

03;04;12

Сравнение распространения ударной волны в распадающейся плазме в разных газах

© А.С. Барышников, И.В. Басаргин, М.В. Чистякова

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: al.bar@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 12 декабря 2008 г.)

Исследовано влияние влажности и состава газа на эффект расщепления ударных волн в плазме распадающегося тлеющего разряда в осушенном и влажном воздухе, в азоте и аргоне на разных временах после выключения разряда. Форма сигнала, отражающая распределение давления газа за ударной волной, в этих средах существенно не различается, кроме некоторых значений времени затухания, сопоставимых с характерным временем падения концентраций возбужденных состояний, в том числе синглетного кислорода, после выключения разряда (8 ms). Проведено количественное сравнение сигнала в тех же четырех газах на разных значениях времени после выключении разряда с помощью разложения сигнала в ряд Фурье. Представлено сравнение свободного члена, второй и третьей мод в фурье-разложении. Исследования проводились до времени 60 ms.

PACS: 52.35.Tc

Изучение структуры течения за ударной волной в плазме положительного столба тлеющего разряда и в распадающейся плазме разряда имеет уже достаточно продолжительную историю. Первые работы в распадающейся плазме были проведены под руководством профессора Г.И. Мишина на плазмогазодинамической установке Физико-технического института (ФТИ) [1]. Исследования проводились только в воздухе, взятом из атмосферы, т.е. в воздухе обычной влажности и запыленности, и в аргоне. Впоследствии было показано [2,3], что на распространение ударной волны в плазме влияет разновидность газа, например, такие, на первый взгляд незначительные, параметры, как влажность воздуха, его запыленность. Хотя изменения формы сигнала за ударной волной в связи с изменением влажности воздуха незначительны, поведение распределения скорости ударной волны поперек разряда существенно отличается [3].

В представленной работе продолжены исследования на плазмогазодинамической установке ФТИ распространения ударной волны в распадающейся плазме, под которой понимается среда, возникающая после выключения тока в положительном столбе тлеющего разряда. Проводится сравнение формы импульса давления за ударной волной в распадающейся плазме разных газов: осушенном воздухе (влажность практически нулевая), в воздухе, насыщенном парами (влажность практически 100%), в азоте и в аргоне с целью выяснения роли влажности и физико-химических процессов в плазме на поведение ударной волны.

Изучается распространение ударной волны в распадающейся плазме после выключения тока в положительном столбе тлеющего разряда [2,3]. Давление газа в экспериментальной камере, как и в предыдущих исследованиях, составляет $4 \cdot 10^3$ Pa, сила тока в разряде — 1.1 А.

После многочисленных исследований авторы пришли к выводу о том, что форма распределения давления за

ударной волной в начальный момент после выключения разряда остается практически одинаковой в двух средах: осушенном и увлажненном воздухе. Эксперименты показывают, что на временах до 1 ms поведение распределения давления за ударной волной хорошо описывается распределениями, представленными на рис. 1, а.

Можно видеть, что в азоте распределение давления отличается только амплитудой, а в аргоне — положением вторичной волны. На рисунке показано распределение сигнала с пьезодатчика, ориентированного навстречу ударной волне. Пьезодатчик находится на расстоянии 20 mm от центра разряда. Именно на этом расстоянии, как было указано в [4], имеется резкое увеличение скорости распространения ударной волны в тлеющем разряде в атмосферном воздухе. Из рис. 1, а видно, что форма сигнала в азоте, в осушенном и увлажненном воздухе практически одинакова в плазме сразу после выключения разряда. В аргоне отличие распределения давления гораздо более значительно.

Однако в промежутке времени затухания от 2 до 4 ms имеются различия и в близких газах (см. рис. 1, b, c), они носят не только количественный, но и качественный характер. В сухом воздухе (1) в момент времени 2 ms „пик“ в распределении отстает от „пика“ во влажном воздухе (2) и в азоте (3). Сигнал в сухом воздухе по сравнению с сигналами во влажном воздухе и азоте уширяется, и снижение после „пика“ становится явно более пологим. Сигнал в сухом воздухе имеет также меньшую амплитуду, однако сравнивать полученные экспериментальные данные по амплитуде нужно с определенной долей осторожности, поскольку на амплитуду сигнала существенно влияет начальная энергия распространения волны, которая подвержена случайным вариациям от эксперимента к эксперименту. В различных экспериментах амплитуды сигналов изменяются в пределах 10%. Длина „полки“ распределения от

