

Оглавление

1. Введение	4
2. Постановка задачи	5
3. Оценка электрических характеристик электромагнитной системы актуатора	6
4. Постановка эксперимента	7
5. Результаты экспериментов	9
6. Теоретическое описание движения дуги разряда в согласованном магнитном поле	12
7. Выводы	15
8. Литература	15

1. Введение

При разработке современных летательных аппаратов рассматриваются различные способы управления пристеночными течениями, такие как вдув/отсос газа на поверхности аппарата, охлаждение/нагрев поверхности, изменение формы и/или свойств поверхности и др. Одним из перспективных методов управления потоком при обтекании поверхности является использование различных типов актуаторов. Актуатор – это исполнительное устройство или же функциональный элемент системы автоматического управления, который воздействует на объект, изменяя поток энергии или материалов, которые поступают на объект. Существует множество различных типов актуаторов таких как: плазменные [1], электрические [2] и механические [3]. Широкий спектр теоретических и экспериментальных работ, посвященных данной проблеме, обуславливает актуальность данного направления исследования, связанной с необходимостью эффективного управления структурой течения вблизи поверхности, что может существенным образом отразиться на аэродинамических и экономических характеристиках перспективных летательных аппаратов.

В данной работе рассмотрена модель магнитоплазменного актуатора, работа которого основана на горении разряда в самосогласованном магнитном поле, создаваемом питающей электрической цепью, которая представляет собой последовательно подключенные между собой соленоид и поверхность с точечными электродами, расположенными на его торце.

Принцип работы актуатора основан на движении дуги электрического разряда с плотностью тока j вдоль поверхности в магнитном поле B под действием объемной силы $j \times B$.

Анализ открытых литературных источников глубиной ??? лет не показал наличия исследований данного типа актуаторов, что определяет научную новизну задачи.

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований работы актуатора в неподвижном газе.

2. Постановка задачи

Рассматривается движение электрической дуги в магнитном поле, индуцированном катушкой с током вблизи плоской поверхности из диэлектрика.

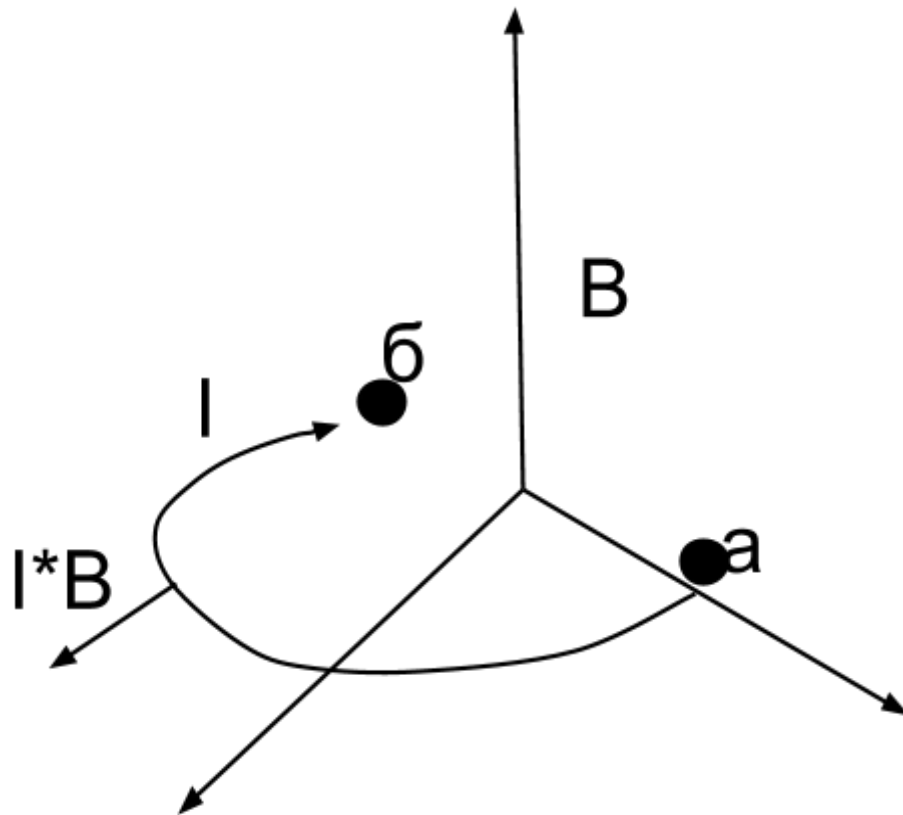


Рис.1 а, б - электроды

Движение дуги разряда происходит в неподвижном газе (воздухе) при различной величине давления. Расстояние между точечными электродами составляет 10 мм. Необходимо определить скорость движения дуги и электрическими параметрами системы, создающей магнитное поле.

