

04;12

Влияние магнитного поля на ионизирующий разряд в воздухе

© А.В. Ерофеев, Б.Г. Жуков, Т.А. Лапушкина,
С.А. Поняев, С.В. Бобашев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: alex.erofeev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 20 июля 2008 г.

Исследовано влияние внешнего магнитного поля на форму и структуру высоковольтного газового разряда, используемого для ионизации воздушного потока до степени ионизации 10^{-5} с целью создания управляющей магнито-гидродинамической (МГД) системы. Экспериментальная установка на основе ударной трубы включает в себя систему генерации магнитного поля, систему организации высоковольтного ионизирующего разряда длительностью 2–4 μs , а также расширяющийся МГД-канал с набором продольных и поперечных магнитному полю электродов. В первой серии экспериментов разрядный ток замыкался вдоль силовых магнитных линий, во второй серии ток замыкался в поперечном направлении. Фиксировались картины свечения разряда при различных значениях магнитной индукции. Было показано, что более эффективно использовать импульсно-периодический ионизирующий разряд в поперечном направлении и электроды для замыкания магнитоиндуцированного тока.

PACS: 47.85.L

Проблема управления высокоскоростными потоками слабоионизованного газа является актуальной и широко обсуждаемой [1,2]. Одной из задач в этой области является проблема управления присоединенными скачками уплотнения на входе в воздухозаборник летательного аппарата. В предыдущих работах [3–6] был рассмотрен магнито-гидродинамический (МГД) метод воздействия на структуру сверхзвуковых потоков. В этих экспериментальных работах в качестве рабочего вещества использовался поток термически ионизованного инертного газа ксенона, что позволило смоделировать течение в воздухозаборнике без дополнительных энергетических затрат на ионизацию потока. В работах была показана возможность управления ударно-волновой

конфигурацией, возникающей на входе в воздухозаборник при помощи МГД-метода, и обнаружен ряд новых и важных эффектов.

Для эффективного МГД-воздействия на воздушные потоки необходимо ионизовать воздух в зоне МГД-взаимодействия до степени ионизации $\sim 10^{-5} \div 10^{-4}$. В [7] для ионизации воздуха было предложено использовать нетермическую ионизацию, создаваемую при помощи газового разряда. Основные требования к ионизирующему разряду — относительная однородность ионизации по объему, а также время релаксации воздушной плазмы после выключения разряда порядка $20 \div 30 \mu\text{s}$, что достигается, как показали предварительные исследования [7], при ионизации воздуха комбинированным газовым разрядом. Комбинированный разряд создается одновременным действием как высоковольтного, так и высокочастотного разрядов. Для более эффективного подхода к решению этой проблемы в целях снижения энергозатрат на ионизацию в [7] было предложено использовать импульсно-периодическую ионизацию.

Отметим, что на однородность созданной зоны ионизации будут влиять различные факторы: относительно большое давление газа в рабочей зоне ($\sim 20\text{--}50 \text{ Torr}$), эмитирующая способность и структура ионизирующих электродов, мощность, вложенная в разряд. Кроме того, так как МГД-воздействие подразумевает наличие внешнего магнитного поля, то существенную роль в достижении нужных параметров разряда будет иметь влияние магнитной индукции на зону ионизации.

Комплексное изучение авторами магнитогидродинамического управления сверхзвуковым потоком слабоионизованной газовым разрядом воздушной плазмы при внутреннем и внешнем обтекании тел различной конфигурации проводится с целью создания управляющей МГД-системы. Система будет включать в себя МГД-генератор (ускоритель), газоразрядный ионизатор и пакет теоретических расчетов, прогнозирующих и моделирующих физические процессы. Она позволит управлять положением ударно-волновых скачков, тормозить или ускорять сверхзвуковой поток, а также получать дополнительную электроэнергию за счет преобразования кинетической энергии набегающего потока в электрическую. Это перспективная программа научных исследований, включающая в себя ряд важных подзадач.

Одной из таких подзадач является создание эффективного ионизатора воздуха. Поскольку МГД-воздействие предполагает наличие внешнего магнитного поля, для осуществления эффективной ионизации

