

11, ноябрь 2015

УДК 621.793.72

Тепловое состояние элементов конструкции вакуумного дугового испарителя

Ван Гуоянь, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

***Научный руководитель:** Кириллов Д.В., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

kirillovdy@bmstu.ru

Введение

Метод вакуумного дугового осаждения покрытий (катодно-дуговое осаждение) - физический метод нанесения тонких плёнок в вакууме путём конденсации на подложку материала из плазменных потоков, генерируемых из катода-мишени вакуумной дуги сильноточного низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала электрода [1]. Метод используется для нанесения металлических, полупроводниковых, керамических и композитных пленок на различные изделия [1, 2].

Главным недостатком вакуумно-дугового метода получения пленок и покрытий является наличие в плазме разряда капельной фазы [1, 2]. Микрокапли снижают эксплуатационные характеристики функциональных покрытий. Долю капельной фазы в потоке можно уменьшить с помощью магнитных и электростатических сепараторов плазмы [1, 2] и путём управления движением катодных пятен по поверхности катода [1, 2]. В то же время на процессы генерации капельной фазы значительное влияние оказывают теплофизические характеристики материала катода и условия горения разряда, в частности температура рабочей поверхности катода [1, 2, 3]. Таким образом, одним из направлений, позволяющих снизить долю капельной фазы, является изучение и оптимизация условий охлаждения катода дугового испарителя. Интересен также вопрос теплового состояния других элементов конструкции с целью оптимизации существующих технических решений.

Целью работы является моделирование теплового состояния элементов конструкции торцевого вакуумного дугового испарителя с магнитной системой,

создающей на поверхности катода расходящееся магнитное поле. В частности, необходимо оценить температуру рабочей поверхности катода. Подобный расчёт даст оценку эффективности системы охлаждения дугового испарителя.

Методика расчёта и моделирования

В качестве устройства, в котором моделируются тепловые поля, был взят серийный стационарный торцевой вакуумный дуговой испаритель с расходящимся осесимметричным магнитным полем. Диаметр дискового катода 78 мм, толщина 30 мм (рис. 1). Катод и анод охлаждались водой, анод был выполнен в виде конуса, посредством которого устройство крепилось к вакуумной камере. Анод с вакуумной камерой имел прямой электрический контакт, таким образом, анод имел потенциал заземлённой камеры, таким образом, анодом так же являлась вся вакуумная камера.

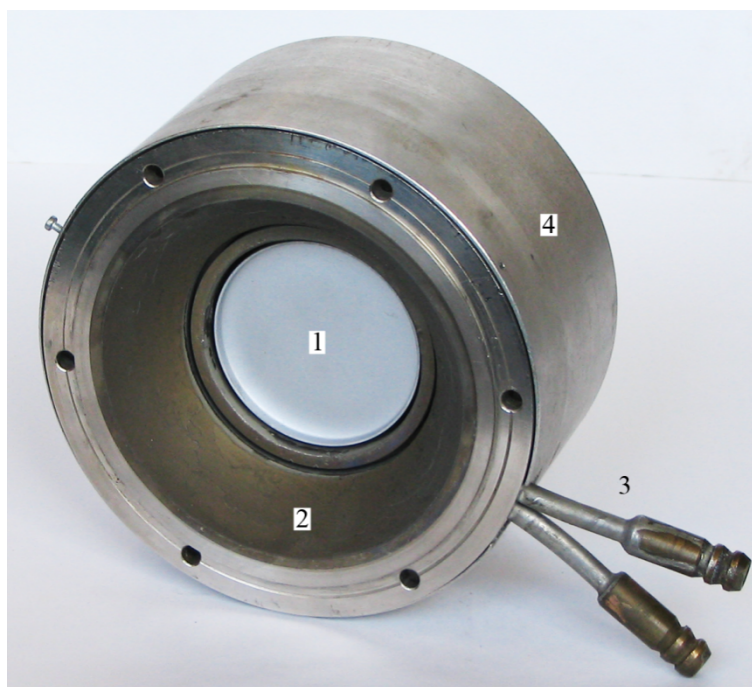


Рис. 1. Вакуумный дуговой испаритель, для которого производилось моделирование теплового состояния: 1 – катод; 2 – анод; 3 – трубки охлаждения; 4 - кожух

Катодные пятна непрерывно перемещаются по рабочей поверхности катода, испаря материал катода [1] и тем самым нагревая его. С поверхности катода идёт поток электронов и испарённого вещества в ионизированном состоянии. Ток электронов приходит на анод, передавая ему значительное количество тепла. Таким образом,

наиболее теплонапряженными элементами конструкции являются катода и анод дугового испарителя. При этом катод нуждается в максимально хорошем охлаждении для снижения интенсивности образования микрокапель.

