

03;04

О двух режимах воздействия импульсного объемного разряда на ударную волну

© И.А. Знаменская, Н.Н. Сысоев, Ц. Цзинь (J. Jin)

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

E-mail: znamen@phys.msu.ru

Поступило в Редакцию 4 мая 2012 г.

Экспериментально исследованы два качественно различающихся режима воздействия объемного разряда наносекундной длительности на плоскую ударную волну $M = 2-3$ в канале. При положении ударной волны в момент разряда вне его зоны механизм последующего воздействия преимущественно тепловой. При положении волны в разрядном промежутке в момент разряда механизм воздействия разряда на ударную волну и поток за ней преимущественно ударно-волновой; происходит необратимая перестройка течения в канале с образованием трех новых разрывов.

Возможность использования плазменных технологий для управления параметрами высокоскоростных потоков является предметом многих исследований [1–3]. Основной механизм воздействия импульсного сильноточного электрического разряда на высокоскоростные потоки газа — ударно-волновой [3–5]. При быстром (за время менее $1 \mu\text{s}$) локальном вводе значительной доли энергии разряда в поток возникают ударно-волновые конфигурации, определяющие дальнейшую эволюцию течения газа [4–6], в том числе и сверхзвукового. Возникающее разрывное газодинамическое течение хорошо описывается уравнениями газодинамики в модели импульсного энергоклада [4,5]. В частности, при воздействии наносекундного объемного разряда на поток газа с плоской ударной волной в канале экспериментально может быть реализована задача распада плоского разрыва на границе газ–плазма на фронте ударной волны [5]. При этом возникает и эволюционирует соответствующая разрывная конфигурация.

Целью данной работы было исследование структуры квазидвумерного течения, возникающего в канале после взаимодействия плоской ударной волны с плазмой поперечного импульсного объемного (комбинированного) разряда. Эксперимент проводился на ударной трубе

с разрядной камерой, сечение $24 \times 48 \text{ mm}^2$ [4,5]. Тип разряда — импульсный объемный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных электродов, расположенных на верхней и нижней стенках камеры. Двумя противоположными стенками разрядной камеры длиной 17 см служили плоскопараллельные кварцевые стекла. Рабочий газ — воздух с давлением около 6666 Па. Объемный разряд инициировался после подачи импульсного напряжения 24–30 кВ. Время тока комбинированного разряда до 200 ns. Энергия 0.5–1.0 J вкладывалась в область разряда — сначала в плазменные электроды, затем в объем $30 \times 100 \times 24 \text{ mm}^3$. Плазменные листы обеспечивают предыонизацию межэлектродного участка канала. От плазменных листов поперек канала инициировались ударные волны, через $\sim 30\text{--}50 \mu\text{s}$ они ослабевали до звуковых. Разрывное газодинамическое течение, возникающее при взаимодействии плоской ударной волны с числами Маха $M = 2\text{--}3$, движущейся в канале, с областью импульсного разряда, регистрировалось теневым методом в различные моменты времени вплоть до $300 \mu\text{s}$ после разряда. Источником света был Nd : YAG-лазер с временем экспозиции 6 ns.

Первый режим взаимодействия ударной волны с разрядом реализовывался при вхождении плоской ударной волны в область объемного разряда спустя некоторое время $t_0 > 0$ после его инициирования. В момент $t = 0$ поджигались поверхностные разряды на верхней и нижней стенках ударной трубы; от них начинали распространяться поперек канала навстречу друг другу ударные волны. С задержкой 20–50 ns инициировался объемный разряд. В это время плоская ударная волна находилась на расстоянии менее 10 см от разрядной камеры. Плоская ударная волна входила в область разряда через время задержки t_0 от 0 до $250 \mu\text{s}$. Задержка обеспечивалась синхронизацией импульса с датчика давления с импульсом на разряд.

Исходная плоская ударная волна S_0 после вхождения в область разряда со временем задержки $t_0 = 0\text{--}40 \mu\text{s}$ взаимодействовала с поперечными ударными волнами, неоднородной неравновесной средой в объеме камеры и значительным градиентом термодинамических параметров вблизи плазменных электродов (рис. 1, а). В зонах вблизи электродов, где было существенно влияние поверхностного разряда, плоская ударная волна выдвигалась вперед (эффект теплового слоя [7]). В результате неоднородности температуры и плотности, особенно в зоне поверхностного энерговклада, за фронтом ударной волны развивалось турбулентное течение.

