

УДК 537.52

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2011 г. И. Б. Клементьева, В. А. Битюрин, Б. Н. Толкунов, И. А. Моралев

И. Б. Клементьева

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Поступила в редакцию 14.05.2010 г.

В статье представлены результаты экспериментального исследования эволюции, динамики и электрических характеристик разрядов в газовой среде, потоке газа, встречных потоках газа во внешнем магнитном поле в широком диапазоне параметров. Дано описание механизмов эволюции разряда по спирали, перемещения привязки разряда к внешнему электроду, вращения разрядного канала, вторичного прооя.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование электрических разрядов в потоках газа во внешнем магнитном поле связано, прежде всего, с задачей обеспечения устойчивого, эффективного смешения и сгорания газообразных топлива и окислителя в сверхзвуковом потоке быстропотоочных камер химических реакторов. В таких камерах сгорания за короткое пролетное время топливо и окислитель не успевают образовывать способную к сгоранию смесь, и становится необходимым применение дополнительных способов интенсификации смешения [1–4].

Одним из методов, позволяющих интенсифицировать смешение и горение в газовых потоках топлива и окислителя, является МГД-метод, который заключается в создании импульсного электрического разряда в газовом потоке и в использовании взаимодействия электрического разряда с внешним магнитным полем для организации вторичных вихревых течений [1, 5, 6].

Процессы и явления, обусловленные применением МГД-метода интенсификации смешения, изучены недостаточно полно, в этой связи их экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование актуально для физики плазмы и плазменной аэродинамики.

Получено 14.05.2010 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка задачи. Основным элементом МГД-метода интенсификации смешения является электрический разряд. Понимание особенностей эволюции и динамики электрического разряда в газовой среде и потоках газа во внешнем магнитном поле дает представление о возможности его использования с целью интенсификации смешения.

В статье представлены результаты экспериментов, принципиальная схема которых приведена на рис. 1.

Основной поток 1, моделирующий окислитель, поступает в экспериментальную секцию слева направо. Встречно/спутно основному потоку через расположенную на оси аэродинамического тракта систему инъекции подается газ 2, моделирующий топливо. Электрический разряд 6 инициируется в магнитном поле 3 между проволочным 4 и кольцевым 5 электродами. Под действием ponderomotorной силы F_{emf} разряд деформируется, перемещается и создает возмущения в потоке, что является интенсифицирующим фактором перемешивания топлива и окислителя.

Для практических приложений возможно широкое разнообразие конструктивных решений электродных узлов в аэродинамических трактах для организации эффективного взаимодействия электри-

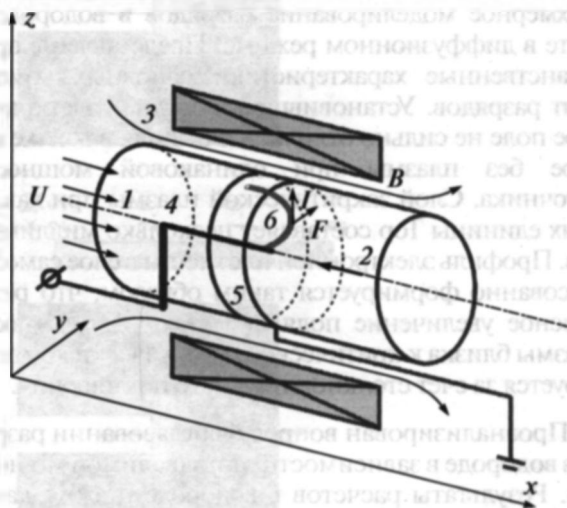


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментов: 1 – основной поток, 2 – инжектируемый поток, 3 – линии индукции магнитного поля, 4 – проволочный электрод, 5 – кольцевой электрод, 6 – электрический разряд.

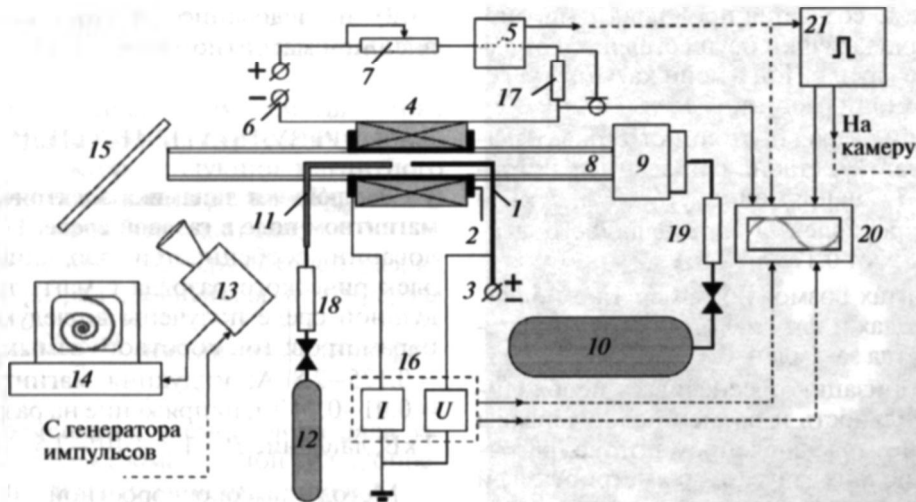


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – проволочный электрод; 2 – кольцевой электрод; 3 – генератор; 4 – магнитная катушка; 5 – система включения магнитного поля и подачи сигнала на генератор импульсов; 6 – аккумуляторная батарея; 7 – реостат; 8 – кварцевая труба; 9 – ресивер; 10 – компрессор; 11 – система инжекции; 12 – баллон с газом; 13 – скоростной фоторегистратор; 14 – компьютер; 15 – зеркало; 16 – схема измерения тока в цепи $I_{\text{арс}}$ и напряжения на дуге $U_{\text{арс}}$; 17 – токовый шунт; 18, 19 – расходомеры; 20 – осциллограф; 21 – генератор импульсов.

