

УДК 519.63:533.9.07

В.О. ГАРИН, Ю.А. БОГОСЛАВЕЦ*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ТЕРМОКАТОДА
В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПЛАЗМОТРОНЕ**

На основе математического моделирования вихревого течения и критерия обеспечения докритического значения парциального давления активных газов исследуется эффективность защиты термокатода в катодном узле электродугового плазмотрона. Показано, что основным фактором, влияющим на состав атмосферы вблизи катода, является формирование пристеночного течения от вихревой камеры в сторону термокатода. Для оптимизации режимов подачи защитного газа предлагается использовать численный эксперимент на основе разработанных математических моделей.

Ключевые слова: *плазмотрон, полый катод, термоэмиссия, математическое моделирование, отравление, газодинамические характеристики, вихревое течение.*

Введение

Применение композиционных материалов в авиастроении и постановка проблемы. Увеличение применения композиционных материалов (КМ) в авиационной промышленности делает актуальной задачу утилизации изделий из них. Традиционные методы сжигания отходов для ее решения неприменимы, так как при таком способе утилизации КМ образуются крайне токсичные вещества. Одним из перспективных направлений в данной проблеме является применение плазменных технологий. Недостатком применения плазменных установок для утилизации является их недостаточная надежность и малый ресурс. В работе [1] в качестве наиболее перспективного способа повышения ресурса электродуговых плазмотронов предложено использовать катодные узлы с термокатадами, изготовленными с применением новых эмиссионных материалов, стойких к отравлению атмосферным воздухом. Режимы подачи защитного газа при этом должны назначаться исходя из условия обеспечения докритического парциально давления воздуха. Однако вопросы, связанные с выработкой рекомендаций по параметрам режима подачи защитного газа для существующих электродуговых плазмотронов до настоящего времени не рассматривались.

Анализ последних исследований и публикаций. Среди современных конструкций плазмотронов, предназначенных для нагрева газа, наиболее перспективными с точки зрения обеспечения ресурса являются плазмотроны с секционированным катодным узлом. Идея применения секционированного катодного узла для плазмотронов, работающих на

агрессивных газах, была впервые высказана в работах В.Л. Дзюбы [1]. Такой плазмотрон состоит из термокатода, помещенного в охлаждаемый катододержатель и секционированного канала (рис. 1). Рабочий газ подается через тангенциальные отверстия в вихревой камере плазмотрона, которая находится между переходной секцией и анодным узлом, а защитный – через такие же тангенциальные отверстия в вихревых камерах, расположенных между секциями.

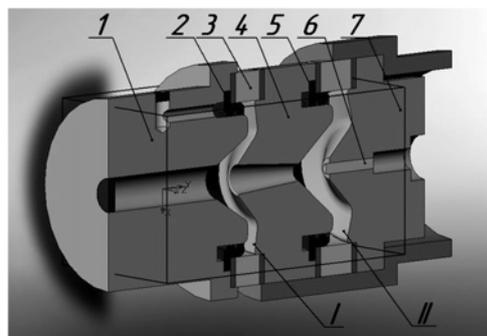


Рис. 1. Модель плазмотрона:
1 – анодный узел; 2 – вихревая камера подачи воздуха; 3 – изоляторы; 4 – переходная секция;
5 – вихревая камера подачи аргона;
6 – термокатод; 7 – катододержатель

В работе [2] приведены данные экспериментальных исследований течения в полости катодного узла. В ходе экспериментов определялись профили статического давления на различных поверхностях исследуемой модели. Однако на основании таких измерений трудно судить об эффективности защиты термокатода, поскольку она определяется составом атмосферы у эмиссионной поверхности.

Дополнительной трудностью является то, что для большинства эмиссионных материалов критические значения парциального давления воздуха находятся в диапазоне $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Па. Это требует использования для определения состава атмосферы высокоточных измерительных средств.

Проведение таких экспериментов является достаточно трудоемким процессом. Более эффективными могут быть методы численного эксперимента, которые при применении современных интегрированных CAD/CAE систем позволяют получать не только большой объем информации, но и имеют широкие возможности ее анализа, в том числе при варьировании геометрических параметров модели.

Целью работы является анализ эффективности защиты термокатода в базовой конструкции несекционированного катодного узла на основе численного моделирования и критерия обеспечения докритического парциального давления активных газов.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Описание решаемой задачи и используемых математических моделей.