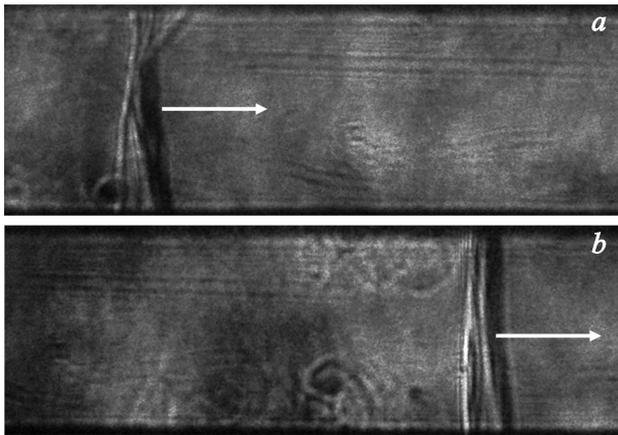


Рис. 1. Первый режим. Начальные условия: $x_0 = -1$ см, $t_0 = 14 \mu\text{s}$, $t = 120 \mu\text{s}$ (а), и $x_0 = -3.4$ см, $t_0 = 45 \mu\text{s}$, $t = 196 \mu\text{s}$ (б).

При временах задержки t_0 от 40 до $250 \mu\text{s}$ в момент разряда плоская ударная волна была дальше от разрядной камеры; к моменту ее входа поперечные ударные волны ослабевали, но нагретая зона плазменных листов существенно влияла на форму ударной волны вблизи поверхностей. Распадающаяся плазма объемного разряда весьма слабо влияла на ее структуру и динамику (рис. 1, б).

На рис. 2 показан график движения ударной волны (вдоль оси симметрии течения) при $x_0 \sim -1.5$ см, полученный из теневых изображений. Исходная ударная волна S_0 с числом Маха $M = 2.3$ сразу после вхождения в послеразрядную область ($15 < t < 80 \mu\text{s}$) ускорялась; по мере остывания разрядного объема и после выхода из нее скорость ударной волны восстанавливалась. Это означает, что время $t \sim 100 \mu\text{s}$ после разряда произошла релаксация основных теплофизических параметров в области объемного разряда. При этом параметры области объемного разряда, судя по динамике ударной волны, восстанавливались на $100\text{--}150 \mu\text{s}$ быстрее, чем температура плазменных электродов [7], где удельный энерговклад существенно выше. Через время $t > 200\text{--}250 \mu\text{s}$ форма и скорость плоской ударной волны почти восстанавливалась, однако турбулентное течение за волной вблизи стенок сохранялось значительно дольше.

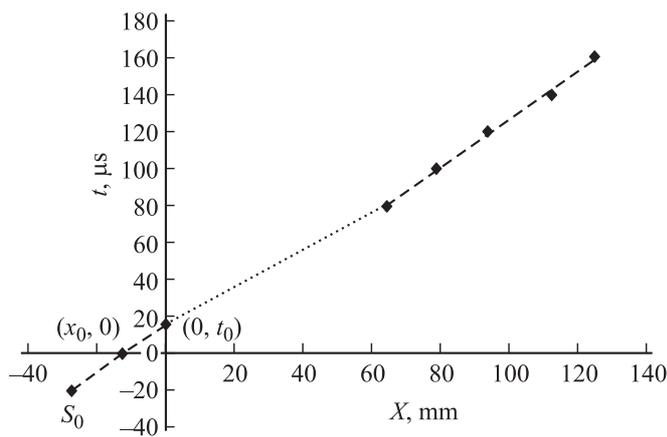


Рис. 2. Первый режим. Движение ударной волны при $x_0 \sim -1.5$ см $t_0 \sim 15$ μ с.

Во втором режиме воздействие разряда на течение с ударной волной определялось преимущественно возникающей при разряде ударно-волновой конфигурацией. Разряд инициировался в момент прохождения плоской ударной волны по области разряда: положение исходной ударной волны в момент разряда $0.5 \text{ см} < x_0 < 10 \text{ см}$. Плазма разряда существовала только перед фронтом волны — в области низкого давления (эффект самолокализации импульсного разряда в потоке с разрывом [4,5]). Время существования плоской поверхности разрыва, разделяющей две области среды с различным давлением, скоростью, степенью ионизации, не превышало времени тока разряда 200 ns , что существенно меньше характерных газодинамических времен. После воздействия разряда на область, ограниченную плоским фронтом исходной ударной волны, зарегистрировано возникновение системы трех вертикальных разрывов, соответствующей одномерному течению после распада разрыва на фронте S_0 . Дальнейшая эволюция течения определялась движением этих новых разрывов и их взаимодействием с поперечными ударными волнами, распространяющимися от плазменных листов.

