

03

## **Особенности релаксации ударно-волновой конфигурации в диффузоре после прекращения воздействия магнитного и электрического полей**

© С.В. Бобашев, Р.В. Васильева, А.В. Ерофеев, Т.А. Лапушкина,  
С.А. Поняев, Д.М. Ван Ви

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия  
E-mail: alex.erofeev@mail.ioffe.ru  
Университет Джона Гопкинса, Лаурел, Мэриленд, США

Поступило в Редакцию 8 августа 2005 г.

Экспериментально исследуется импульсное взаимодействие с магнитным и электрическим полями потока ионизованного газа в диффузоре с полным внутренним сжатием. Импульс взаимодействия задается формой импульса электрического тока между электродами, расположенными во входной части диффузора. Установлено, что при выключении электрического тока ряд характерных особенностей ударно-волновой конфигурации потока релаксирует к невозмущенным значениям с заметным запаздыванием во времени.

PACS: 47.40.-x

Данная работа является продолжением экспериментального цикла работ по изучению влияния воздействий внешних магнитного и электрического полей на положение скачков в сверхзвуковом диффузоре [1–3]. Эти исследования были инициированы проблемой управления структурой потока в гиперзвуковых диффузорах с помощью магнитогазодинамического (МГД) метода. В эксперименте влияние МГД взаимодействия на разрывные течения моделируется с помощью использования плазмы инертных газов в качестве рабочего вещества.

Данная работа направлена на исследование процессов нестационарной газодинамики, а именно: изменения ударно-волновой конфигурации после прекращения внешних воздействий. Внешние воздействия в основном заключаются в торможении потока газа под действием

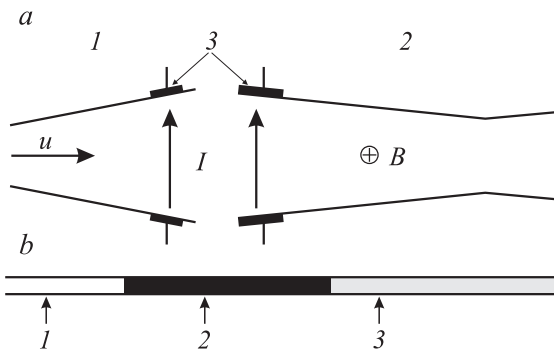
лоренцевой силы и джоулева нагрева газа во внешнем электрическом поле. Длительность этих воздействий определяется временем прохождения электрического тока через объем плазмы. При этом ток замыкается через электроды, расположенные на противоположных стенках диффузора. Суть эксперимента заключается в том, чтобы по последовательности шпирен-грамм течения проследить особенности релаксации возникшей ударно-волновой конфигурации к начальному положению скачков после выключения тока.

Основу экспериментальной установки составляют ударная труба и соединенная с ней вакуумная камера, где находятся ускоряющее сопло и диффузор с полным внутренним сжатием потока. С описанием установки можно познакомиться в [1–3]. Поперечное магнитное поле индукцией до 1.5 Т и длительностью квазистационарной стадии около 600  $\mu\text{s}$  создавалось разрядом батареи конденсаторов через катушки Гельмгольца. Импульс электрического тока формировался с помощью длинной линии. Визуализация потока осуществлялась с помощью шпирен-системы, в качестве источника света использовался источник Подмошенского, покадровая съемка производилась скоростной кинокамерой ВСК-5.

Особенностью данного эксперимента является большое приэлектродное падение потенциала, сравнимое с магнитоиндуцированной ЭДС [2]. Для его компенсации необходимо прикладывать к электродам напряжение от внешнего источника; в качестве такого источника используется длинная линия. Таким образом, в роли ключа, открывающего ток в нашем эксперименте, служит запуск длинной линии при замыкании тока через плазменный промежуток; ток отключается, когда заканчивается импульс, генерируемый длинной линией.

Схема эксперимента показана на рис. 1. Ток проходит через электроды, расположенные в конце сопла и в начале диффузора, так что воздействию внешних полей подвергается только часть потока. Можно выделить три области потока, по-разному связанные с взаимодействием. На рис. 1, *b* светлым обозначается область потока, которая не подвергалась ранее внешним воздействиям; черным обозначается область потока, где происходит внешнее воздействие; серым обозначается та область потока, которая ранее подвергалась воздействию.