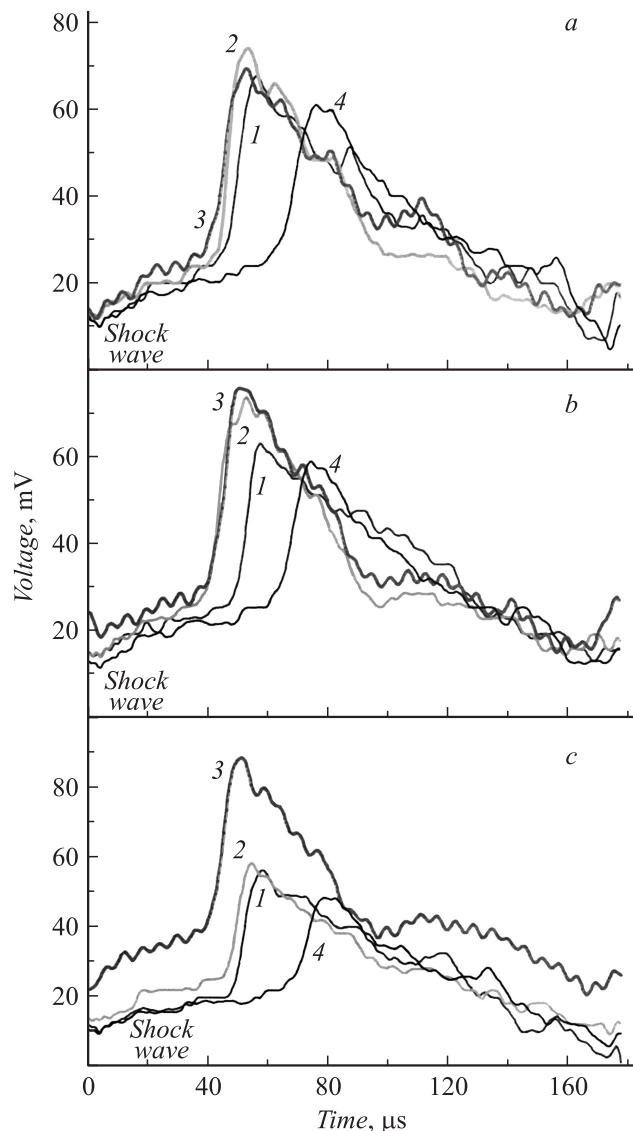


Рис. 1. Сравнение импульсов с пьезодатчика в сухом (1), увлажненном (2) воздухе, в азоте (3) и в аргоне (4). Расстояние от центра 20 мм. Время после выключения разряда: *a* — 0 (без учета времени выключения разряда), *b* — 2, *c* — 4 ms.

ударной волны до „пика“ распределения не подвержена значительным колебаниям, амплитуда этих колебаний не более 3%. Следует отметить, что в то же время (2 ms) сигналы во влажном воздухе и в азоте практически совпадают.

Известно, что в разряде влажного воздуха концентрация синглетного кислорода существенно понижена по сравнению с сухим воздухом [5].

В момент времени 4 ms (см. рис. 1, *c*) сигналы во влажном и сухом воздухе совпадают, тогда как в азоте „пик“ сигнала все еще опережает „пики“ во влажном и сухом воздухе, и амплитуда его остается больше. После 6 ms сигналы в азоте, в осушенном и увлажненном воздухе становятся одинаковыми в пределах точности полученных экспериментальных данных. На-

до отметить, что в статье [6] было обнаружено, что концентрация синглетного кислорода после выключения тлеющего разряда примерно при тех же условиях, что и в нашем эксперименте, падает на несколько порядков за время 6–8 ms.

Таким образом, за время падения концентрации синглетного кислорода после выключения разряда форма распределения давления за ударной волной во влажном воздухе изменяется. Сначала она близка к форме сигнала в азоте, в котором нет кислорода, а затем приближается к форме в сухом воздухе, в котором концентрация синглетного кислорода уже незначительна. Далее, когда синглетный кислород практически исчезает, все три распределения в различных газах практически совпадают. Для сравнения, сигнал в существенно ином газе — аргоне — все время после выключения разряда значительно отличается от сигналов в трех близких газах (см. рис. 1).

Сравнение результатов показало, что основные различия в форме сигнала за ударной волной в трех газах (влажном воздухе, сухом воздухе и азоте) имеют место на временах до 6–10 ms, которые сравнимы со временем падения концентраций возбужденных состояний в плазме воздуха, в том числе — синглетного кислорода [4]. Вышеприведенное сравнение сигналов носит качественный характер.

Кроме качественного сравнения в разных газовых средах в настоящей работе было проведено и количественное сравнение с помощью разложения экспериментальных сигналов в ряды Фурье. При разложении обнаружилось, что амплитуды мод разложения (коэффициенты разложения) начиная с пятой моды уже на несколько порядков меньше амплитуд первых трех мод. Как показывают расчеты восстановления сигнала по его разложению, добавление уже четвертой моды мало изменяют восстановленный сигнал.

