e = 1-2 \text{ эВ}$ и концентрацией электронов $n_e \approx 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Вблизи катода образовывался тонкий прогретый слой с $T_0 \ll 700 \text{ К}$ и $n_e \approx 2-3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, эффективной толщиной не более 20 мм.

Особое внимание в настоящей работе было уделено одновременному измерению статического давления P и плотности газа ρ за УВ в заданной локальной области плазмы.

Статическое давление измерялось пьезодатчиком (ПД), конструкция которого была подобна датчику, описанному в [6]. ПД был вмонтирован в диэлектрический клин, изготовленный из капролона, с углом при вершине 30° . В эксперименте имелась возможность перемещать клин как вдоль плазменной зоны (по оси X), так и поперек нее (по оси Y). Кроме того, плоскость клина с чувствительным элементом ПД можно было располагать как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях РС.

От плазмы чувствительный элемент ПД, диаметром 5.5 мм, отделялся тонкой алюминиевой фольгой и двумя-тремя слоями диэлектрической липкой ленты. При этом уровень электрических плазменных шумов и электрических "наводок" от импульсного разрядного тока не превышал 50 мВ, что составляло 10% от амплитуды полного сигнала.

В контрольных экспериментах с помощью ширинной и интерферометрической импульсной визуализации течения было установлено, что клин практически не вносит искажений в спутный поток за УВ в области над его плоской поверхностью.

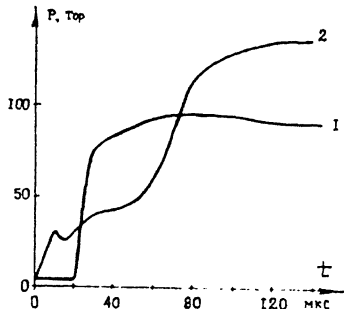
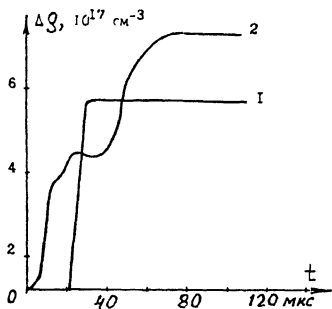


Рис. 1. Изменение плотности $\rho(t)$ и статического давления $P(t)$ в ударной волне в воздухе (1) и плазме TR в воздухе (2). $U_0 = 1500$ м/с, $P_0 = 6$ Торр, $j = 40$ мА/см², $X = 150$ мм, $Y = 50$ мм. В - волна, П - предвестник. Здесь $\Delta\rho$ превышение плотности над начальным значением.

Плотность газа измерялась с помощью оптического интерферометра Майкельсона ($\lambda = 0,63$ мкм) с регистрацией смещения полос посредством ФЭУ [2]. При этом луч интерферометра проходил на расстоянии 10 мм над плоскостью ПД.

Скорость УВ в воздухе и плазме регистрировалась с помощью двух шпирен-датчиков, расположенных на расстоянии 20 мм друг от друга на высоте $Y = 60$ мм от поверхности катода. Точность определения скорости была не хуже 5%.

Измерения плотности и давления в УВ в плазме производились в сечении РС, расположенном на расстоянии $X = 150$ мм от начала области разряда (при общей длине разрядной зоны 160 мм), и на высоте $Y = 50$ мм от плоскости катода.

Характерные эпюры плотности $\rho(t)$ и давления $P(t)$ за УВ, входящей в РС со скоростью $U_0 = 1500$ м/с, в контрольных экспериментах - 1 (в воздухе без разряда) и в плазме - 2 в указанной области РС показаны на рис. 1.

Можно видеть, что за фронтом УВ в воздухе имелся достаточно однородный поток газа, полная длительность которого была около 300 мкс. Длительность фронта сигнала давления определялась временным разрешением ПД и составляла ~ 10 мкс. В плазме при этом имела место двухволновая структура УВ, причем скорость предвестника (П) превосходила скорость входящей УВ, а скорость волны (В) оказывалась существенно меньшей.

Типичные осциллограммы изменения плотности и давления в УВ в воздухе и плазме, входящей в РС со скоростью $U_0 = 500$ м/с, в области РС с координатами $X = 150$ мм, $Y = 50$ мм приведены на рис. 2.

