

03;04;12

Магнитогидродинамическое управление сверхзвуковым обтеканием тела

© В.А. Сахаров, Н.П. Менде, С.В. Бобашев, D.M. Van Wie

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

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

Johns Hopkins University, Laurel, Maryland, 20723, U.S.A.

Поступило в Редакцию 14 марта 2006 г.

Предложена конструкция и описан принцип действия электромагнитного устройства, с помощью которого газоразрядная плазма, образующаяся между электродами, расположенными на поверхности тела вращения, перемещается магнитным полем вокруг тела. Показано, что частота вращения газоразрядной плазмы существенно зависит от направления тока через устройство, а также от давления окружающего газа. Приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие эффективное магнитогидродинамическое (МГД) воздействие на структуру сверхзвукового течения азота вблизи тела вращения при числе Маха $M = 4$.

PACS: 85.80.Jm, 52.30.Cv

В проводимых ранее экспериментальных исследованиях [1,2] по МГД-управлению сверхзвуковым потоком рассматривалось внутреннее течение в канале, а магнитное поле создавалось внешним по отношению к каналу источником. Цель данной работы — разработка устройства, позволяющего сосредоточить на исследуемом объекте все компоненты электромагнитной системы, обеспечивающей эффективное управление сверхзвуковым обтеканием объекта.

Схема электромагнитного устройства показана на рис. 1. Исследуемая модель — тело вращения, изготовленное из диэлектрического материала, имеет форму цилиндра диаметром 26 mm и длиной 40 mm, сопряженного с конусом с углом при вершине 60° . На цилиндрической части соосно с моделью расположен соленоид 1, состоящий из 20 витков медного провода диаметром 1 mm. В месте сопряжения конуса и цилиндра заподлицо с поверхностью расположен кольцевой электрод 2, к которому подключен один из концов соленоида, другой его конец соединен с источником напряжения. В качестве источника импульсного

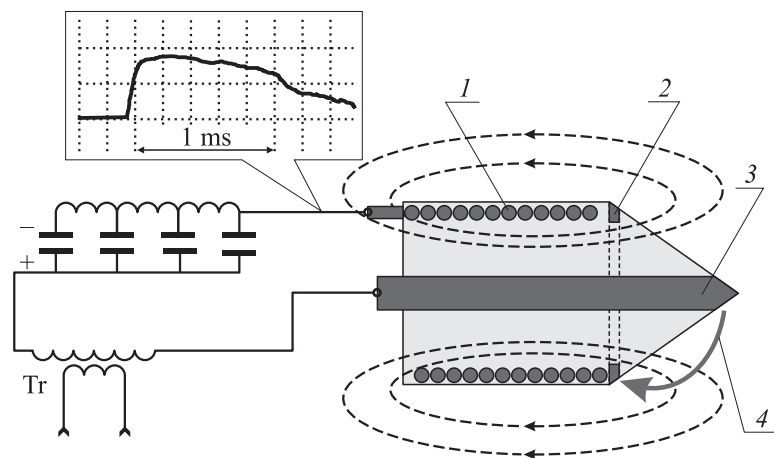


Рис. 1. Эскиз электромагнитного устройства и электрическая схема.

напряжения используется линия с сосредоточенными параметрами, состоящая из 14 LC ячеек, которая перед экспериментом заряжается до напряжения в диапазоне 300–700 V. Другой полюс источника напряжения соединяется через вторичную обмотку высоковольтного трансформатора Tr с центральным электродом 3, расположенным вдоль оси модели. Центральный электрод 3 представляет собой латунный стержень диаметром 6 mm с конической носовой частью.

Для запуска устройства на первичную обмотку трансформатора Tr подается импульс напряжением 12 kV и длительностью $\sim 1 \mu\text{s}$. Импульс вторичной обмотки Tr амплитудой до 30 kV вызывает электрический пробой в разрядном промежутке между центральным 3 и кольцевым 2 электродами. В результате этого по цепи, состоящей из плазменного промежутка и соленоида, осуществляется разряд источника в течение $\sim 1.5 \text{ ms}$, и в цепи возникает импульсный ток $\sim 10^3 \text{ A}$ (см. осциллограмму на рис. 1). Магнитное поле, возникающее при прохождении тока через соленоид, взаимодействует с током в плазме 4. В результате этого плазма приобретает вращательное движение в азимутальном направлении вокруг тела.