Третья мода мало изменяет сигнал по амплитуде (рис. 2), но по сравнению со второй дает более каче-

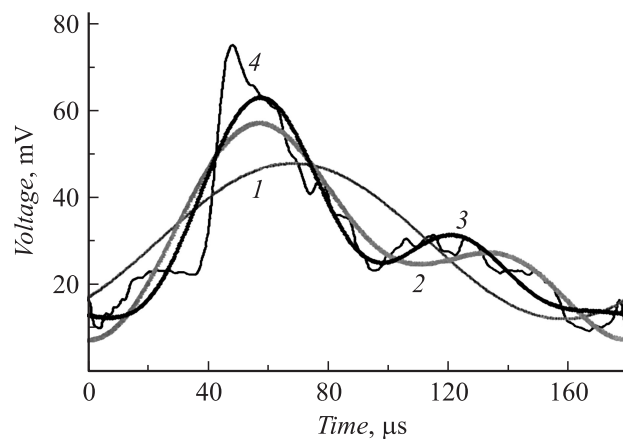


Рис. 2. Восстановление формы сигнала по трем модам разложения в ряд Фурье. 1 — прибавление первой моды, 2 — второй моды, 3 — третьей моды, 4 — экспериментальный профиль. Расстояние от центра 20 мм. Профиль сигнала во влажном воздухе без выключения разряда.

ственное описание зоны малого изменения сигнала от фронта первичной ударной волны (иногда его называют предвестником) до второго резкого увеличения сигнала (вторичной волны). Первая мода очень грубо передает сигнал, она описывает только амплитуду сигнала, а добавление свободного члена смещает сигнал на нужное расстояние по вертикали. В связи с изложенным первые три моды можно назвать основными модами разложения сигнала в ряд Фурье. Моды значительно более высокой частоты, чем первые три, описывают случайные колебания сигнала, хорошо видимые на рисунках.

На рис. 3 показано изменение свободного члена разложения в ряд Фурье сигнала со временем после выключения разряда. Свободный член представляет собой половину интеграла от функции, описывающей сигнал, по всему промежутку времени регистрации сигнала. Измеряемый сигнал соответствует распределению давления за ударной волной. Так как датчик направлен навстречу течению, то давление представляет собой совокупность газокINETической энергии и скоростного напора. Таким образом, можно сказать, что поведение свободного члена описывает изменение полной энергии ударной волны и течения за ней. Видно, что в период времени до 30 ms энергия волны во влажном воздухе (2) на 20% выше, чем энергия волны в сухом (1). Энергия волны в азоте (3) в первые 10 ms (время дезактивации большинства возбужденных состояний, и в том числе синглетного кислорода [6]), подвержена заметным изменениям. Сначала она увеличивается примерно на 10%, при этом энергия волны в азоте достигает значений энергии во влажном воздухе (2). Затем, уже к исходу 10 ms, она сравнивается со значениями в сухом воздухе (1) и остается равной им вплоть до конца диапазона регистрируемых времен после выключения разряда. Небольшое увеличение энергии или, скорее, постоянство значений можно видеть и во всех газах. Во влажном воздухе (2) оно простирается до 20 ms, а сухом (1) — до 14 ms. В азоте (3) это значение

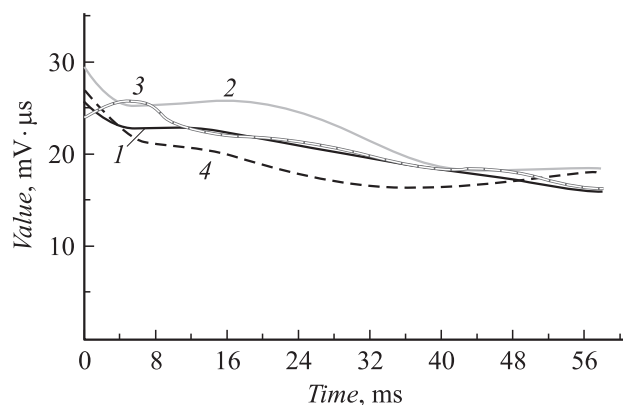


Рис. 3. Изменение со временем после выключения разряда свободного члена в разложении Фурье распределения давления за ударной волной (полная газокINETическая энергия ударной волны и течения за ней) в сухом (1), увлажненном (2) воздухе, в азоте (3) и в аргоне (4). Расстояние от центра разряда 20 mm.

