ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2010, № 1 (дополнительный), с. 155–160

УДК 537.52

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ И ВЛИЯНИЕ ЭТОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И СМЕШЕНИЕ

© 2010 г. И. Б. Клементьева, В. А. Битюрин, А. Н. Бочаров

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступила в редакцию 15.09.2009 г.

В статье рассматривается взаимодействие электрического разряда с газовой средой во внешнем магнитном поле в постановке задачи исследования МГД-метода интенсификации смешения и горения. Дается феноменологическое объяснение механизмов влияния такого взаимодействия на структуру потока и смешение. Обобщаются полученные ранее численные и экспериментальные результаты, демонстрирующие особенности описываемого взаимодействия. Обсуждается общий вид исследуемого течения, которое представляет собой суперпозицию, по крайней мере, трех течений: вихревого течения, порожденного непотенциальной электромагнитной силой, в плоскости поперечного сечения разрядного канала; закрученного течения среды у центрального электрода и перемещения газа в радиальном направлении в плоскости продольного сечения разрядного канала.

PACS: 52.30Cv, 52.80Mg

ВВЕДЕНИЕ

Исследование взаимодействия электрического разряда с газовой средой во внешнем магнитном поле и влияния такого взаимодействия на структуру потока и смешение связано, прежде всего, с технической задачей интенсификации смешения и горения топлива и окислителя в быстропроточных камерах химических реакторов с помощью МГД-метода. МГД-метод интенсификации смешения и горения подробно описан в работах [1, 2], его суть состоит в использовании взаимодействия тока электрического разряда с внешним магнитным полем для генерации вторичных вихревых течений в потоках газа. Применение МГД-метода базируется на концепции “реакционного объема”. Горение как элементарная химическая реакция может произойти только в объеме, где имеет место столкновение молекул топлива и окислителя. Этот объем носит название “реакционного объема” и формируется в результате диффузии на контактной поверхности двух потоков:

$$V(t) = S(t)\delta(t),$$

где $V(t)$ – “реакционный объем”, $S(t)$ – площадь контактной поверхности потоков, $\delta(t) \approx \sqrt{Dt}$ – толщина диффузионного слоя (D и t – коэффициент диффузии и время). Молекулярная диффузия – медленный процесс на масштабах доступных для смешения времен, которые лимитируются пребыванием топлива и окислителя в камере сгорания. Однако ускорить процесс создания “реакционного объема” можно, увеличивая площадь контактной поверхности, например, генерацией вихревых течений в потоках топлива и окислителя (кинематическое перемешивание) с помощью МГД-метода.

В монографиях [3–5] показано, что в возмущенном турбулентном потоке длины материальных линий и площади материальных поверхностей (в задаче смешения это – площадь контактной поверхности двух сред) растут во времени по экспоненциальному закону:

$$S \sim S_0 \exp\{t\Omega\},$$

где S_0 – площадь контактной поверхности в начальный момент времени, Ω – масштаб характерной неоднородности в потоке.

Экспоненциальный рост длины контура также продемонстрирован в работе [6], где возмущенный поток определяется случайным полем скорости, которое является точным решением уравнений Эйлера для несжимаемой жидкости в двухмерной постановке. Помещенный в такое поле скорости контур, изначально имеющий форму окружности, деформируется, а его длина растет с течением времени по экспоненциальному закону (рис. 1).