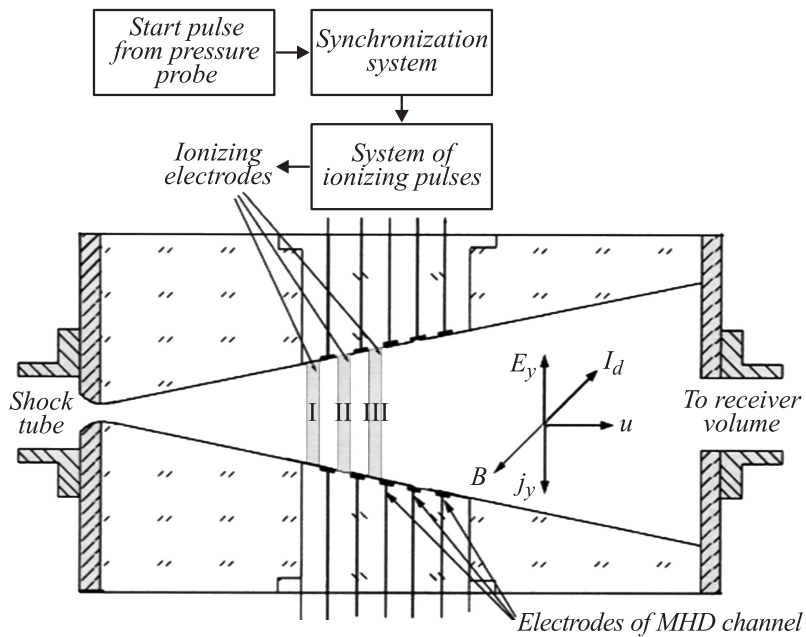


Рис. 1. Схема установки.

необходимо знать, как величина и направление магнитной индукции влияют на однородность ионизирующего газового разряда. Основная цель данной работы — исследование влияния магнитного поля на структуру высоковольтного газового разряда при продольном и поперечном замыкании разрядного тока.

Схема установки показана на рис. 1. Газодинамический тракт состоит из ударной трубы и расширяющегося сопла, которое представляет собой рабочую камеру, в которой ширина линейно расширяющегося сопла 36 mm, полуугол раствора сопла 11° , высота сопла в критическом сечении 5.5 mm. Квазистационарное однородное магнитное поле величиной до 1.5 T создается в поперечном течении направлении при помощи катушек Гельмгольца, расположенных соосно по бокам камеры. Здесь же на рис. 1 показаны направления основных векторов: скорости потока (u), магнитной индукции (B), напряженности электрического

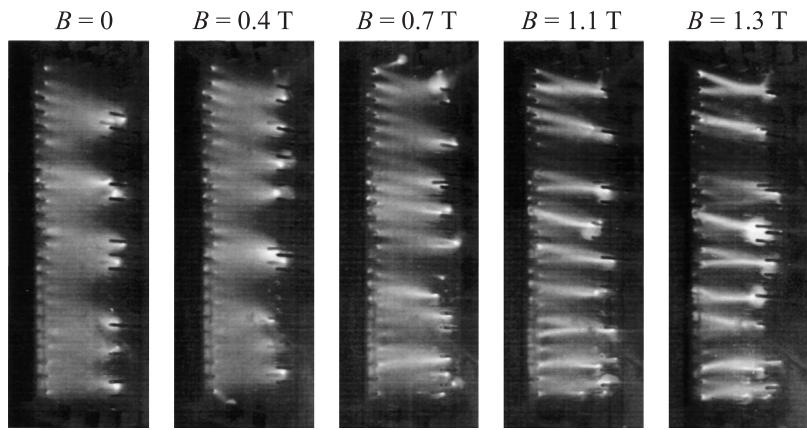


Рис. 2. Структура продольного разряда при разных значениях магнитного поля.

поля (E_y), магнитоиндуцированного (j_y) и разрядного (I_d) токов. Структура разряда фиксировалась цифровым фотоаппаратом, при этом длительность протекания разрядного тока составляла порядка $3 \mu\text{s}$, что являлось и временем экспозиции фотоаппарата. Все эксперименты проведены в покоящемся воздухе, при давлении газа в рабочей камере 5 Torr .

В первой серии экспериментов исследовалось влияние продольного разряда, когда разрядный ток направлен вдоль силовых магнитных линий. При этом использовались штыревые электроды с отдельными балластными сопротивлениями, смонтированные в боковые стенки камеры. Более подробно электрическая схема используемого высоковольтного ионизатора представлена в [7]. Напряжение, подаваемое в разрядную цепь, менялось от 3 до 10 kV . Общее сопротивление балласта составляло 11Ω . На рис. 2 представлены фотографии разряда при нескольких значениях магнитной индукции и напряжении ионизатора 5 kV . На фотографиях видно, что по мере увеличения магнитного поля диффузный разряд, характерный для нулевого магнитного поля, переходит в контрагированный с наличием нескольких жгутов высокой проводимости. Максимальная проводимость воздуха составляет порядка $50\text{--}80 \text{ S/m}$. При увеличении магнитного поля величина разрядного тока не меняется, проводимость же в жгутах возрастает примерно в 5 раз.