Расчёт теплового состояния элементов вакуумного дугового испарителя проводился методом конечных элементов в среде SOLIDWORKS Flow Simulation. Метод конечных элементов – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Область, в которой ищется решение дифференциальных уравнений, разбивается на конечное число элементов путём создания расчётной сетки. В каждом из элементов задаётся вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Значения функций на границах элементов (в узлах сетки) неизвестны и являются решением задачи. Дифференциальные уравнения, описывающие физические процессы, записываются как система алгебраических линейных уравнений. Количество уравнений соответствует количеству неизвестных значений в узлах расчётной сетки. Решение задачи начинается с граничных элементов, где заданы граничные условия.

Физические процессы передачи тепла учитывались с помощью уравнения стационарной теплопроводности Фурье [1]:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS d\tau, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q – количество переданного тепла, Дж; T – поле температур, К; dS – приращение площади, м²; n – направление вектора нормали; τ – переменная времени.

Переходные процессы описываются уравнением нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T, \quad (2)$$

где $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ – коэффициент температуропроводности (ρ – плотность, c_p – удельная теплоёмкость среды); T – поле температуры; τ – переменная времени.

Поле скоростей охлаждающей жидкости было получено решением уравнения Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \tau} = -(\bar{v} \cdot \nabla) \bar{v} + \nu \Delta \bar{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{f}, \quad (3)$$

где τ — переменная времени, ρ — плотность среды, p — поле давлений, v — векторное поле скоростей, f — векторное поле массовых сил.

Процессы лучистого теплообмена учитывались согласно закону Стефана-Больцмана:

$$q_{изл} = \varepsilon \sigma_s T^4 S, \quad (4)$$

где $q_{изл}$ — удельный поток тепла; ε — степень черноты серого тела; σ_s — постоянная Стефана-Больцмана; T — температура поверхности тела; S — площадь.

Для проведения расчёта была построена упрощённая геометрическая модель вакуумного дугового испарителя, где были удалены мелкие детали, такие как крепёж, и упрощены детали со сложной геометрией (рис. 2). Подобные упрощения незначительно влияют на результаты расчёта, но значительно позволяют упростить задачу и сократить время вычислений.

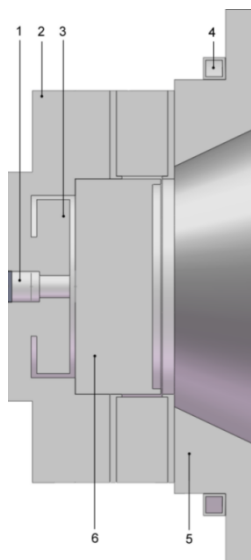


Рис. 2. Упрощенная модель вакуумно-дугового испарителя: 1, 5 — каналы водяного охлаждения; 2 — рубашка охлаждения; 3 — магнитная система; 4 — нейтральная вставка; 6 — анод; 7 — катод

Для решения уравнений численными методами была построена начальная расчётная сетка (рис. 3а). Элемент сетки имел вид параллелепипеда размером 6,5×6,5×5,0 мм. В процессе расчёта для уменьшения погрешности проводилось уточнение расчётной сетки в областях с максимальным градиентом целевых параметров. Окончательный вид расчётной сетки приведён на рис. 3б. По результатам расчёта были

построены поля температур в элементах дугового испарителя, а так же линии тока и распределение температуры охлаждающей жидкости.