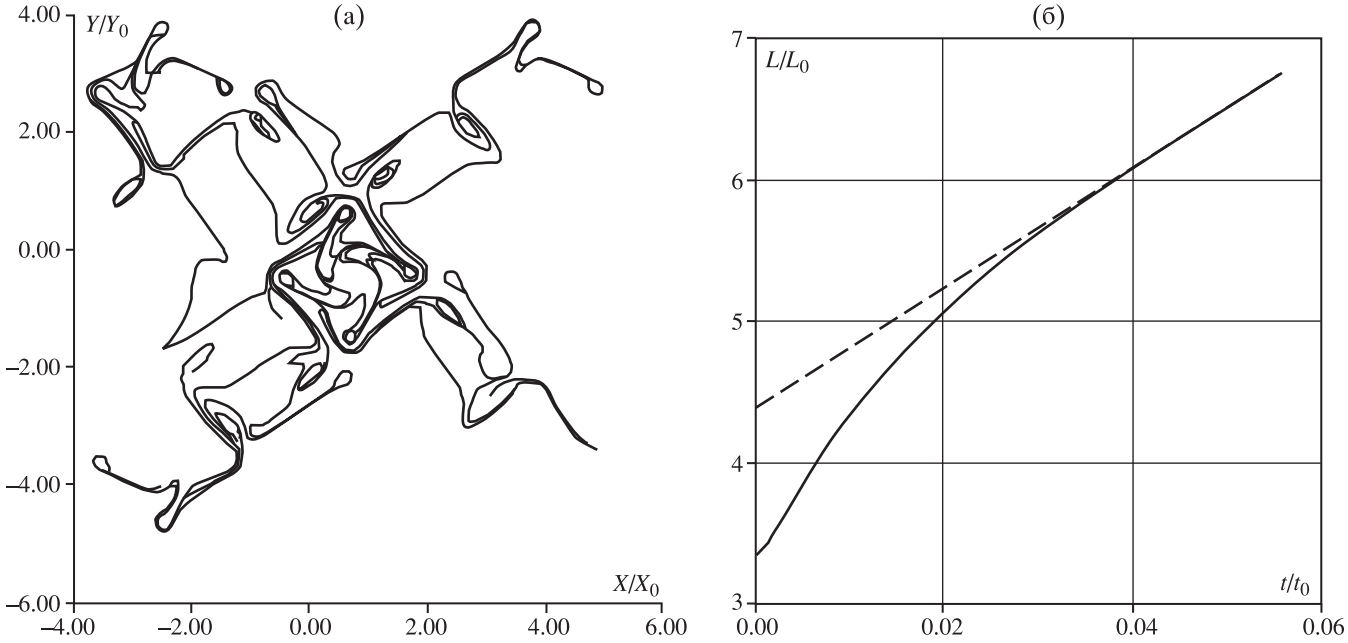

Рис. 1. Деформация контура (а). Рост длины контура L со временем (б).

Вторичные вихревые течения, порожденные вследствие взаимодействия тока электрического разряда с магнитным полем, способствуют росту “реакционного объема” через деформацию контактной поверхности двух сред и тем самым интенсифицируют процесс смешения топлива и окислителя.

Схема применения МГД-метода, являющаяся одновременно и схемой экспериментальных и численных исследований взаимодействия электрического разряда с газовой средой во внешнем магнитном поле, приведена на рис. 2.

Основной поток *1*, моделирующий окислитель, поступает в экспериментальную секцию слева направо. Встречно/спутно основному потоку через расположенную на оси аэродинамического тракта систему инжекции может подаваться газ, моделирующий топливо. Электрический разряд *5*, инициируемый в магнитном поле *2* между проволочным *3* и кольцевым *4* электродами, под действием электромагнитной силы **F** деформируется, перемещается и представляет собой источник возмущений в потоке, являющихся интенсифицирующим фактором смешения.

Для практических приложений возможно широкое разнообразие конструктивных решений электродных узлов в аэродинамических трактах для организации эффективного взаимодействия электрического разряда в магнитном поле с потоком газа. Однако с точки зрения исследования процессов целесообразна простая геометрия разрядного