Эксперименты проводились на экспериментальном комплексе [1,2], созданном на базе Большой ударной трубы ФТИ [3]. В торце канала

низкого давления располагается рабочая секция прямоугольного сечения со сверхзвуковым соплом. Параметры сверхзвукового потока азота в выходном сечении сопла: давление — 5 кПа, плотность — 0.04 kg/m^3 , температура — 440 К, скорость — 1600 м/с, число Маха — 4. Длительность стационарного истечения составляет $\sim 1.5 \text{ ms}$. Исследуемая модель располагается внутри рабочей секции за выходным сечением сопла. Включение электромагнитного устройства производится в момент установления стационарного течения в сопле.

Первая серия опытов была проведена в неподвижном воздухе. В рабочей камере создавалось давление, близкое к давлению в сверхзвуковом потоке. В эксперименте при помощи ждущего фоторегистратора измерялась частота вращения газоразрядной плазмы. Для этого изображение конической поверхности устройства фокусировалось на фотопленку и с помощью вращающейся зеркальной призмы перемещалось по пленке с заданной скоростью. Размер изображения вдоль направления развертки ограничивался щелевой диафрагмой шириной 2 мм. В результате на пленке фиксировалось изменение во времени яркости свечения плазмы около выделенного участка конической поверхности. По интервалу между максимумами яркости определялась частота вращения газоразрядной плазмы вокруг тела. Кроме этого, в опытах фотографировались теневые картины и регистрировался проходящий через электромагнитное устройство ток.

Измерения показали, что в покоящемся газе частота вращения плазмы вокруг тела уменьшается от 90 до 30 кГц при увеличении давления воздуха от 2 до 10 кПа. На рис. 2 значками показано изменение частоты вращения в зависимости от давления покоящегося воздуха в рабочей камере. Погрешность измерений составляет 15%.

Вторая серия экспериментов проводилась при обтекании модели сверхзвуковым потоком азота. На рис. 3 показаны две теневые картины обтекания тела вращения сверхзвуковым потоком азота при числе Маха 4. На фото слева показана теневая картина обтекания при неработающем электромагнитном устройстве. Она соответствует типичной картине обтекания тела с конической носовой частью сверхзвуковым потоком. На фото справа показана картина обтекания при включенном устройстве, соответствующая времени $\sim 1 \text{ ms}$ от начала истечения. На этой фотографии видно, что присоединенная ударная волна изменила свое положение. На фотографии газоразрядная плазма изображается яркой областью, примыкающей к поверхности конуса. Между разрядом

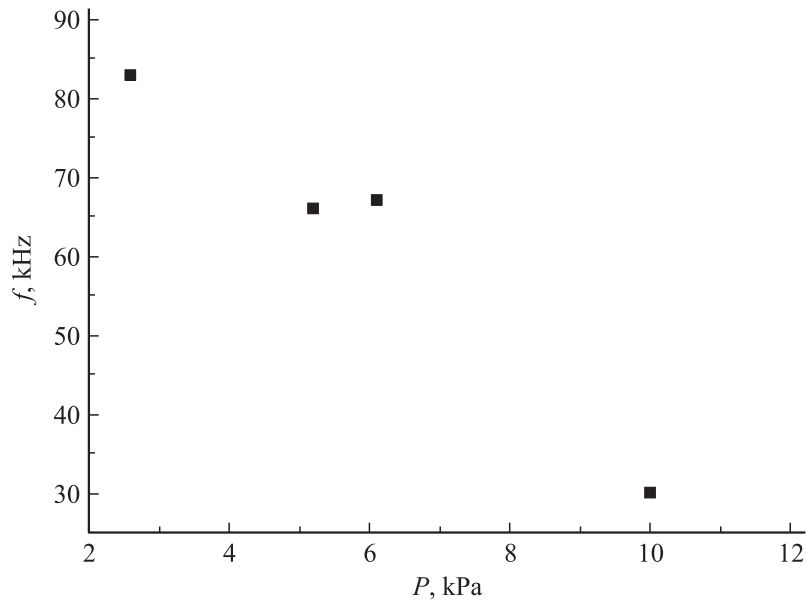


Рис. 2. Зависимость частоты вращения плазмы от давления в неподвижном воздухе.

и фронтом присоединенной ударной волны расположена область менее горячего газа. Течение над цилиндрической поверхностью характеризуется наличием сильных турбулентных неоднородностей. Сравнение двух фотографий убедительно свидетельствует о сильном воздействии вращающегося разряда на волновую структуру течения.

Оценки показали, что затраченная на нагрев плазмы электрическая мощность (~ 0.1 MW) оказалась соизмерима с мощностью сверхзвукового потока, заключенного в трубке тока диаметром, равным диаметру обтекаемого тела. Поскольку магнитное поле вблизи кольцевого электрода значительно больше, чем около центрального, можно предположить, что и динамика явления определяется, главным образом, процессами вблизи кольцевого электрода.

