

03;04

Особенности воздействия слабotoчного газового разряда на сильную ударную волну

© Т.А. Лапушкина, А.В. Ерофеев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: tanyusha@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 26 сентября 2016 г.

Исследуется процесс воздействия неравновесной плазменной среды, созданной слабotoчным газовым разрядом, на ударную волну (число Маха $M = 6.8$). Ударная волна формируется в ударной трубе круглого сечения, затем проходит через зону воздействия в рабочей камере, имеющей квадратное сечение. Газовый разряд зажигается в зоне воздействия до прихода ударной волны путем подачи напряжения на специальные штыревые электроды, вмонтированные в нижнюю и верхнюю стенки рабочей камеры. В эксперименте было обнаружено явление уширения ударной волны и увеличения скорости ее распространения при прохождении через область неравновесной газоразрядной плазмы.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.05.44357.16509

Проблема воздействия на сильные газодинамические разрывы, включая ударные волны различной природы, с целью их значительного ослабления вплоть до полного разрушения не только важна с прикладной точки зрения, но и вызывает большой интерес для фундаментальных исследований. Для решения такой задачи при сверхзвуковых течениях с числами Маха $M > 4$ плазменный метод воздействия является одним из наиболее актуальных с точки зрения быстроты реакции на воздействие. Плазменный метод предполагает использование газовых разрядов и плазменных струй различной природы и интенсивности. В ряде работ с целью воздействия на сверхзвуковое течение и пограничные слои используются высокоэнергетичные плазменные листы [1], слабotoчные барьерные разряды (DBD) [2], а также плазменные струи [3]. В представленной работе исследуется процесс прохождения сильной ударной волны через область заранее сформированного слабotoчного газового разряда.

Задача плазменного воздействия на сверхзвуковые течения и газодинамические разрывы решается в несколько этапов. В предыдущих работах было исследовано воздействие газового разряда, сформированного в сверхзвуковом потоке перед присоединенной волной обтекаемого тела [4] или у поверхности тела в области между ударной волной и телом [5], а также процесс замыкания газового разряда при прохождении ударной волны через область приложения электрического поля [6]. Было показано сильное воздействие неравновесной плазмы набегающего потока и поверхностного разряда на положение и форму головной ударной волны. При возрастании степени неравновесности набегающей плазмы T_e/T_h ударная волна сильно отходит от тела, затем становится неустойчивой, а при возрастании электронной температуры T_e более чем в 5 раз по отношению к температуре газа T_h ударная волна полностью разрушается [7]. Воздействовать на ударную волну путем предварительного приложения электрического поля, предполагая, что газовый разряд замкнется по ионизованной ударной волне, не удалось, так как было обнаружено, что разрядный ток замыкается гораздо позже входа ударной волны в область приложения электрического поля через инициирующий разрядный канал, который движется по области воздействия за ударной волной с меньшей на 20% скоростью и не влияет на ударную волну [6].

Основная цель работы на данном этапе — изучить процесс прохождения сильной ударной волны ($M = 6.8$) через область заранее сформированного слаботоочного газового разряда при варьировании величины газоразрядного тока. Использование слаботоочного газового разряда позволяет исследовать степень воздействия слабоионизованной неравновесной плазменной среды на структуру и скорость распространения ударной волны.

Исследования проводятся в рабочей камере квадратного сечения, состыкованной с ударной трубой [6], где формируется сильная ударная волна, при этом возможно варьирование числа Маха ударной волны в широких пределах. В представленной работе исследования проводились при числе Маха в ударной трубе $M = 6.8$. Камера находится в конце камеры низкого давления круглого сечения и отделяется от нее тонкой целлофановой диафрагмой. В рабочей камере в зоне воздействия заранее организуется слаботоочный газовый разряд путем приложения напряжения 600 В к специальным штыревым электродам, вмонтированным в верхнюю и нижнюю стенки рабочей камеры. Установка позволяет

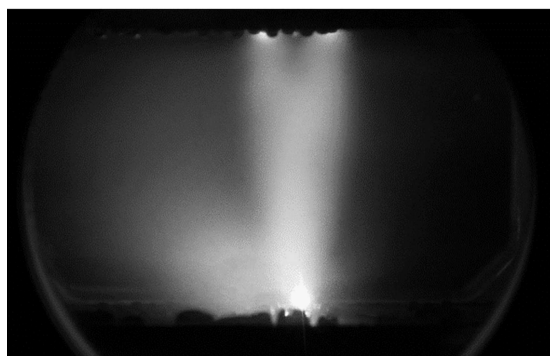


Рис. 1. Форма газового разряда в области воздействия.