Объектом исследования является базовая модель плазматрона, включающая катодный и анодный узлы, разделенные двумя вихревыми камерами подачи аргона и воздуха и переходной секцией (рис. 1). Аргон подается в прикатодное пространство II (расход аргона $G_{Ar} = 5 \times 10^{-5}$ кг/с) через четыре тангенциальных отверстия в вихревой камере. Воздух подавался в секционный канал I (расход воздуха $G_B = 5 \times 10^{-4}$ кг/с) вихревой камеры.

При определении фракционного состава при совместной подаче аргона и воздуха использовалась модель однофазного двухкомпонентного течения. Для определения состава смеси при совместной подаче аргона и воздуха математическая модель дополнялась уравнением концентрации:

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \text{grad } c = \text{div}(\rho(D + \mu_T) \text{grad } c),$$

где μ_T – динамический коэффициент турбулентной вязкости, c – массовая концентрация.

Так как характеристики отравляемости эмиссионных материалов обычно строят в зависимости от парциального давления воздуха, полученные значения массовой концентрации использовались для определения парциального давления компонент смеси. Оценка эффективности защиты термокатода велась на основе критерия обеспечения докритического значения давления воздуха

$$P_B = \frac{cP \mu_{Ar}}{c\mu_{Ar} + (1-c)\mu_B} \leq P_{кр}.$$

2. Исследование многокомпонентного течения.

На первом этапе проводилось моделирование многокомпонентного течения при подаче аргона и воздуха через вихревые камеры.

Для дискретизации расчетной области, заключенной в полости модели плазматрона, включая определение поверхностного слоя и специальных регионов входов и выхода, использованы параллелепипеды (рис. 2).

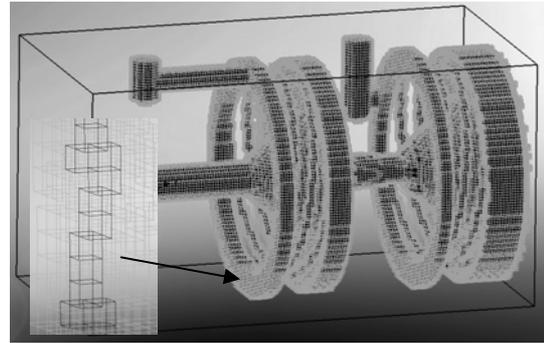


Рис. 2. КЭ модель внутренней полости плазматрона

В рассматриваемом плазматроне, при диаметре сливного отверстия анода $d=8$ мм, начинают образовываться зоны циркуляционного течения (рис. 3).

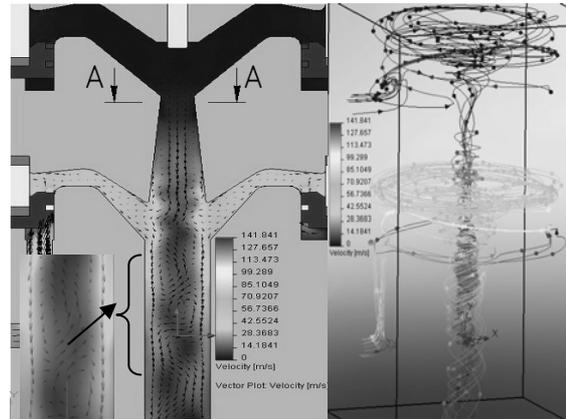


Рис. 3. Течение газа по оси плазматрона при диаметре сливного отверстия 8 мм

На рис. 4 показан график распределения скорости течения газов по радиусу в сечении А-А.

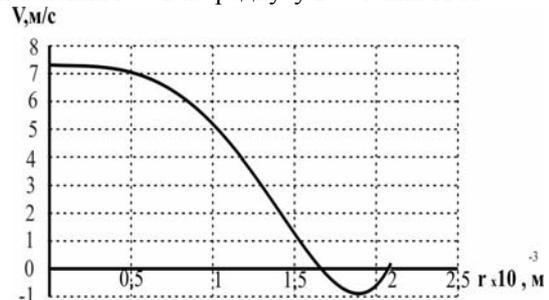


Рис. 4. Распределение осевой компоненты скорости течения газов в плазматроне при диаметре сливного отверстия $d=8$ мм

Для защиты термокатода такой характер течения в полости катодного узла является нежелательным, так как способствует проникновению в прикатодное пространство газов из вихревой камеры подачи воздуха (графики распределения скорости течения газов по радиусу в сечении А-А представлены на рис. 4).

