# \_\_\_\_\_ ДИАГНОСТИКА \_\_ ПЛАЗМЫ

УЛК 533.9

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ АКСИАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В ГЕНЕРАТОРЕ МАГНИТО-ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ЛУГОВОГО РАЗРЯЛА

© 2020 r. C. Wang<sup>a,\*</sup>, Q. Sun<sup>a</sup>, Z. Zhang<sup>a</sup>, W. Xia<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology, Hefei 230027, China

\*e-mail: awcheng@mail.ustc.edu.cn
Поступила в редакцию 06.06.2019 г.
После доработки 10.12.2019 г.
Принята к публикации 19.12.2019 г.

В генераторе магнито-вращающейся плазмы дугового разряда движение плазмы вдоль оси установки, возникающее под действием аксиального магнитного поля, исследовалось с использованием высокоскоростной ССD-камеры. Экспериментальные результаты показывают, что при увеличении напряженности магнитного поля плазма дугового разряда движется по направлению к основанию катода, в то время как при увеличении тока дугового разряда катодное пятно вынужденно смещается по направлению к концу катода. Двумерная связанная модель использовалась для анализа аксиального движения плазмы дугового разряда при различных значениях напряженности магнитного поля. Численное моделирование показало, что плазма дугового разряда сжимается в аксиальном направлении и столб дуги изгибается в направлении основания катода. Выдвигается предположение, что динамика формы плазменной дуги обусловлена наличием сильного обратного потока со стороны конца анода, который вызван наличием области низкого давления вблизи катода. Кроме того, связанная модель предсказывает перемещение катодного пятна, согласующееся с экспериментальными результатами. Сделан вывод, что движение катодного пятна определяется потоком энергии, падающим из плазмы столба дуги на поверхность катода.

*Ключевые слова:* генератор магнито-вращающейся плазмы дугового разряда, численное моделирование, аксиальное движение дуговой плазмы, катодное пятно

**DOI:** 10.31857/S0367292120060116

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

В плазменных дуговых горелках прямой полярности, внешнее аксиальное магнитное поле заставляет плазменную дугу вращаться вокруг центрального электрода, что увеличивает объем плазменной дуги [1, 2], улучшает однородность параметров плазмы [2, 3] и уменьшает эрозию электродов [4–6]. По этим причинам, генераторы вращающейся дуговой плазмы широко используются в промышленности, например, для осаждения алмазных пленок [7, 8], анализа аэрозолей [9], синтеза газов [10, 11], и получения наноразмерных материалов [12, 13].

В последние годы проводились многочисленные исследования влияния аксиального магнитного поля на движение дуговой плазмы, в том числе, на динамику столба дуги [2, 3, 14, 15] и сложную эволюцию дуговых пятен [14, 16–18]. Из-за ограничений, накладываемых экспериментальными условиями, и недостатка подходящих методов исследования, в большинстве работ ис-

следовалось радиальное и круговое движения дуги, в то время как исследований аксиального движения дуги практически не проводилось. На самом деле, вращение дуговой плазмы трехмерно. Например, в [19-21] проводилось численное моделирование, и было установлено, что в аксиальном направлении размер высокотемпературной области плазмы вращающейся дуги ограничен, но происходит ее расширение в радиальном направлении. В генераторе магнито-вращающейся плазмы дугового разряда также экспериментально наблюдалось аксиальное движение плазмы, возникающее при регулировании скорости потока газа [15]. При этом изменение положения дуговой плазмы оказывало существенное влияние на форму дугового разряда и его напряжение, что важно для промышленного применения.

Однако, экспериментально аксиальное движение плазменной дуги в генераторе магнитовращающейся плазмы дугового разряда исследовано мало. В некоторых работах по численному

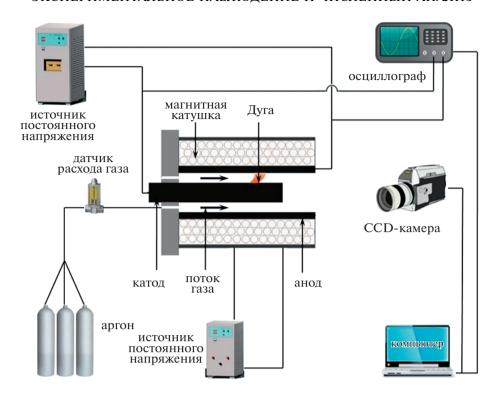


Рис. 1. Схема экспериментальной установки, где создавалась плазма дугового разряда.

