

03;12;04

## Управление сверхзвуковым потоком азота при помощи магнитного поля

© С.В. Бобашев, Н.П. Менде, В.А. Сахаров, Д.М. Ван Ви

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

E-mail: v.sakharov@mail.ioffe.ru

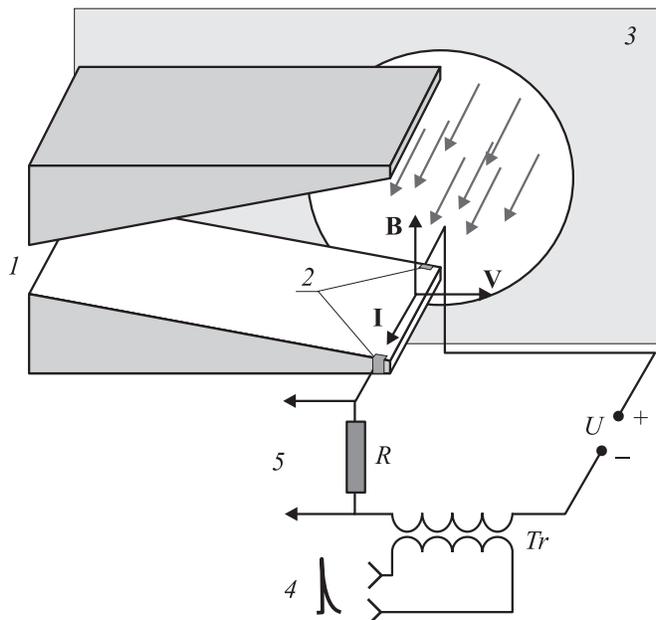
Джонс Гопкинс Университет, Лаурел, Мериленд, США

Поступило в Редакцию 25 февраля 2004 г.

На экспериментальном комплексе ФТИ, созданном на базе Большой ударной трубы (БУТ), реализовано магнитогазодинамическое (МГД) взаимодействие сверхзвукового потока холодного азота с внешним магнитным полем. Импульсный сверхзвуковой поток с числом Маха 4 создавался при истечении ударно-нагретого азота через сопло и имел длительность около 1.5 ms. Газ ионизовался импульсным разрядом между двумя электродами, смонтированными на одной из стенок сопла и расположенными таким образом, что электрический ток силой до  $\sim 500$  А протекал в направлении, перпендикулярном потоку вблизи диэлектрической стенки сопла. В направлении, ортогональном потоку газа и току, создавалось внешнее магнитное поле  $\sim 0.3$  Т. Обнаружено, что магнитное поле существенно меняет ударно-волновую структуру потока.

В качестве толкающего газа в камере высокого давления БУТ используется водород, а рабочий газ — азот заполняет канал низкого давления. К торцу канала примыкает рабочая секция прямоугольного сечения с плоским сверхзвуковым соплом внутри нее. Рабочая секция отделена от канала тонкой пластиковой диафрагмой, что позволяет поддерживать в рабочей секции низкое давление порядка 1 Па.

Рабочая секция и детали сопла изготовлены из диэлектрического материала. На боковых вертикальных стенках рабочей секции находятся стеклянные иллюминаторы для оптической диагностики газового потока при помощи теневого прибора, в поле зрения которого находится сопло. Расстояние между стеклами иллюминаторов (ширина сопла) равно 75 mm. Над и под рабочей секцией расположены две электромагнитные катушки таким образом, что их общая ось пересекает ось иллюминаторов. С помощью катушек создается импульсное магнитное поле длительностью 4.5 ms с магнитной индукцией до 1.5 Т. Подробно экспериментальная установка описана в [1].



**Рис. 1.** Эскиз рабочей камеры и схема измерений: 1 — сопло, 2 — электроды, 3 — иллюминатор, 4 — поджигающий импульс, 5 — на осциллограф.

Азот в канале низкого давления нагревается ударной волной, отраженной от торцевой стенки канала низкого давления, на которой находится вход сверхзвукового сопла. Температура азота за отраженной ударной волной достигает  $\sim 1700$  К, газодинамические параметры газа перед входом в сопло остаются постоянными в течение примерно 1.5 мс. В клиновидном сопле азот ускоряется до сверхзвуковой скорости, соответствующей числу Маха 4. Давление его в выходном сечении сопла составляет  $\sim 5$  кПа, температура  $\sim 400$  К, скорость потока  $\sim 1600$  м/с.