3. Оценка электрических характеристик электромагнитной системы актуатора

Для оценки величины тока и количества витков в катушке была рассмотрена модель движения дуги в магнитном поле соленоида, движущаяся под действием силы Ампера.

Было предположено, что в воздухе, при давлении около 6 кПа происходит электрический пробой газа между электродами и, что в начальный момент времени форма дуги представляет собой цилиндр, радиус которого равен выходному сечению электрода диаметром 1 мм., длина дуги была принята равной расстоянию между электродами.

Для визуализации движения дуги разряда в магнитном поле соленоида предполагалось использовать высокоскоростную камеру Photron SA-Z. Для обеспечения достаточного качества изображения (разрешение кадра зависит от частоты съемки) разрядного промежутка частота видеосъемки в эксперименте составляет 10 мГц, а время экспозиции 1 мкс. Минимальное перемещение дуги за время экспозиции кадра должна быть не меньше 1 мм. Исходя из данных параметров эксперимента был осуществлен расчет основных электрических параметров электромагнитной системы актуатора: сила тока и количество витков в катушке.

Для осуществления пробоя на расстоянии 10 мм между электродами были выполнены оценки напряжения пробоя с использованием кривой Пашена для различных давлений воздуха.

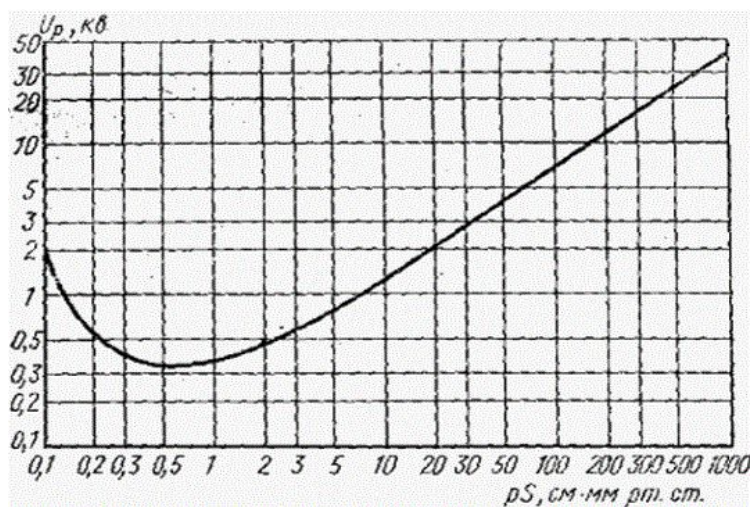


Рис.2 Кривая Пашена для воздуха

Таким образом были определены все величины для проведения эксперимента, согласно формуле равноускоренного перемещения:

$$x = \frac{IBl}{m} t^2, \quad (1)$$

$$m = \frac{PV_{\mu}}{RT}, \quad (2)$$

$$B = \frac{IN\mu_0}{d}, \quad (3)$$

где I – величина тока в цепи и дуге, B – магнитная индукция, m -масса дуги, l – расстояние между электродами, V – объем дуги(цилиндра), t – время одного кадра, x – величина перемещения, которое мы хотим зафиксировать, P – давление воздуха, d – высота катушки, N – число витков и константы такие как: магнитная постоянная, газовая постоянная и молярная масса воздуха.

В данной модели предполагается, что в начальный момент разряд не успевает нагреть заданный объем газа в начальный момент, поле однородным. В результате решения уравнений (1-3) было установлено, что для регистрации перемещения дуги разряда в согласованном магнитном поле питающей электромагнитной системы актуатора требуется обеспечить следующие параметры: $N = 100$, $I = 10$ А.

4. Постановка эксперимента

В работе рассмотрена модель магнито-плазменного актуатора на основе импульсного электрического разряда. Модель состоит из соленоида с поверхностью, на торце которого находятся точечные электроды, расстояние между которыми 10 мм. Магнитное поле можно считать однородным вблизи электродов. Дуга электрического разряда, реализованная на поверхности диэлектрика между точечными электродами, движется в согласованном магнитном поле под действием силы Ампера.