моделированию аксиального движения [19, 20, 22] были получены значимые результаты, но эти исследования являются не полными. Эти модели обычно не учитывают механизм взаимного влияния столба дуги и катодного пятна, возникающего благодаря сложным физическим процессам, происходящим в области катода. Поэтому при моделировании положение катодного пятна предполагается фиксированным, хотя положение столба дуги изменяется значительно. Вследствие этого результаты моделирования оказываются далеки от реальности, поскольку столб дуги значительно влияет на положение катодного пятна [15, 16]. Недавно нами была разработана связанная модель, учитывающая теплопроводности тяжелых частиц и электронов в промежутке между столбом дуги и прикатодным слоем. Эта модель основана на модифицированном уравнении переноса энергии [23-25]. Эта модель описывает как точечный, так и диффузный режимы катодного пятна [25]. Поэтому использование связанной модели может стать более подходящим методом исследования аксиального движения плазмы дугового разряда.

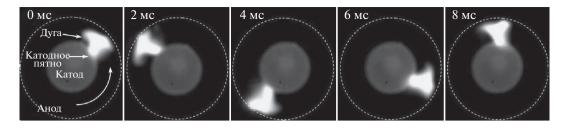
Чтобы исследовать аксиальное движение дуговой плазмы в аксиальном магнитном поле, был разработан генератор магнито-вращающейся дуговой плазмы, работающий при атмосферном давлении. Для исследования динамики вращающейся дуговой плазмы использовалась высоко-

скоростная ССD-камера. Для качественного описания поведения плазменной дуги в присутствии аксиального магнитного поля использовалась двумерная связанная модель. В статье обсуждаются особенности структуры плазмы дугового разряда. Авторы надеются, что результаты этого исследования будут способствовать широкому использованию генератора магнито-вращающейся плазмы дугового разряда.

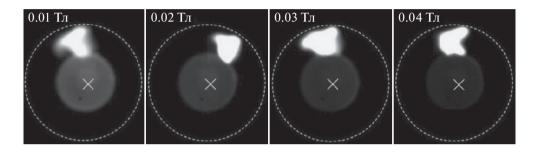
# 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 2.1. Экспериментальное оборудование

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Генератор дуговой плазмы состоит из полого цилиндрического анода (красная медь, длина 250 мм и диаметр 20 мм), соосного с ним вольфрам-лантанового катода (W-La сплав, 2 массовых процента лантана, длина 150 мм и диаметр 10 мм), и охлаждаемой магнитной катушки, окружающей анод. Магнитная катушка создает аксиальное магнитное поле, вызывающее вращение плазменной дуги вокруг катода. Имеется возможность плавной регулировки магнитного поля в диапазоне от 0 до 0.1 Тл за счет изменения тока. Напуск газа осуществляется равномерно по поверхности катодного фланца. Через отверстие для напуска газа аргон инжектируется в генератор в аксиальном направлении со скоро-



**Рис. 2.** Последовательные изображения плазменной дуги, I = 100 A, B = 0.01 Тл, время срабатывания затвора 1 мкс и скорость съемки 5000 кадров/с.



**Рис. 3.** Изображения плазменной дуги, полученные с помощью CCD-камеры при различных напряженностях магнитного поля, I = 100 A, время срабатывания затвора 1 мкс и скорость съемки 5000 кадров/с.

стью 0.5 стандартного литра в минуту. Постоянный ток от модулированного источника питания 0–200 В (SCR выпрямитель тока, эффективность преобразования более 90% и флуктуация тока менее 10%) подается в генератор дуговой плазмы. Высокоскоростная ССD-камера (256 × 256 пикселей, максимальная скорость съемки 1000000 кадров в секунду, модель FASTCAM SA5 1000 K-M3, производитель Photron Company) расположена перед генератором для получения изображений плазменной дуги. Для регистрации сигналов напряжения дуги использовались осциллограф (модель MDO3000, производитель Tektronix) и делитель напряжения. Магнитное поле в генераторе плазмы регистрировалось флюксметром (модель НТ208). В данном исследовании, измерения магнитного поля проводились у конца катода. Все эксперименты проводились при атмосферном давлении.

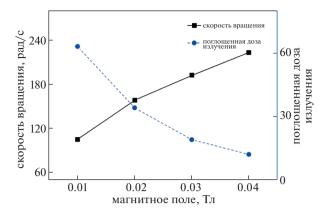
#### 2.2. Экспериментальные результаты

Последовательные изображения вращающейся дуги при токе  $I=100~\mathrm{A}$  и магнитном поле  $B=0.01~\mathrm{T}$ л показаны на рис. 2. На этих изображениях пунктиром показана внутренняя стенка анода. Под действием силы Лоренца дуга вращается вокруг катода против часовой стрелки со скоростью порядка  $100~\mathrm{o}$ б/с. Важно отметить, что скорость потока газа относительно мала; поэтому

катодное пятно расположено на боковой поверхности катода, а не на его конце.