ческого разряда с магнитным полем и потоками газа. Однако с точки зрения исследования процессов целесообразна простая геометрия разрядного промежутка. Рассматриваемая схема (рис. 1) обеспечивает необходимую для эффективного перемешивания локализацию разряда у контактной поверхности потоков и в то же время удобна для исследования интересующих процессов эволюции и динамики электрического разряда в газовой среде/потоках газа во внешнем магнитном поле. Конструкция коаксиально расположенных электродов, магнитной катушки и аэродинамического тракта – логичное следствие идеи применения вращающегося разряда для перемешивания. Не являясь прототипом реального устройства, она в то же время демонстрирует возможность использования МГД-метода для интенсификации смешения и горения в спутных струях.

Схема экспериментальной установки. Схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования эволюции и динамики разряда в газовой среде/потоках газа во внешнем магнитном поле и МГД стимулированного смешения и поджига, представлена на рис. 2.

Базовым элементом является экспериментальная секция, представляющая собой аэродинамический тракт с коаксиальной системой электродов и магнитной катушки. Аэродинамический тракт длиной 80 см используется для организации основного потока и включает следующие элементы: ресивер 9, стабилизирующий поток, кварцевую трубу 8 диаметром 34 мм. Подача газа осуществляется при помощи компрессора 10 с баллоном определенного объема.

В экспериментах с разрядами давления ниже атмосферного экспериментальная секция монтируется в цилиндрической барокамере из нержавеющей стали длиной 0.95 м и диаметром 0.8 м. На боковой поверхности камеры имеются четыре диагностических окна диаметрами от 20 до 42 см. Откачка воздуха из барокамеры производится вакуумным насосом, позволяющим достигать давления порядка 10^3 Па. Аэродинамический тракт в этом случае включает расходомерную шайбу, электромеханический клапан, стальной канал диаметром 34 мм и длиной 44 см, кварцевую трубу тех же параметров.

Длина аэродинамического канала обеспечивает стабилизированные профили скорости в тестовой секции.

Подача встречного/спутного (два варианта возможны в экспериментах) потока, моделирующая впрыск топлива, осуществляется через систему инжекции, представляющую собой кварцевую трубочку 11 с внутренним диаметром 4 мм и длиной 40 мм, расположенную на оси аэродинамического тракта на расстоянии 15–30 мм от центрального электрода. Инжектируемый газ подается из баллона 12.

Электрический разряд инициируется между кольцевым дюралюминиевым электродом 2 диаметром 34 мм и шириной 50 мм, смонтированным в кварцевую трубу, и центральным проволочным электродом 1 из вольфрама или меди диаметром 1–10 мм, расположенным на оси аэродинамического тракта.

С помощью магнитной катушки 4, изготовленной из медной проволоки диаметром 2.2 мм и расположенной коаксиально с аэродинамическим

трактом, в системе создается продольное магнитное поле. Питание катушки осуществляется от аккумуляторной батареи 6. Ток в цепи катушки регулируется при помощи реостата 7.

Электрический разряд постоянного тока создается с использованием стабилизированных источников питания 3 с напряжением $U_{x,x} = 5, 7$ кВ и балластного сопротивления, позволяющего держать ток в цепи $I_{к.з}$ от 0.175 до 2.8 А.

В экспериментах возможно изменение полярности на электродах и катушке, при этом кольцевой электрод всегда заземлен.

Схема синхронизации обеспечивает необходимую последовательность и временные интервалы между включением—выключением потока, разряда, магнитного поля и запуском регистрирующей аппаратуры: требуемые расходы потоков устанавливаются с помощью расходомеров 18, 19; разряд инициируется в зазоре между электродами самостоятельно или при помощи третьего электрода; при включении магнитного поля сигнал с генератора импульсов 21 запускает скоростной фоторегистратор 13 и осциллограф 20, которые обеспечивают запись процессов как до включения магнитного поля, так и после.

Визуализация разряда осуществляется с помощью сверхскоростного фоторегистратора Citius Imaging C10 со следующими характеристиками: максимальное разрешение матрицы — 652×496 , размер пикселя — 10 мкм, максимальная скорость съемки — 10000 кадров в секунду, время экспозиции — от 6 мкс, точность синхронизации порядка 1 мкс. В экспериментах выставлены следующие настройки: время экспозиции ~ 0.023 мкс, скорость съемки ~ 5 кГц, разрешение $\sim 60 \times 52$.

Ток в разрядной цепи I_{arc} , напряжение на разряде U_{arc} , напряжение на шунте электрической цепи катушки, сигнал о включении магнитного поля регистрируются четырехканальными цифровыми запоминающими осциллографами Tektronix TDS 2014.

Параметры экспериментов. В работе представлены результаты нескольких серий исследований, выполненных в различных конфигурациях экспериментальной секции в широком диапазоне параметров: напряжение на разряднике $U_{x,x} = 1-7$ кВ, ток короткого замыкания в разрядной цепи $I_{к.з} = 0.135-2.8$ А, давление в экспериментальной секции $P = 1.5 \times 10^4-10^5$ Па, индукция магнитного поля $B = 0.01-0.24$ Тл, скорость основного потока $\sim 0.2-10$ м/с, скорость инжектируемого потока — до 30 м/с, электрический разряд инициируется в воздухе, газом основного потока также является воздух, встречного — азот.

Проведенные эксперименты можно условно отнести к двум группам:

1) исследование электрического разряда во внешнем магнитном поле в газовой среде,

2) исследование электрического разряда во внешнем магнитном поле в потоке/потоках газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Эволюция и динамика электрического разряда в магнитном поле в газовой среде. Результаты исследований особенностей эволюции и динамики электрического разряда в магнитном поле в воздушной среде получены в следующем диапазоне параметров: ток короткого замыкания цепи $I_{к.з} = 0.175-2.8$ А; индукция магнитного поля $B = 0.01-0.24$ Тл; напряжение на разряднике $U_{x,x} = 1, 7$ кВ; давление $P = 1.5 \times 10^4-2.5 \times 10^4, 10^5$ Па [7].

