

514.758.2

УДК 514.758.2

Кинематическое моделирование процесса роста покрытия на поверхности планетарно вращающихся стержней

Грешилов В.В., студент

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

*Научный руководитель: Воробьев Е.В., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергоустановки»*

duh@power.bmstu.ru

1. Введение

Получение высококачественных тонкопленочных слоев металлов, сплавов, диэлектриков и полупроводников является одной из актуальных задач современной технологии. До недавнего времени для получения тонкопленочных покрытий использовались главным образом процессы испарения и конденсации веществ, в вакууме (термовакuumный метод) [1]. Главный недостаток данного метода, в виде низкой скорости осаждения частиц, удалось преодолеть с помощью применения магнетронных распылительных систем (МРС). Благодаря удержанию электронов над поверхностью мишени в области скрещенных электрического и магнитного полей, МРС могут работать при низких давлениях, обеспечивая высокую чистоту покрытия при высокой скорости роста. Данный метод обладает широкой номенклатурой распыляемых материалов и может использоваться для нанесения покрытий сложного состава [2]. МРС нашли широкое применение во многих отраслях промышленности [1, 3].

Одна из основных проблем при проектировании подобных систем – обеспечение равномерности нанесения покрытия. Для этого необходимо учитывать закон распределения потока материала по углам [4, 5, 6], расстояние от магнетрона до подложки, ее геометрии, ориентации и закона движения относительно источника. Учет всех этих параметров особенно важен в тех областях производства, где предъявляются строгие требования к равномерности толщины покрытия, например, оптическая промышленность и микроэлектроника.

Задача усложняется, если требуется нанести равномерное по толщине покрытие на поверхности большого количества деталей в одном технологическом процессе. Для этого детали размещают на подвижной платформе, находясь на которой, заготовки двигаются относительно мишени по сложной циклической траектории. В качестве примера можно привести карусельные системы, в которых изделия группами расположены на вращающихся вокруг своей оси платформах, которые в свою очередь вращаются вокруг некоторого центра [7]. Такие системы не обеспечивают достаточной равномерности нанесения покрытия, из-за взаимного перекрытия деталей. Для решения данной проблемы предлагаются системы, в которых заготовки вращаются индивидуально, благодаря чему можно добиться высокой равномерности толщины пленки. Расчет параметров напыления для подобных установок является сложной параметрической задачей. Целью настоящей работы является создание математической модели, позволяющей вычислить скорость роста покрытия в таких системах.

2. Постановка задачи

Рассмотрим систему из N стержней радиусом r и длиной L , установленных на платформе, радиусом R , которая равномерно вращается вокруг своей оси с угловой частотой ω (рис.1.). Каждый стержень вращается вокруг собственной оси с угловой скоростью ω_1 .

Напыление производится двумя магнетронными распылительными системами, расположенными на оси платформы на расстоянии l до стержней. Для упрощения дальнейших расчетов будем считать размер дорожки распыления МРС много меньшим расстояния от нее до стержней

Предположим, что покрытие толщиной δ равномерно покрывает поверхность стержня (рис.2). Магнетрон будем считать протяженным линейным источником. Толщину можно выразить через ее массу, площадь поверхности и плотность материала пленки:

$$\delta = \frac{m}{A_{\text{п.цилиндра}} \cdot \rho_{Ni}}$$

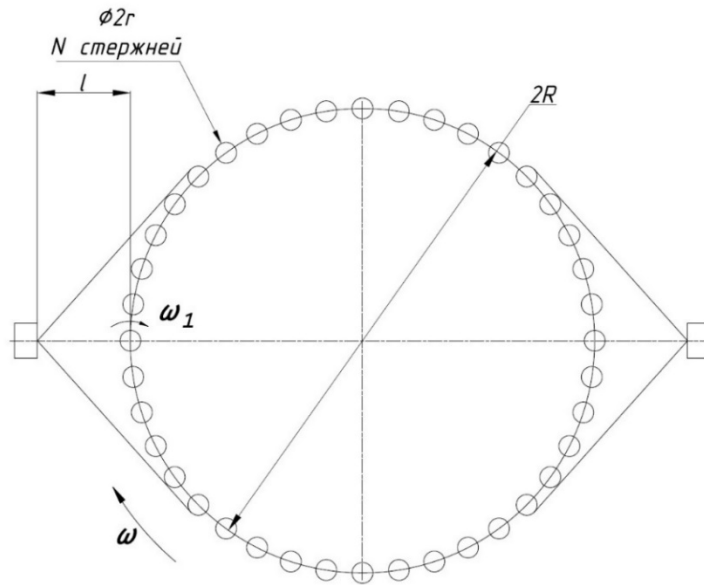


Рис. 1. Схема системы

Рассмотрим элементарную площадку на поверхности стержня, находящуюся под углом ϵ видимости из магнетрона. Нормаль площадки повернута под углом γ к источнику, тогда скорость роста толщины пленки:

$$\dot{\delta} = \frac{\dot{m}}{A\rho} = \frac{m_p \cdot M \cdot S_\epsilon \cdot \frac{I_p}{e} \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(\epsilon)}{A_{\text{п.цл.}} \cdot \rho_{Ni}}$$

где I_p – тор разряда, S_ϵ – коэффициент распыления, m_p – масса протона, M – молярная масса вещества (Никеля), $A_{\text{п.цл.}}$ – площадь поверхности полуцилиндра.

$$A_{\text{п.цл.}} = \pi \cdot s(\varphi, \psi) \cdot L$$

Введем две координаты, описывающие движение точки по поверхности стержня (рис. 2):

φ – угловая координата поворота платформы со стержнями;

ψ – угловая координата характеризующая движение точки по поверхности стержня (начало отсчета в точке PO);

В результате скорость роста покрытия, наносимого двумя магнетронами будет выражаться зависимостью (рис.1):

$$\dot{\delta}(\varphi, \psi) = 2 \cdot \frac{m_p \cdot M \cdot S_\epsilon \cdot \frac{I_p}{e} \cdot \cos(\gamma(\varphi, \psi)) \cdot \cos(\epsilon(\varphi, \psi))}{\pi \cdot s(\varphi, \psi) \cdot L \cdot \rho_{Ni}} \quad (1)$$

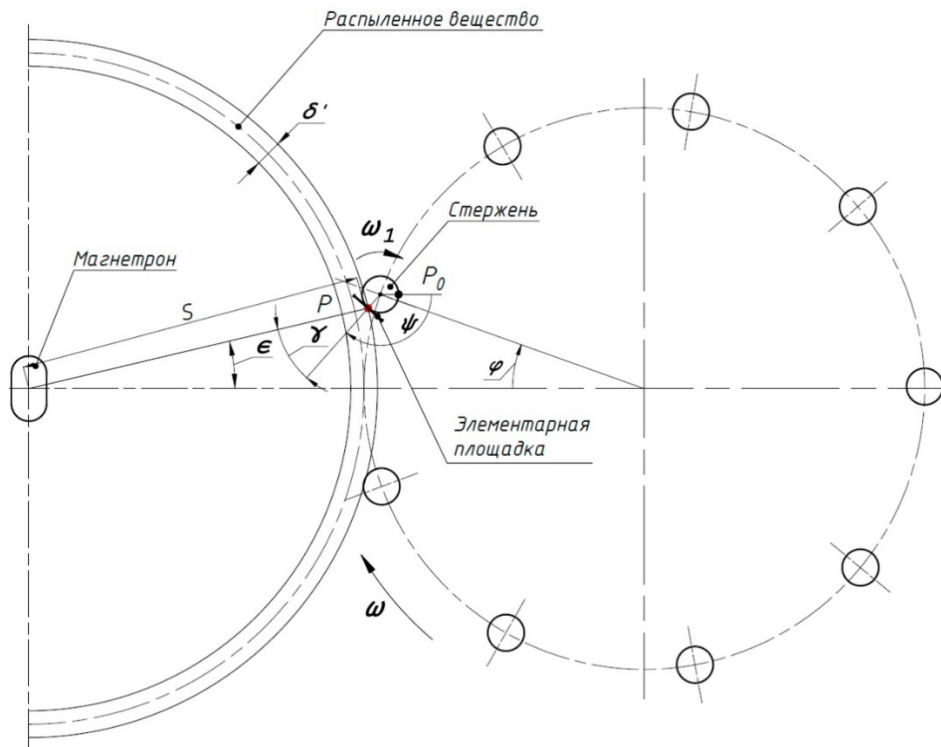


Рис. 2. Схема процесса роста покрытия

3. Кинематика движения платформы

Для нахождения $\gamma(\varphi, \psi)$ и $\epsilon(\varphi, \psi)$ необходимо определить зависимость $\zeta(\varphi)$ угла, определяющего сектор, в пределах которого происходит нанесение покрытия.

