04

Исследование влияния параметров разряда на распространение ударной волны из канала разрядной камеры

© А.В. Глушнева, А.С. Савельев, Э.Е. Сон, Д.В. Терешонок

Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия
e-mail: Glushniova.alexandra@gmail.com

(Поступило в Редакцию 28 июля 2014 г.)

Экспериментально и теоретически исследовано распространение ударной волны, образовавшейся при пробое в разрядной камере. Диагностика потока проводилась с помощью бесконтактного оптического метода визуализации шлирен. Экспериментально получены зависимости пространственно-временных характеристик распространения ударной волны из канала разрядной камеры от энергии разряда. Аналитически проведена оценка скорости выхода ударной волны из канала и энергии, затраченной и вложенной в ударную волну.

Изучение ударных волн представляет огромный интерес не только для фундаментальной науки, но и с точки зрения практического применения. Ударно-волновые явления возникают при большом энерговкладе в малом объеме за короткий промежуток времени, например при искровых разрядах в воздухе [1]. Основополагающие выводы были получены в результате исследований, выполненных сотрудниками С.Л. Мандельштама [2–4]. Следует отметить, что течение газа, вызванное искровым разрядом, отличается от мгновенного взрыва, так как время движения ударной волны (УВ) соизмеримо со временем энерговыделения. Теория взрывной волны при искровом разряде была развита С.И. Брагинским и С.И. Драбкиной [3,4]. Механизм образования УВ в ходе искрового разряда заключается в сильном термическом нагреве газа током. Сильный электрический ток вызывает джоулев нагрев, который приводит к резкому повышению давления в токовом канале. В случае, когда пробой между электродами происходит внутри камеры, УВ будет распространяться наружу по каналу камеры.

Необходимость исследовать распространение УВ из разрядных камер возникла по причине использования разрядных камер в качестве элемента молниезащитных устройств. Принцип действия нелинейного ограничителя напряжения на основе разрядных камер заключается в следующем. Система последовательно соединенных разрядных камер одним концом подключена к высоковольтной линии, другим — заземлена. При попадании молнии в высоковольтную линию происходит пробой разрядных промежутков между электродами, расположенными на дне каналов камер. В ходе разряда канала формируются УВ и высокотемпературная струя газа. Истечение струи и распространение УВ влияют на параметры разряда, способствуя более раннему гашению разряда. По этой причине изучение распространения УВ из разрядной камеры важно для исследования процесса истечения газа и его влияния на параметры внутри разрядной камеры. В настоящей работе изучается распространение УВ из разрядной камеры с цилиндрическим каналом. Задача заключалась в исследовании влияния энергии, затраченной в разрядном промежутке, на пространственно-временные характеристики УВ.

Пробойные условия внутри разрядной камеры создаются с помощью батареи конденсаторов, которая заряжается высоковольтным источником. Пробой инициируется с помощью третьего электрода, расположенного между силовыми электродами ближе к катоду. Величина выделенной в разряде энергии варьировала в промежутке от 40 до 400 J. Энергия, выделенная в разряде, находилась при помощи осциллограмм тока и параметров схемы и варьировала в диапазоне от 24.5 до 224 J. В экспериментах использовалась фторопластовая разрядная камера с цилиндрическим каналом длиной 20 mm и диаметром 3 mm. Диагностика потока осуществлялась с помощью бесконтактного оптического метода шлирен [5]. Съемка распространения УВ из камеры производилась высокоскоростной камерой со скоростью 200 000 кадров в секунду, разрешением 1024x16 пикселей и задержкой относительно разряда 0.000 μs.

Скоростная съемка позволила определить положение УВ в различные моменты времени после ее выхода из канала. Путем дифференцирования пространственно-временной зависимости положения УВ вне канала была найдена зависимость скорости УВ от времени (рис. 1). Из рисунка видно, что чем выше значение энергии, выделенной в разрядном промежутке, тем позже происходит вырождение УВ. Также диаграммы показали, что скорость распространения УВ на выходе из камеры меняется в диапазоне от 800 до 1600 m/s.