Метод высокоскоростной фоторегистрации позволил детально проследить развитие электрического разряда в рассматриваемых условиях. При включении внешнего аксиального магнитного поля (собственное магнитное поле разряда мало в рассматриваемых условиях) разряд деформируется и перемещается в кольцевом зазоре коаксиально расположенных электродов. Квазистационарный процесс перемещения разряда достигается за некоторое время (до 100 мс) после включения магнитного поля, которое требуется для установления соответствующей гидродинамики в экспериментальной секции и определенных условий на электродах. Момент достижения квазистационарного процесса определяется по осциллограммам тока и напряжения разряда.

Высокоскоростная фоторегистрация выявила ряд особенностей формы, эволюции и динамики электрического разряда в магнитном поле в газовой среде. На рис. 3 представлена характерная конфигурация электрического разряда в магнитном поле в зазоре коаксиально расположенных электродов. Разряд изображен в плоскости поперечного сечения кольцевого электрода (обозначен на фотоснимках окружностью). Разрядный ток течет от центрального электрода к внешнему. Вектор индукции магнитного поля направлен из-за плоскости изображения, таким образом, электромагнитная сила действует по часовой стрелке.

На снимке видно, что разряд в магнитном поле принимает форму спирали, раскручивающейся вокруг проволочного электрода. Такая форма обусловлена тем, что в результате действия электромагнитной силы перпендикулярно токовому каналу в коаксиальной конфигурации электродов тангенциальная составляющая скорости элементов разряда обратно пропорциональна их радиус-вектору. Центральный элемент разряда имеет максимальную тангенциальную составляющую, равную его линейной скорости, в то время как внешний элемент разрядной спирали перемещается преимущественно в радиальном направлении.

На разряд в газовой среде в магнитном поле действуют следующие силы (в предположении “непродуваемости” дуги):

электромагнитная сила взаимодействия тока разряда с магнитным полем, перпендикулярная как направлению вектора индукции магнитного поля, так и направлению тока в разряде $F_{emf} = I \times B$ (на единицу длины разрядного канала);

сила сопротивления газа окружающей разряд среды движению разряда, зависящая от его формы и размеров $F_{drag} = \frac{\rho u^2 C_D S}{2}$ (на единицу длины разрядного канала).

Скорость перемещения элементов разряда зависит от величины электромагнитной силы, определяемой током I_{arc} и магнитной индукцией B .

В случае равенства электромагнитной силы и силы аэродинамического сопротивления среды для каждого участка разрядного канала скорости элементов разряда равны и его форма близка к эвольвентной спирали, раскручивающейся вокруг центрального электрода [8].

Эвольвентная форма в идеальных условиях определялась бы только радиусом кольцевого зазора, ограничивающего количество витков спирали, и диаметром центрального электрода, влияющего на ее шаг [9] (теоретически тангенциальная составляющая скорости центрального элемента разряда стремится к бесконечности при стремлении к нулю диаметра проволочного электрода, и спираль вырождается в диск). Однако следует отметить, что в условиях эксперимента разряд перемещается в возмущенной им же газовой среде. В рассматриваемой конфигурации (и расчеты это подтверждают) среда под действием эволюционирующего в магнитном поле разряда раскручивается преимущественно в центральной части у проволочного электрода. Кроме того, на динамику разряда влияют возмущения от его собственного горячего турбулентного следа. Отклонение формы разряда от эвольвентной спирали в условиях экспериментов определяется также неоднородностью параметров разряда по длине и особенностями процессов у электродов.

В экспериментах получены результаты для положительной и отрицательной полярностей внешнего электрода, при этом зафиксированный характер эволюции разряда и его форма различны для двух случаев и определяются особенностями процессов у катода и анода. В случае кольцевого электрода — катода разрядная спираль имеет большую кривизну по сравнению с ситуацией, когда внешним электродом является анод.

Интегральные фотографии на рис. 4 иллюстрируют динамику перемещения привязки разряда к кольцевому электроду. Перемещение носит ярко выраженный дискретный характер и происходит в результате зафиксированного на фотоснимке

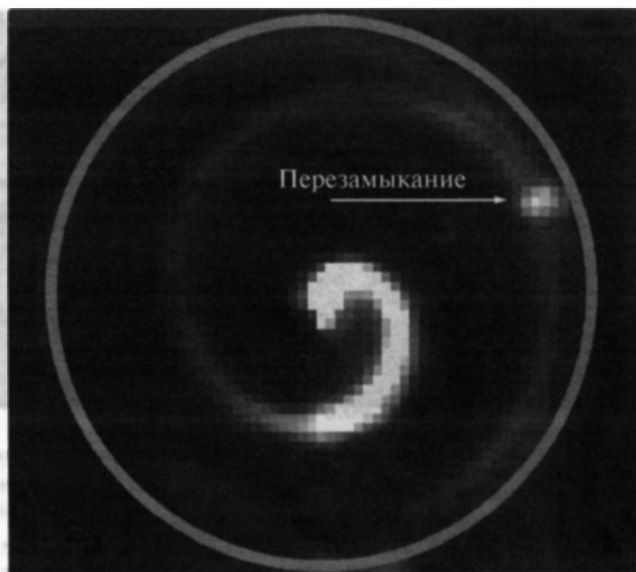


Рис. 3. Перезамыкание разряда на внешний электрод.

рис. 3 механизма перезамыкания внешней части искривленного токового канала разряда, движущейся преимущественно в радиальном направлении к кольцевому электроду. Динамика перемещения привязки к внешнему электроду также различна для двух полярностей, что определяется особенностями протекания тока у катода и анода.

Наблюдаемое в экспериментах вращение разряда есть результат его эволюции по форме спирали под действием электромагнитной силы в рассматриваемой конфигурации и перезамыкания внешней части токового канала на кольцевой электрод (рис. 3) [10].