Во время вращения системы часть стержней затеняется своими соседями (рис.3а-б). Используя теорему косинусов, а также тригонометрические соотношения для «незатененного» стержня можно получить:

$$\zeta_1(\varphi) = \pi - 2 \cdot \text{Arcsin}\left(\frac{r}{MO(\varphi)}\right) \quad (2)$$

а для «затененного»:

$$\zeta_2(\varphi) = \frac{\pi}{2} - \theta(\varphi) + \text{Arcsin}\left(\frac{MO(\varphi) \cdot \sin(\theta(\varphi) - \beta(\varphi))}{r}\right), \quad (3)$$

где:

$$MO(\varphi) = \sqrt{R^2 + (R + l)^2 - 2 \cdot R \cdot (R + l) \cdot \cos(\varphi)}$$

$$\theta(\varphi) = \alpha(\varphi) - \alpha(\varphi - \varphi_0)$$

$$\beta(\varphi) = \text{Arcsin}\left(\frac{r}{MO(\varphi)}\right)$$

$$\alpha(\varphi) = \beta(\varphi) + \text{Arcsin}\left(\frac{R \cdot \sin(\varphi)}{MO(\varphi)}\right)$$

θ – угол между отрезками MO_1 и MO_2 ;

β – угол между отрезками MO и MO_2 ;

α – угол между горизонталью и отрезком MO_2 ;

φ_0 – угловой сектор между соседними элементами.

$$\varphi_0 = \frac{2\pi}{N},$$

где N – количество элементов.