В данном случае наблюдалась трехволновая конфигурация, включающая дополнительное возмущение (Л), названное в [1] лидером. На данном режиме проведения экспериментов лидер характеризует-

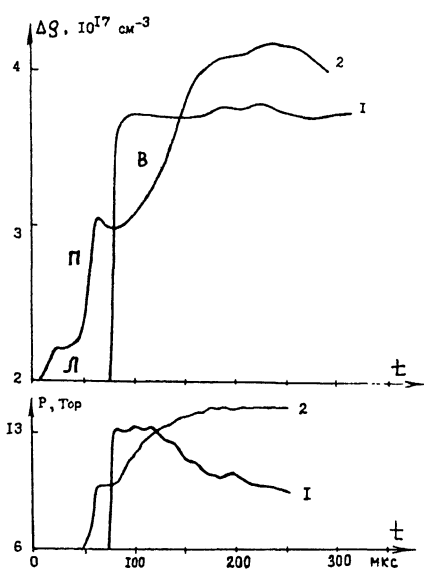


Рис. 2. Изменение плотности $\rho(t)$ и статического давления $P(t)$ в ударной волне в воздухе (1) и плазме ТР в воздухе (2). $v_0 = 500$ м/с, $P_0 = 6$ Тор, $j = 40$ мА/см². В - волна, П - предвестник, Л - лидер.

ся небольшим $\sim 10\%$ повышением плотности вблизи фронта предвестника.

Факт существования лидера в виде изменения плотности был установлен с помощью двух различных методов визуализации: оптической интерферометрии и шпирен-метода. Причем величины зарегистрированных сигналов за-

метно превышали уровни собственных шумов фотоприемников и электрических наводок от разряда. Поскольку увеличение статического давления в лидере было небольшим (порядка изменения плотности), то наблюдавшийся сигнал незначительно превышал уровень шумов датчика давления и не мог быть надежно измерен.

Средние значения отношений ρ/ρ_0 , P/P_0 и скоростей для фронтов лидера, предвестника и волны приведены в таблице. Следует указать на зависимость параметров предвестника и лидера от расстояния области наблюдения Y от поверхности катода.

При приближении к катоду плотность в предвестнике уменьшалась: так, например, для УВ с $v_0 = 1500$ м/с в точке $X = 150$ мм и $Y = 80$ мм значение ρ/ρ_0 равнялось 3.8-4, а в 30 мм от катода отношение ρ/ρ_0 уменьшалось до 1.45. Однако временной интервал между фронтом предвестника и волной при этом не изменялся, оставаясь равным ~ 40 мкс.

В свою очередь при приближении к катоду плотность в лидере также понижалась, а при давлении в РС $P_0 \ll 3$ Тор вместо увеличения плотности происходило даже ее уменьшение ниже начального уровня [1].

Отметим, что расщепление УВ в плазме нельзя объяснить искривлением ее фронта в прикатодной зоне. Рассмотрение интерферометрических снимков (с экспозицией 20-40 нс) показало, что искривление волны не наблюдается уже на расстоянии $Y \geq 40$ мм от катода. Поэтому эпюры плотности и давления, представленные на рис. 1 и 2, полученные для $Y \geq 50$ мм, несомненно отражают структуру плоской УВ в холодной плазме.

Анализ полученных экспериментальных данных изменения в УВ в плазме плотности и статического давления привел к выводу, что

$$U_0 = 1500 \text{ м/с}, M_0 = 4.32$$

	Предвестник (П)	Волна (В)	Лидер (Л)	Без плазмы
ρ/ρ_0	3	1.65 ± 0.05	-	4.73
P/P_0	10 ± 1	3.75 ± 0.25	-	21.6
$U, \text{ м/с}$	1825 ± 75	950 ± 50	-	1500

$$U_0 = 500 \text{ м/с}, M = 1.44$$

	Предвестник (П)	Волна (В)	Лидер (Л)	Без плазмы
ρ/ρ_0	1.46	1.32	1.1	1.76
P/P_0	1.72 ± 0.08	1.45 ± 0.15	-	2.26
$U, \text{ м/с}$	600 ± 12	490 ± 10	714 ± 14	500

аномальные свойства УВ в плазме обусловлены выделением в них энергии.

Величина энергии выделяющейся в одном грамме массы газа, существенным образом зависит от интенсивности УВ. Для УВ, входящей в плазму со скоростью $U_0 = 1500 \text{ м/с}$, она оказалась значительной, равной ~ 0.6 от удельной газодинамической энтальпии плазмы в РС перед УВ, в то время, как для УВ, имеющей скорость перед входом в плазму $U_0 = 500 \text{ м/с}$, выделяющаяся энергия мала и составляет примерно в сто раз меньшую величину.

Эксперименты с обрыва тока разряда до прихода в плазму УВ позволили установить, что выделяющаяся энергия не связана с протеканием тока в УВ.

Последовательное увеличение времени задержки между моментами гашения разряда и прихода УВ дало возможность подтвердить выводы ранее проведенных экспериментов [5] о большом „времени жизни“ данного энергетического состояния в распадающейся плазме, составляющего, по крайней мере, около 10^{-2} с .