На рис. 3 показано развитие нестационарного ударно-волнового течения, близкого к двумерному, возникшего после распада разрыва в результате импульсного локализованного энерговклада. Видно, что после разряда исходная ударная волна S_0 распалась на три разрыва:

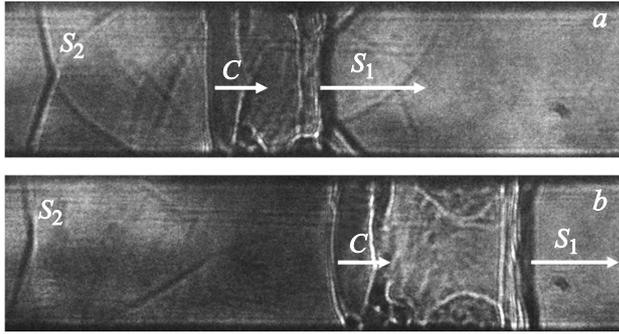


Рис. 3. Второй режим. Начальные условия: $x_0 \sim 6.3$ см, $t = 32 \mu\text{s}$ (a), $x_0 = 6.4$ см, $t = 58 \mu\text{s}$ (b).

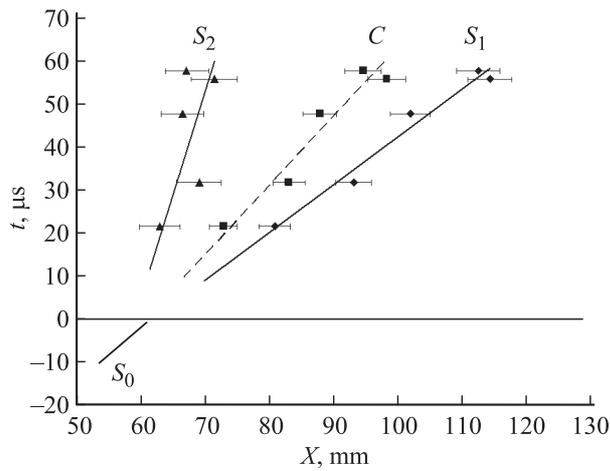


Рис. 4. Второй режим. Динамика разрывов после распада начального разрыва $x_0 \sim 6$ см.

ударные волны S_1 , S_2 и контактная поверхность C . S_1 и C движутся вперед с разными скоростями, ограничивая область неравновесного потока релаксирующей плазмы комбинированного разряда. Видно, что контактный разрыв теряет устойчивость, искривляется, расплывается, течение вблизи него существенно турбулентно. Ударная волна S_2 движется навстречу набегающему спутному потоку, ее положение относительно разрядной камеры мало менялось. Форма S_2 искривлена

в результате взаимодействия с поперечными волнами от плазменных электродов. Течение газа за ней не турбулизировано. Возмущений на свободной границе области объемного разряда (на расстоянии ~ 4 см от места распада разрыва) не зарегистрировано. На рис. 4 показан график движения разрывов, возникших на фронте S_0 ($v \sim 780$ м/с) в результате распада разрыва после импульсной ионизации области газа перед ней при $x_0 \sim 6$ см.

Таким образом, выявлены и экспериментально исследованы два качественно различающихся режима воздействия импульсного объемного разряда на сверхзвуковое течение с плоской ударной волной в канале. Показано, что в первом режиме при начальном взаимном расположении разряда и волны $-12 \text{ см} < x_0 < 0.5 \text{ см}$ время воздействия импульсного разряда на поток составляет $100-250 \mu\text{s}$, механизм воздействия преимущественно тепловой, выражается в искривлении формы ударной волны и турбулизации потока за ней. Во втором режиме, при положении исходной ударной волны в момент разряда $0.5 \text{ см} < x_0 < 10 \text{ см}$, механизм воздействия разряда на поток преимущественно ударно-волновой, происходит необратимая перестройка течения в канале: возникновение трех новых разрывов. Расширяющаяся турбулизированная область неравновесной релаксирующей плазмы ограничена неустойчивым контактным разрывом и ударной волной.

Работа выполнена при частичной поддержке грант РФФИ № 11-07-93959 ЮАР-а.

Список литературы

- [1] Chernyi G.G. // Proc. AIAA 2nd Weakly Ionized Gases Workshop. Norfolk (Virginia, USA), 1998. P. 1.
- [2] Benard N., Zouzou N., Claverie A., Sotton J. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 033303.
- [3] Аульченко С.М., Замураев В.П., Знаменская И.А., Калинина А.П., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. // ЖТФ. 2009. Т. 79. В. 3. С. 17–27.
- [4] Знаменская И.А., Иванов И.Э., Орлов Д.М., Сысоев Н.Н. // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 2. С. 174–177.
- [5] Znamenskaya I.A., Koroteev D.A., Lutsky A.E. // Phys. Fluids. 2008. V. 20. N 5. P. 056 101.
- [6] Знаменская И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 5. С. 10–18.
- [7] Знаменская И.А., Иванов И.Э., Коротеева Е.Ю., Орлов Д.М. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439. № 5. С. 609–612.