По мере увеличения напряженности магнитного поля скорость вращения дуговой плазмы быстро увеличивается от 100 об/с при 0.01 Тл до 210 об/с при 0.04 Тл, но яркость свечения конца катода постепенно уменьшается, как показано на рис. 3 и 4. Уменьшение величины поглощенной дозы излучения (в единицах Гр, маркер на конце катода) указывает на снижение температуры на конце катода, которое можно объяснить тем, что дуговая плазма постепенно удаляется от конца катода. К сожалению, положение плазменной дуги и ее структура в осевом направлении не очень хорошо видны из-за ограничений, связанных с условиями эксперимента. Более подробную информацию можно получить, привлекая численное моделирование.

На рис. 5 показаны типичные изображения дуговой плазмы для различных значений тока дуги, полученные при поле B=0.02 Тл. При сравнении яркостей свечения катода при токах 100 и 150 А было обнаружено, что при увеличении тока дуги дуговая плазма смещается по направлению к концу катода. Когда ток дуги превышает 200 А, катодное пятно полностью переходит на конец катода. Более подробную информацию можно получить из рис. 6. Видно, что катодное пятно располагается либо на боковой поверхности катода, либо на его конце, что определяется заданием параметров



**Рис. 4.** Скорость вращения дуговой плазмы и величина поглощенной дозы излучения (в единицах Гр, маркер на конце катода) для изображений дуговой плазмы, представленных на рис. 3.

процесса (тока дуги и напряженности магнитного поля). При фиксированном токе дуги катодное пятно находится на боковой поверхности катода при более высоких напряженностях магнитного поля. При фиксированной напряженности магнитного поля более высокий ток дуги способствует смещению католного пятна в область конца катода. Таким образом, критическая напряженность магнитного поля (пунктирная линия на рис. 6), при которой катодное пятно переходит с конца катода на его боковую поверхность, возрастает с увеличением тока дуги. Как упоминалось в нашей предыдущей работе [15], положение дуговой плазмы может оказывать заметное влияние на характеристики плазмы, такие как форма плазменной дуги, эволюция катодного пятна и флуктуации напряжения. Как показано на рис. 2, когла католное пятно нахолится на боковой поверхности катода, оно скользит вокруг катода, и плазменная дуга сохраняет приблизительно одинаковую форму, что приводит небольшим флуктуациям напряжения дуги (менее 3 В, около 10%, как показано на рис. 7). Если же катодное пятно перемещается к концу катода, колебания амплитуды напряжения дуги становятся значительными. При анализе изображений ССО-камеры,

приведенных на рис. 5 было обнаружено, что движение катодного пятна на конце катода является весьма сложным, случайным и разнообразным. Во время движения катодного пятна плазменная дуга может резко удлиняться или укорачиваться. В результате амплитуда флуктуаций напряжения превышает 10 В (см. рис. 7). В этой связи, крайне важно понимать процессы, происходящие при аксиальном движении плазменной дуги, поскольку их нужно учитывать при практическом использовании генератора магнито-вращающейся плазмы дугового разряда.

#### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

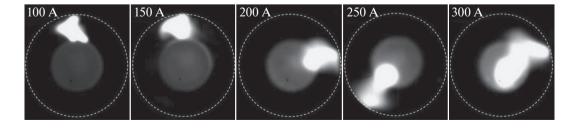
В этом разделе двумерная связанная модель использована для качественного описания аксиального движения дуговой плазмы под действием аксиального магнитного поля. В теоретической модели магнито-вращающаяся дуга имеет трехмерную структуру, как видно из рис. 2 и 3. В рамках двумерного моделирования невозможно получить точные результаты. Здесь двумерная модель используется для уменьшения сложности расчетов и повышения их эффективности. Численные результаты могут выявить основные качественные особенности движения плазменной дуги.

