

03;04

## Локализация импульсного энерговклада при инициировании поперечного поверхностного разряда в потоке с ударной волной

© И.А. Знаменская, И.В. Мурсенкова, Д.М. Орлов, Н.Н. Сысоев

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
E-mail: znamen@phys.msu.ru

Поступило в Редакцию 20 декабря 2006 г.

Проведены исследования локализации поперечного поверхностного разряда наносекундной длительности при инициировании скользящего по диэлектрику разряда (плазменный лист) в потоке с плоской ударной волной в канале. Выявлены особенности распределения свечения ионизированной разрядом поверхности канала в присутствии ударной волны. Как правило, вся энергия разряда, как можно судить по свечению, локализуется в области низкого давления перед ударной волной. Инициирование разряда при различных положениях ударной волны позволяло увеличивать плотность энерговклада перед ударной волной (вплоть до 12–15 eV на частицу). При определенных значениях параметра Таунсенда  $E/P$  и числа Маха  $M$  происходил переход от свечения разряда исключительно перед фронтом волны к свечению за фронтом или перед фронтом в объеме.

PACS: 47.40.Nm, 52.90.+z

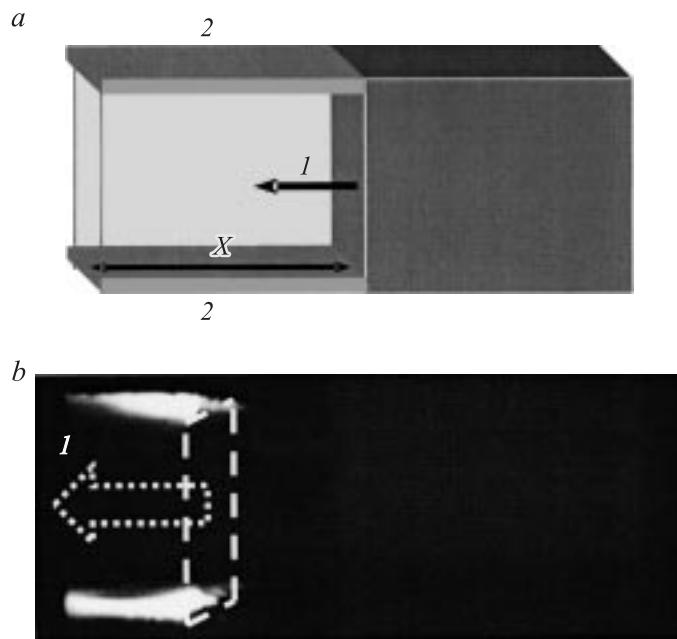
Исследованиям влияния разрядов на газодинамическую структуру потока уделяется в последнее время особое внимание в связи с возросшим интересом к проблеме управления течением [1,2]. Необходимость воздействия на характеристики обтекания различных элементов конструкций ведет к поиску различных источников энергетического воздействия. Среди них наиболее перспективными являются электрические разряды разных типов. Использование коронного и барьерного разрядов на поверхности и вблизи модели позволяло значительно влиять на параметры обтекания, но лишь в определенном диапазоне скоростей потока: эффекты переставали проявляться при больших скоростях [2].

Задачей является создание источника эффективного энергетического воздействия на высокоскоростное течение газа.

В данной работе для создания неравновесной области в потоке с ударной волной в канале реализован поперечный поверхностный разряд наносекундной длительности — квазинепрерывная система параллельных каналов, скользящих по диэлектрику (плазменный лист). Такой разряд обеспечивает мгновенное однородное возбуждение среды — пре-дьюнизацию [3] и с газодинамической точки зрения может представлять интерес за счет достаточно большой мощности [4].

Эксперименты проводились на ударной трубе, где в камеру низкого давления встроена газоразрядная камера [3,5]. Труба имеет сечение  $24 \times 48$  mm и позволяет проводить эксперименты с числами Маха  $1.5 < M < 5.6$ . На участке длиной 17 см две противоположные стенки секции заменены плоскопараллельными кварцевыми стеклами. Плазменные листы размером  $30 \times 100$  mm инициируются на двух других противоположных стенках рабочей секции на расстоянии 24 mm друг от друга. Разряды через систему синхронизации можно одновременно инициировать в различные моменты времени прохождения ударной волной разрядного промежутка, а следовательно, и при различном положении волны в этом промежутке (рис. 1, а). Время протекания тока разряда — до 150 ns. За это время ударная волна с числом Маха  $M = 3$  продвинется вдоль плазменных листов менее чем на 0.2 mm.