Параметры формы разряда и динамика перемещения привязки разряда к внешнему электроду зависят от величин тока и магнитной индукции. С ростом тока увеличивается кривизна разрядного канала и его максимальная длина, достигаемая в процессе эволюции, поскольку внешняя цепь, работающая близко к режиму генератора тока, допускает большее падение напряжения на разряднике. Однако коаксиальная конфигурация электродов и существование условий для локальных перезамыканий внешней части разрядного канала на кольцевой электрод существенно ограничивают максимальную длину разряда, которая могла бы существовать для данных параметров внешней цепи. Расстояние между последовательными положениями привязки разряда к кольцевому электроду увеличивается с ростом тока, так как при большей мощности источника разряд, имея большую максимальную длину, покрывает большую поверхность внешнего электрода при фиксированном положении привязки, и последующее перезамыкание происходит на большем расстоянии. С ростом индукции магнитного поля также увеличива-

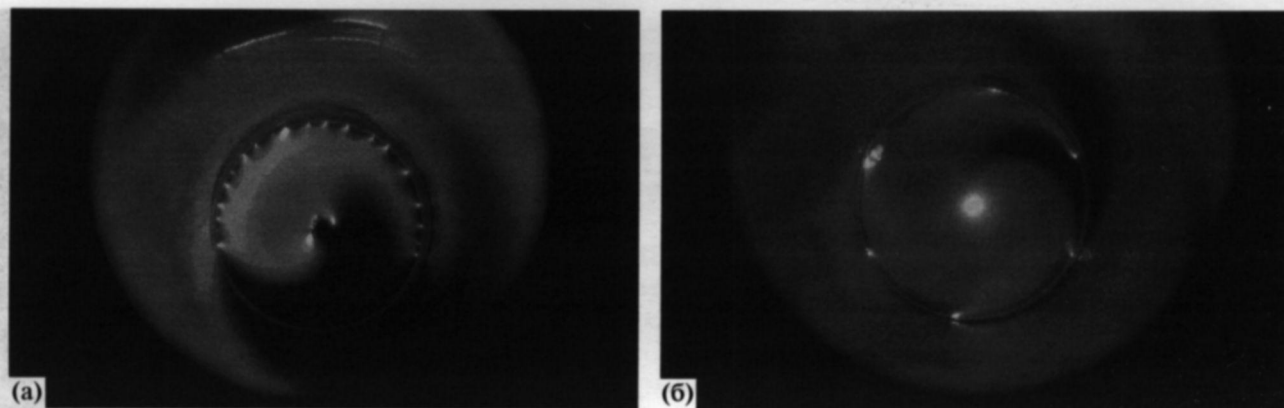


Рис. 4. Интегральные снимки перемещения анодного (а) и катодного (б) пятен по внешнему электроду.

ется кривизна разрядного канала и его максимальная длина, однако интенсивность свечения от разряда снижается, так как мощность источника постоянна.

В экспериментах со значениями тока $I_{к,з} = 0.35, 0.175$ А и индукции магнитного поля $B = 0.01$ Тл реализуется режим непрерывного, медленного перемещения катодного пятна вдоль внешнего электрода, связанного, скорее всего, с локальным прогревом катода [11, 12].

Существенное влияние на динамику разряда при малых токах и магнитных полях (в экспериментах $I_{к,з} = 0.35, 0.175$ А, $B = 0.01$ Тл) оказывает сила Архимеда, которая в зависимости от направ-

ления электромагнитной силы в поле силы тяжести определяет степень искривленности, скорость перемещения разряда и электродных пятен. Так, для случая кольцевого электрода – катода на тех участках, где электромагнитная сила направлена вдоль вектора силы тяжести, зафиксированы режимы перемещения катодного пятна в направлении, обратном перемещению разряда.

Попытное движение катодного пятна зафиксировано также в экспериментах с разрядом при давлении ниже атмосферного ($P = 1.5 \times 10^4 - 2.5 \times 10^4$ Па) и при больших значениях электрического тока: при $I_{к,з} = 0.9$ А и $B = 0.01$ Тл отмечено ярко выраженное попятное движение катодного пятна вдоль всей поверхности внешнего электрода. Однако уже при $B = 0.03$ Тл для того же значения тока $I_{к,з} = 0.9$ А катодное пятно привязано к определенной точке кольцевого электрода в течение всего времени наблюдения.

Характерная особенность развития электрического разряда в магнитном поле – его вторичный пробой на внешний электрод – катод, обусловленный распределением электрического поля в рассматриваемой области. Скоростная съемка позволяет непосредственно зафиксировать момент и положение повторного пробоя (рис. 5).

В результате вторичного пробоя, как правило локализованного в месте привязки разряда к кольцевому электроду, образуется новый канал протекания тока, при этом свечение плазмы оставшейся части разряда падает. Заново организованный разрядный канал эволюционирует в магнитном поле по форме спирали с локальными перезамыканиями на внешний электрод – катод, удлиняется, и вторичный пробой может повториться. Следует отметить, что источник питания, используемый в экспериментах, позволяет приблизиться к режиму генератора тока, поэтому вторичный пробой не является следствием неустойчивости, обусловленной внешней электрической цепью, а определяется, скорее всего, полем в разрядной секции. Таким

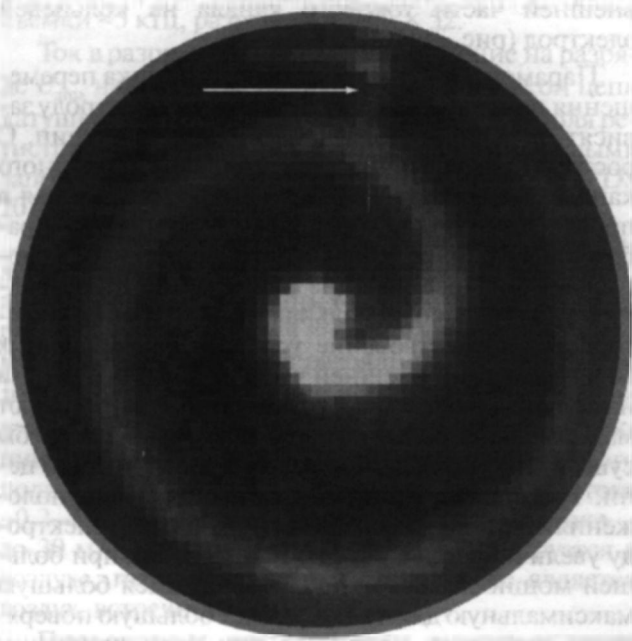


Рис. 5. Вторичный пробой разряда в процессе его эволюции на внешний катод для $I_{к,з} = 2.8$ А и $B = 0.05$ Тл.