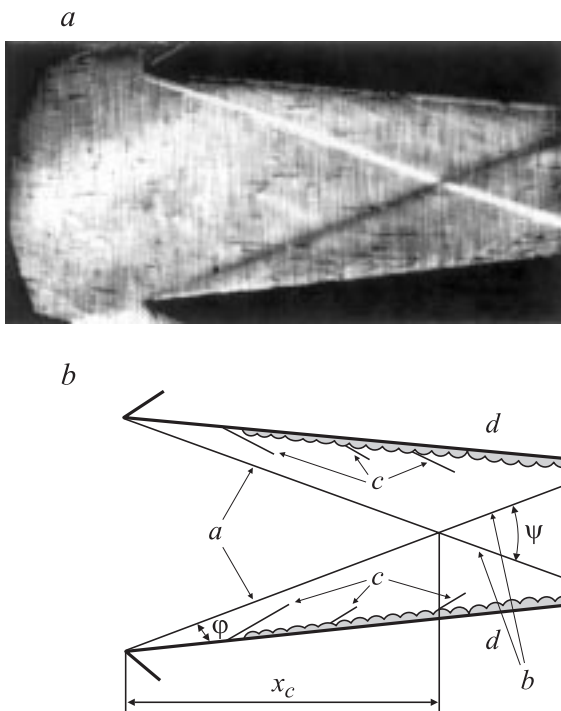
Эксперимент проводился в Хе при числе Маха фронта ударной волны в ударной трубе, равном 8, и начальном давлении в камере низкого давления 30  $\text{mm Hg}$ . Согласно теоретическим оценкам, на



**Рис. 1.** Схема эксперимента: *a* — расположение сопла (1), диффузора (2) и электродов (3),  $u$  — вектор скорости потока,  $B$  — магнитная индукция,  $I$  — электрический ток; *b* — обозначение трех областей потока, имеющих разное отношение к взаимодействию с внешними полями: светлая область (1) — нет взаимодействия; черная область (2) — область взаимодействия; серая область (3) — газ после взаимодействия.

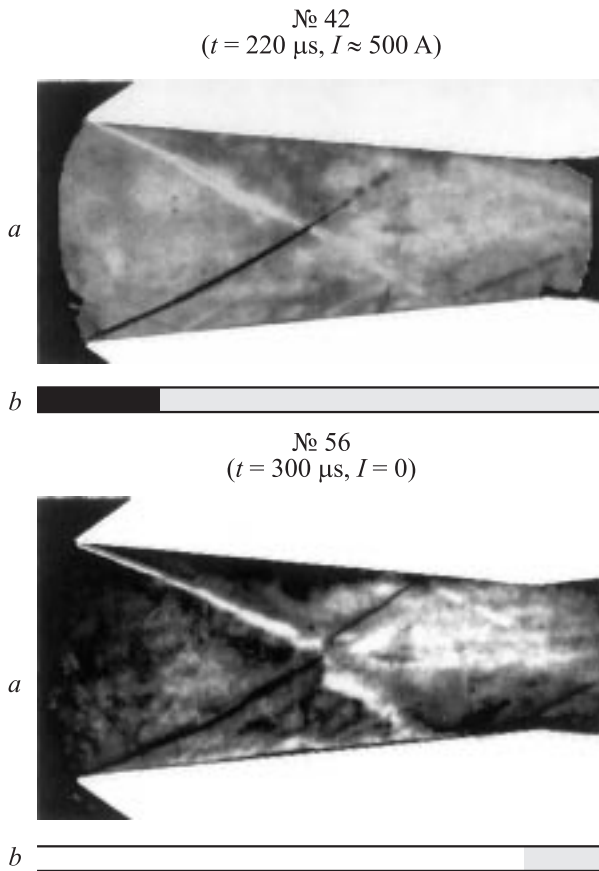
входе в диффузор основные параметры потока низкотемпературной плазмы имеют следующие значения: концентрация тяжелого компонента  $n_h = 0.58 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ , степень ионизации газа  $1.5 \cdot 10^{-3}$ , температура электронов  $T_e = 4300 \text{ К}$ , проводимость плазмы  $\sigma = 540 \text{ мхо/м}$ , параметр Холла для электронов при значении магнитной индукции  $B = 1 \text{ Т}$ ,  $\beta_{e|B=1} = 3.7$ , плотность газа  $\rho = 0.127 \text{ кг/м}^3$ , температура тяжелого компонента  $T_h = 1600 \text{ К}$ , скорость  $u = 1.5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ , число Маха потока  $M = 4.3$ . Длительность истечения составляла  $550 \mu\text{с}$ , магнитная индукция  $B = 1.3 \text{ Т}$ . Ток величиной  $550 \text{ А}$  включался сразу с приходом плазмы в зону взаимодействия, оставался постоянным в течение  $220 \mu\text{с}$ , затем начинался его спад до нуля в течение  $80 \mu\text{с}$ . При протекании тока происходит торможение сверхзвукового потока как вследствие МГД-взаимодействия, так и вследствие джоулева нагрева во внешнем электрическом поле. Это приводит к увеличению угла наклона присоединенных скачков и изменению всей ударно-волновой конфигурации.