варьировать величину газоразрядного тока путем изменения величины нагрузочного сопротивления, а также ширину зоны воздействия путем изменения количества подключенных штыревых электродов. Максимальная ширина газоразрядной зоны 8 см. Также возможно создание газового разряда при различных давлениях в рабочей камере, при этом меняется форма разряда от диффузного во всей области воздействия до контрагированного в центральной области, при этом возможно использование разных рабочих газов. В данной работе в качестве рабочего газа в камере низкого давления использовался ксенон, в рабочую камеру напускался воздух.

Для сравнения степени воздействия на ударную волну газоразрядной среды при разных интенсивностях газоразрядного тока измерялась скорость распространения ударной волны до зоны воздействия и за ней. Для этой цели в боковые стенки рабочей камеры перед газоразрядной зоной и за ней на фиксированном расстоянии друг от друга было вмонтировано по два специальных пьезодатчика, с помощью которых фиксировался приход ударной волны в конкретные точки камеры. Кроме того, для исследования изменения формы ударной волны использовалась шлирен-система с многокадровой фиксацией шлирен-картин течения в зоне воздействия, визуализирующая сильные градиенты плотности. В качестве приемника использовалась высокоскоростная камера с электронной регистрацией изображения.

Постановка дополнительной диафрагмы между камерой низкого давления и рабочей камерой позволила нам избавиться от сложной ударно-волновой конфигурации, возникавшей в рабочей камере при переходе ударной волны из канала круглого сечения в ударной трубе в рабочий канал с квадратным сечением [6]. В рабочей камере наблюдается одиночная ударная волна, фиксируемая шлирен-системой в зоне наблюдения и воздействия. Кроме того, такая постановка эксперимента позволяет создавать в рабочей камере различные начальные давления воздуха. В результате возможна организация в зоне воздействия газовых разрядов различной формы с разной величиной газоразрядного тока. В представленной части исследований для создания плазменной среды в области воздействия использовались диффузные разряды при давлении 7 Торг с газоразрядными токами 10–200 мА, аналогичные разряду, показанному на фотографии (рис. 1). На фотографии хорошо видны штыревые электроды, вмонтированные в верхнюю и нижнюю стенки рабочей камеры квадратного сечения. При помощи этих электродов зажигался газовый разряд, газоразрядный ток при этом протекал перпендикулярно направлению распространения ударной волны. При токе 200–300 мА в области газового разряда наблюдались сферические страты разной конфигурации, представляющие собой ионизационные волны, возникающие вследствие развития ионизационной неустойчивости [8,9]. На следующем этапе планируется исследование воздействия на ударную волну ионизационно-неустойчивой стратифицированной плазменной среды.

При наблюдении прохождения ударной волны через газоразрядную зону было обнаружено значительное уширение ударной волны, которое наблюдается с момента входа ударной волны в плазменную среду и продолжается на всем протяжении нахождения ударной волны в зоне воздействия. Ударная волна как бы размазывается по объему и, по всей вероятности, ее силовое воздействие также распределяется по этому пространству. На рис. 2 представлены шлирен-картины ударной волны в газоразрядной области в отсутствие газового разряда (рис. 2, *a*) и при газоразрядном токе 160 мА (рис. 2, *b*). Как видно из представленных фотографий, наблюдается сильное уширение ударной волны, при этом она становится более выпуклой, возможно, вследствие неоднородности распределения тока вдоль разряда, выпуклость направлена в сторону ее распространения. Было обнаружено, что ширина ударной волны растет с увеличением газоразрядного тока. С учетом того что при