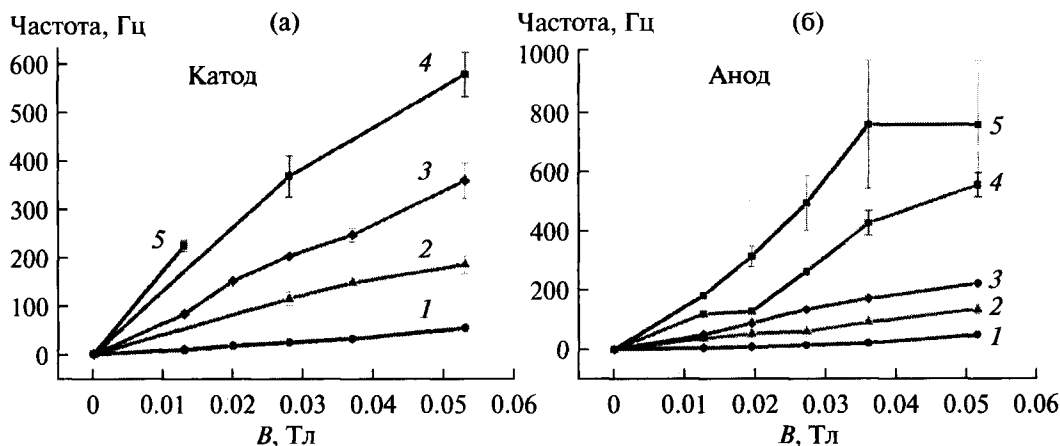


Рис. 6. Зависимость частоты вращения разряда от магнитной индукции B для нескольких значений тока $I_{к,3}$: 1 – 0.175 А, 2 – 0.35, 3 – 0.7, 4 – 1.5, 5 – 2.8; (а) – кольцевой электрод – катод, (б) – кольцевой электрод – анод.

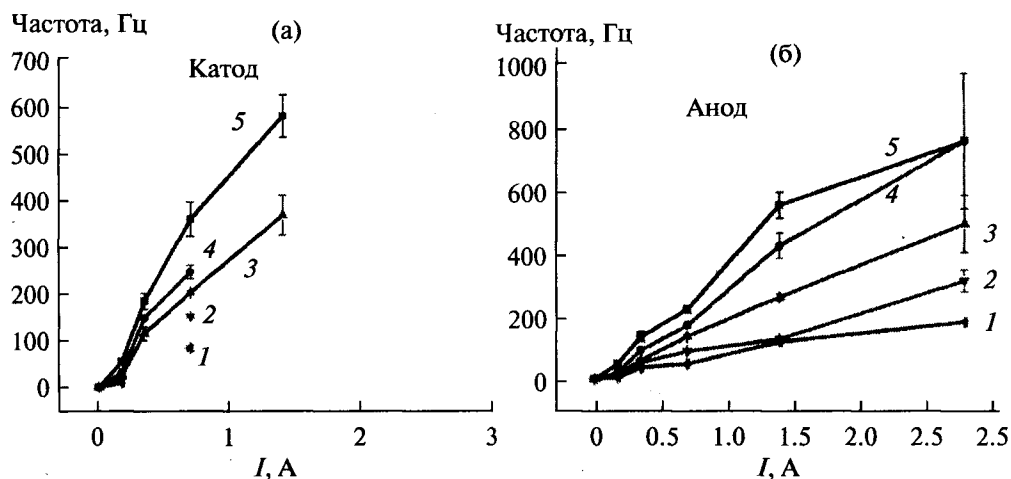


Рис. 7. Зависимость частоты вращения разряда от тока $I_{к,3}$ для нескольких значений магнитной индукции B : 1 – 0.01 Тл, 2 – 0.02, 3 – 0.03, 4 – 0.04, 0.05; (а) – кольцевой электрод – катод, (б) – кольцевой электрод – анод.

образом, причинами наблюдаемого в экспериментах пульсирующего характера параметров разряда в случае кольцевого электрода – катода являются локальные перезамыкания внешней части токового канала на внешний электрод и повторные пробои разряда на кольцевой катод. Вторичные пробои на внешний электрод – анод не происходят, что, по-видимому, связано с отмеченными выше различиями в выявленном характере перемещения анодных и катодных пятен и, в общем, процессов, происходящих у анода и катода.

Количественные результаты исследований динамики разряда представлены на рис. 6, 7, где частоты вращения для режимов противоположных полярностей построены как функции индукции магнитного поля B и тока $I_{к,3}$. Частоты видимого вращения разряда, вычисленные по записям фоторегистратора, хорошо согласуются с данными, полученными из осциллограмм. Точность измерения

частот вращения электрического разряда определяется количеством кадров в секунду, которое позволяет достигнуть фоторегистратор при приемлемом пространственном разрешении. Скорость регистрации 5000 кадров в секунду обеспечивает достаточное временное разрешение в полученном диапазоне частот вращения разряда. Частоты, разрешаемые осциллографом в проведенных экспериментах, – 100 мГц.

Частота видимого вращения разряда увеличивается с ростом тока и индукции магнитного поля. Частота растет тем быстрее с ростом поля, чем выше ток, при этом в случае внешнего электрода – анода чем выше поле, тем частота менее зависима от него. Это становится более заметным с ростом разрядного тока.

Графики на рис. 7, отражающие зависимость частоты вращения разряда от тока $I_{к,3}$ для различ-

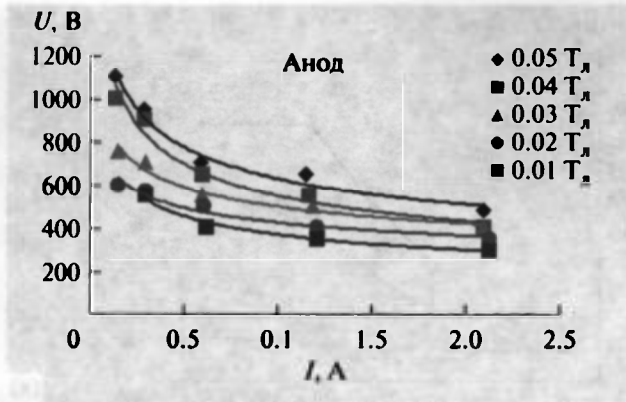


Рис. 8. ВАХ разряда для нескольких значений магнитной индукции.