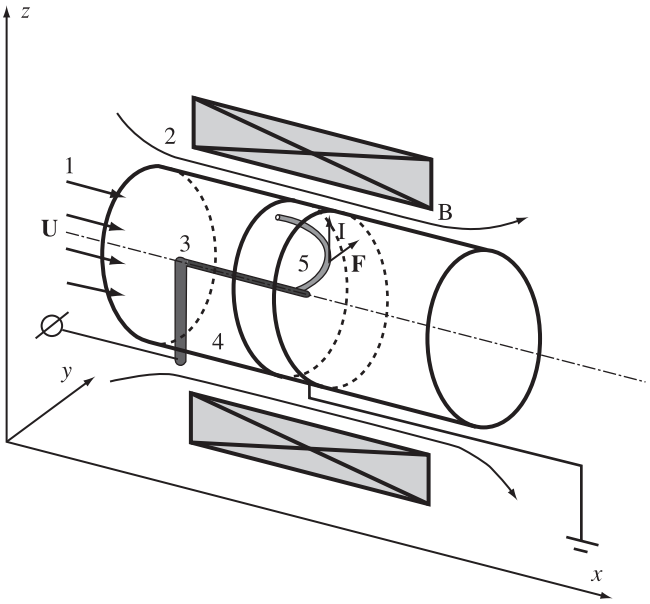

Рис. 2. Принципиальная схема исследований: *1* – поток газа, *2* – магнитное поле, *3* – центральный проволочный электрод, *4* – кольцевой электрод, *5* – электрический разряд.

промежутка, представленная на рис. 2, которая в то же время обеспечивает локализацию разряда у контактной поверхности смешиваемых потоков. Конструкция коаксиально расположенных электродов, магнитной катушки и аэродинамического тракта – логичное следствие идеи применения вращающегося в магнитном поле разряда для интенсификации смешения.

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА С ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА СТРУКТУРУ ПОТОКА

На формирование сложной картины течения, являющегося результатом взаимодействия электрического разряда с газовой средой во внешнем магнитном поле, оказывают влияние три механизма. Это – организация вихревого течения в плоскости поперечного сечения разрядного канала вследствие непотенциальной природы электромагнитной силы; закручивание газа у центрального электрода; перемещение среды в радиальном направлении к кольцевому электроду в плоскости продольного сечения разряда.

Рассмотрим вихревое течение, имеющее место в плоскости поперечного сечения токового канала (рис. 3). Областью исследований в данном случае является прямоугольная плоскость, представляющая собой развертку цилиндрической поверхности, секущей пространство между центральным проволочным и кольцевым электродами (рис. 3).

Во внешнем магнитном поле в среде с неоднородной проводимостью – в холодном потоке газа с контрагированным электрическим разрядом – непотенциальная электромагнитная сила не может быть уравновешена градиентом давления в двухмерном случае:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho\mathbf{F} - \mathrm{grad}\,p,$$

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{F} = B_x \frac{dj_z}{dx},$$

где ρ – плотность газа, $\mathbf{v}$ – скорость, $\mathbf{F}$ – электромагнитная сила, p – давление, B_x – x-я компонента вектора магнитной индукции, j_z – z-я компонента вектора плотности тока.

Нескомпенсированность сил приводит к тому, что в системе возникает вторичное течение, выраженное в перемещении электрического разряда и наличии вихревых потоков в его окрестности. Структура исследуемого течения соответствует распределению давления, которое линейно внутри проводящей зоны и как поле диполя вне ее. В модели сплошной среды давление на границе разрядного канала с непроводящим газом непрерывно. Поэтому форма разряда в поперечном сечении устанавливается согласно условию непрерывности давления и принимает вид, показанный на рис. 4, на котором представлены результаты численного моделирования, подробно описанного в работе [7].

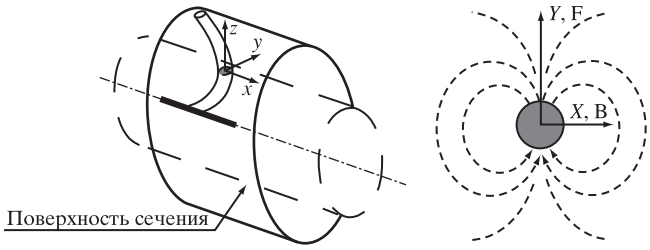

Рис. 3. Вихревое течение в плоскости поперечного сечения разрядного канала.

