

03

## Наносекундная ионизация области обтекания прямоугольного уступа высокоскоростным потоком

© И.А. Знаменская, Д.И. Татаренкова, Т.А. Кули-заде

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: znamen@phys.msu.ru

Поступило в Редакцию 9 сентября 2019 г.

В окончательной редакции 9 сентября 2019 г.

Принято к публикации 18 сентября 2019 г.

Описано явление перераспределения плазмы и тока импульсного объемного разряда на основе самолокализации при инициировании в нестационарном течении в ударной трубе сечением  $48 \times 24$  мм. Показано, что на участке газодинамического канала с уступом в форме параллелепипеда в потоке за фронтом ударной волны с числами Маха 2.8–3.5 в течение  $2800 \mu\text{s}$  реализуются короткоживущие плазменные каналы в зонах отрыва около уступа.

**Ключевые слова:** ударная волна, плазма импульсного разряда, область отрыва потока, электрический ток.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.01.48854.18027

Электрические разряды являются достаточно эффективным средством для активного управления газодинамическими потоками различных конфигураций, включая сверхзвуковые течения [1,2]. Импульсный разряд с наносекундным фронтом нарастания тока сопровождается быстрым ростом (за время менее  $1 \mu\text{s}$ ) температуры и давления в зоне разряда, что обусловлено высоким значением вложенной в газ энергии в ограниченной области. Плазменная зона генерирует ударную (взрывную) волну на своей границе [3]. Ее конфигурация и интенсивность зависят от локализации разряда, структуры газового потока и распределения плотности в зоне локализации разряда. Поверхностные разряды могут быть использованы для управления пограничным слоем [4,5], включая зоны отрыва пограничного слоя на обтекаемой поверхности. Особое внимание уделяется управлению отрывом при обтекании уступов [6,7]. Импульсный объемный разряд может существенно изменить высокоскоростное течение в газодинамическом канале [8,9]. При этом эффект самолокализации импульсного разряда в неоднородном потоке позволяет прогнозировать и контролировать импульсное и импульсно-периодическое воздействие на поток.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование перераспределения плазмы импульсного объемного разряда в спутном потоке за движущейся в канале ударной трубы ударной волной в поле течения, формирующемся после дифракции волны на прямоугольном уступе (прямая и обратная ступеньки). В литературе имеется большое количество данных о дифракции ударной волны на прямых и обратных уступах и их обтекании [10,11]. Визуализация течений осуществлялась преимущественно теневыми, интерферометрическими методами [12]. Метод визуализации импульсным объемным разрядом позволяет зарегистрировать зоны пониженной плотности на основе интегральной

регистрации свечения разряда в потоке [13]. При этом зоны повышенного свечения являются источниками возмущений и ударных волн, влияющих на поток после окончания тока разряда.

Цель работы — определение зон локализации энергии сильноточного объемного разряда при различных условиях отрывного обтекания препятствия. Эксперименты проводились на стенде УТРО-3, представляющем собой диафрагменную ударную трубу со специальной разрядной камерой [3,8,9]. Импульсный объемный разряд с предьонизацией от плазменных листов (электродов) инициировался в канале прямоугольного сечения размером  $24 \times 48$  мм в различные моменты движения плоской ударной волны и потока за ней. Исходная плоская ударная волна проходила через препятствие в виде параллелепипеда, размещенного на нижней стенке камеры ударной трубы (рис. 1). Ионизация потока импульсным объемным разрядом с предьонизацией ультрафиолетовым излучением от плазменных листов (электродов) [3] происходила на участке газодинамического канала длиной 10 см; прямоугольный уступ (параллелепипед размером  $48 \times 6.2 \times 1.9$  мм) был закреплен на расстоянии 1.5 см от передней кромки плазменного электрода (ниже по потоку). Длительность тока разряда, измеренная по осциллограммам, полученным с низкоиндуктивного