Прежде всего мы рассмотрим ударно-волновую конфигурацию, которая возникает в диффузоре в отсутствие внешних воздействий ( $B = 0$ ,  $V = 0$ ). На рис. 2, *a* представлена шпирен-картина установив-



**Рис. 2.** *a* — шлирен-грамма установившегося течения в отсутствие внешних воздействий ( $B = 0, V = 0$ ); *b* — расшифровка газодинамических неоднородностей и обозначения основных параметров ударно-волновой конфигурации.

шегося течения, визуализирующая скачки уплотнения. Рис. 2, *b* дает расшифровку основных газодинамических неоднородностей и обозначает наиболее характерные параметры, которые показывают реакцию потока на внешнее воздействие. На этом рисунке можно выделить присоединенные скачки — „*a*“; скачки „*b*“, которые возникли в результате отражения присоединенных скачков друг от друга, линии Маха „*c*“, которые появляются на стыках электродов с изоляторами, и пограничный слой „*d*“.  $\varphi$  — угол наклона присоединенного скачка к стенке диффузора,  $x_c$  — расстояние, на котором пересекаются присоединенные скачки;  $\psi$  — угол между отраженными скачками.



**Рис. 3.** *a* — шлирен-граммы ударно-волновой конфигурации в различные моменты времени. *b* — обозначение областей течения с различной предысторией. Цифры — номера кадров,  $t$  — время от момента прихода фронта потока на вход в диффузор,  $I$  — величина тока.

Эти характерные параметры имеют следующие значения:  $\varphi = 15.5^\circ$ ,  $\psi = 42^\circ$ ,  $x_c = 42 \text{ mm}$  для невозмущенного потока.

Проследим эволюцию ударно-волновой конфигурации при отключении тока по серии шлирен-грамм, представленной на рис. 2. Время

№ 66  
( $t = 357 \mu\text{s}$ ,  $I = 0$ )

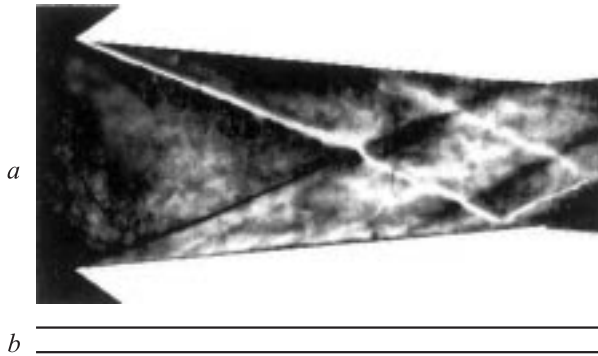
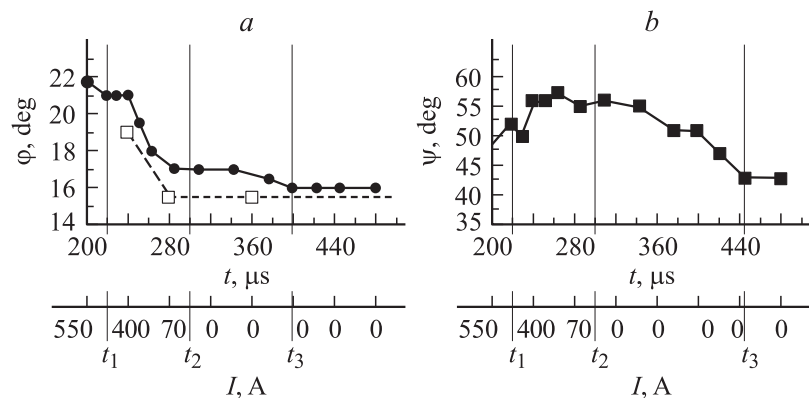


Рис. 3 (продолжение).