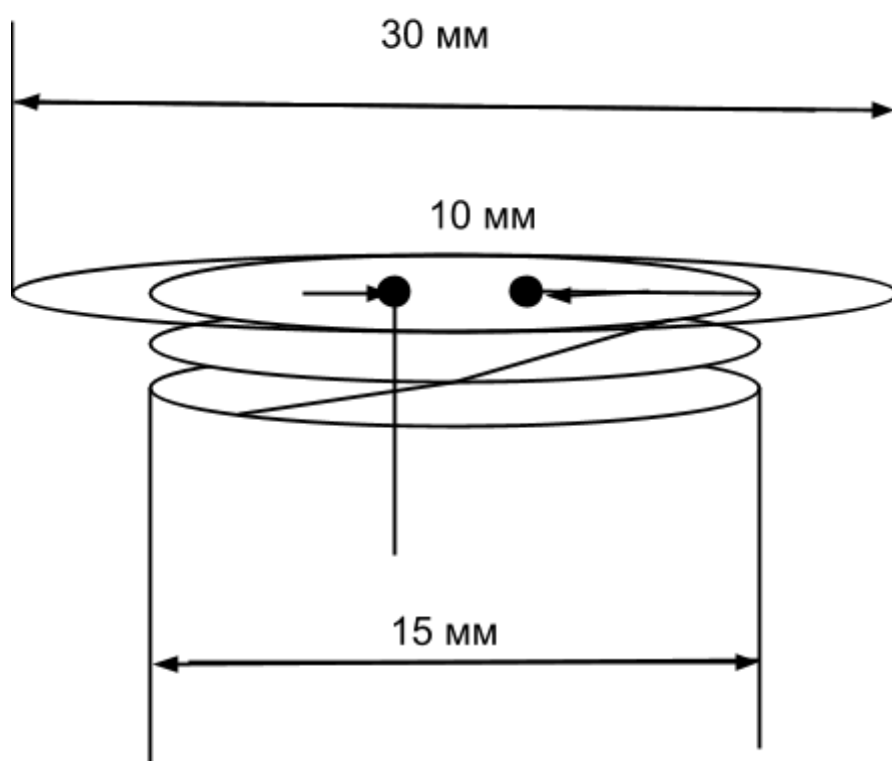


Рис.3 схема эксперимента

Для инициации разряда между электродами была использована длинная линия конденсаторов, позволяющая менять величину и длину импульса тока. К длинной линии конденсаторов последовательно подключена модель, которая находится под вакуумным колпаком. С помощью вакуумного насоса давление приводится к необходимой величине. Затем производится съемка разряда высокоскоростной камерой Photron Fastcam SA-Z. Измерение электрических параметров происходит с помощью трансформаторов тока, сигнал с которых поступает на осциллограф Tie-Pie HS4. Ток варьировался с помощью изменения величины нагрузки в линии. Измерение давления происходило с помощью вакуумметра Instrutech CVM211 "Stinger".