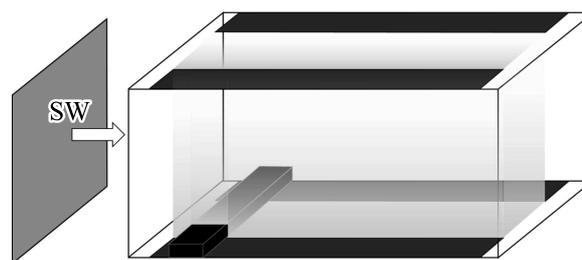
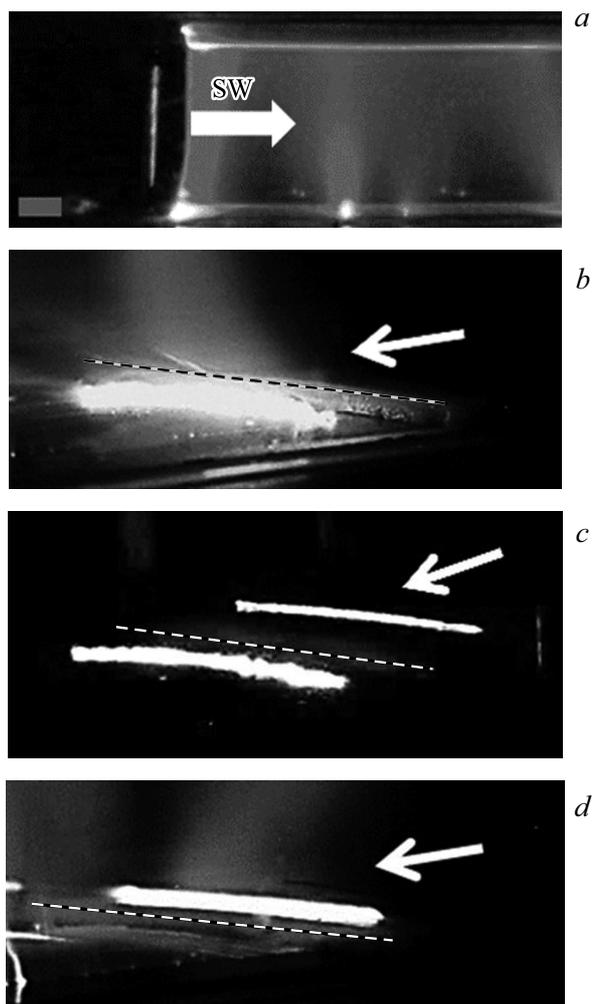


Рис. 1. Схема разрядной секции с ударной волной.



**Рис. 2.** *a* — разряд при движении ударной волны после дифракции (поток слева направо); *b–d* — эффект самолокализации плазмы до  $600\ \mu\text{s}$ , при  $600\text{--}1200\ \mu\text{s}$ , после  $1200\ \mu\text{s}$  соответственно (поток справа налево).

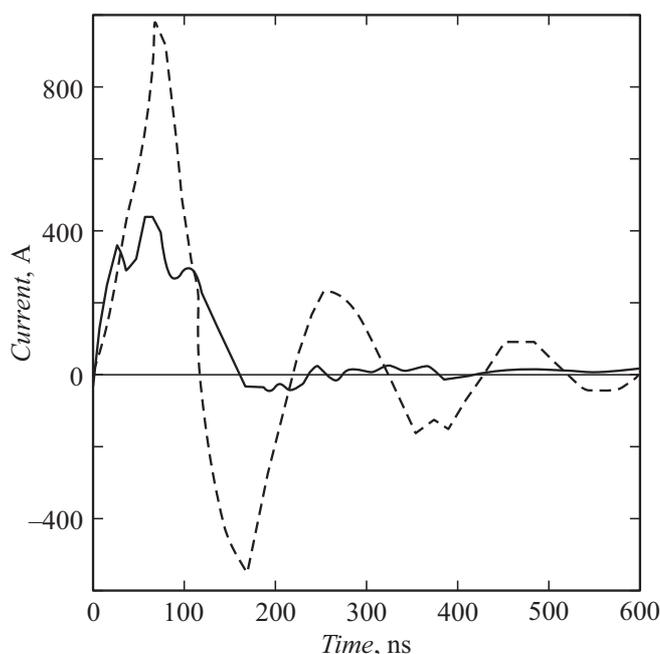
шунта, составляла  $150\text{--}300\ \text{ns}$ , а длительность свечения разряда — до  $1\text{--}2\ \mu\text{s}$  [3]. Исследовалась ионизация потока воздуха с плоской ударной волной с числом Маха  $M = 2.8\text{--}3.5$  и потока за ней с числом Маха  $1.3\text{--}1.5$ . Визуализация потока осуществлялась через боковые стенки рабочей камеры, которые представляли собой кварцевые окна длиной  $17\ \text{cm}$ . Интегральные изображения свечения разряда в поле течения регистрировались с двух сторон испытательной (разрядной) камеры. Зарегистрированы и исследованы мгновенные изображения свечения плазмы, возникающие при инициировании объемного разряда в потоке в моменты времени от  $t = 0$  (касание уступа) до  $t = 2800\ \mu\text{s}$ .

При дифракции ударной волны на препятствии последовательно происходят отражение разрыва от прямого уступа с установлением обтекания с головной волной [11], огибание обратного уступа, установление обтекания с ударной волной перед уступом, скачками уплот-

нения, зонами отрыва (пониженной плотности [10]). Свечение разряда, в частности, визуализирует зоны локализации энергии в областях мгновенного разрежения. Интенсивность свечения коррелирует с распределением плотности в потоке за счет того, что локальный коэффициент ионизации является нелинейной функцией  $E/N$  (здесь  $E$  — мгновенное электрическое поле,  $N$  — концентрация молекул).

Было зарегистрировано явление линейной самолокализации плазмы импульсного объемного разряда вдоль направляющей прямоугольного уступа в потоке за ударной волной и зафиксирован эффект перемещения канала самолокализации плазмы по мере эволюции параметров обтекания препятствия спутным потоком. На рис. 2, *a* представлено изображение свечения плазмы при движении ударной волны (обозначена стрелкой) после прохождения препятствия при ионизации канала импульсным объемным разрядом с предыонизацией от плазменных листов. Свечение разряда зафиксировано в областях низкой плотности: перед фронтом ударной волны и в зоне отрыва за препятствием на нижней стенке канала.