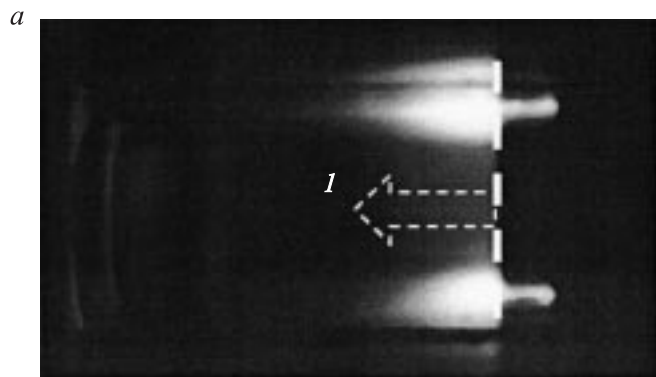
В работе ставилась задача исследования перераспределения плазмы поверхностных импульсных разрядов при их инициировании в канале с движущейся ударной волной. В силу конструкции ударной установки течение с плоской ударной волной, сформировавшееся в рабочей камере, можно считать квазидвумерным. Проводились эксперименты по регистрации интегрального по времени свечения поверхностного разряда при прохождении ударной волной разрядного промежутка (а также сразу после ее выхода из него). Получены изображения свечения плазменных листов в канале с движущейся ударной волной при различных значениях начального давления в камере низкого давления и расстояния до конца разрядного промежутка  $X$ . Наибольший интерес представляли собой эксперименты по регистрации свечения для различных значений  $X$ . Это достигалось изменением задержки между сигналом, поступающим от пьезодатчика давления при прохождении ударной волны, и моментом инициирования разряда. Свечение разряда регистрировалось при помощи фотоаппаратов.



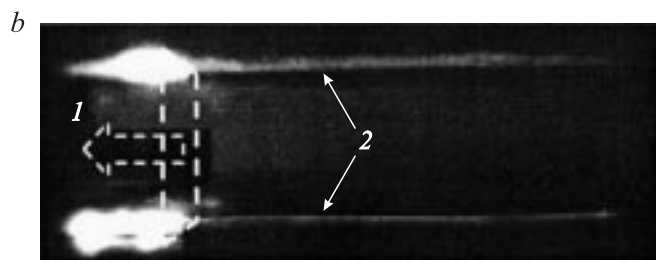
$M = 3.7; X = 2.8 \text{ cm}; P_0 = 14 \text{ Torr}$

**Рис. 1.** Распространение ударной волны в канале: 1 — ударная волна, 2 — плазменный лист.

На снимках, сделанных при различных задержках, положениях фронта волны, отчетливо прослеживается эволюция свечения при прохождении ударной волны по разрядному промежутку. На типичных картинах свечения разряда в присутствии ударной волны отчетливо видно, что основное свечение перераспределяется на поверхность перед фронтом ударной волны, а листы за ударной волной не светятся. Таким образом, вся энергия плазменных листов, судя по свечению, локализуется в области низкого давления (рис. 1, *b*). Ударная волна, по сути, является границей области поверхностной ионизации. Интенсивность свечения перед волной растет с уменьшением расстояния между фронтом и концом разрядного промежутка, что соответствует увеличению плотности энергии в излучающей области. Инициирование разряда при различных положениях ударной волны позволяло получать различные