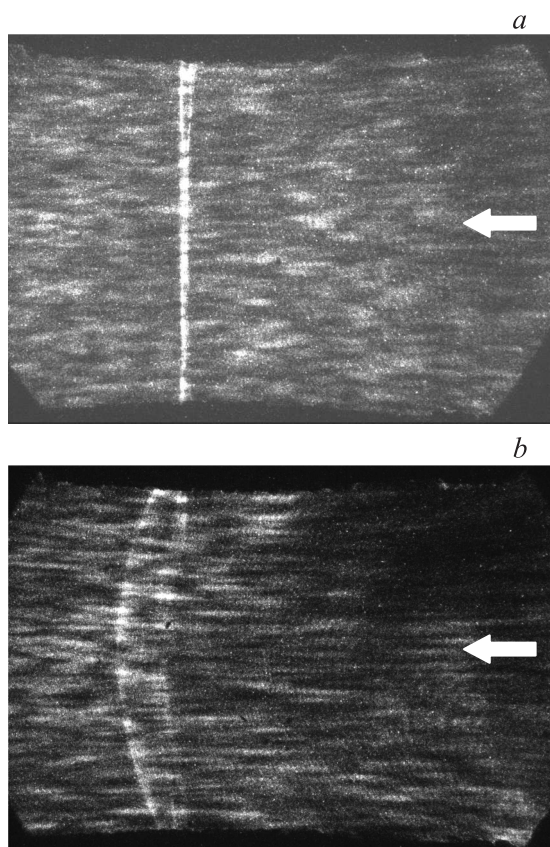


Рис. 2. Форма ударной волны в газоразрядной области при различных значениях газоразрядного тока, А: a — 0, b — 160. Стрелкой указано направление распространения волны.

данных значениях газоразрядного тока плазменная среда значительно неравновесна и греется в основном электронная компонента, можно сделать вывод, что увеличение ширины ударной волны происходит с ростом температуры электронов. Более того, при этом увеличивается скорость распространения ударной волны по газоразрядной среде, что видно из графиков, приведенных на рис. 3.

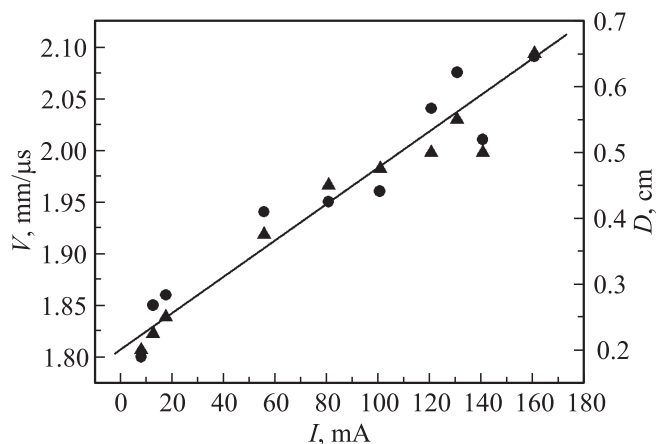


Рис. 3. Зависимость ширины (кружки) и скорости распространения (треугольники) ударной волны от величины газоразрядного тока.

Таким образом, в эксперименте было обнаружено, что сильная ударная волна уширяется при распространении по области неравновесной слабоионизованной плазмы, созданной газовым разрядом. Такое искажение волны экспериментально получено впервые, и механизм этого уширения пока до конца не ясен. Возможно, это связано с расщеплением ударной волны при ее взаимодействии с плазмой и с образованием отраженной волны, распространяющейся в противоположную сторону и сносимой потоком. Это предмет для дальнейших исследований. Ширина новой ударно-волновой конфигурации и скорость ее распространения в плазменной среде увеличиваются с ростом газоразрядного тока.

В эксперименте удалось избавиться от сложной ударно-волновой конфигурации, возникающей вследствие перехода ударной волны из канала круглого сечения в канал квадратного сечения. Для этого достаточно было отделить камеры целлофановой диафрагмой и создать в рабочей камере более низкое начальное давление (5–10 Torr). В дальнейшем планируется использовать данную установку для исследований воздействия различных плазменных сред, в том числе и запыленных, на одиночную ударную волну с варьируемыми в широком диапазоне числами Маха в отсутствие и при наличии внешнего магнитного поля разной интенсивности.

Соавтор Т.А. Лапушкина благодарит за финансовую поддержку грант РФФИ № 15-01-04635а.

Список литературы

- [1] Знаменская И.А., Сысоев Н.Н., Цзинь Ц. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 9. С. 28–33.
- [2] Staricovskiy A., Post M., Tkach N., Miles R. // AIAA Paper-2014–0144. 2014.
- [3] Narayanaswamy V., Clemens N.T., Raja L.L. // AIAA Paper 2010–1089. 2010.
- [4] Lapushkina T., Erofeev A., Poniaev S., Bobashev S. // AIAA Paper-2008–1383. 2008.
- [5] Erofeev A., Lapushkina T., Poniaev S., Bobashev S. // AIAA Paper-2010–1382. 2010.
- [6] Лапушкина Т.А., Ерофеев А.В. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. В. 5. С. 35–41.
- [7] Tatiana Lapushkina, Aleksandr Erofeev, Sergei Poniaev // 30th International Symposium on Shock Waves. ISSW30. V. 1. Ed.: G. Ben Dor; O. Igra; O. Sadot. Springer, 2016.
- [8] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [9] Нерушев О.А., Новопашин С.А., Радченко В.В., Сухинин Г.И. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 66. № 11. С. 679–682.