Нетривиальные свойства обнаруженного энергетического резервуара подтверждаются еще и тем, что он существует не только в плазме воздуха (двухатомный газ), но и в аргоне (одноатомный газ) [3, 4], в котором внутренняя „колебательная энергия“ не запасается. Осуществленные ранее эксперименты [1, 4] выявили сложную структуру УВ в плазме, которая не может быть объяснена только энергетическим механизмом и в формировании которой кардинальную роль играет электронная компонента плазмы [7].

Этот вывод подтверждается результатами экспериментов по распространению УВ в холодной плазме нестационарного ТР при

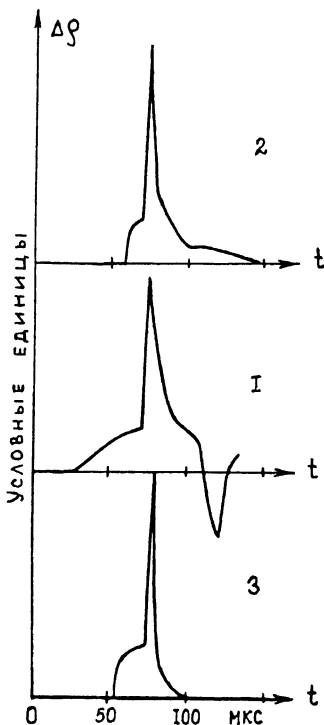


Рис. 3. Шлирен сигналы УВ в плазме ТР в воздухе $U_0 = 600$ м/с, $P_0 = 6$ Тор, $j = 40$ мА/см², $X = 150$ мм, $Y = 50$ мм. При наложении поперечного направлению движения УВ и току разряда внешнего магнитного поля $H = 200$ Э: 1 – напряженность холловского поля ускоряет электроны, 2 – напряженность холловского поля ускоряет электроны, 2 – напряженность холловского поля тормозит электроны, 3 – магнитное поле отсутствует.

наложении на него внешнего поперечного магнитного поля с напряженностью $H = 200-400$ Э (вектора тока разряда, скорости УВ и напряженности магнитного поля образовывали взаимно ортогональную систему векторов). Величина напряженности холловского поля E_H составляла 45 В/см, отношение $E_H/E \approx 0.3$ (где E – средняя напряженность электрического поля в разряде). При этом в зависимости от направления вектора H по отношению к вектору E напряженность холловского поля E_H оказывалась направленной либо в сторону ускорения электронов в УВ (случай 1), либо, наоборот, их торможения (случай 2).

Магнитное поле не изменяло существенным образом параметры разряда: ВАХ отклонялись не более, чем на 10%, температурное поле в зоне разряда $T_0(X, Y, t)$ практически оставалось неиз-

менным (интерферометрические измерения). На рис. 3 представлены ширен сигналы, соответствующие УВ в воздушной плазме ($X = 150$ мм, $Y = 50$ мм) при наличии магнитного поля и без него (случай 3). Скорость УВ на входе в РС $U_0^* = 600$ м/с, давление $P_0 = 6$ Тор. В результате этих экспериментов было обнаружено, что в случае 1 расщепление УВ было максимальным и интервал времени между фронтами предвестника и волны составлял ~ 40 мкс, что в 2 раза превосходило расщепление в отсутствии магнитного поля (случай 3) и в 4 раза превышало расщепление в случае 2. Кроме того, для случаев 1 и 2 величины P , ρ , $\Delta\rho$ и скорости предвестника также значительно различались.

Итак, результаты описанных экспериментов с полной определенностью показали, что при образовании газоразрядной плазмы в ней возникает специфическое энергетическое состояние с необычными свойствами, способное дезактивироваться в УВ в кинетическую энергию, увеличивая скорость УВ и уменьшая ее плотность.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] К л и м о в А.И., М и ш и н Г.И. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. № 24. С. 89.
- [2] К л и м о в А.И., М и ш и н Г.И., Ф е д о т о в А.Б., Ш а х о в а т о в В.А. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 20. С. 31.
- [3] Б а с а р г и н И.В., М и ш и н Г.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 4. С. 209.
- [4] Б а с а р г и н И.В., М и ш и н Г.И. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. № 8. С. 55.
- [5] К л и м о в А.И., К о б л о в А.Н., М и ш и н Г.И., С е р о в Ю.Л., Х о д о т а е в К.В., Я в о р И.П. // Письма в ЖТФ. 1982. Т. 8. № 9. С. 551.
- [6] Б а ж е н о в а Т.В., Г в о з д е в а Л.Г., Л а г у т о в Ю.П. и др. Нестационарное взаимодействие ударных и детонационных волн в газах. М., 1986.
- [7] М и ш и н Г.И. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. № 5. С. 274.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР,
Ленинград

Поступило в Редакцию
6 августа 1991 г.