Внутреннее устройство рабочей секции и основные элементы электрической цепи схематически показаны на рис. 1. В выходном сечении сопла высотой 95 мм в одну из его стенок (на рисунке — нижнюю) вблизи иллюминаторов вмонтированы два электрода заподлицо с поверхностью стенки сопла. Электроды имеют размер в плане  $6 \times 4$  мм и ориентированы большей стороной по потоку. Электроды предназначены

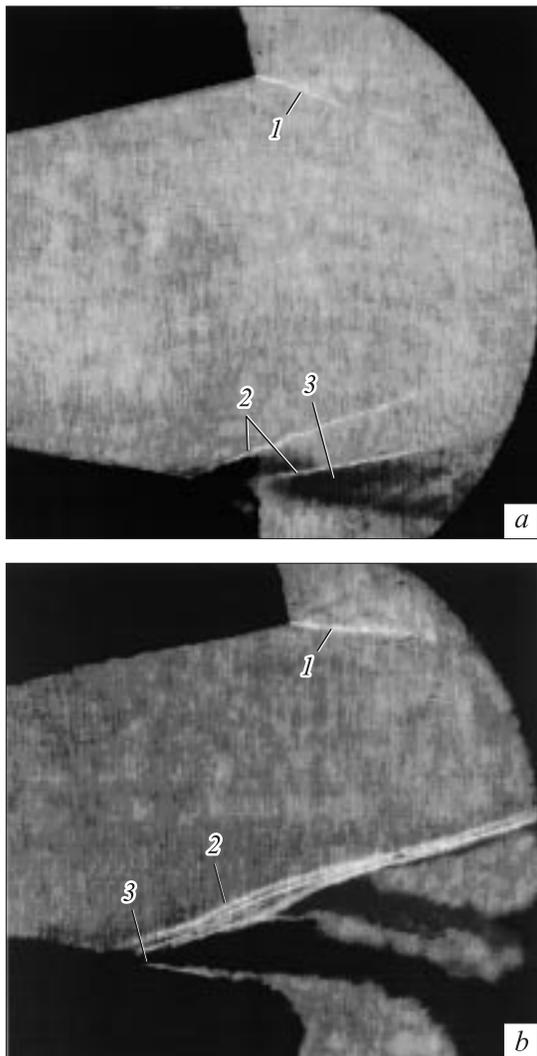
для пропускания электрического тока через рабочий газ с целью МГД воздействия на поток.

Поскольку сверхзвуковой поток азота не ионизован, основной проблемой является обеспечение его проводимости при стационарном течении в сопле. Наиболее простым приемом в данных условиях представляется инициализация рабочего тока с помощью однократного высоковольтного пробоя пространства между электродами. К электродам (рис. 1) подключена внешняя электрическая цепь, состоящая из соединенных последовательно источника импульсного напряжения  $U$ , высоковольтного импульсного трансформатора  $Tr$  и сопротивления нагрузки  $R$ . В качестве источника напряжения  $U$  используется линия с распределенными параметрами, состоящая из 14 одинаковых  $LC$ -ячеек. Характерное время разряда линии составляет  $800 \mu s$ . Перед экспериментом линия заряжается до требуемого напряжения. Трансформатор  $Tr$  служит для формирования высоковольтного импульса, инициирующего пробой между электродами.

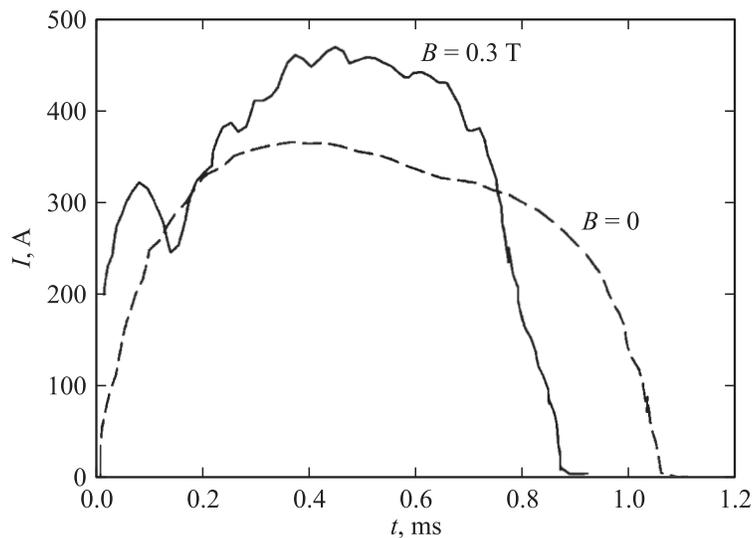
Синхронизация работы всех устройств осуществляется сигналом датчика давления, расположенного в канале ударной трубы на некотором удалении перед рабочей камерой. Последовательность запуска магнитной системы и схемы инициализации разряда в потоке азота обеспечивает протекание рабочего тока при стационарном течении в сопле в момент максимума индукции магнитного поля.