Для оценки степени эффективности защиты термокатода при расходе аргона и воздуха: $G_{Ar} = 5 \times 10^{-5}$ кг/с, $G_B = 5 \times 10^{-4}$ кг/с и диаметре сливного отверстия анода $d = 8$ мм был рассчитана массовая концентрация воздуха в прикатодном пространстве (рис. 5).

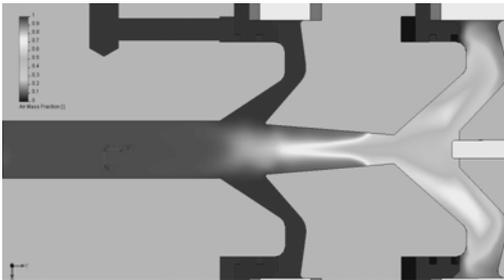


Рис. 5. Распределение массовой концентрации воздуха в канале плазмотрона

На основании полученных результатов были построены графики распределения парциального давления по оси плазмотрона (рис. 6). Для данного плазмотрона массовая концентрация воздуха около термокатода составила 0,371, что соответствует парциальному давлению 1,35 Па. Такое значение парциального давления более чем в 100 раз превосходит предельные значения для всех известных термоэмиссионных материалов. Поэтому ресурс данного термокатода будет небольшим.

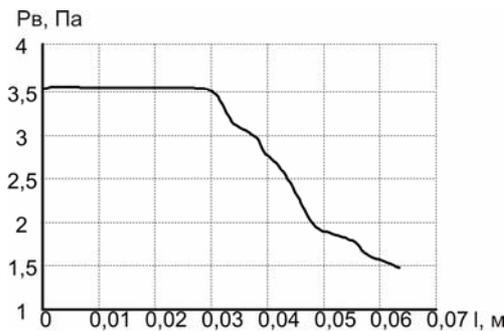


Рис. 6. Распределения парциального давления по оси плазмотрона при $d = 8$

С целью изучения влияния сливного отверстия на величину парциального давления вблизи термокатода был проведен ряд дополнительных расчетов. При диаметре сливного отверстия анода $d = 5$ мм, в сечении А-А зона с циркуляционным течением отсутствует (рис. 7).

На рис. 8 показан график распределения осевой компоненты скорости течения газов по радиусу в сечении А-А. Распределение массовой концентрации воздуха в канале плазмотрона для этого случая приведено на рис. 9. На основании полученных результатов были построены графики распределения парциального давления по оси плазмотрона (рис. 10).

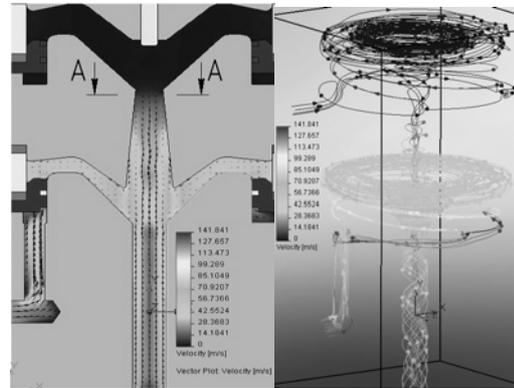


Рис. 7. Течение газа по оси плазмотрона при диаметре сливного отверстия 5 мм

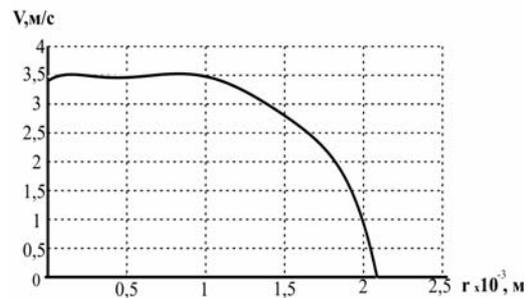


Рис. 8. Распределение осевой компоненты скорости течения газов в плазмотроне при диаметре сливного отверстия $d = 5$