#### 3.1. Описание модели

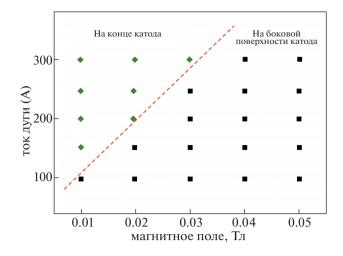
Связанная модель, используемая в данном исследовании, была подробно описана в наших предшествующих работах [23—25]. В расчетах, описанных в данном разделе, считается, что на поверхность катода падает поток тепла. В рамках связанной модели, поток тепла на поверхность катода может быть записан следующим образом:

$$q_{tot} = j_s U_{tot} - \frac{j_s}{e} \left[ A_{eff} + (2.5 + 0.78) k_B T_e \right] - q_{rad} - k_h \nabla T_h \cdot \mathbf{n},$$

где  $q_{tot}$  представляет собой полную плотность потока энергии к поверхности катода,  $j_s$  — полная плотность электрического тока ( $j_s = j_i - j_{bd} + j_{em}$ ),



**Рис. 5.** Изображения плазменной дуги, полученные с помощью CCD-камеры при различных токах дуги, B = 0.02 Тл, время срабатывания затвора 1 мкс и скорость съемки 5000 кадров/с.



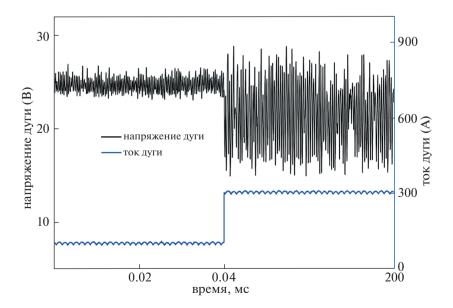
**Рис. 6.** Положение катодного пятна при различных токах дуги и напряженностях магнитного поля.

 $j_{em}$  — плотность электрического тока, вызванного термоэлектронной эмиссией электронов,  $j_i$  — плотность электрического тока, переносимого на поверхность катода ионами, а  $j_{bd}$  — плотность электрического тока, переносимого электронами плазмы при обратной диффузии от катода в плазму;  $U_{tot}$  — падение напряжения в прикатодном слое и  $\delta$  — поправочный член пропорциональный степени ионизации ионов;  $T_h$ ,  $T_e$ ,  $k_B$  и  $A_{eff}$  соответствуют температуре тяжелых частиц, электронной температуре, постоянной Больцмана и эффективной работе выхода электронов из материала катода.

Физическая интерпретация теплового потока, падающего на поверхность катода, следующая [24]:  $j_s U_{tot}$  — это электрическая мощность, падающая на единицу площади поверхности прикатодного слоя;  $q_{rad}$  — это радиационные потери;  $\frac{J_s}{\rho} [A_{eff} + (2.5 + 0.7\delta) k_B T_e]$  — это энергия, переносимая из прикатодного слоя в плазму электронным током. В настоящей работе поток энергии, переносимый благодаря теплопроводности тяжелыми частицами/электронами из столба дуги на поверхность катода, оценивался с использованием выражений  $q_{hc}=-k_h\nabla T_h\cdot \mathbf{n}$  и  $q_{ec}=-k_e\nabla T_e\cdot \mathbf{n}$ . При несвязанном моделировании вклад потока от столба дуги к катоду благодаря теплопроводности не учитывается. Таким образом, механизм связи между столбом дуги и катодом может быть в некоторой степени описан за счет добавления в модель теплопроводности.

## 3.2. Расчетная область и граничные условия

Схема области, для которой проводились расчеты, показана на рис. 8. Катод представляет собой цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм. Внутренний диаметр полого цилиндрического анода 20 мм, а его длина 40 мм. Катод сделан из вольфрам-лантанового сплава, а анод из красной меди. В расчетах считается, что магнитное поле однородно и параллельно оси катода. Аргон поступает в разрядную камеру через входное отверстие, расположенное вокруг основания катода, и выходит из камеры через выпускное отверстие анода. Скорость потока аргона 0.35 м/с. Граничные условия для основных пере-



**Рис. 7.** Типичные сигналы тока и напряжения плазменной дуги, B = 0.02 Тл.

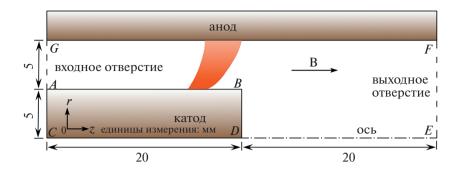
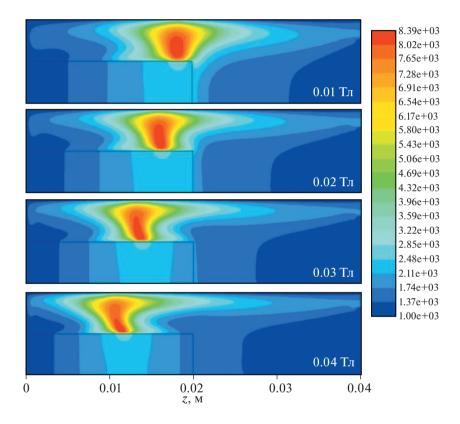


Рис. 8. Схема области, для которой проводились расчеты.