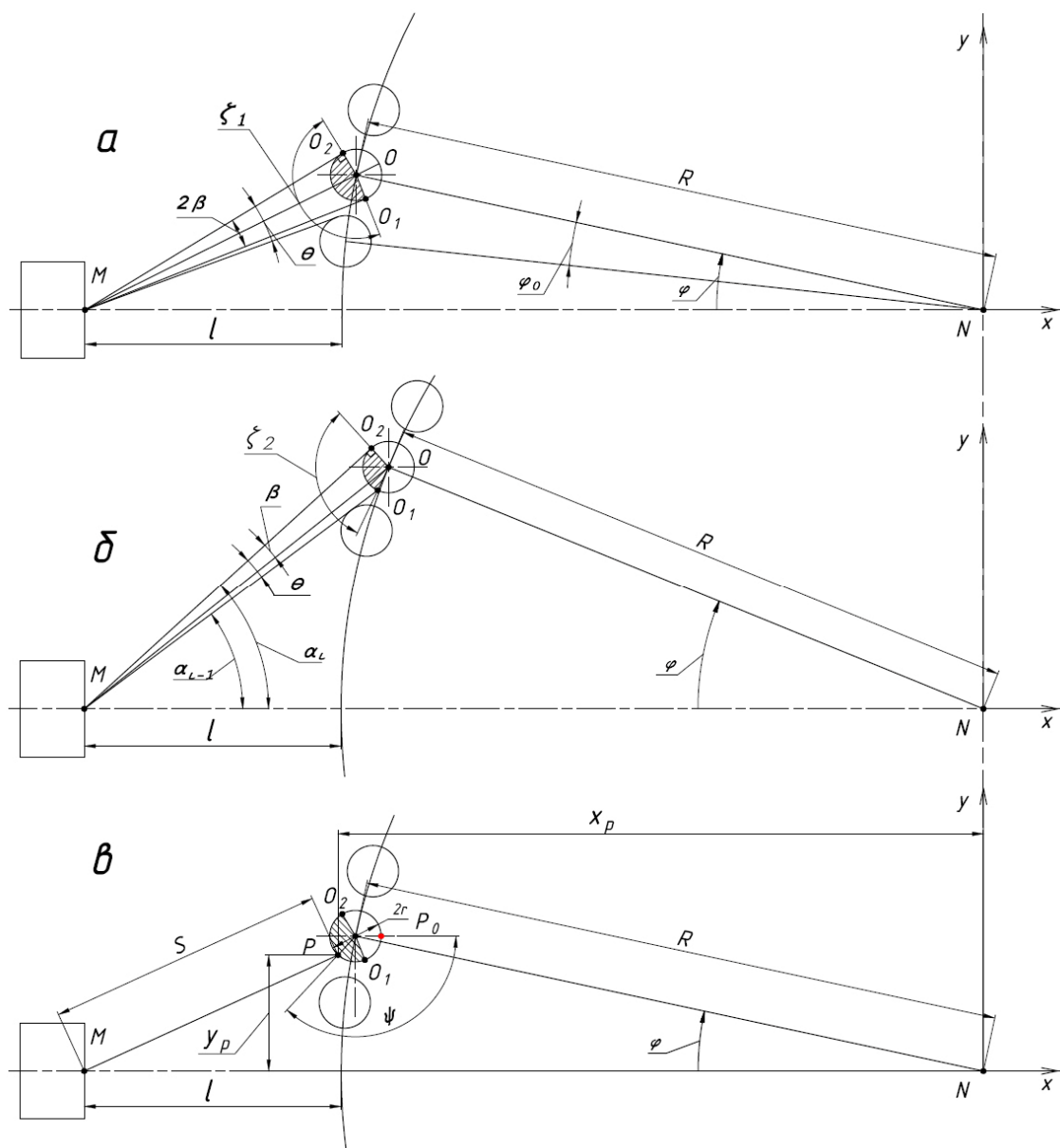


Рис. 3. Определение параметров для стержня

4. Кинематика движения системы стержней и платформы

Для определения угловой координаты ψ выберем произвольную точку P на поверхности стержня. Отсчет угловой координаты в системе стержня производится от точки P_0 (рис.3в).

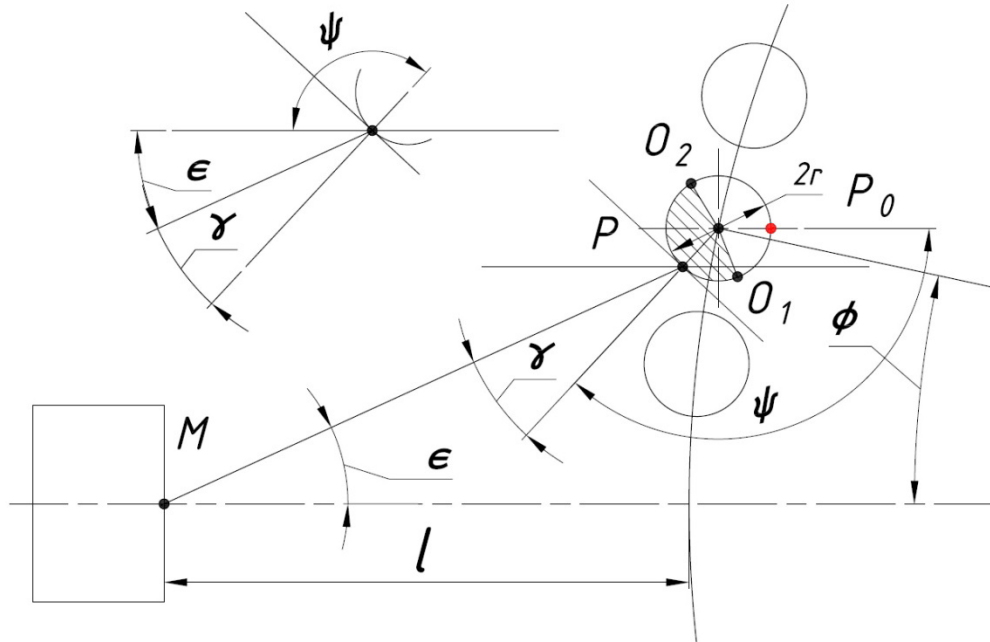


Рис. 4. Определение параметров для выбранной точки на поверхности

Введем систему отсчета с началом отсчета в точке N , тогда координаты точки P описываются зависимостями:

$$x_P(\varphi, \psi) = -(R \cdot \cos(\varphi) - r \cdot \cos(\psi))$$

$$y_P(\varphi, \psi) = R \cdot \sin(\varphi) - r \cdot \sin(\psi)$$

Расстояние s от точки P до МРС:

$$s_x(\varphi, \psi) = R + l - |x(\varphi, \psi)| = R + l - |R \cdot \cos(\varphi) - r \cdot \cos(\psi)|$$

$$s_y(\varphi, \psi) = |R \cdot \sin(\varphi) - r \cdot \sin(\psi)|$$

$$s(\varphi, \psi) = \sqrt{s_x(\varphi, \psi)^2 + s_y(\varphi, \psi)^2} \quad (4)$$