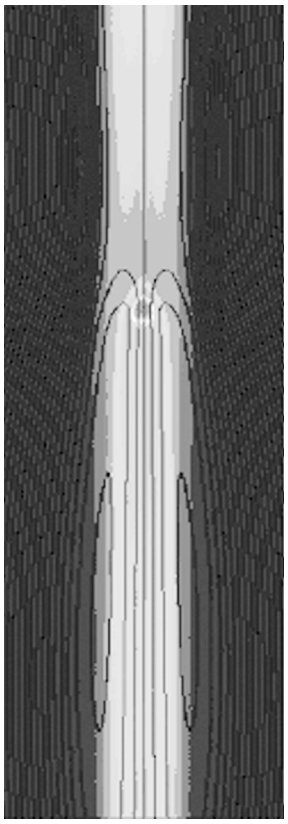

Рис. 4. Форма поперечного сечения разряда и структура вторичного течения.

Область разряда на рисунке – темное асимметричное пятно. Квазилинии тока отражают вихревую структуру вторичного течения, генерируемого в окрестности токового канала. Светлая область перед разрядом – тепловой след от его предыдущего прохождения в газе. Демонстрацией влияния такого течения на смешение является деформация контактной поверхности сред, отраженная на рис. 5 для двух задач взаимного расположения контактной поверхности и траектории перемещения разрядного канала – перпендикулярного [2] и продольного [8] соответственно. Здесь светлая зона – “реакционный объем”, сформированный на контактной поверхности двух сред.

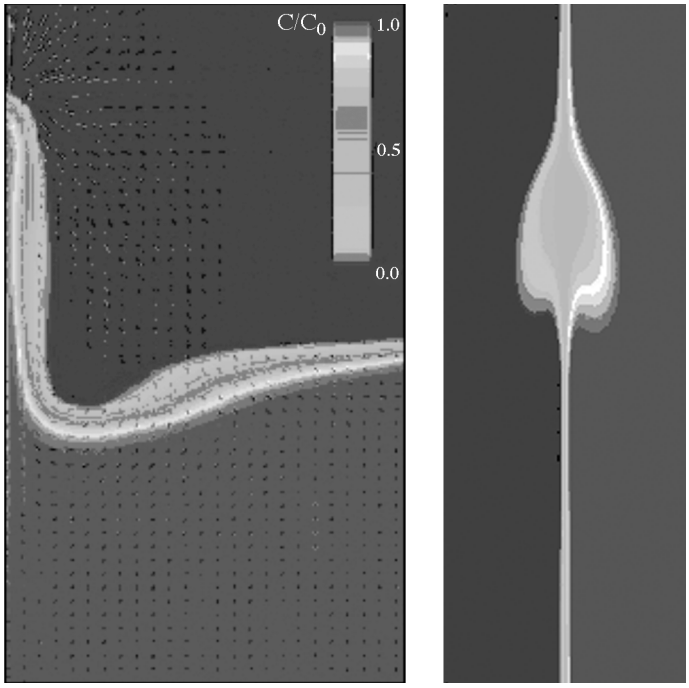

Рис. 5. Деформация контактной поверхности при поперечном и продольном перемещениях разрядного канала соответственно.

Если теперь вернуться к рассмотрению всего объема исследования и связать картину течения, полученную в плоскости поперечного сечения, со всем разрядным каналом, то можно видеть, что степень возмущения среды в системе есть интеграл микровозмущений, возникающих в плоскости поперечного сечения разряда из-за непотенциальности электромагнитной силы, по длине токового канала.

Другая картина наблюдается в плоскости продольного сечения столба электрического разряда, где имеет место закрученное течение газа вокруг центрального электрода (рис. 6).

В начальный момент времени в проводящем канале во внешнем магнитном поле устанавливается перепад давления, значение которого одинаково для каждого сечения разряда по всей его длине. Так как распределение давления непрерывно на границе проводящей области, в среде, окружающей разряд, создается градиент давления и газ приходит в движение. Величина градиента давления растет по направлению к центральному электроду, и, следовательно, скорость вращения среды также увеличивается по направлению к центру рассматриваемой области:

$$\nabla p = \frac{p_F - p_B}{r},$$

$$v \sim \nabla p,$$

где p_F, p_B – максимальное и минимальное значения

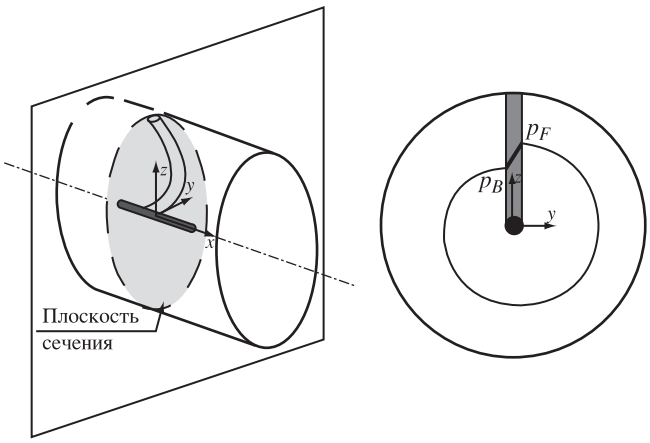

Рис. 6. Закрученное течение газа вокруг центрального электрода.

давления на границе зоны разряда с холодным газом; r – радиус разрядного промежутка; v – скорость движения среды.

Структуру потока в плоскости продольного сечения разряда (поле скорости) и форму токового канала демонстрируют результаты численного моделирования [4, 5] и экспериментов [4–6], приведенные на рис. 7а и 7б соответственно. Видно, что разряд раскручивается вокруг центрального электрода, при этом форма разрядного канала – результат перемещения среды, вызванного распределением давления в исследуемой области, которое в свою очередь задается электромагнитной силой, действующей перпендикулярно току разряда. Деформация кон-

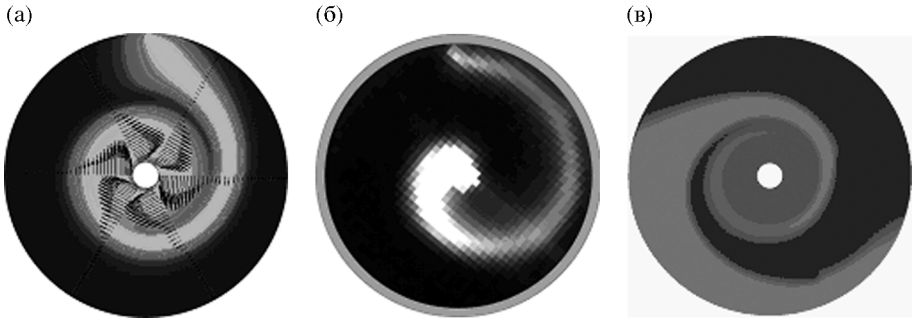

Рис. 7. (а) – поле скорости и форма разряда (результат численного моделирования), (б) – форма разряда (эксперимент), (в) – деформация контактной поверхности двух сред (численное моделирование).

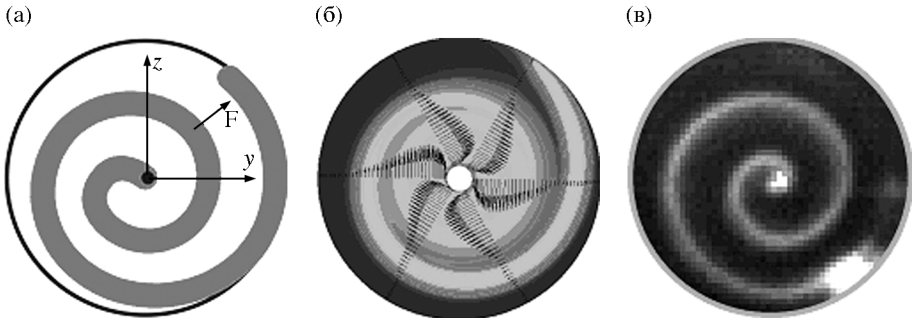

Рис. 8. (а) – схема эволюции разряда по спирали, (б) – поле скорости в среде, (в) – форма разряда (результаты численного моделирования и экспериментов соответственно).

тактной поверхности двух сред в рассматриваемой конфигурации, представленная как результат численного моделирования, подтверждает наличие закрученного течения в системе (рис. 7в).