**Рис. 9.** Распределение температуры тяжелых частиц плазменной дуги для различных напряженностей магнитного поля, I = 100 A.

менных подробно описаны в нашей предыдущей работе [25]. Вычисления в рамках связанной модели проводились с использованием программного обеспечения Fluent и алгоритма SIMPLE.

#### 3.3. Численные результаты

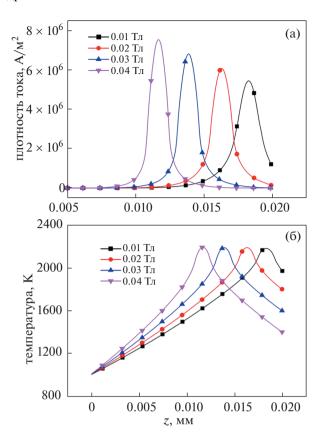
На рис. 9 показано распределение температуры тяжелых частиц в плазме дугового разряда в камере. При напряженности магнитного поля 0.01 Тл дуговая плазма образуется на боковой стороне катода, и катодное пятно находится вблизи конца катода. В плоскости продольного верти-

кального сечения высокотемпературная область плазмы дугового разряда имеет колоколообразную форму. По мере увеличения напряженности магнитного поля симметрия структуры нарушается, и дуговая плазма наклоняется в сторону основания катода, и ее сечение приобретает дугообразную форму. Кроме того, дуговая плазма постепенно перемещается в направлении от конца катода, что согласуется с данными эксперимента, представленными на рис. 3. Также видно, что высокотемпературная область дуговой плазмы сжимается в аксиальном направлении. Однако, температура тяжелых частиц, показанная на рис. 9,

оказалась ниже, что обусловлено использованием двумерного приближения.

Можно выделить три области плазмы дугового разряда: столб дуги, катодное пятно и анодное пятно. В связанной модели прикатодный слой считается одномерным, а наличие прианодного слоя не учитывается; поэтому распределение температуры дуговой плазмы, показанное на рис. 9. фактически представляет собой температуру столба дуги. Области высокой плотности тока и высокой температуры на рис. 10 обычно считаются областями локализации катодного пятна. Изза низкой работы выхода материала вольфрамлантанового катода (~2.3 эВ) максимальная температура поверхности катода составляет менее 2200 К. Видно, с увеличением напряженности магнитного поля катодное пятно перемещается по направлению к основанию катода. Максимальные значения плотности тока и температуры немного возрастают, что указывает на то, что при больших магнитных полях катодное пятно становится более компактным. Мы предполагаем, что распределение параметров катодного пятна в первую очередь зависит от его положения. Когда катодное пятно находится вблизи основания катода, усиленное охлаждение приводит к установлению более высокого градиента температуры вдоль оси катодного стержня; поэтому для достаточной эмиссии электронов с катода требуются более высокие температуры. Кроме того, при более высоких магнитных полях происходит большее сжатие столба дуги, что также способствует сжатию катодного пятна [16].

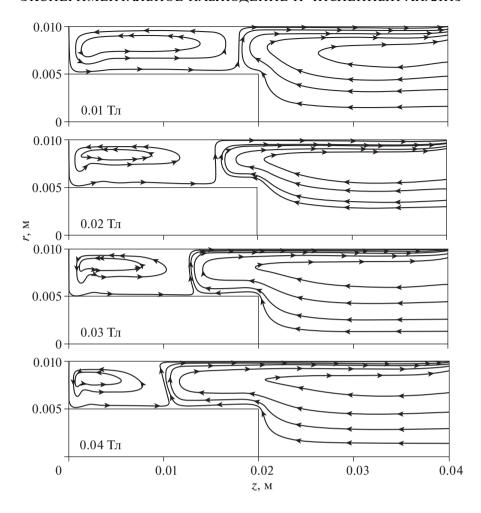
Распределение линий течения газа, показанное на рис. 11, (азимутальная составляющая скорости здесь не показана) демонстрирует, что возникает сильный обратный поток газа, который берет начало на выходе анода. Обратный поток с выхода анода и плазменный газ из входного отверстия встречаются в области дуги и затем вместе текут в сторону анода. Видно, что с ростом напряженности магнитного поля размер области, занимаемой противотоком газа со стороны выходного отверстия анода, увеличивается, и при величине магнитного поля 0.04 Тл она занимает пространство почти до середины катодного стержня. В целом, аксиальное магнитное поле вызывает вращение плазменной дуги вокруг катода. Центробежная сила, возникающая из-за наличия азимутальной скорости, заставляет плазму двигаться в радиальном направлении. Это означает, что радиальная скорость дуговой плазмы возрастает. В результате плотность плазмы и давление газа вблизи катода уменьшаются. Распределение давления в камере показано на рис. 12. Как и ожидалось, вблизи катода находится область низкого давления, и с увеличением напряженности магнитного поля давление понижается еще больше. Кроме того, положение области низ-



