

03:04

Особенности замыкания газового разряда при прохождении ударной волны через область приложения электрического поля

© 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 2014 г.*

Исследовалось влияние низкотемпературной плазмы на интенсивность и скорость распространения сильных ударных волн с числом Маха $M = 6-8$. На данном этапе рассматривалось прохождение ударной волны через область приложения электрического поля, организованного предварительной подачей напряжения на специальные электроды, вмонтированные в стенки прямого канала в области прохождения ударной волны. Обнаружено, что замыкание газового разряда в области приложения электрического поля происходит по отдельному газоразрядному каналу, возникающему за ударной волной и распространяющемуся по области приложения напряжения с меньшей, чем у ударной волны скоростью. Ни газоразрядный канал, имеющий турбулентную структуру, ни возникающая за ним область однородного газового разряда не влияет на структуру и скорость распространения ударной волны.

Возможность ослабления сильных ударных волн, в том числе и детонационных, вплоть до полного их разрушения — важная задача аэродинамики с точки зрения не только прикладной науки, но и фундаментальных исследований. Решение проблемы быстрого ослабления ударных волн различного происхождения позволит значительно уменьшить их разрушающее воздействие и материальные затраты в разных областях жизнедеятельности человечества. Для этой цели предлагается использовать воздействие электрических и магнитных полей. В частности, возможно гашение ударных волн, сформированных перед объектами, летящими со сверхзвуковой скоростью, например перед астероидами, захваченными земным притяжением и не сгоревшими в атмосфере. Ослабление таких волн позволит избежать

разрушения этими волнами наземных объектов. В горнодобывающей промышленности заблаговременное полное разрушение электрическим и магнитным полями детонационных волн, образованных вследствие взрыва природного газа и распространяющихся по шахтам и штольням, позволит избежать катастрофы и человеческих жертв.

Основным механизмом изменения структуры и скорости распространения ударной волны при прохождении через электрическое поле в виде газоразрядной области является плазменное воздействие, связанное со степенью неравновесности плазмы в зоне разряда [1]. В ряде работ при прохождении ударной волны через область слабоионизованного газа наблюдались расщепление и ослабление ударной волны [2,3] или создание сложных газодинамических структур [4], а при высокой степени неравновесности набегающего плазменного потока на обтекаемое тело головная ударная волна становится неустойчивой и возникает частичное или полное ее разрушение [1].

Ввод энергии со стороны электрического поля $\mathbf{J} \times \mathbf{E}$ и нагрев тяжелой компоненты газа будут тормозить поток в области ударной волны и за ней, что также способствует ослаблению волны [5]. При включении дополнительно внешнего магнитного поля в поперечном газоразрядному току направлении поперечная сила $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ при определенном направлении тока будет тормозить сверхзвуковой поток и ударную волну, что значительно снизит ее интенсивность. Подбор соотношений плазменного, теплового и магнитогидродинамического воздействий при их совместном влиянии на ударную волну позволит эффективно снизить ее разрушительные действия на окружающую среду вплоть до полного ее ослабления.

Исследования проводятся в прямом МГД-канале, сопряженном с ударной трубой, в которой и происходит формирование ударных волн различной интенсивности (рис. 1). Зона воздействия представляет собой область газового разряда, организованного путем приложения импульса напряжения к специальным штыревым электродам, расположенным на верхней и нижней стенках канала [6]. В перпендикулярном газоразрядному току направлении возможно включение импульсного магнитного поля, организованного при помощи специальных катушек Геймгольца, находящихся у боковых стенок канала. Длина зоны воздействия может меняться в пределах от 1 до 8 см в зависимости от количества подключенных штыревых электродов. Каждый штыревой электрод имеет свое нагрузочное сопротивление во избежание перетекания токов. Ин-

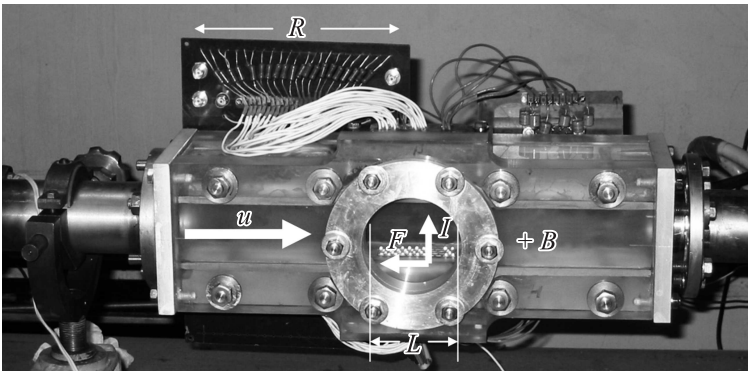


Рис. 1. Фотография рабочего канала с газоразрядной зоной. На рисунке буквами обозначены: u — скорость потока, F — сила Лоренца, I — разрядный ток, $+B$ — направление магнитного поля (от нас), R — набор сопротивлений.