ных значений магнитной индукции B , получены на основе данных рис. 6.

ВАХ разряда для нескольких значений магнитной индукции B приведены на рис. 8, где напряжение на дуге U_{arc} построено в зависимости от разрядного тока I_{arc} . Ток и напряжение дуги измерены при квазистационарном ее вращении, поэтому снятые ВАХ являются статическими характеристиками. Приведенные кривые имеют падающий характер, свойственный дугам [11, 12], однако следует отметить, что падение напряжения на разряде при том же значении тока I_{arc} увеличивается с ростом индукции магнитного поля B . Нагрузочные прямые источника питания, близкие к вертикальным прямым, характерны для случая генератора тока.

В экспериментах определена скорость перемещения элементов разрядного канала в газовой среде. Она равна линейной скорости видимого вращения разряда на радиусе центрального электрода [13].

В квазистационарном режиме перемещения разрядного канала электромагнитная сила $F_{\text{cmf}} = I \times B$ (на единицу длины) должна уравновешиваться силой сопротивления газа окружающей разряд среды. Сила сопротивления окружающей среды движению элемента разряда может быть оценена как сила аэродинамического сопротивления движению твердого стержня по формуле $F_{\text{drag}} = \frac{\rho u^2 C_D s}{2}$

(на единицу длины). Здесь ρ – плотность газа, в котором перемещается разрядный канал, в условиях эксперимента она равна $\sim 0.26 \text{ кг/м}^3$; C_D – безразмерный коэффициент; $s \sim 2 \text{ мм}$ – диаметр сечения элемента разрядного канала (считается, что элемент круглый в поперечном сечении), определяемый по фотоснимкам; u – скорость элемента. Предполагается, что плазма разряда “непродуваемая”.

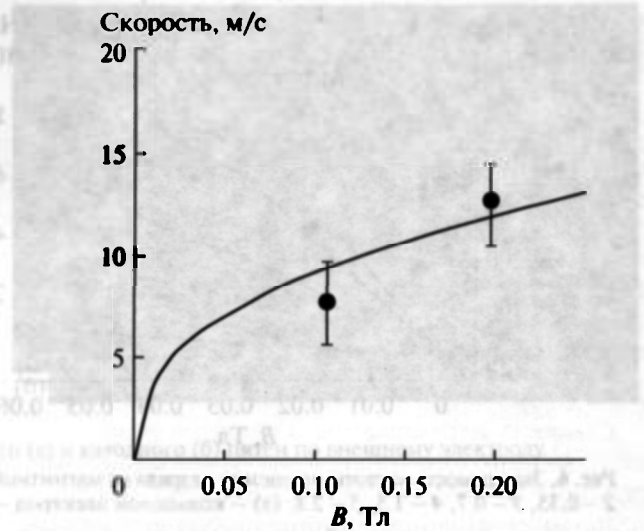


Рис. 9. Зависимость скорости перемещения элементов разряда от индукции магнитного поля.

Скорость элемента разрядного канала рассчитывается по формуле $u = \sqrt{\frac{2IB}{\rho C_D s}}$, где для коэффициента C_D можно воспользоваться эмпирической зависимостью $C_D = 1 + 0.4(B \times 10^4)^{0.3}$ [14].

Экспериментально определенная скорость перемещения элементов разрядного канала для центрального электрода – анода при токе $I_{\text{arc}} = 0.9 \text{ А}$, давлении $P = 0.2 \times 10^5 \text{ Па}$ и двух значениях индукции магнитного поля $B = 0.1, 0.2 \text{ Тл}$ и кривая скорости, построенная по формуле, приведены на рис. 9.

График на рис. 9 демонстрирует, что для условий, реализованных в проведенных экспериментах, скорость перемещения элементов разрядного канала коррелирует с квадратичным (по скорости) законом сопротивления движению тел в сплошной среде.

Эволюция и динамика электрического разряда в магнитном поле в потоке газа. Представленные в данном разделе результаты получены в экспериментах с электрическим разрядом постоянного тока атмосферного давления, эволюционирующего в кольцевом зазоре коаксиально расположенных электродов в воздушном потоке во внешнем магнитном поле (рис. 1) [13, 15]. Одной из особенностей эволюции разряда в рассматриваемых условиях является его снос потоком газа вдоль электродов и разрыв токовой цепи.

Чтобы обеспечить режим самоиницирования разряда между электродами после его сноса и разрыва потоком, в качестве центрального используется профилированный проволочный электрод из меди. В такой конфигурации разряд зажигается в узком зазоре между двумя электродами, затем,