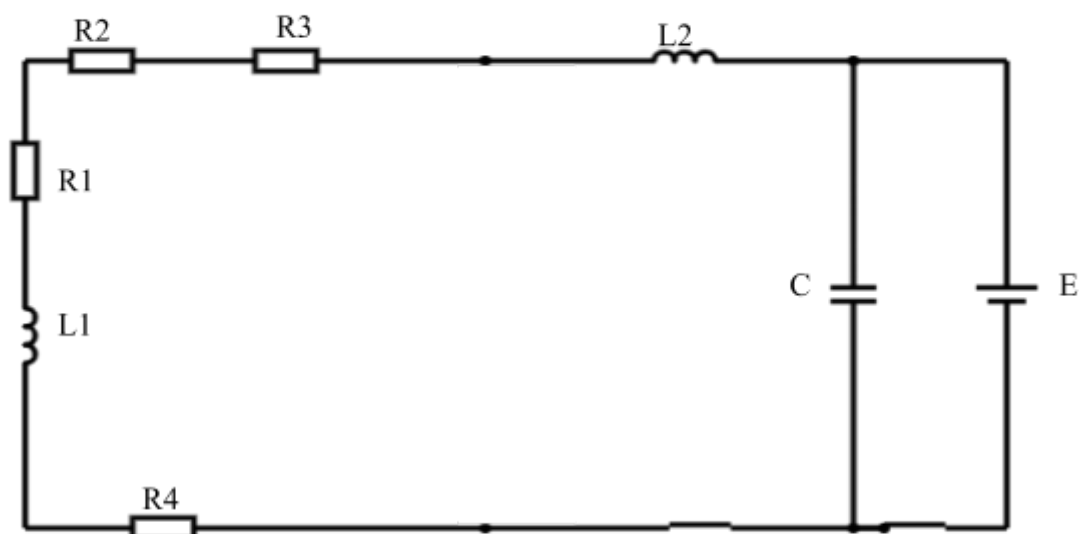


Рис.4 Эквивалентная электрическая схема экспериментального стенда. R1 - сопротивление дуги, L1 -индуктивность соленоида, C и L2 - длинная линия конденсаторов, R2, R3, R4 - нагрузочные сопротивления, E - ЭДС источника.

Давление воздуха и величина полного тока варьировались в диапазоне 1–12 кПа и 12–53 А соответственно. Для каждого давления были проведены по шесть экспериментов: три на каждую величину тока и еще три в другой проекции наблюдения. Смена проекции происходила путем изменения положения модели относительно оптической оси.

5.Результаты экспериментов

В ходе эксперимента были получены фотографии движения дуги разряда в магнитном поле, индуцируемом соленоидом. На рис. 4-6 приведены фотографии, показывающие характерное поведение дуги в магнитном поле. В верхнем ряду фотографий показано движение дуги разряда в магнитном поле при боковой проекции наблюдения (Рис. 4,а-в), а в нижнем ряду – соответствующие им фотографии движения дуги разряда в плане (Рис. 4, г-д).

На рис. 4 движение дуги происходит при давлении окружающего воздуха 12 кПа, на рис. 5 – при 6 кПа, на рис. 6 – при 1 кПа. На каждом рисунке показано движение дуги через 10 мкс после инициации разряда.

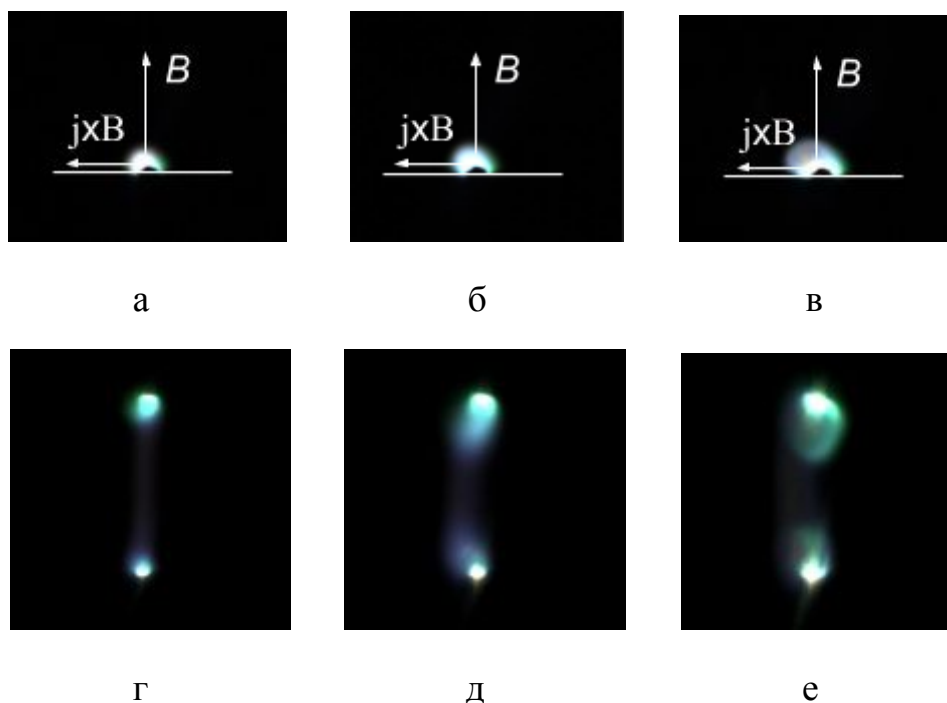


Рис. 5 Фотографии в момент пробоя при давлении 12 кПа
 вид сбоку: а - сила тока 12 А, б – сила тока 21 А, в – сила тока 53 А
 вид сверху: г - сила тока 12 А, д – сила тока 21 А, е – сила тока 53 А