Скорость элементов разрядного канала резко возрастает от кольцевого электрода к центральному, и с течением времени разряд в рассматриваемых условиях принимает форму спирали, раскручивающейся вокруг проволочного электрода. Внешняя часть такой спирали, где сила Ампера направлена по радиусу разрядного промежутка, перемещается к кольцевому электроду, вынуждая среду перемещаться в том же направлении. В центральной же части рассматриваемой области электромагнитная сила действует на разряд преимущественно в азимутальном направлении, так как ток течет по нормали к поверхности проволочного электрода. Здесь по-прежнему имеет место закрученное течение газа. На рис. 8 приведены схема эволюции разряда по спирали, результаты численного моделирования [7, 9] и экспериментов [7, 9, 10], демонстрирующие структуру потока и форму разряда для рассматриваемого случая.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структура потока в условиях взаимодействия тока электрического разряда с внешним магнитным полем в коаксиальной конфигурации электродов сложна и определяется рядом факторов. Можно выделить, по крайней мере, три механизма, которые формируют исследуемое течение. Наблюдаемая картина течения – результат суперпозиции микропотоков, генерируемых в плоскости поперечного сечения разряда вследствие непотенциальности электромагнитной силы, закручивания среды вокруг центрального электрода и перемещения газа в радиальном направлении благодаря эволюции разрядного канала по спирали.

В поле вторичных вихревых течений, которые являются следствием взаимодействия тока электрического разряда с магнитным полем, увеличивается площадь контактной поверхности двух сред. Увеличение площади контактной поверхности способствует росту “реакционного объема” и интенсификации процесса смешения топлива и окислителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bityurin V.A.*, *Bocharov A.N.* Advanced MHD assisted Mixing of Reacting Streams // AIAA Paper 2001-0793. 2001.
2. *Bocharov A.N.*, *Leonov S.B.*, *Baranov D.S. et al.* MHD Enhanced Mixing and Combustion in Cocurrent Streams // 4th Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics in Aerospace Applications. Moscow, Russia, 2002. P. 220.

3. *Ottino J.M.* The Kinematics of Mixing: Stretching, Chaos, and Transport. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

4. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика, механика турбулентности. Ч. 1. М.: Наука, 1966. С. 505.

5. *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика, механика турбулентности. Ч. 2. М.: Наука, 1967. С. 513.

6. *Bityurin V., Potebnya V., Tseskis A.* Evolution of a Current Plasma Clot in Turbulent Flow // 33rd SEAM Conf. Tennessee, 1995. P. IV. 7.

7. *Klement'eva I., Bocharov A., Bityurin V., Klimov A.* Experimental and Numerical Study of MHD Assisted Mixing // 15th Int. Conf. on MHD Energy Conversion and 6th Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Moscow, Russia, 2005. P. 365.

8. *Bityurin V.A., Klementyeva I.B., Bocharov A.N., Klimov A.I.* Magnetically Driven Electrical Discharges in High Speed Reacting Flows for the MHD Assisted Mixing and Combustion // AIAA Paper 2007-1024. 2007.

9. *Bityurin V., Bocharov A., Klement'eva I., Klimov A.* Numerical and Experimental Study of MHD Assisted Mixing and Combustion // AIAA Paper 2006-1009. 2006.

10. *Klement'eva I., Bityurin V.* Electrical Discharge – Gas Flows Media Interaction in External Magnetic Field // AIAA Paper 2008-1393. 2008.

Сдано в набор 26.01.2010. Подписано к печати 09.03.2010. Формат бумаги 60 × 88 $^1/_8$
Цифровая печать Усл. печ. л. 20,0. Усл.кр.-отт. 3,1 тыс. Уч.-изд.л. 20,0. Бум.л. 10,0
Тираж 150 экз. Зак. 176

Учредители: Российская академия наук.
Объединенный институт высоких температур РАН

Издатель: Российская академия наук. Издательство «Наука», 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
Отпечатано в ППП «Типография «Наука», 121099, Москва, Шубинский пер., 6