Полученный в эксперименте результат можно оценить, воспользовавшись приближенным методом Г.Г. Черного [6], и выразить энергию, полученную УВ, через пространственно-временные характеристики. Так как масса газа, в которой происходило энерговыделение, много меньше массы газа, увлеченного УВ, и давление за УВ p_1 много больше давления невозмущенного воздуха p_0, то можно считать, что поведение УВ в эксперименте подобно поведению УВ в результате сильного взрыва на дне канала. Согласно [7], время образования УВ по порядку величины равно времени

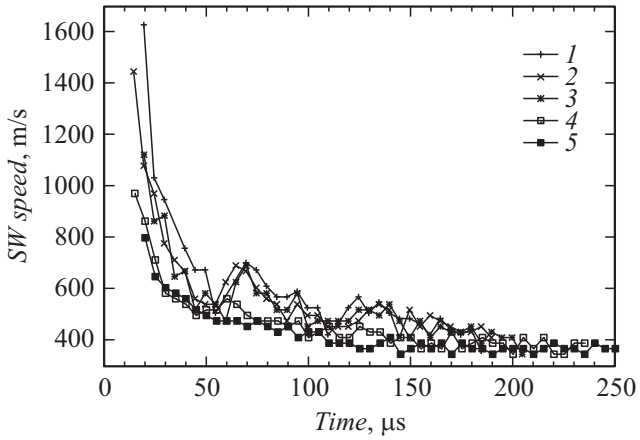

Рис. 1. Скорость УВ при разных энерговкладах: *1* — 224 J, *2* — 186 J, *3* — 103.5 J, *4* — 54.85 J, *5* — 24.5 J.

нагрева газа до тех пор, пока не будет выполнено условие $p_1 > p_0(1+\gamma)/(\gamma-1)$. Оценим время нагрева газа. Характерный объем воздуха, в котором начинает происходить разряд, можно оценить как $V = 0.25\pi d^2 h$, где $d = 3\,\mathrm{mm}$ — диаметр канала, $h = 2\,\mathrm{mm}$ — высота области энерговыделения (V — объем газа между электродами). Характерные значения тока и напряжения в самый начальный момент времени $I \approx 10^4\,\mathrm{A}$, $U \approx 10^3\,\mathrm{V}$ (рис. 2). Таким образом, мощность энерговыделения составит $W \approx 10^7\,\mathrm{Wt}$. Время, необходимое для нагрева газа до образования УВ, при такой мощности составляет $t_2 \approx 10^{-7}\,\mathrm{s}$. По экспериментальным данным характерное время распространения УВ по каналу разрядной камеры $t \approx 15\,\mu\mathrm{s} \gg t_2$, поэтому можно считать, что УВ образуется сразу после начала разряда. Согласно теории, основная масса газа сосредоточена в тонком слое на фронте УВ. Толщину этого слоя r можно найти из уравнения сохранения массы, учтя, что плотность в этом

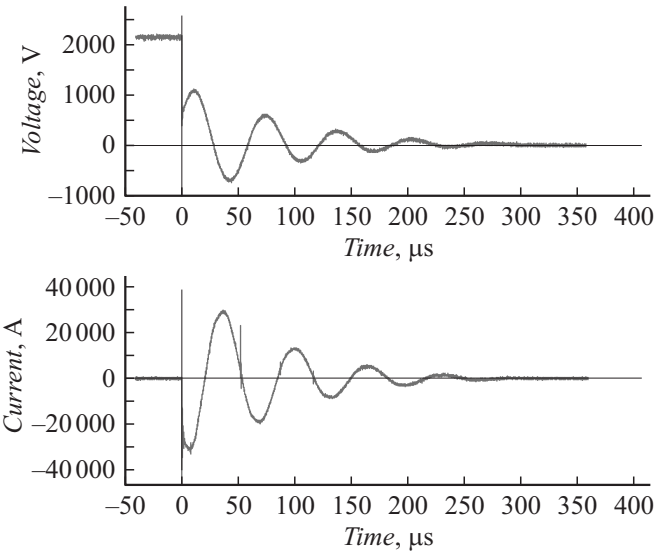

Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения.