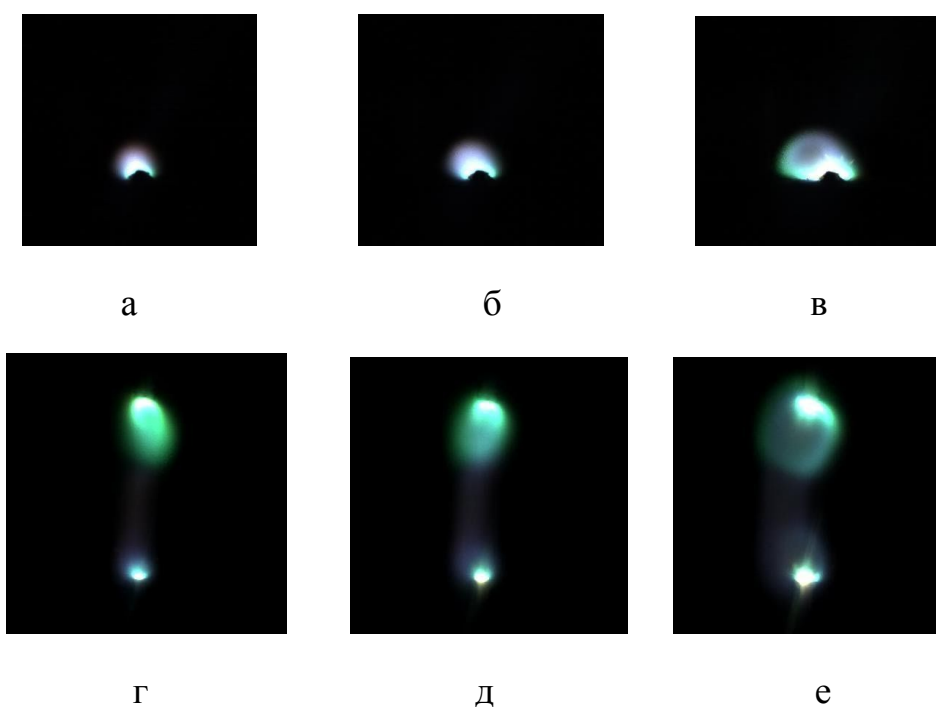


Рис. 6 Фотографии в момент пробоя при давлении 6 кПа
 вид сбоку: а - сила тока 12 А, б – сила тока 21 А, в – сила тока 53 А
 вид сверху: г - сила тока 12 А, д – сила тока 21 А, е – сила тока 53 А