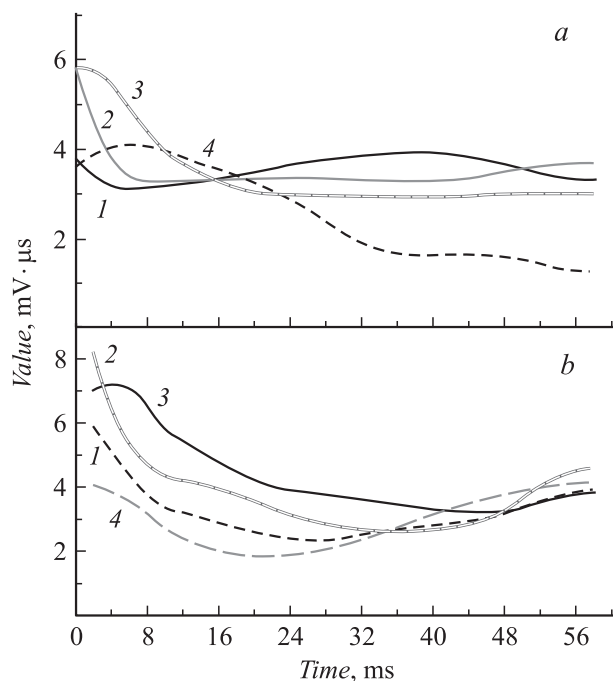


Рис. 4. Сравнение изменения со временем после выключения разряда третьего (a) и второго (b) членов в разложении Фурье распределения давления за ударной волной в сухом (1), увлажненном (2) воздухе, в азоте (3) и в аргоне (4). Расстояние от центра разряда 20 mm.

составляет 8 ms, а в аргоне (4) на графике имеется плато значений от 8 до 10 ms, и более протяженное — начинается со времени 44 ms до конца экспериментального диапазона. В аргоне (4) значения сначала совпадают со значениями в сухом воздухе (1), а затем на 20% ниже значений в сухом воздухе вплоть до практического совпадения значений во всех газах начиная с 48 ms.

На рис. 4 изображено в сравнении поведение амплитуд двух мод разложения в ряд Фурье, второй (рис. 4, b) и третьей (рис. 4, a), с увеличением времени после выключения разряда. При этом учитывалось (см. рис. 2), что рассмотрение только одной первой моды разложения неудовлетворительно описывает экспериментальный сигнал.

Из рис. 4 видно, что величины амплитуд второй и третьей моды сравнимы, поэтому следует проводить анализ поведения двух мод одновременно. Поведение амплитуды третьей моды для сухого воздуха (1), влажного воздуха (2) и для азота (3) похоже на поведение сигналов в этих газах в диапазоне изменения времени затухания разряда от 0 до 12 ms. Значения амплитуд во влажном воздухе (2) сначала совпадают со значениями в азоте (3), а затем, примерно в момент времени 8 ms, переходят к значениям в сухом воздухе (1), и, наконец, в конце диапазона 12 ms все три значения совпадают. Затем амплитуды мало изменяются со временем, но разнятся друг от друга по величине примерно на 10%. В это же время (12–16 ms) амплитуда третьей моды (см. рис. 4, a) в аргоне (4) примерно равна значениям в азоте,

сухом и влажном воздухе. В другое время амплитуда третьей моды в аргоне снижается существенно быстрее, чем в остальных газах. Поведение амплитуд второй моды (см. рис. 4, *b*) для различных газов с увеличением времени затухания разряда имеет другой характер. Для всех газов амплитуды уменьшаются и разнятся друг от друга примерно на 20–25% до времени затухания примерно 40 ms, а затем начинают увеличиваться, но не быстро, и различаются уже гораздо меньше — не более чем на 10%.

Исходя из поведения свободного члена разложения (полной газокинетической энергии ударной волны) и поведения амплитуд второй и третьей мод разложения в ряд Фурье сигналов с пьезодатчика в разных газах можно выделить три характерных времени изменения формы сигнала: 8, 12 и 40 ms. Значения времени 8–12 ms характерны для дезактивации возбужденных состояний после выключения разряда [6].

Таким образом, можно сказать, что характерная для ударной волны в тлеющем разряде форма распределения давления за ударной волной обусловлена наличием возбужденных электронных состояний в плазме разряда. Для воздуха это может быть синглетное состояние молекулы кислорода как основного возбужденного состояния в плазме тлеющего разряда.

Обнаруженное третье время перестройки формы экспериментального сигнала (40 ms) требует дополнительного осмысления и экспериментального исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-08-00663-а.

Список литературы

- [1] Басаргин И.В., Мишин Г.И. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 7. С. 198–203.
- [2] Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистяков М.В. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 10. С. 54–57.
- [3] Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистяков М.В. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 15. С. 12–15.
- [4] Барышников А.С., Басаргин И.В., Чистяков М.В. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 22. С. 82–86.
- [5] Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Каральник В.Б., Кочетов И.В., Напартович А.П., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 6. С. 571–584.
- [6] Вагин Н.П., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Котков И.В., Кочетов И.В., Напартович А.П. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 5. С. 465–476.