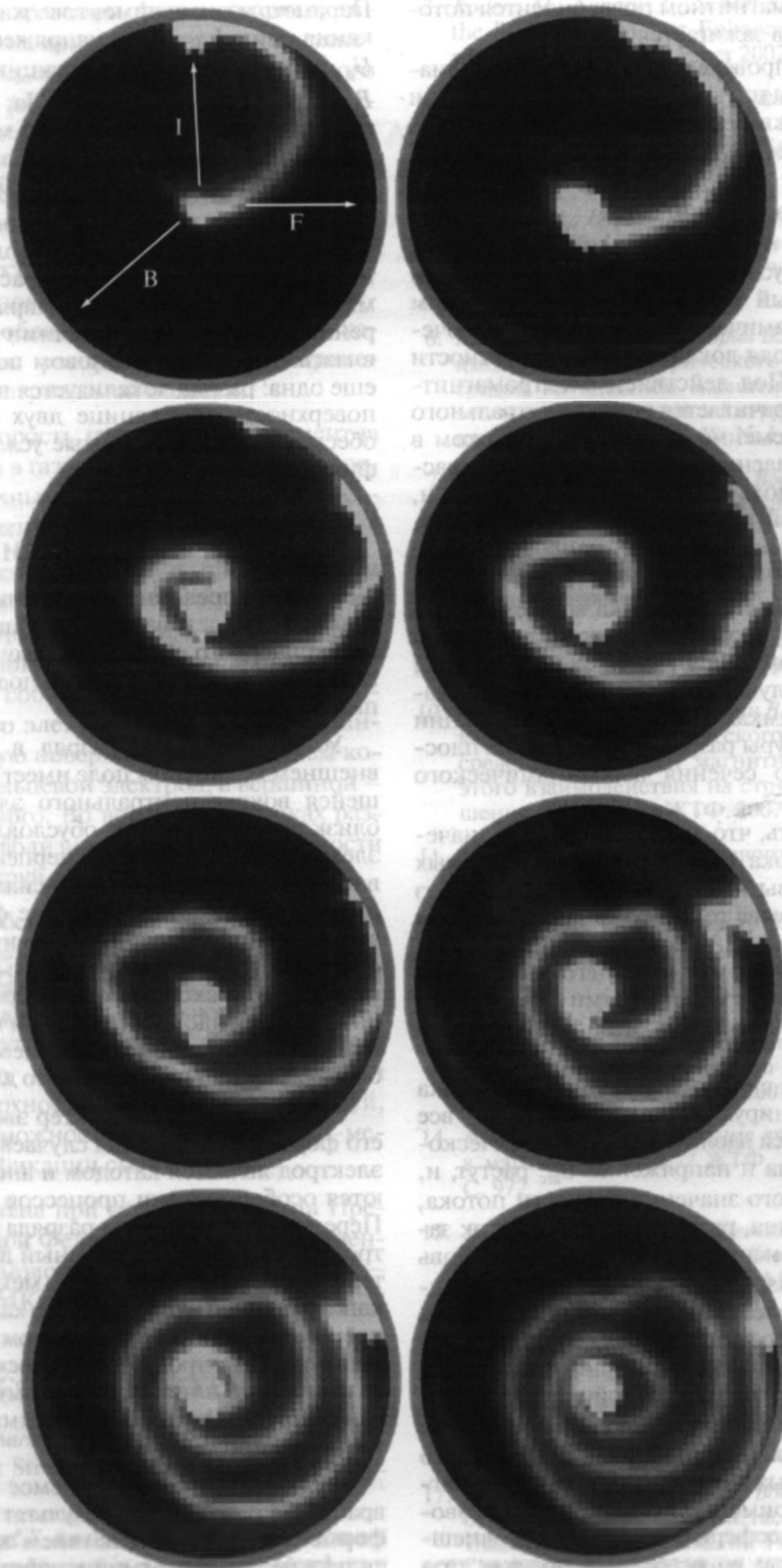


Рис. 10. Кадры скоростной видеосъемки взаимодействия электрического разряда с внешним магнитным полем $B = 0.05$ Тл в воздушном потоке 10 м/с (интервал между кадрами – 0.42 мс), внешний электрод – катод, $I_{\text{к.з.}} = 1$ А.

эволюционируя в магнитном поле, сносится потоком, рвется и снова зажигается.

Исследование проведено для следующего диапазона параметров: ток короткого замыкания цепи $I_{к.з} = 0.7, 1$ А, индукция магнитного поля $B = 0.01 - 0.24$ Тл, напряжение на разряднике $U_{к.к} = 1, 7.02$ кВ, давление $P = 1.5 \times 10^4 - 2.5 \times 10^4, 10^5$ Па, скорость воздушного потока — $0.2 - 10$ м/с.

Наблюдаемый процесс эволюции разряда в рассматриваемых условиях выглядит следующим образом. Разрядный канал, вытянутый потоком вдоль оси аэродинамического тракта, при включении магнитного поля локализуется в окрестности двух электродов. Под действием электромагнитной силы он разворачивается вокруг центрального электрода, одновременно вытягиваясь потоком в аксиальном направлении, и принимает форму раскручивающейся вдоль магнитного поля спирали, как бы намотанной на коническую поверхность, вершиной которой является кончик проволочного электрода, а основанием — кольцевой электрод.

На рис. 10 приведена развертка во времени записи скоростного фоторегистратора эволюции разряда в магнитном поле $B = 0.05$ Тл в воздушном потоке 10 м/с для случая внешнего электрода — катода. На фотоснимках представлены проекции трехмерной структуры разрядного канала на плоскость поперечного сечения аэродинамического тракта.

Следует отметить, что до определенного значения скорости потока (2 м/с в рассматриваемых условиях) разряд вытягивается вдоль потока без последующего разрыва токового канала. При этом наблюдается квазистационарное вращение разрядной спирали по кромке внешнего электрода с периодическими перезамыканиями разрядного канала как на кольцевой, так и на проволочный электроды.

С увеличением скорости воздушного потока разряд, эволюционируя в магнитном поле, все больше вытягивается вдоль оси аэродинамического тракта, его длина и напряжение U_{arc} растут, и, начиная с некоторого значения скорости потока, токовый канал рвется, разрядный промежуток заново пробивается, напряжение U_{arc} падает. Вновь образовавшийся разрядный канал, эволюционируя в магнитном поле, снова выдувается потоком, рвется и т.д. — процесс становится близким к периодическому. В данном случае реализуется режим горения разряда в условиях неустойчивости внешней цепи.

Эволюция электрического разряда атмосферного давления во встречных потоках газа во внешнем магнитном поле. Эксперименты по исследованию эволюции разряда атмосферного давления во внешнем магнитном поле во встречных потоках газа проведены в конфигурации экспериментальной секции, представленной на схеме рис. 1 [13, 16, 17].

Параметры экспериментов: ток короткого замыкания цепи $I_{к.з} = 1$ А, напряжение на разряднике $U_{к.к} = 1$ кВ, величина индукции магнитного поля $B = 0.1$ Тл, давление $P = 10^5$ Па; скорость основного воздушного потока — $1 - 3.5$ м/с. В качестве газа инжектируемого потока используется азот. Скорость встречного потока — до 30 м/с.