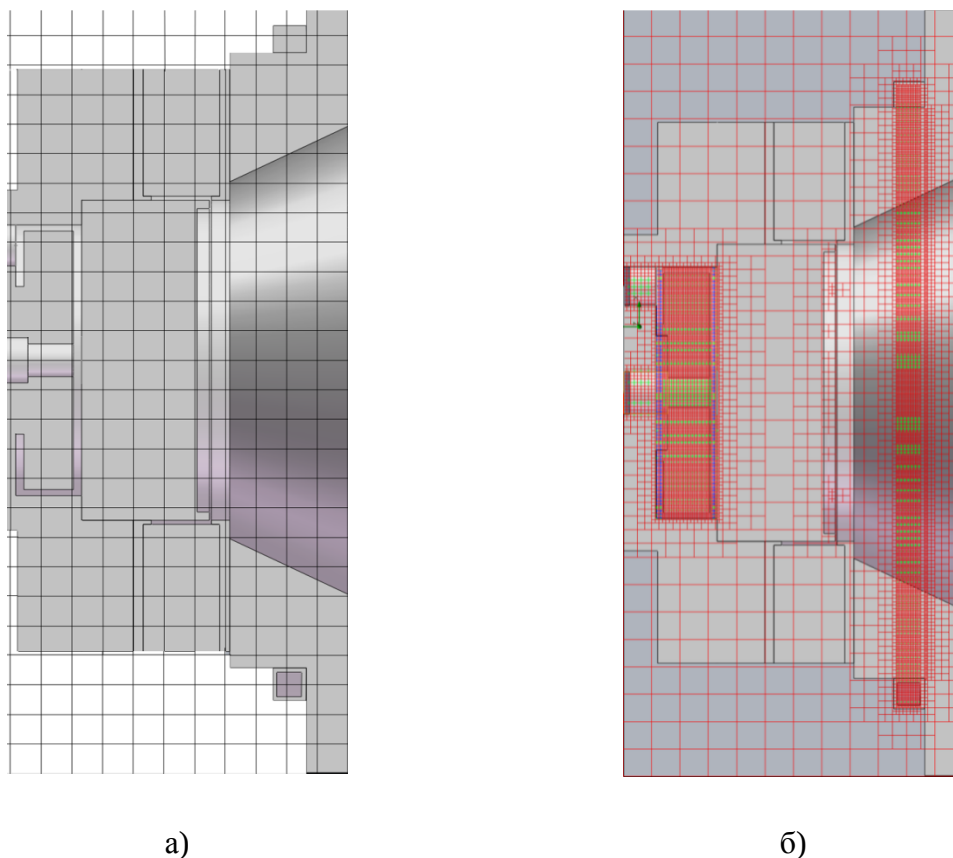


Рис. 3. Расчётная сетка для проведения теплового расчёта методом конечных элементов: а) начальная расчётная сетка; б) уточненная расчётная сетка

Для реализации теплового расчёта в системе были заданы следующие граничные условия (рис. 4):

- температура воды на входе в систему охлаждения катода: $T_{\text{вх}}=15^{\circ}\text{C}$,
- массовый расход воды на входе: $G_{\text{к вх}} = 0,1 \text{ кг/с}$;
- давление воды на выходе: $p_{\text{вых}}= 10^5 \text{ Па}$;
- степень черноты изучающих поверхностей анода 0,8;
- степень черноты рабочей поверхности катода 0,5;
- температура стенки охлаждаемой части анода $T_{\text{вх}} = 15^{\circ}\text{C}$.

Начальная температура для всех элементов конструкции принята равной 20°C . В качестве материала для катода был принят титан, для остальных элементов конструкции - нержавеющая сталь 12X18H9 (AISI 302). Материал изоляторов - фторопласт.

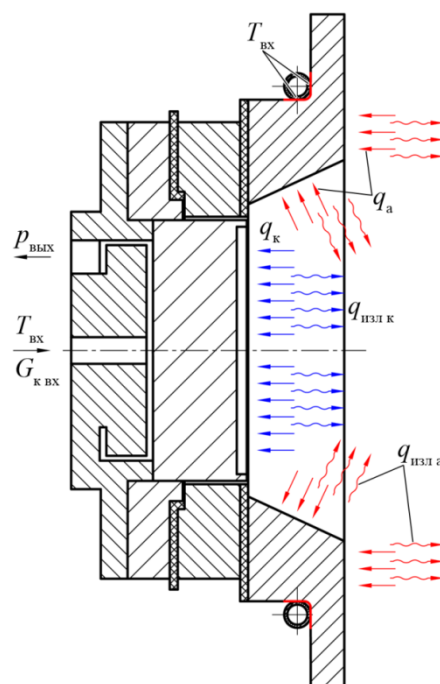


Рис. 4. Граничные условия для моделирования теплового состояния дугового испарителя: $q_{изл\ к}$, $q_{изл\ а}$ – тепловой поток излучения с поверхности катода и анода соответственно; $q_{к}$ – тепловой поток, поступающий на катод; $q_{а}$ – тепловой поток, поступающий на анод