**Рис. 10.** Распределения (а) плотности тока и (6) температуры вдоль поверхности катода для различных напряженностей магнитного поля,  $I=100~\mathrm{A}.$ 

кого давления меняется, она перемещается в направлении основания катода, что согласуется с наличием флуктуаций обратного потока. Таким образом, можно сделать вывод, что динамика формы плазменной дуги (дугообразное искривление, аксиальное сжатие и движение катодного пятна вдоль стержня катода (рис. 9)) обусловлено обратным потоком, который создается областью низкого давления, создаваемой вблизи катода за счет вращения плазменной дуги.

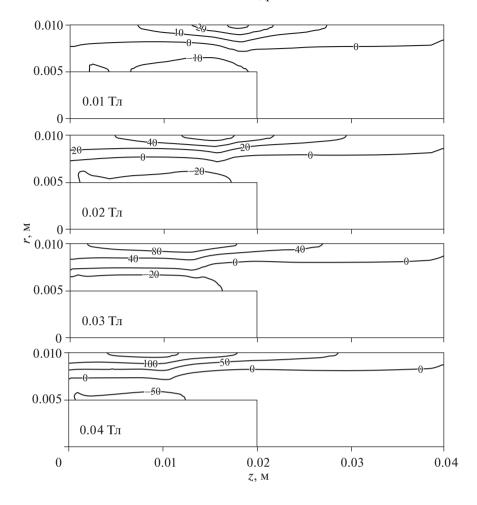
В принципе, столб дуги и анодное пятно также активно движутся, поскольку на них также воздействуют потоки газа. Движение катодного пятна является довольно таки сложным, потому что для поддержания электронной эмиссии с катода требуются достаточно высокие температуры катода. В отличие от других численных моделей, связанная модель, используемая в данном исследовании, позволяет получить достаточно полное описание движений плазменной дуги (включая перемещения столба дуги и катодного пятна), поскольку в этой модели учитывается обмен энергией между столбом дуги и поверхностью катода. На рис. 13 показано отношение потока энергии, поступающей на катод из плазмы дугового столба



**Рис. 11.** Распределение линий потока газа в камере, где создается дуговой разряд, для различных напряженностей магнитного поля, I = 100 A.

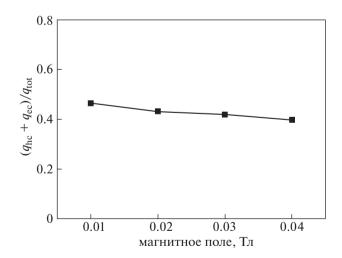
 $(q_{hc}+q_{ec})$  к общему потоку энергии  $(q_{tot})$  на поверхность катода. Оказалось, что потоком энергии из дугового столба нельзя пренебрегать (в данном эксперименте он оказался порядка 40%). Таким образом, поток энергии из плазмы дугового столба, вероятно, является ключевым фактором, оказывающим влияние на температуру поверхности катода. Поскольку в рамках данной модели положение катодного пятна определяется в первую очередь температурой катода [23, 24], то можно сделать вывод, что движение катодного пятна напрямую связано с нагревом дугового столба. Как показано на рис. 9, плазма дуги (столб дуги) изгибается в направлении основания катода вследствие вращения дуги. Изгиб столба дуги изменяет зону нагрева поверхности катода плазмой дугового столба и приводит к появлению флуктуаций температуры катода. Поэтому катодное пятно перемещается вслед за дуговой плазмой (столбом дугового разряда), приводя в численных расчетах к перемещению дуговой плазмы в целом.