Зафиксировано три основных режима линейной локализации разряда на участке потока вблизи препятствия (рис. 2, *b–d*, на снимках штриховой линией отмечена верхняя грань уступа с подветренной стороны; стрелками указано направление потока вдоль центра канала). Обнаружено, что через несколько микросекунд после прохода ударной волны через препятствие происходит локализация поперечного плазменного канала



**Рис. 3.** Осциллограммы тока в различные моменты времени: движение ударной волны по зоне разряда (штриховая кривая) и в потоке за ударной волной через  $90\ \mu\text{s}$  после ухода ударной волны от препятствия (сплошная кривая).

вдоль уступа с подветренной стороны — в зону вихря, возникающего в результате дифракции ударной волны на обратном уступе (рис. 2, *b*, первый режим). Этот канал, визуализируемый на некотором удалении от препятствия, представляет собой короткоживущее плазменное образование, локализованное в зоне отрыва за уступом при сверхзвуковом обтекании препятствия (в данном режиме перед уступом устанавливается головная ударная волна). При снижении скорости потока до трансзвуковых значений на временном интервале  $t = 700\text{--}1200\ \mu\text{s}$  реализуется второй режим с двумя линейными каналами пробоя разряда одновременно и в подветренной, и в наветренной областях у препятствия (рис. 2, *c*). Головная ударная волна перед уступом ослабевает и пропадает. Канал в подветренной области отстоит от препятствия, как и в первом режиме, но интенсивность свечения становится значительно меньше. При дальнейшем снижении скорости потока в канале ударной трубы (после  $1200\text{--}1300\ \mu\text{s}$ ) головная ударная волна перед уступом пропадает окончательно, зона минимальной плотности перераспределяется в дозвуковую отрывную область перед препятствием. Реализуется третий режим локализации энергии разряда — в канал на кромке уступа с наветренной стороны (рис. 2, *d*). Позже — при турбулизации течения в канале и иницировании пробоев вдоль пограничного слоя на стекле (после  $2.8\ \text{ms}$ ) — эффект пропадает.

Показано, что разным стадиям развития потока (и режимам локализации разряда) отвечают различные осциллограммы тока. На рис. 3 представлены осциллограммы тока, которые соответствуют ионизации потока при прохождении ударной волны по разрядной зоне (рис. 3, штриховая кривая) и после ее ухода из разрядного промежутка (стационарное сверхзвуковое обтекание с локализацией с подветренной стороны препятствия) (рис. 3, сплошная кривая).

Таким образом, плазма импульсного объемного разряда с предьонизацией при иницировании на участке газодинамического канала с уступом самолокализуется в виде короткоживущих сильноточных плазменных каналов в трех конфигурациях в зонах отрыва около уступа. Перераспределение разряда происходит по мере эволюции течения в канале (снижение скорости и турбулизация потока).

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00672).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Bayoda K.D., Benard N., Moreau E. // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 118. P. 063301. DOI: 10.1063/1.4927844
- [2] Ланушкина Т.А., Ерофеев А.В. // *Письма в ЖТФ.* 2017. Т. 43. В. 5. С. 17–23. DOI: 10.21883/PJTF.2017.05.44357.16509
- [3] Дорощенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. // *ЖТФ.* 2018. Т. 88. В. 5. С. 684–691. DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45895.2435
- [4] Ukai T., Russell A., Zare-Behtash H., Kontis K. // *Phys. Fluids.* 2018. V. 30. P. 116106. DOI: 10.1063/1.5054263
- [5] Zheng J.G., Cui Y.D., Li J., Khoo B.C. // *Phys. Fluids.* 2018. V. 30. P. 040907. DOI: 10.1063/1.5012054
- [6] Ruisi R., Zare-Behtash H., Kontis K., Erfani R. // *Acta Astronaut.* 2016. V. 126. P. 354–363. DOI: 10.1016/j.actaastro.2016.05.016
- [7] Leonov S.B., Adamovich I.V., Soloviev V.R. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. V. 25. P. 063001.
- [8] Знаменская И.А., Иванов И.Э., Крюков И.А., Кулизаде Т.А. // *ЖЭТФ.* 2002. Т. 122. В. 6. С. 1198–1206.
- [9] Знаменская И.А., Сысоев Н.Н., Jin J. // *Письма в ЖТФ.* 2013. Т. 39. В. 9. С. 28–33.
- [10] Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. *Нестационарные взаимодействия ударных волн.* М.: Наука, 1977. 274 с.
- [11] Краснов Н.Ф., Кошевой В.Н., Калугин В.Т. *Аэродинамика отрывных течений.* М.: Высш. шк., 1988. 351 с.
- [12] Skews B.W. // *J. Fluid Mech.* 1967. V. 29. P. 705–719. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112067001132>
- [13] Znamenskaya I.A., Kuli-zade T.A., Kulikov V.N., Perminov S.P. // *J. Flow Visual. Image Proc.* 2011. V. 18. P. 214–224. DOI: 10.1615/JFlowVisImageProc.2011002204