слое равна $\rho_1 > \rho_0(1+\gamma)/(\gamma-1)$:

$$Sr\rho_0(1+\gamma)/(\gamma-1) = SR\rho_0,$$

$$r = R(\gamma-1)/(1+\gamma), \tag{1}$$

где S — площадь сечения канала, R — расстояние от дна канала до положения УВ. Из закона движения слоя (2) находим зависимость скорости УВ от R (3)

$$d/dt(Mu) = Sp_c = S\alpha p_1, \tag{2}$$

$$D = \alpha R^{\alpha-1}, \tag{3}$$

где p_c — давление на внутренней стороне слоя, a, α — некоторые коэффициенты, M и u — масса и скорость газа соответственно. Чтобы найти зависимость координаты УВ от времени и энергии, запишем закон сохранения энергии. Внутренняя энергия складывается из энергии слоя толщиной r и в небольшом количестве газа за этим слоем

$$E_T = p_c RS/(\gamma-1) + 0.5p_1 Sr(1+\alpha)/(\gamma-1). \tag{4}$$

Кинетическая энергия сосредоточена в слое газа на фронте УВ

$$E_K = Mu^2/2, \quad u = 2D/(\gamma+1). \tag{5}$$

Исходя из (3)–(5) закон сохранения энергии примет вид

$$E = E_T + E_K = \big[2\alpha/(\gamma^2-1) + (\alpha+1)/(\gamma+1)^2 + 2/(\gamma+1)^2\big]a^2\rho_0 SR^{2\alpha-1} = \mathrm{const}. \tag{6}$$

Значение $\alpha = 0.5$ определяется из (6). Также из (6), выражая a, находим $R(t)$

$$R = \beta\big(E/(\rho_0 S)\big)^{1/3} t^{2/3},$$

$$\beta = \big[1.5(\gamma+1)[\alpha(3\gamma+1)/(\gamma-1)+3]^{-0.5}\big]^{2/3}. \tag{7}$$

Скорость УВ может быть выражена из (3) и (7)

$$D = (2/3)\beta(E/\rho_0 S)^{1/3} t^{-1/3}. \tag{8}$$

Из (7), выражая E и подставляя значения R, ρ_0, S, t, взятые из эксперимента, находим, что для энергии разряда в 24.5 J на формирование УВ идет энергия $E = 1.108\,\mathrm{J}$, скорость УВ на выходе из камеры, найденная по формуле (8), дает значение $D = 742\,\mathrm{m/s}$, а экспериментальное значение $D = 800\,\mathrm{m/s}$. Для энергии заряда 224 J на формирование УВ идет энергия $E = 2.445\,\mathrm{J}$, теоретическое значение скорости $D = 1153\,\mathrm{m/s}$, в то время как экспериментальное значение составляет $D = 1600\,\mathrm{m/s}$. Таким образом, в случае больших энергий разряда экспериментальные и теоретические результаты расходятся на 28%. Данный эффект может быть объяснен взаимодействием струи газа и УВ. Так как длительность разряда порядка $250\,\mu\mathrm{s}$, то распространяющаяся

струя продолжает получать энергию от разряда и в случае с энерговкладом разряда 224 J это приводит к тому, что струя догоняет УВ и сообщает ей дополнительную энергию.

На основе приближенного метода сделаны оценки скорости выхода УВ из канала, удовлетворительно согласующиеся с экспериментом. Дано объяснение наблюдаемого расхождения теоретического и экспериментального значений скорости выхода УВ из канала.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8733).

Список литературы

[1] *Желтоводов А.А., Пимонов Е.А.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 2. С. 21–35.
[2] *Дорлгов Г.Г., Мандельштам С.Л.* // ЖЭТФ. 1953. Т. 24. С. 691–707.
[3] *Драбкина С.И.* // ЖЭТФ. 1951. Т. 21. С. 473–483.
[4] *Брагинский С.И.* // ЖЭТФ. 1958. Т. 34. С. 1548–1556.
[5] *Васильев Л.А.* Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
[6] *Черный Г.Г.* // ДАН СССР. 1957. Т. 112. № 2. С. 213–216.
[7] *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.