$M = 5.5; X = 5.6 \text{ cm}; P_0 = 3.3 \text{ Torr}$

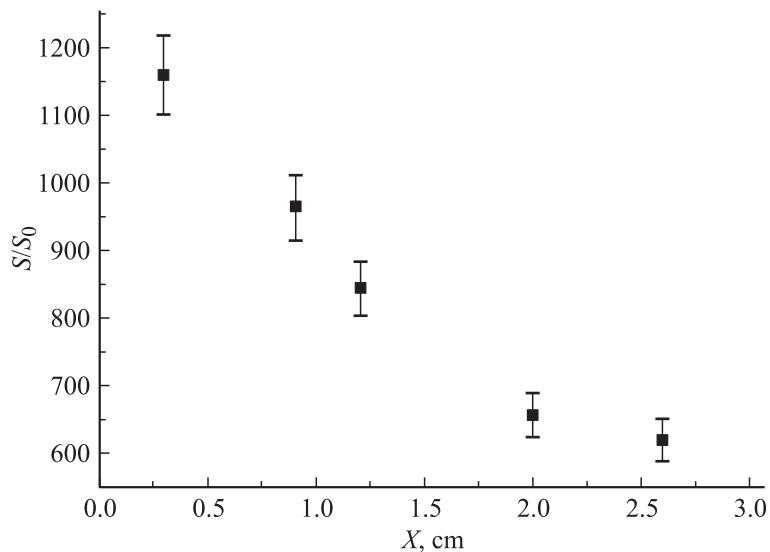


$M = 3.1; X = 0.3 \text{ cm}; P_0 = 25 \text{ Torr}$

**Рис. 2.** Эффекты свечения: *a* — эффект объемного свечения, *b* — эффект свечения за фронтом УВ; 1 — ударная волна (УВ), 2 — свечение за фронтом УВ.

плотности энерговклада перед ударной волной — при постоянном значении полной энергии разряда плотность энерговклада возрастала по мере уменьшения разрядной области перед ударной волной.

При определенных параметрах эксперимента возникали особенности развития и свечения разряда: свечение поверхностного разряда частично перераспределялось — в область поверхностного разряда за ударной волной или в пространственное свечение перед поверхностью ударной волны между плазменными листами (рис. 2). Эти эффекты обуславливались различными комбинациями параметров: начального давления перед волной  $P_0$ , числа Маха  $M$  и расстояния между волной и концом разрядного промежутка  $X$  в начальный момент времени.



**Рис. 3.** Зависимость интегральной интенсивности свечения от расстояния до конца разрядного промежутка.

Объемное свечение между двумя плазменными листами (рис. 2, *a*) регистрировалось при больших числах Маха (порядка  $M = 4-5.6$ ) и низком начальном давлении ( $P_0 = 4-7$  Torr), при этом расстояния до конца разрядного промежутка были довольно велики (вплоть до середины плазменного листа). Очевидно, что при этом не вся энергия возбуждения внутренних степеней свободы высвобождается в пристеночной области. Свечение за фронтом ударной волны (рис. 2, *b*) появлялось при небольших числах Маха ( $\sim 2-3$ ) и достаточно низких начальных давлениях (25 Torr), но при расстояниях до конца разрядного промежутка менее 30% от его общей протяженности. В этом случае также не вся энергия разряда переходит в пристеночную область перед ударной волной.

Исследована зависимость интенсивности свечения покоящегося воздуха по оси симметрии в канале перед ударной волной (рис. 2, *a*) от параметра  $X$ . При больших числах Маха у объемной стадии отчетливо прослеживается рост интенсивности излучения при уменьшении расстояния до конца разрядного промежутка (рис. 3).

Таким образом, при определенных критических параметрах разряд локализуется не только вблизи поверхности перед ударной волной. Можно говорить о предельных величинах энерговклада на единицу поверхности, которые достигаются в эксперименте по локализации поверхностного разряда в газе с разрывом. Предельные значения плотности энергии определяются комбинацией параметров  $P_0$ ,  $M$  и  $X$ .

Оценки предельно достигаемой плотности энергии на единицу поверхности и объема дали 2 и  $0.2 \text{ J/cm}^2$  соответственно. Оценки расчета энергии на частицу дают 12–15 eV на молекулу. Эффективность энергетического воздействия разряда на поток при этом определяется соотношением электрической энергии, введенной в приповерхностный слой, и энтальпии потока.

Данная работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-08-50247-а, 06-08-01301-а и программы № 9 Президиума РАН.

## Список литературы

- [1] *Opaits D.F., Roupasov D.V., Starikovskaia S.M., Starikovskii A.Yu.* et al. // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 2005. Reno, Nevada, USA, 2005, paper AIAA 2005-1180.
- [2] *Göksel B.* et al. // 3rd AIAA Flow Control Conference. 5–8 June 2006, San Francisco, California, AIAA 2006-3686.
- [3] *Знаменская И.А., Коротеев Д.А., Попов Н.А.* // ТВТ. Т. 43. № 6. С. 820–827.
- [4] *Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рухадзе А.А.* // ТВТ. Т. 40. № 3. С. 515.
- [5] *Знаменская И.А., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 24. С. 38.