Измерения, проведенные при обтекании модели сверхзвуковым потоком, показали, что частота вращения плазмы существенно зависит

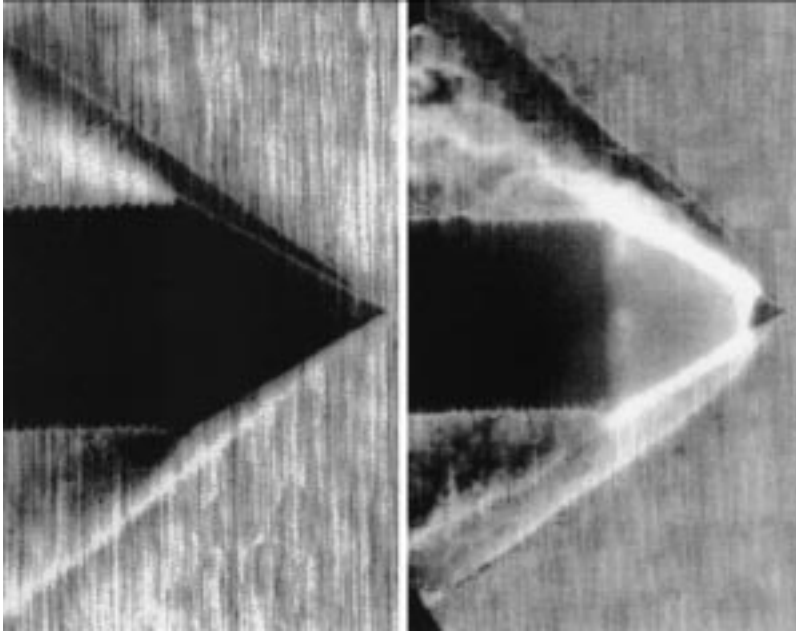


Рис. 3. Теневая картина обтекания тела вращения сверхзвуковым потоком азота при выключенном электромагнитном устройстве (слева) и при включенном (справа).

от полярности подключения внешнего источника, т. е. направления тока в газоразрядной плазме. Для варианта подключения, показанного на рис. 1, когда кольцевой электрод является катодом, частота вращения разряда вокруг тела составляла примерно 30 кГц. В случае обратного подключения — кольцевой электрод является анодом — частота вращения разряда уменьшилась почти в 2 раза и составила примерно 15 кГц.

Причина такого эффекта, вероятно, связана с образованием катодных пятен на поверхности электрода, что соответствует концентрации силовых электрических линий вблизи пятна. Поскольку величина электромагнитной силы пропорциональна плотности электрического тока, то в этом случае скорость вращения плазмы вокруг оси тела

больше, чем при обратном подключении. Установлено, что частота вращения практически не зависит от начального напряжения источника тока, т.е. от величины тока в плазме и индукции магнитного поля. В экспериментах величина тока изменялась в диапазоне $300 \div 1000$ А.

Анализ теневых картин показал, что для двух рассмотренных случаев включения источника качественных изменений в ударно-волновой структуре течения обнаружить не удалось.

Таким образом, в настоящей работе предложено, создано и испытано электромагнитное устройство, эффективно воздействующее на ударно-волновую структуру сверхзвукового течения азота при обтекании тела вращения. Управление потоком осуществляется посредством взаимодействия газоразрядной плазмы с магнитным полем. Показано, что частота вращения газоразрядной плазмы существенно зависит от направления тока в устройстве, а также от давления окружающего газа.

Конструкция предлагаемого устройства соединяет в себе все необходимые для организации эффективного МГД-взаимодействия элементы (магнитный индуктор и систему электродов), делая возможным экспериментальное моделирование МГД-процессов при внешнем течении. Ясный физический принцип и простота конструкции позволяют независимо изменять величины тока и магнитного поля, а также модифицировать рассмотренную схему устройства в плане изменения размеров модели и использования различных электродных систем в соответствии с задачами исследования.

Работа выполнена при поддержке EOARD (проект МНТЦ № 2009) и Программы президиума РАН № 20 (2002–2005 гг.)

Список литературы

- [1] *Bobashev S., Mende N., Sakharov V., Van Wie D.* // 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, Jan. 5–8, 2004. AIAA-2004-515.
- [2] *Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А., Ван Ви Д.М.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 15. С. 35–40.
- [3] *Масленников В.Г., Сахаров В.А.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 11. С. 88–95.