В работе [13, 2] сообщается, что тепловая мощность, отводимая в титановый катод, составляет 20-30 % от электрической мощности разряда. В расчёте примем среднюю величину доли тепла, отводимого в катод 25 %. Для расчёта был взят типичный режим работы дугового испарителя: ток разряда 100 А при напряжении разряда 18 В. Таким образом, подводимая к рабочей поверхности катода мощность составляет

$$Q_{к} = 0,25 \cdot U_{р} \cdot I_{р} = 0,25 \cdot 18 \cdot 100 = 450 \text{ Вт} \quad (5)$$

В установках вакуумного дугового напыления в качестве анода часто выступает вакуумная камера. Однако, не редки случаи, когда появляется анодная привязка, и большая часть мощности выделяется на небольшом участке анодной привязки, нагревая локальные участки до 200°C и более. Возьмём крайний, самый жёсткий режим работы установки, и примем, что остальная часть мощности выделяется на аноде. Поток мощности распределён по открытой электронам плазмы поверхности равномерно, и теплового контакта анода с массивной вакуумной камерой нет:

$$Q_a = 0,75 \cdot U_p \cdot I_p = 0,75 \cdot 18 \cdot 100 = 1350 \text{ Вт} \quad (6)$$

Для упрощения расчёта примем, что тепловой контакт между анодом и напаянной трубкой охлаждения хороший, и температура в зоне контакта соответствует температуре охлаждающей воды, то есть 15°C.

При моделировании теплового состояния устройства так же учитывались радиационные процессы теплообмена. С некоторым допущением было принято, что излучение происходит только с двух наиболее нагретых поверхностей: рабочая поверхность катода и поверхность анода, обращённая к вакууму.

Результаты

Особенность используемого программного комплекса в том, что любая задача представляется нестационарным процессом. Расчёт ведётся от начального невозмущённого состояния до установившегося стационарного режима с заданными граничными условиями. Критериями установившегося стационарного режима для нашего случая можно взять среднюю температуру поверхности катода, среднюю температуру поверхности анода и среднюю температуру охлаждающей воды на выходе из системы охлаждения катода (рис. 5). Считалось, что процесс установившийся, когда изменение целевых параметров составляло не более чем 0,5 % от средней величины параметра.

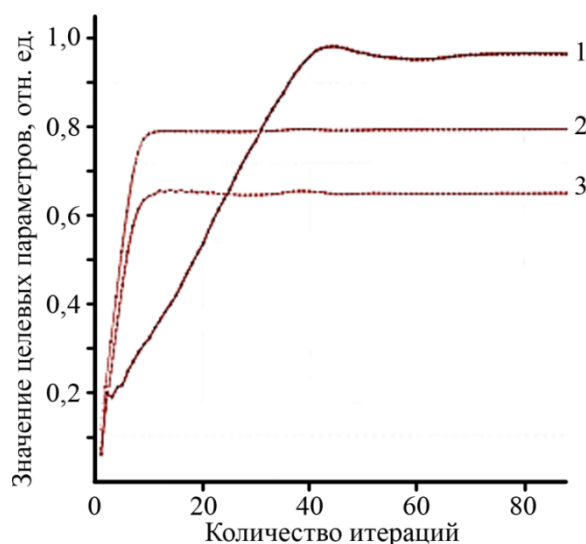


Рис. 5. Изменение целевых параметров расчёта в процессе установления стационарного состояния системы: 1 – температура внутренней поверхности анода; 2 – температура поверхности катода; 3 – средняя скорость потока воды на выходе

Окончательные результаты моделирования распределения теплового состояния устройства представлены на рис. 6. Линии тока охлаждающей воды и её температура представлены на рис. 7.