Сравнивая результаты численного моделирования, приведенные на рис. 14, можно видеть, что при фиксированном магнитном поле (B = $0.04 \, \mathrm{T}$ л) при токе  $I = 100 \, \mathrm{A}$  дуговая плазма расположена ближе к основанию катода, чем при токе I = 300 A, что согласуется с экспериментальными результатами. В теории скорость вращения плазмы дуги пропорциональна квадратному корню из тока дуги [6, 15, 26]. Таким образом, при больших токах дуги происходит расширение области низкого давления, возникающей из-за вращения плазменной дуги (см. рис. 14). Поэтому, казалось бы, при токе I = 300 A плазменная дуга должна находиться ближе к основанию катода. Однако, как эксперимент, так и численные расчеты дают противоположный результат. Как показано на рис. 15, положение плазменной дуги в аксиальном направлении в основном определяется четырьмя силами  $F_{gasflow}$ ,  $F_{backflow}$ ,  $F_{Lorentz}$  и  $F_{surface}$ . Здесь сила  $F_{gasflow}$  создается потоком газа из впускного отверстия;  $F_{backflow}$  — сила, действующая со

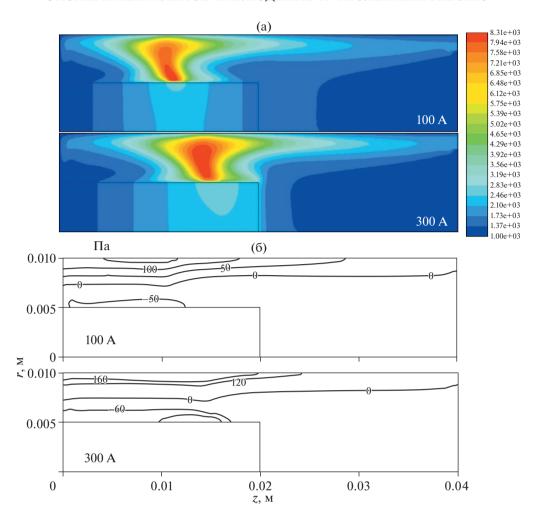


**Рис. 12.** Распределение давления в камере, где создается дуговой разряд, для различных напряженностей магнитного поля, I = 100 A.

стороны области низкого давления около катода;  $F_{Lorentz}$  — сила Лоренца, создаваемая индуцированным в катоде магнитным полем; сила  $F_{surface}$ известна как сила поверхностного сопротивления катода, которой для вольфрам-лантанового катода модно пренебречь из-за низкой работы выхода материала катода [15]. По результатам численного моделирования можно сделать вывод, что сила  $F_{backflow}$  является основной силой, толкающей плазменную дугу по направлению к основанию катода, в то время как силы  $F_{gasflow}$  и  $F_{Lorentz}$  толкают ее по направлению к концу катода. Можно получить оценку, показывающую, что сила  $F_{Lorentz}$  резко взрастает при увеличении тока дуги, потому что ее величина пропорциональна квадрату тока дуги. Таким образом, при более высоком токе дуги катодное пятно будет перемещаться в направлении конца катода, даже если вблизи катода появится более обширная область с низким давлением (см. рис. 5 и 6).



**Рис. 13.** Отношение потока энергии, поступающей на катод из плазмы дугового столба  $(q_{hc}+q_{ec})$  к общему потоку энергии  $(q_{tot})$  на поверхность катода для различных напряженностей магнитного поля,  $I=100~\mathrm{A}$ .



**Рис. 14.** Сравнение распределений (а) температуры тяжелых частиц и (б) давления в камере, где создается дуговой разряд, для различных токов дуги, B = 0.04 Тл.

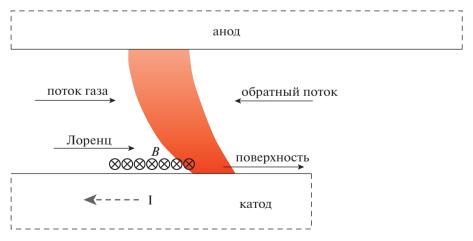


Рис. 15. Схема сил, действующих на плазменную дугу в аксиальном направлении.

Подчеркнем, что эта модель может объяснить только аксиальное движение дуговой плазмы, а также катодного пятна. На рис. 2 также видно

быстрое движение катодного пятна вокруг стержневого катода. Однако подобные физические процессы нельзя описать в рамках используемой

физической модели. Для дальнейшей работы нам потребуется улучшенная модель.