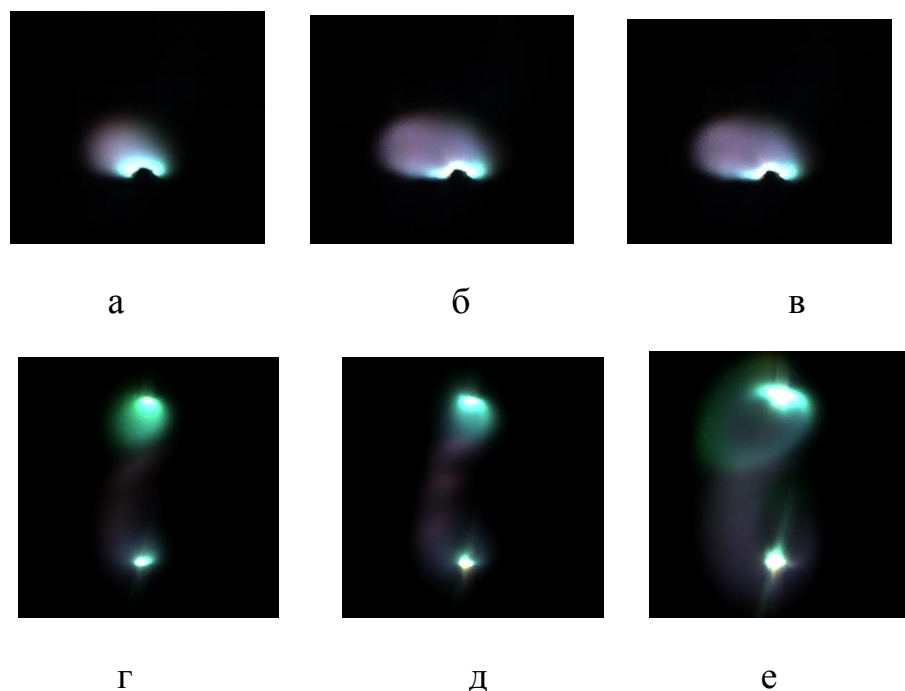


Рис. 7 Фотографии в момент пробоя при давлении 1 кПа

вид сбоку: а - сила тока 12 А, б – сила тока 21 А, в – сила тока 53 А

вид сверху: г - сила тока 12 А, д – сила тока 21 А, е – сила тока 53 А

Из рисунков 5–7 видно, что повышение величины электрического тока в цепи актуатора приводит к росту плотности тока разряда, а также к увеличению магнитной индукции индуцируемого катушкой магнитного поля в зоне электродов, что приводит к росту скорости перемещения дуги разряда под действием электромагнитной силы. Кроме того расширение области разряда может быть также связано с повышением величины плотности тока разряда, что приводит к более интенсивному выделению Джоулевого тепла j^2/σ . Видно, что в более интенсивном магнитном поле форма дуги разряда имеет значительное искажение, что может обуславливаться эффектом Холла. На рисунках видно, что с уменьшением давления воздуха в экспериментальной камере происходит расширение области разряда.

По перемещению переднего фронта разрядной области на фотографиях была произведена оценка скорости разряда. Анализ данных позволил получить зависимость скорости движения дуги от тока пробоя при разных давлениях воздуха (Рис. 8).

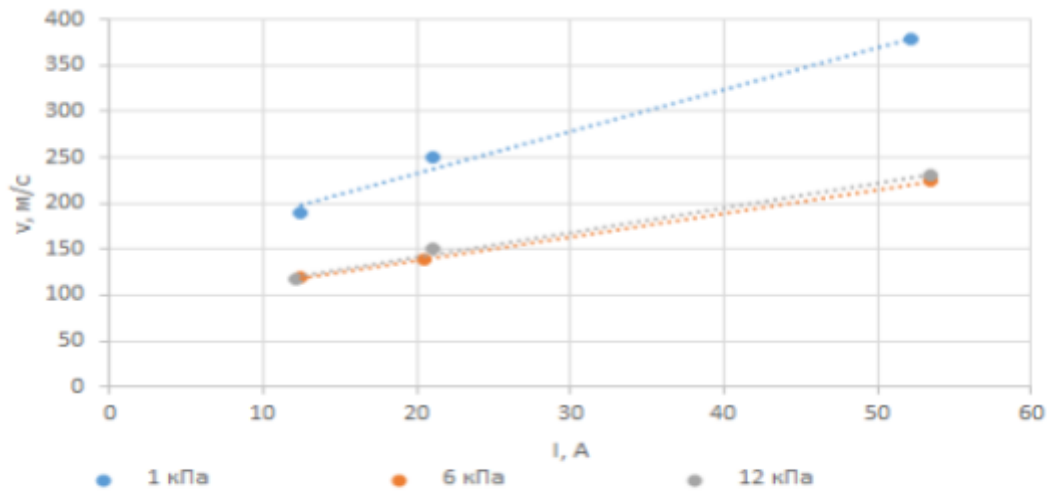


Рис. 8 график скорости переднего фронта дуги от силы тока

Из графика можно сделать вывод, что в заданном диапазоне экспериментальных параметров скорость дуги разряда в начальный момент практически линейно зависит от величины тока, что однако отличается от прогнозируемого характера движения дуги. Возможно, учет некоторых явлений таких как, сила сопротивления воздуха, позволит скорректировать полученные результаты расчетов.

6. Теоретическое описание движения дуги разряда в согласованном магнитном поле

По полученным фотографиям (рис. 5–7) стало очевидным, что геометрия дуги явным образом не совпадает с исходной моделью дуги в виде тонкого жгута, принятой при планировании эксперимента. Видно, что расширяющаяся дуга занимает четверть окружности в боковой проекции. С учетом геометрии разряда и силы сопротивления воздуха, скорость считается установившейся по всей дуге и обтекает, как без зазоров, в дополнение к уравнениям (1), (2), (3) изменение скорости дуги было представлено в следующем виде:

$$V = \frac{\pi}{4} r^2 l, \quad (4)$$

$$r = vt, \quad (5)$$

$$I^2 B l - \frac{\rho v^2 c}{2} V^{2/3} = ma, \quad (6)$$

$$v = \sqrt{\frac{2IBl}{V^{2/3} \rho c}}, \quad (7)$$

где V – величина объема дуги в время движения дуги пробоя, r – радиус расширяющейся круговой части дуги, c – коэффициент сопротивления воздуха. Формула (7) получена в приближении, что скорость дуги практически не изменяется, что следует из анализа фотографий движения разряда. Коэффициент сопротивления воздуха был получен экспериментально: был взят конкретный нормировочный эксперимент со средним током при среднем давлении, таким образом коэффициент оказался равен 3,5. Полученные формулы описывают скорость крайней части дуги с относительной точностью не более 50%. В результате были получены зависимости скорости дуги разряда от величины тока в цепи актуатора для различного давления воздуха. На рис. 9-11 показаны графики, полученные в экспериментах и с помощью теоретической оценки на базе уравнения (7).