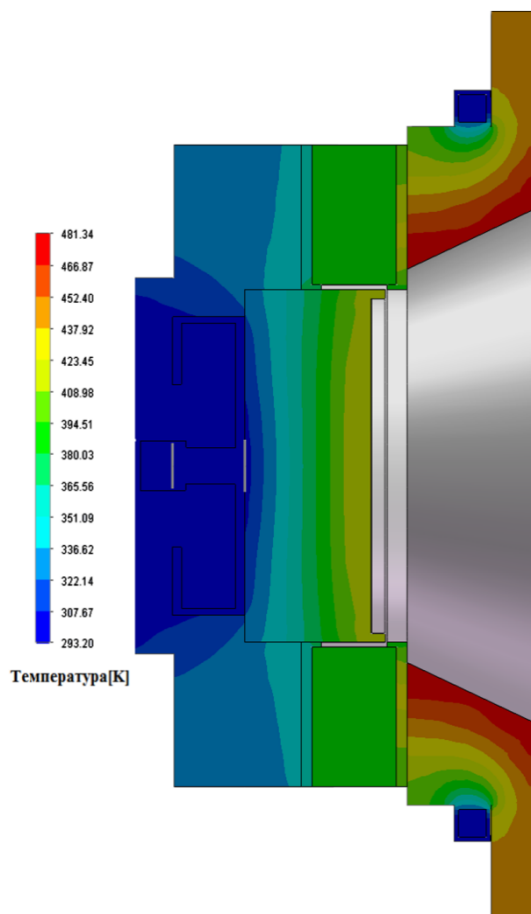


Рис. 6. Поле температур в элементах вакуумного дугового испарителя.

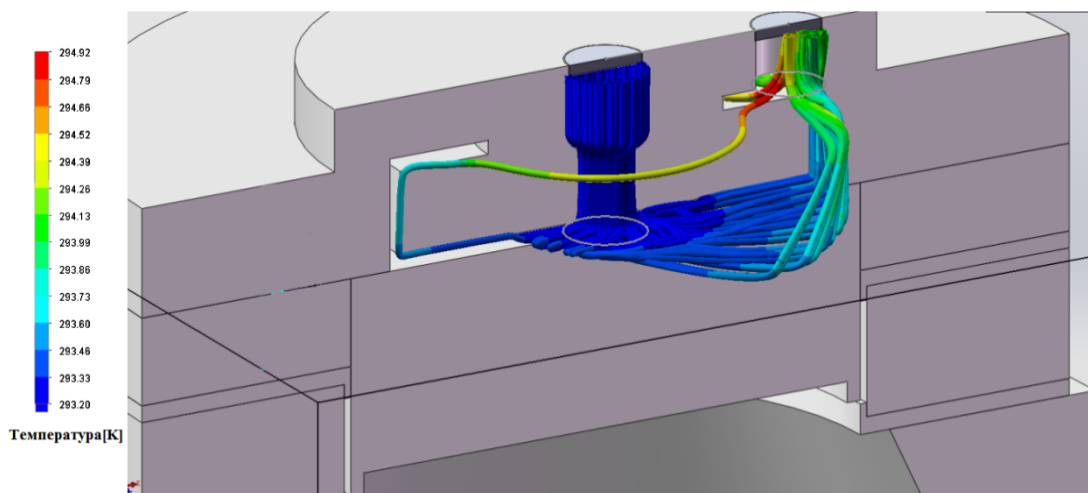


Рис. 7. Линии тока охлаждающей жидкости и её температура

Таким образом, можно определить, что средняя температура поверхности катода составляет 127 °С, максимальная и минимальная температура составляет соответственно 140 °С и 163 °С. Максимальная температура поверхности анода достигает 208°С. Температура в области расположения резиновых уплотнений составляет 170°С и 150°С. Рабочая температура наиболее распространённых сортов резины, подходящих для вакуумных уплотнений, составляет не более 120°С. Таким образом, в случае привязки всего электронного тока к аноду или в случае отказа использовать в качестве анода вакуумную камеру необходимо использовать резиновые уплотнения группы 6 с максимальной рабочей температурой до 200° С. Так же понадобится корректировать охлаждение анодного узла. Отметим, что в реальных условиях работы устройства анод является холодным, а тепло распределяется относительно равномерно по всей поверхности вакуумной камеры.