экспозиции кадров  $1.9 \mu\text{s}$ , время между кадрами  $5.7 \mu\text{s}$ . На рис. 3 кадр 42 показывает картину течения, которая установилась к началу спада токового импульса ( $t = 220 \mu\text{s}$ ). Видно, что по сравнению с ситуацией  $V = 0$ ,  $I = 0$  (рис. 2) произошли заметные изменения в положении и форме скачков „a“ и скачков „b“. На полосе, расположенной под шлирен-граммой, в соответствии с принятыми обозначениями (рис. 1, b) показана область потока, через которую в данный момент протекает электрический ток, и область потока, которая ранее прошла через зону протекания электрического тока. Кадр 56 показывает картину течения во время, когда ток уменьшился до нуля ( $t = 300 \mu\text{s}$ ). На нижней полосе история потока представлена упрощенно, в предположении, что тока прервался мгновенно; показано, насколько граница газа, подвергшегося ранее воздействию, переместилась вниз по потоку. Кадр 66 показывает, что произошло с ударно-волновой конфигурацией через  $57 \mu\text{s}$  после полного отключения воздействий. Как показано на нижней полосе, диффузор к этому времени оказался заполненным газом, который раньше не проходил через зону протекания тока и потому никакому внешнему воздействию не подвергался. Однако ударно-волновая конфигурация в этом газе, как видно из шлирен-граммы, сохраняет заметные следы внешних воздействий.

Для того чтобы характеризовать процесс релаксации ударно-волновой конфигурации к исходному состоянию после отключения тока,



**Рис. 4.** Временная зависимость угла наклона присоединенного скачка  $\varphi$  (a) и угла  $\psi$  между присоединенными скачками (b). Вторая абсцисса показывает значение тока во время его спада в соответствующие моменты времени  $t$ .

на рис. 4, a представлено изменение во времени значения угла наклона присоединенного скачка при отключении тока. Помимо временной шкалы здесь на второй шкале абсцисс приведены соответствующие значения токов. Кроме результатов измерения угла  $\varphi$  в процессе отключения тока (черные кружки) на рис. 4, a представлены значения углов  $\varphi$  при квазистационарных токах, когда ток оставался постоянным во все время истечения газа (светлые квадратики). На рис. 4, a отмечены три момента времени:  $t_1$  — время, когда оканчивается плато на осциллограмме тока и начинается его спад;  $t_2$  — время прекращения тока,  $t_3$  — время, после которого ударно-волновая конфигурация принимает начальное положение и далее практически не изменяется. Видно, что изменение  $\varphi$  несколько запаздывает за изменением тока. После прекращения тока в течение некоторого времени информация о взаимодействии с внешними полями сохраняется в значении угла  $\varphi$ .

На рис. 4, b представлено изменение угла между отраженными друг от друга присоединенными скачками —  $\psi$ . Анализ приведенной зависимости говорит о том, что, вероятно, за время  $t = 220 \mu\text{s}$  протекания квазистационарной стадии тока значение угла  $\psi$  не достигло своей максимальной величины и после спада тока продолжает возрастать и остается практически без изменений в течение всего времени

спада ( $t_2 - t_1$ ). После того как ток отключился и объем газа, ранее подвергавшийся воздействию, покинул зону наблюдения, значение угла  $\psi$  медленно релаксирует к своему начальному значению.

Относительно процесса релаксации ударно-волновой конфигурации к исходной картине после прекращения воздействия внешних полей можно заметить, что односкачковая конфигурация релаксирует значительно быстрее, чем многоскачковая.

К основным результатам работы можно отнести создание метода импульсного воздействия на ударно-волновые конфигурации и установление того факта, что существует запаздывание в изменении основных характеристик ударно-волновой конфигурации по отношению к изменению интенсивности внешних воздействий.

Работа выполнена при поддержке EOARD (грант МНТЦ 2009).

## Список литературы

- [1] *Бобашев С.В., Васильева Р.В., Дьяконова Е.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 2. С. 63–69.
- [2] *Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A.* et al. // AIAA Paper. 2001. N 2001–2878.
- [3] *Лапушкина Т.А., Бобашев С.В., Васильева Р.В.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 4. С. 23–31.