После установления стационарного потока в сопле (примерно  $300 \mu s$  после запуска сопла) на первичную обмотку трансформатора подается высоковольтный инициирующий импульс длительностью несколько микросекунд. Возникающий пробой инициирует разряд тока внешнего источника  $U$ . Ток через сверхзвуковой поток протекает в течение  $\sim 1 ms$  и достигает нескольких сотен ампер.

На первом этапе были проведены опыты без магнитного поля, в ходе которых измерялся ток через плазму, и наблюдалась картина течения на срезе сопла. На рис. 2, *a* показана теневая картина, полученная в стационарной фазе течения в момент прохождения через поток тока силой  $I = 400 A$ . Поскольку течение в сопле симметрично относительно центральной плоскости, эффект воздействия электрического разряда на поток можно оценить, сравнивая структуру течения у верхнего (без электродов) и нижнего краев сопла. Сверху виден характерный слабый разрыв (1), возникающий при сверхзвуковом расширении газа на острой кромке. В нижней части течения видны слабые ударные волны (2),



**Рис. 2.** Теневая картина течения в сопле при: *a* —  $I = 400$  А и  $B = 0$ ,  
*b* —  $I = 500$  А и  $B = 0.3$  Т.



**Рис. 3.** Импульсы токов в потоке азота без магнитного поля (штриховая) и при его наличии (сплошная).

образовавшиеся в результате нагрева газа током, а также турбулентный сдвиговый слой (3).

При включении магнитного поля для случая, когда сила Лоренца направлена навстречу вектору скорости потока, картина течения существенно изменяется. На рис. 2, *b* показана теневая картина течения при МГД торможении, полученная в тот же момент времени от начала истечения, что и предыдущая. В этом случае амплитуда индукции магнитного поля  $B = 0.3$  Т, а сила тока  $I = 500$  А. Здесь, так же как и на рис. 2, *a* в верхней части поля течения виден слабый разрыв (1). Характерной особенностью течения является ярко выраженная сильная ударная волна (2), исходящая из точки, расположенной на расстоянии  $\sim 30$  мм выше по потоку от кромки сопла. Взаимодействие ударной волны с пограничным слоем на стенке сопла (3) вызывает отрыв потока непосредственно за ударной волной.

На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов тока для двух рассмотренных выше случаев. Как видно из рисунка, присутствие магнитного поля (сплошная кривая) заметно изменяет характер уста-

новления рабочего тока в сверхзвуковом потоке азота. Импульс тока в этом случае имеет два максимума, первый из которых приходится на фазу формирования потока, а второй соответствует стационарному истечению. Оценки показывают, что отношение мощности электрического нагрева газа к мощности сверхзвукового потока составляет величину не более 0.5. Отношение давлений по обе стороны ударной волны, сосчитанное по углу ее наклона к поверхности сопла и локальному значению числа Маха потока, равно примерно 5.

В заключение следует заметить, что настоящее исследование является продолжением цикла работ, проводимых в ФТИ в последние годы по проблеме МГД управления в сверхзвуковых потоках. В отличие от предшествующих исследований, где в качестве рабочего газа применялся слабоионизованный ксенон, авторам впервые удалось реализовать эффективное МГД взаимодействие в сверхзвуковом потоке холодного азота.

Работа выполнена при финансовой поддержке EOARD (проект МНТЦ № 2009).

## Список литературы

- [1] *Bobashev S.V., Mende N.P., Sakharov V.A., Van Wie D.M.* MHD Control of the Separation Phenomenon in a Supersonic Xenon Plasma Flow (II). AIAA 2003-169. January, 2003.