При заданном расходе и геометрии каналов максимальная скорость воды составляет 2,5 м/с в районе входного патрубка. Скорость потока воды на периферии катода минимальна и составляет 0,3 м/с вследствие большей площади сечения канала. Интенсивность теплообмена зависит от типа течения воды. Критерий Рейнольдса при течении воды от центра катода к периферии уменьшается от 4100 до 450, что говорит о том, что поток в центре катода поток турбулентный, а на периферии – ламинарный. Однако, поверхность катода, имеющая контакт с водой имеет максимальную температуру 43 °С, что говорит об отсутствии вскипания воды в пограничном слое. Следовательно, охлаждение катода достаточно для продолжительной работы испарителя.

Выводы

В работе был проведён тепловой расчёт серийного образца вакуумного дугового испарителя. Расчёт проводился с помощью программного комплекса SOLIDWORKS Flow Simulation методом конечных элементов. Получены температурные поля в элементах вакуумно-дугового испарителя, поля скоростей и температуры охлаждающей воды. В качестве граничных условий были взяты параметры, характерные для типичного режима работы испарителя. Показано, что рабочая поверхность катода устройства нагревается до максимальной температуры 163 °С при средней температуре 127 °С, при этом температура поверхности анода на локальных участках достигает 208 °С. Показано, что приведённая схема охлаждения анода не обеспечивает достаточное охлаждение анода в крайнем случае отказа от использования в качестве анода вакуумной камеры и передачи аноду 75% разряда.

Результаты работы могут быть полезны при дальнейшей оптимизации конструкции устройств, а так же при разработке новых устройств в дополнение к имеющейся методике аналитического расчёта охлаждения энергетических установок. Данные и методика по оценке температуры рабочей поверхности катода могут быть востребованы в работах по исследованию влияния условий охлаждения катода на процессы генерации микрокапельной фазы в катодном пятне вакуумного дугового разряда.

Список литературы

1. Дороднов А.М. Некоторые применения плазменных ускорителей в технике // Физика и применение плазменных ускорителей: сб. под ред. А.И. Морозова. Минск: Издательство «Наука и техника», 1974. С. 330-365.
2. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Мелик-Парсаданян А.К., Пархоменко Ю.Н. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 9. С. 22-27.
3. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К., Воробьев Е.В., Булычёв В.С. Вакуумная дуга на поликристаллическом кремниевом катоде // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2014. № 11. DOI: 10.7463/1114.0748209.
4. Береговский В.В., Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Щуренкова С.А. Объемное содержание и дисперсный состав капельной фазы в покрытиях, полученных вакуумно-дуговым методом на установке PLATIT π-80 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 3-5.
5. Гранкина О.О., Гранкина Т.О. Исследование поверхностной плотности микрокапель в титановых покрытиях, полученных в вакуумно-дуговом испарителе с арочным магнитным полем // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 2. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/760856.html> (дата обращения 05.06.2015).
6. Аксёнов И.И., Белоус В. А., Васильев В. В., Волков Ю. Я., Стрельницкий В. Е. Прямолинейный сепаратор углеродной плазмы вакуумной дуги // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2001. №2 (79). С. 127-130.

7. Takikawa H., Tanoue H. Review of Cathodic Arc Deposition for Preparing Droplet-Free Thin Films // IEEE transactions on plasma science, Vol. 35, No. 4. 2007. P. 992-999. DOI:10.1109/DEIV.2006.357354.
8. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 1. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/256359.html> (дата обращения 08.06.2015).
9. Аксёнов Д.С., Аксёнов И.И., Стрельницкий В.Е. Подавление эмиссии макрочастиц в вакуумно-дуговых источниках плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2007. № 6. С. 106-115.
10. Аксёнов И.И., Брень В.Г., Коновалов И.И. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда II. Влияние интегральной температуры катода // ТВТ.1983. Т.21. № 4. С. 646-651.
11. Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Формирование катодного кратера в низковольтной вакуумной дуге с холодным катодом // Письма в Журнал технической физики. 1998. Т. 24, № 13. С. 14-19.
12. Саксаганский Г.Л. Электрофизические вакуумные насосы. М.: Энергоатомиздат, 1988. 280 с.
13. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Рязанов В.А. Исследование профиля выработки катода дугового испарителя с арочным магнитным полем // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI: 10.7463/1112.0482485.
14. Алямовский А.А. Инженерные расчёты в Solidworks Simulation. М.: ДМК-Пресс, 2010. 464 с.
15. Daalder J.E. Energy dissipation in the cathode of a vacuum arc // J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 10. 1977. P. 2225-2234. DOI: 10.1088/0022-3727/10/16/013.