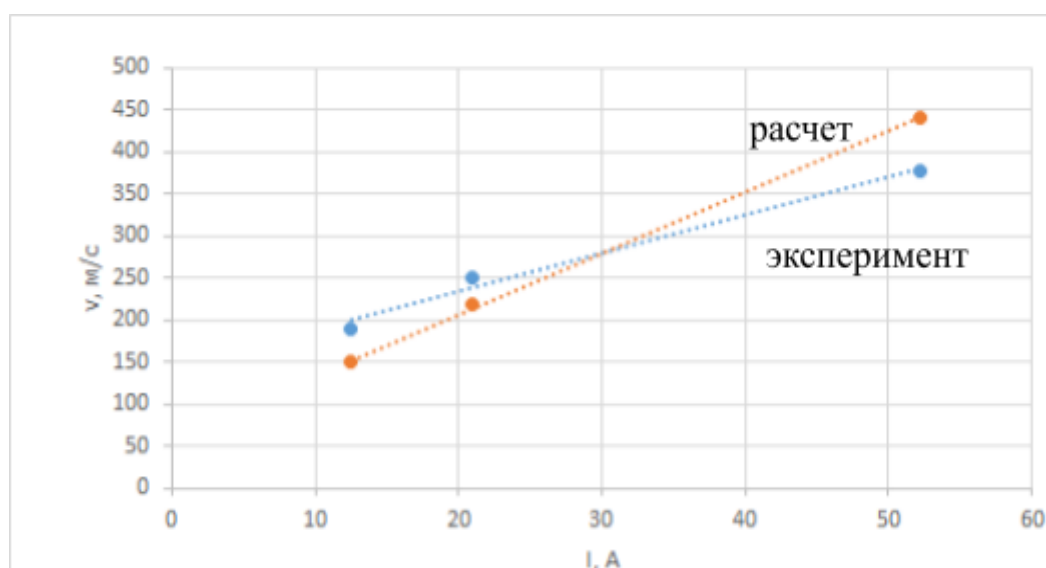


Рис. 9 Сравнение результатов теоретической оценки и экспериментальных для давления воздуха 1 кПа

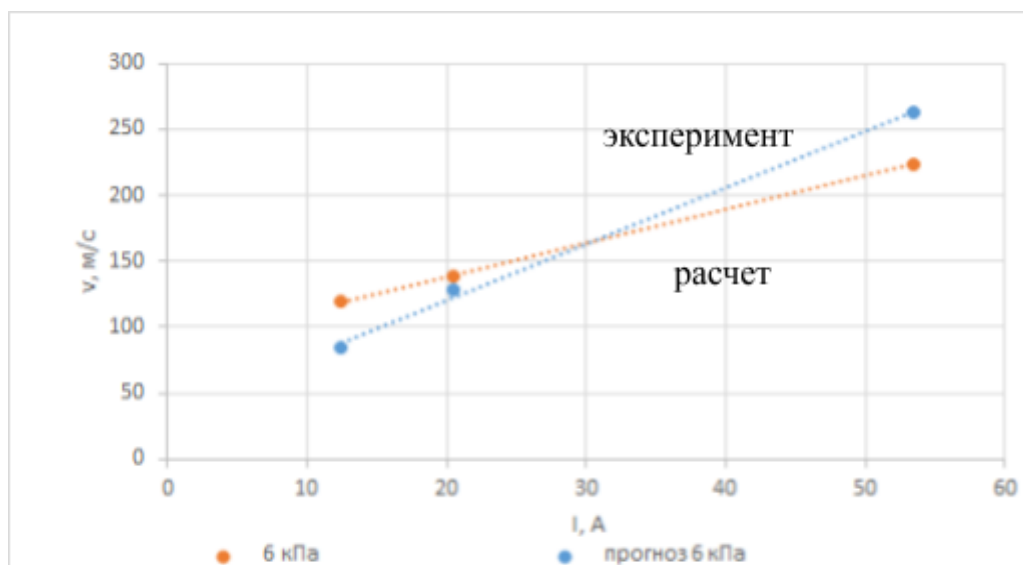


Рис. 10 Сравнение результатов теоретической оценки и экспериментальных для давления воздуха 6 кПа.