#### 4. ВЫВОДЫ

В настоящей работе был создан генератор магнито-вращающейся плазмы дугового разряда для исследования аксиального движения плазменной дуги при различных значениях магнитного поля. Было установлено, что с увеличением напряженности магнитного поля дуговая плазма постепенно удаляется от конца катода. При этом критическая напряженность магнитного поля, при которой катодное пятно переходит с конца катода на его боковую поверхность, увеличивается по мере роста тока дуги. Это связано с тем, что сила Лоренца, вызванная индуцированным в катоде магнитным полем, заставляет плазму дуги двигаться в направлении конца катода. Чтобы качественно оценить влияние аксиального магнитного поля на движение плазменной дуги, была использована двумерная связанная модель. Хотя полученные в рамках модели размеры генератора весьма отличаются от экспериментальных, тем не менее, модель позволяет получить важную информацию о характеристиках вращающейся дуговой плазмы, приводимой в движение аксиальным магнитным полем. Численное моделирование показывает, что вращение дуги создает область низкого давления вблизи катода, а также сильный обратный поток газа, направленный от выходного отверстия анода. В результате дуговая плазма сжимается в аксиальном направлении и изгибается в направлении основания катода. В отличие от других численных моделей, связанная модель показывает, что катодное пятно движется вместе со столбом дуги. Сделан вывод, что это происходит благодаря потоку энергии, переносимой из плазмы дугового столба на поверхность катода.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук КНР (проект № 11705202) и Фондом естественных наук провинции Аньхой (проект № 1808085MA12).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Slinkman D., Sacks R. // Applied Spectroscopy. 1990. V. 44. P. 76.
- Xia W.D., Li L.C., Zhao Y.H., Ma Q., Du B.H., Chen Q., Cheng L. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 211501.
- 3. Wang C., Li W.W., Zhang X.N., Zha J., Xia W.D. // Chinese Phys. B. 2015. V. 24. P. 065206.

- 4. Szente R.N., Munz R.J., Drouet M.G. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1987. V. 7. P. 349.
- 5. *Szente R.N., Munz R.J., Drouet M.G.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 1987. V. 20. P. 754.
- 6. Szente R.N., Munz R.J., Drouet M.G. // J. Phys. D. Appl. Phys. 1988. V. 21. P. 909.
- Pan W.X., Lu F.X., Tang W.Z., Zhong G.F., Jiang Z., Wu C.K. // Diamond & Related Materials. 2000. V. 9. P. 1682
- 8. Lu F.X., Tang W.Z., Huang T.B., Liu J.M., Song J.H., Yu W.X., Tong Y.M. // Diamond & Related Materials. 2001. V. 10. P. 1551.
- 9. Slinkman D., Sacks R. Applied Spectroscopy. 1990. V. 44. P. 83.
- Ma J., Zhang M., Wu J., Yang Q., Wen G., Su B., Ren Q. // Energies. 2017. V. 10. P. 899.
- 11. Zhang M., Xue W., Su B., Bao Z., Wen G., Xing H., Ren Q. // Energy. 2017. V. 123. P. 1.
- 12. *Mihovsky M.K.*, *Hadzhiyski V.* // High Temperature Material Processes. 2009. V. 13. P. 121.
- 13. *Hadzhiyski V., Mihovsky M., Gavrilova R.* In Plasma-arc reactor for production possibility of powdered nanosize materials, 2011. P. 012005.
- Zha J., Zhang X.N., Xu Z.M., Wang C., Du B.H., Xia W.D. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2013. V. 41. P. 601.
- 15. Wang C., Cui H.C., Zhang Z.L., Xia W.L., Xia W.D. // Contributions Plasma Phys. 2017. V. 57. P. 395.
- Wang C., Li W.W., Zhang X.N., Liao M.R., Zha J., Xia W.D. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2015. V. 43. P. 3716.
- 17. Xia W.D., Zhou H.L., Zhou Z.P., Bai B. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2008, V. 36. P. 1048.
- Zhou H.L., Li L.C., Cheng L., Zhou Z. P., Bai B., Xia W.D. // IEEE Transac. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 1084.
- 19. Baeva M., Uhrlandt D., Loffhagen D. // Plasma Sources Science & Technology. 2011. V. 20. P. 035008.
- Li L.C., Xia W.D., Zhou H.L., Zhou Z.P., Bai B. // European Phys. J. D. 2008. V. 47. P. 75.
- 21. *Bai B., Zha J., Zhang X.M., Wang C., Xia W.D.* // Plasma Science & Technology. 2012. V. 14. P. 118.
- 22. Chen T., Li H., Bai B., Liao M.R., Xia W.D. // Plasma Science and Technology. 2016. V. 18. P. 6.
- Chen T., Wang C., Zhang X.N., Zhang H., Xia W.D. // Plasma Sources Science & Technology. 2017. V. 26. P. 025002.
- 24. Sun Q., Wang C., Chen T., Xia W.D. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2017. V. 50. P. 425202.
- 25. *Chen T., Wang C., Liao M.R., Xia W.D.* // J. Phys. D. Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 085202.
- 26. Szente R.N., Munz R.J., Drouet M.G. // J. Phys. D. Appl. Phys. 1990. V. 23. P. 1193.