Разряд во встречных потоках перемещается вдоль электродов в противоположных направлениях и принимает форму раскручивающейся в магнитном поле спирали. Наряду с уже рассмотренными выше особенностями эволюции разряда в магнитном поле и газовом потоке наблюдается еще одна: разряд локализуется вблизи контактной поверхности на границе двух струй, что может обеспечивать необходимые условия для интенсификации их смещения [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований эволюции и динамики электрического разряда в газовой среде/потоках газа во внешнем магнитном поле в широком диапазоне параметров.

Установлено, что разряд в газовой среде во внешнем магнитном поле имеет вид раскручивающейся вокруг центрального электрода спирали, близкой к эвольвенте, обусловленной действием электромагнитной силы перпендикулярно токовому каналу разряда и коаксиальной конфигурацией электродов. Отклонение формы разряда от эвольвентной спирали в условиях экспериментов определяется неравномерностью распределения по радиусу коаксиального зазора скорости возмущенной разрядом среды, наличием перезамыканий токового канала на кольцевой электрод и неоднородностью параметров по длине разряда.

Обнаружено, что характер эволюции разряда и его форма различны для случаев, когда кольцевой электрод является катодом и анодом, и определяются особенностями процессов у катода и анода. Перемещение привязки разряда к внешнему электроду носит ярко выраженный дискретный характер и происходит в результате механизма перезамыкания внешней части токового канала, движущейся преимущественно в радиальном направлении, на кольцевой электрод. Режим перемещения катодного и анодного пятен по внешнему электроду различен и определяется особенностями протекания тока у катода и анода.

Выявлено, что наблюдаемое в экспериментах вращение разряда есть результат его эволюции по форме спирали под действием электромагнитной силы в рассматриваемой конфигурации и перезамыкания внешней части токового канала на кольцевой электрод (рис. 3).

Показано, что параметры формы разряда, динамика перемещения привязки разряда к внешнему электроду и, следовательно, частота видимого вращения разряда зависят от величин тока и магнитной индукции. При низких значениях электрического тока и индукции магнитного поля на динамику разряда существенное влияние оказывает сила Архимеда.

Отмечена характерная особенность развития электрического разряда в магнитном поле — явление вторичного пробоя на внешний электрод — катод, обусловленное распределением электрического поля в рассматриваемой области.

Определена скорость перемещения элементов разрядного канала в газовой среде, которая коррелирует с квадратичным (по скорости) законом сопротивления движению тел в сплошной среде.

Результаты экспериментов с электрическим разрядом в потоке газа в магнитном поле демонстрируют, что форма разрядного канала в рассматриваемых условиях — трехмерная структура, представляющая собой раскручивающуюся вокруг центрального электрода спираль, намотанную на коническую поверхность, основанием которой является кольцевой электрод, а вершиной — кончик центрального. Во встречных потоках разряд локализуется вблизи контактной поверхности на границе двух струй.

Характер и особенности эволюции и динамики электрического разряда в газовой среде/потоках газа во внешнем магнитном поле, такие, как развитие разряда в виде раскручивающейся вокруг центрального электрода спирали, его вращение в кольцевом зазоре, локализация разряда вблизи контактной поверхности на границе двух струй, указывают на возможность применения МГД-метода для интенсификации смешения.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук МК-3155.2011.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bityurin V., Bocharov A.* Advanced MHD assisted Mixing of Reacting Streams // AIAA Paper 2001-0793. 2001.
2. *Sunami T., Scheel F.* Analysis of Mixing Enhancement Using Streamwise Vortices in a Supersonic Combustor by Application of Laser Diagnostics // AIAA Paper 2002-5203. 2002.
3. *Kodera M., Sunami T., Scheel F.* Numerical Study on the Supersonic Mixing Enhancement Using Streamwise Vortices // AIAA Paper 2002-5117. 2002.
4. *Sunami T., Murakami A., Nishioka M.* Mixing and Combustion Control Strategies for Efficient Scramjet Operation in Wide Range of Flight Mach Numbers // AIAA Paper 2002-5116. 2002.
5. *Bocharov A., Bityurin V., Klement'eva I., Leonov S.* Experimental and Theoretical Study of MHD Assisted Mixing and Ignition in Co-Flow Streams // AIAA Paper 2002-2248. 2002.
6. *Клементьева И.Б., Битюрин В.А., Бочаров А.Н.* Взаимодействие электрического разряда с газовой средой во внешнем магнитном поле и влияние этого взаимодействия на структуру потока и смешение // ТВТ. 2010. Т. 48. № 1 (доп.). С. 132.
7. *Klementyeva I., Bityurin V., Bocharov A.* Constricted Discharge Interaction with High Speed Gas Flows // AIAA Paper 2007-4141. 2007.
8. *Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А.* Электродуговые нагреватели газа. М.: Наука, 1973. 232 с.
9. *Выгодский М.Я.* Справочник по высшей математике. М.: Физматлит, 1963. С. 751.
10. *Клементьева И.Б., Битюрин В.А., Бочаров А.Н.* Взаимодействие электрического разряда с газовой средой во внешнем магнитном поле и влияние этого взаимодействия на структуру потока и смешение // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 22. С. 16.
11. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 536 с.
12. *Финкельбург В., Меккер Г.* Электрические дуги и термическая плазма. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 370 с.
13. *Klementyeva I., Bocharov A., Bityurin V.* Electrical Discharges – Gas Flows Interaction in External Magnetic Fields // 7th Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Moscow, Russia, 2007. CD.
14. *Кукеков Г.А.* Исследование дуги постоянного тока в магнитном поле // ЖТФ. 1941. Т. 11. Вып. 10. С. 972.
15. *Bocharov A., Bityurin V., Klement'eva I., Klimov A.* Numerical and Experimental Study of MHD Assisted Mixing and Combustion // AIAA Paper 2007-1024. 2006.
16. *Bityurin V., Klement'eva I., Klimov A.* Mixing and Combustion Intensification of High Speed Reacting Flows by the Electrical Discharges in Magnetic Field // 31st Int. Sympos. on Combustion. Heidelberg, Germany, 2006. CD.
17. *Bityurin V., Klementyeva I., Bocharov A.* Investigation of Electrical Discharges Interaction with Gas Flows in External Magnetic Fields for Problems of Mixing and Combustion Intensification // 16th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications. Xian, China, 2006. P. 425.