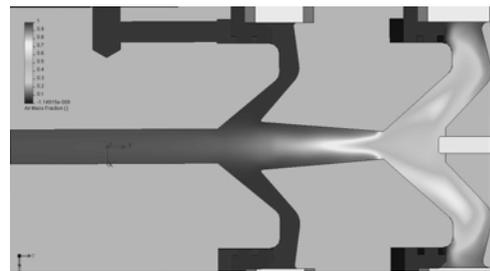


Рис. 9. Распределение массовой концентрации воздуха в канале плазмотрона

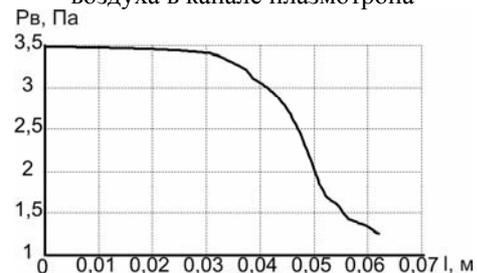


Рис. 10. Распределения парциального давления по оси плазмотрона при $d = 5$

Несмотря на то, что величина парциального давления уменьшилась до 1,26 Па, она все равно превышает максимально допустимое значение для термокатодов (0,001–0,01 Па). Для уменьшения величины парциального давления, для данной конструкции, необходимо увеличить $G_{\text{ДГ}}$, что может оказаться экономически невыгодным. Обеспечить эффективную защиту термокатода можно при переходе к конструкции с секционированным катодным узлом.

Заключение

Показано, что основным фактором, влияющим на состав атмосферы вблизи катода в плазмотроне с вихревой подачей газа, является формирование пристеночного течения от вихревой камеры в сторону термокатода. При увеличении диаметра сливного канала происходит смещение границы формирования пристеночного течения в сторону вихревой камеры. Для более эффективной защиты термокатода целесообразно применять секционированный катодный узел.

Работа выполнена при поддержке Государственного Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта Ф25.4/112.

Литература

1. Дзюба В.Л. *Обобщение экспериментальных и теоретических исследований по созданию высоко-ресурсных электротермических плазменных генераторов: Дис... д-ра техн. наук: защищена 05.09.10. / Дзюба Вячеслав Леонидович. – Коммунарск, 1989. – 401 с.*
2. Дзюба В.Л. *Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В.Л. Дзюба, К.А. Корсунов. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2007. – 448 с.*
3. Кривцов В.С. *Проблемы создания высокоресурсных сильноточных электродуговых плазмотронов / В.С. Кривцов, С.И. Планковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – №7(23). – С. 7-51.*
4. Кривцов В.С. *Газодинамічні характеристики потоку інертного газу в каналі плазмотрона / В.С. Кривцов, С.І. Планковський, Є.В. Цегельник, Є.К. Островський, А.О. Таран, А.В. Лоян // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – К., 2006. – Вып. 2. – С. 87-99.*
5. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. — 840 с.*

Поступила в редакцию 14.11.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии машиностроения С.С. Добротвоский, Национальный технический университет "Харьковский Политехнический Институт", Харьков.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ ТЕРМОКАТОДА В ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ ПЛАЗМОТРОНІ

В.О. Гарін, Ю.А.Богославець

На основі математичного моделювання вихрової течії та критерію забезпечення до критичного значення парціального тиску активних газів досліджується ефективність захисту термокатода в катодному вузлі електродугового плазмотрона. Показано, що основними факторами, які впливають на склад атмосфери поблизу катода, є формування пристіночної течії від вихрової камери до сторони термокатода. Для оптимізації режимів подачі захисного газу пропонується використовувати численний експеримент на основі розроблених математичних моделей.

Ключові слова: плазмотрон, порожнистий катод, термоемісія, математичне моделювання, отруєння, газодинамічні характеристики, вихрова течія

ESTIMATION OF THE THERMOCATHODE PROTECTION EFFICIENCY IN ELECTROARC PLASMOTRON

V.O. Garin, Y.A. Bogoslavets

The efficiency of thermocathode protection in cathode unit of electroarc plasmotron is being analyzed with the help of mathematical simulation of vortex flow and the assurance criteria for subcritical value of partial pressure. It's shown that the main factor, affecting the atmosphere composition near the cathode, is a parietal flow formation from the vortex camera to thermocathode. The numerical experiment, performed on the basis of developed mathematical models, suggested for optimisation of protective gas supply modes.

Key words: Plasmotron, hollow cathode, thermionic emission, mathematical simulation, poisoning, gas-dynamic behavior, vortex flow.

Гарин Вадим Олегович – младший научный сотрудник кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Garin.Vadim@gmail.com.

Богославец Юрий Анатольевич – магистр кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.