тенсивность газового разряда и магнитного поля может варьироваться в широком диапазоне параметров. Рабочими средами распространения ударной волны являются ксенон или воздух.

Для визуализации зоны воздействия в процессе прохождения через нее ударной волны используется шлирен-система, где в качестве приемной части используется высокоскоростная CCD камера, позволяющая получать до 6 шлирен-картин за один эксперимент со скважностью и временем экспозиции до десятков наносекунд. Это дает возможность изучить весь процесс прохождения ударной волны через зону приложения электрического и магнитного полей. До зоны разряда и после нее в стенки канала вмонтированы по два пьезодатчика, расположенных на расстоянии 6 см друг от друга, что позволяет отследить время прохождения ударной волной этого расстояния до и после воздействия, определить скорость распространения ударной волны и исследовать возможное ее изменение в зависимости от интенсивности воздействия со стороны электрического и магнитного полей. Для исследования изменения силового воздействия ударной волны в зависимости от интенсивности внешних воздействий на оси канала навстречу потоку помещен торцевой пьезодатчик, фиксирующий полный напор ударной волны. Так же измеряются вольт-амперные характеристики разряда в процессе прохождения через него ударной волны.

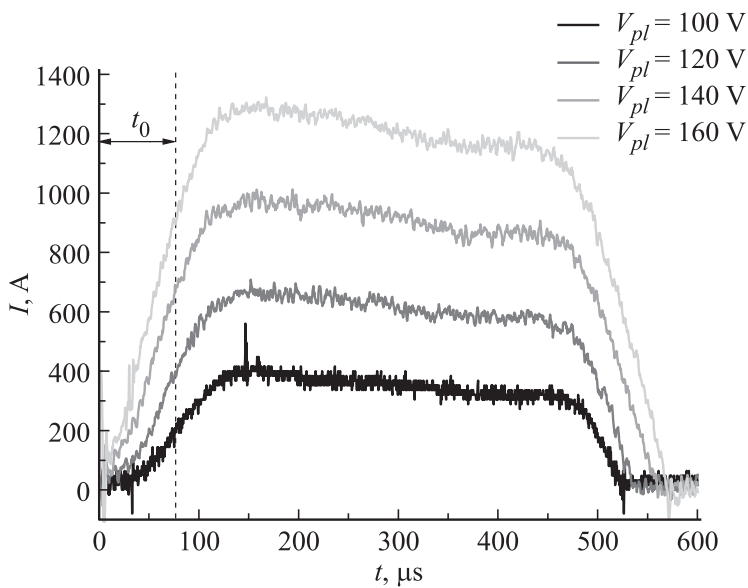


Рис. 2. Осциллограммы используемого в эксперименте газоразрядного тока.

На данном этапе работы исследовались процесс прохождения ударной волны через область приложения электрического поля и особенности замыкания газоразрядного тока. На электроды подавалось напряжение от специальных L – C -цепочек. По мере прохождения ударной волны и ионизованного за ней потока между электродами происходит замыкание тока через газоразрядный плазменный промежуток. Длительность токового импульса порядка $500 \mu\text{s}$. В зависимости от приложенного напряжения ток увеличивался от 400 до 1600 А. Осциллограммы протекающих токов представлены на рис. 2. Здесь же указано время прохождения ударной волны через область воздействия t_0 .

В эксперименте были получены шлирен-картины положения и структуры ударной волны в различные моменты времени (рис. 3). На рис. 3,а представлены четыре шлирен-картины прохождения ударной волны через исследуемую область без разряда. Здесь хорошо видна ударная волна и за ней сложная конфигурация газодинамических разрывов. Природа этих разрывов не совсем ясна, но хорошо видно