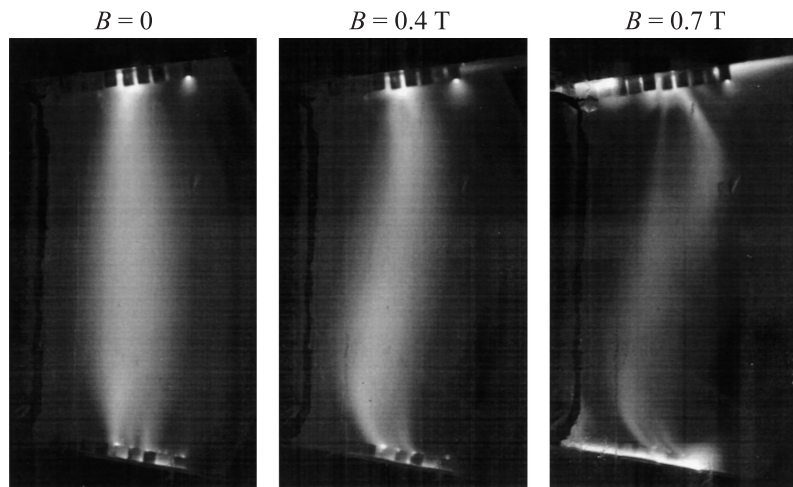


Рис. 3. Структура поперечного разряда при разных значениях магнитного поля.

Поперечный ионизирующий газовый разряд исследовался во второй серии экспериментов. В этом случае разрядный ток замыкался перпендикулярно вектору магнитной индукции через балластное сопротивление; для этого использовались электроды, вмонтированные в верхнюю и нижнюю стенки камеры. Результаты экспериментов при поперечном разрядном токе представлены на рис. 3. Здесь разрядный ток замыкался через сплошные электроды, сопротивление балласта 10Ω , напряжение, подаваемое в цепь, 13 kV . На фотографиях разряда хорошо видно, что при таком протекании тока сохраняется диффузность разряда, но распределение тока становится несимметричным. Изменение формы разряда можно объяснить влиянием магнитного поля на пробег электронов в разряде и возникновением в проводящей среде с током холловской э.д.с., перпендикулярной основному току и вектору магнитной индукции [8]. В результате линии тока отклоняются в горизонтальном направлении. Конечная длина электрода, препятствующая закорачиванию холловских токов, и низкая проводимость среды вне разряда приводят к еще большему искажению в распределении тока вблизи электродов. Чем

больше индукция магнитного поля, тем сильнее влияет эффект Холла на форму разряда.

Следует отметить, что при использовании газового разряда для ионизации воздуха с целью осуществления МГД-взаимодействия в воздушной плазме необходимо учитывать структуру разряда, возникающую при наложении магнитного поля. Рассматривать структурные изменения следует с точки зрения влияния на условия протекания магнитоиндуцированного тока как необходимого условия для МГД-воздействия. Как видно из рис. 1, направление магнитоиндуцированного тока перпендикулярно магнитной индукции и вектору скорости потока и совпадает по направлению с направлением разрядного тока при поперечной ионизации. Как было показано выше, при продольной ионизации воздуха, в отличие от поперечной, в магнитном поле возникает неоднородная структура проводимости. В направлении протекания магнитоиндуцированного тока зоны высокой проводимости сменяются областями с низкой проводимостью, что будет затруднять процесс замыкания данного тока. В отличие от этого при поперечной ионизации по всей области разряда сохраняется однородная проводимость, а искажение формы разряда за счет эффекта Холла только увеличивает зону ионизации и не препятствует протеканию магнитоиндуцированного тока. Таким образом, можно сделать вывод, что для осуществления МГД-воздействия на структуру сверхзвукового потока воздуха с целью ионизации следует использовать высоковольтный разряд в поперечном магнитному полю направлении. При этом для замыкания магнитоиндуцированного и газоразрядного тока можно использовать одни и те же электроды.

Как было показано авторами ранее [7], время релаксации воздушной плазмы после высоковольтной ионизации составляет порядка $20-30 \mu\text{s}$ при времени ионизации $2-3 \mu\text{s}$, что позволяет существенно снижать энергетические затраты за счет импульсно-периодической ионизации и на порядок увеличивать время МГД-воздействия по сравнению с временем ионизации. Используя для ионизации и для МГД-воздействия только поперечные магнитному полю электроды, можно значительно упростить конструкцию управляющей МГД-системы и увеличить зону ионизации воздушного потока.

Работа поддержана программой П-09 президиума РАН и грантом РФФИ 08-01-00330-а.

Список литературы

- [1] *Bletzinger P., Ganguly B.N., Van Wie D.* et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. R33–R57.
- [2] *D. Knight A.* // AIAA. 2004. Paper 2004–1191.
- [3] *Лапушкина Т.А., Бобашиев С.В., Васильева Р.В.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 4. С. 23–31.
- [4] *Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A.* et al. // AIAA. 2003. Paper 2003–0169.
- [5] *Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A.* et al. // Journal of Propulsion and Power. 2005. 0748–4658. V. 21. N 5. P. 831–837.
- [6] *Васильева Р.В., Ерофеев А.В., Лапушкина Т.А.* и др. // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 9. С. 27–33.
- [7] *Bobashev S.V., Erofeev A.V., Lapushkina T.A.* et al. // AIAA. 2006. Paper 2006–1373.
- [8] *Вулис Л.А., Генкин А.Л., Фоменко В.А.* Теория и расчет магнитогидродинамических течений в каналах. М.: Атомиздат, 1971. 384 с.