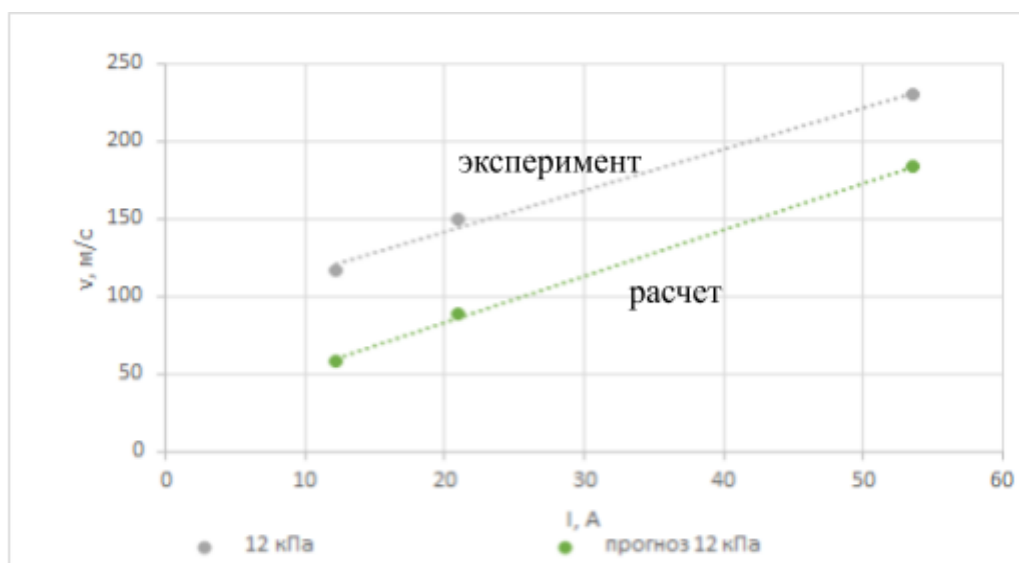


Рис. 11 Сравнение результатов теоретической оценки и экспериментальных для давления воздуха 12 кПа.

Теория расходится с экспериментом не более чем на 30% в случае если давление невелико, например, 1 кПа, 6 кПа. Отклонение на 50% случилось с экспериментом при 12 кПа. Вероятно, что использованная формула для расчета силы сопротивления воздуха начинает хуже описывать трение, так как скорости на которые она рассчитана должны быть околосвуковыми.

7. Выводы

1. Выполнена оценка электрических параметров эксперимента для обеспечения регистрации движения электрической дуги в магнитном поле соленоида, установленного в цепи разряда.
2. Проведены экспериментальные исследования работы магнито-плазменного актуатора в широком диапазоне параметров. Показана возможность практической реализации актуатора при различных давлениях газа вблизи диэлектрических поверхностей.
3. В результате анализа экспериментальных данных была предложена новая модель описания движения дуги разряда в согласованном магнитном поле с учетом динамики изменения геометрии разрядной области, а также сопротивления воздуха движению разряда.
4. Сопоставление результатов теоретических оценок и данных экспериментов показали, что при давлении ниже 12 кПа, формула достаточно адекватно описывает скорость дуги.

Предложенная модель показала себя со стороны того, что движение дуги возможно в самосогласованном поле. Также получена формула описывающая скорость с относительной точностью 50 %, причинами столь больших ошибок могут быть неучтенные эффекты, например, диффузное расширение тока, резкое изменение температуры и давления, возможно, более детальный расчет коэффициента сопротивления воздуха даст более точные результаты.

8. Литература

1. Курячий А. П., Русьянов Д. А., Скворцов В. В., Моделирование плазменных актуаторов при различном давлении газа и оценка их воздействия на сдвиговые течения // Ученые записки ЦАГИ. 2011 г., Т. 42, №2, с. 68-79.
2. Актуаторы. Виды и устройство. Работа и применение. Особенности // электронный ресурс: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrooborudovanie/ustrojstva/aktuatory/>
3. Линейные актуаторы - основные положения, как работает линейный актуатор // электронный ресурс: <http://www.linearmotion.ru/article-basics.html>