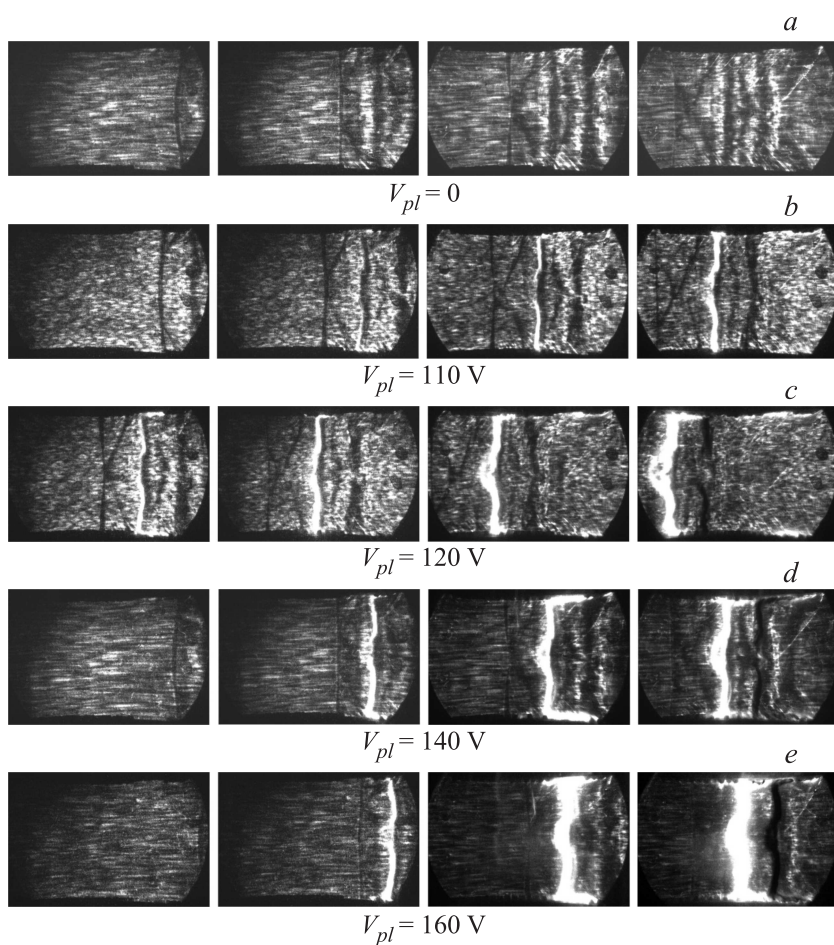


Рис. 3. Шлирен-картины прохождения ударной волны через область приложения электрического поля при разных значениях подаваемого на газоразрядный промежуток напряжения.

положение ударной волны в различные моменты времени и изменение структуры за ней по мере прохождения через область наблюдения. На рис. 3, *b–e* представлены шлирен-картины прохождения ударной волны

через область электрического поля при различных токах разряда. Время экспозиции кадра 500 ns, временной промежуток между кадрами 15 μ s. Видно, что при создании разности потенциалов между противоположными электродами $V_{p1} = 110$ V на шпирен-картинах в области за ударной волной появляется газоразрядный канал с повышенной светимостью. Это канал инициации газового разряда. Газоразрядный ток замыкается не с приходом ударной волны, а несколько позже через газоразрядный канал. За каналом, в области приложения напряжения разряд однороден. По мере увеличения тока интенсивность свечения газоразрядного канала усиливается. Этот канал движется за ударной волной с меньшей скоростью, чем скорость распространения ударной волны. Скорость ударной волны 1.3 mm/ μ s, а скорость газоразрядного канала 1.0 mm/ μ s. По мере продвижения по области приложения напряжения расстояние между ударной волной и газоразрядным каналом увеличивается. После выхода ударной волны из области приложения напряжения газоразрядный канал доходит до последних электродов и исчезает, хотя газоразрядный ток продолжает протекать между электродами и величина его не меняется (рис. 2). Разряд остается диффузным, как и в области за газоразрядным каналом. Можно отметить, что на оси рабочей камеры в области газоразрядного канала наблюдается образование турбулизованной области. По мере увеличения интенсивности разряда турбулизация этой области усиливается, что видно из рис. 3, с–е, полученных при различных напряжениях, подаваемых на электроды.

Таким образом, в результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Экспериментально были исследованы особенности зажигания газового разряда по мере прохождения ударной волны через область приложения электрического поля, при этом обнаружено, что ток замыкается через тонкий газоразрядный канал, который возникает позади ударной волны и следует за ней.

Скорость ударной волны не меняется по мере прохождения через межэлектродную область и не зависит от протекающего за ней тока. Скорость газоразрядного канала меньше, чем скорость ударной волны и не меняется при увеличении интенсивности разряда.

Датчик газодинамического напора показывает, что динамическое давление не меняется при увеличении протекающего через разряд тока.

Список литературы

- [1] *Lapushkina T., Erofeev A., Poniaev S., Bobashev S.* // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit and 10th Weakly Ionized Gas Workshop, Reno, Nevada, Jan. 7–10, 2008. AAIAA-2008-1383.
- [2] *Mishin G.I.* Experimental investigation of the flight of a sphere in weakly ionized air. AIAA-97-2298. 1997.
- [3] *Gridin A.Y., Klimov A.I., Khodataev K.V.* // High Temperature. 1994. V. 32. N 4. P. 454–457.
- [4] *Jin J., Znamenskaya I.A., Syssoev N.N.* // Technical Physics Letters. V. 39. Iss. 5. P. 418–420.
- [5] *Abramovich G.N.* Applied Gas Dynamics. Moscow: Nauka, 1969 (in Russian). 824 p.
- [6] *Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A., Zhukov B.G., Poniaev S.A., Vasil'eva R.V.* // 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Jan. 9–12, 2006. Paper 2006–1373.