Угол вылета материала с поверхности мишени магнетрона ϵ описывается выражением:

$$\epsilon = \text{Arctg} \left(\frac{s_y(\varphi, \psi)}{s_x(\varphi, \psi)} \right) = \text{Arctg} \left(\frac{|R \cdot \sin(\varphi) - r \cdot \cos(\psi)|}{R + l - |R \cdot \cos(\varphi) + r \cdot \sin(\psi)|} \right) \quad (5)$$

Угол γ падения материала на стержень:

$$\gamma + \psi + \epsilon = \pi$$

$$\gamma(\varphi, \psi) = \pi - (\psi + \epsilon(\varphi, \psi)) \quad (6)$$

Теперь необходимо определить диапазон углов ψ , при котором точка P будет в зоне прямой видимости из мишени, т.е. условие попадания точки P в сегмент окружности O_1PO_2 (рис. 5). Для любого удаляющегося от МРС стержня (случай (а)) получаем:

$$\frac{3}{2}\pi - (\alpha + \zeta) < \psi < \frac{3}{2}\pi - \alpha$$

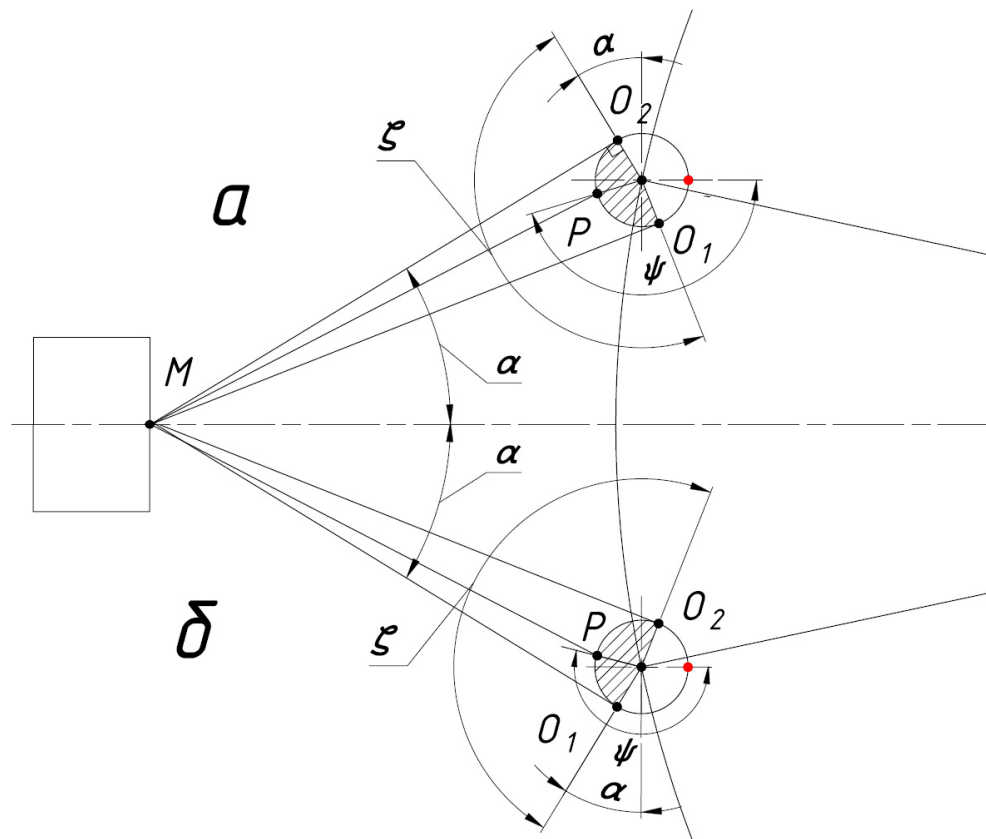


Рис. 5. Схема нахождения области видимости

Для любого приближающегося к МРС стержня (б):

$$\frac{\pi}{2} + \alpha < \psi < \frac{\pi}{2} + (\alpha + \zeta)$$

В качестве примера определим ток разряда необходимый для нанесения покрытия толщиной 5 мкм в системе с размерами:

$$R = 200 \text{ мм}, r = 3 \text{ мм}, l = 80 \text{ мм}, L = 800 \text{ мм}$$

Частоты вращения, которые определяется из условий нагрева стержней:

$$\omega = \frac{\pi}{3} \text{ рад/с}, \quad \omega_1 = \frac{\pi}{45} \text{ рад/с}$$

Время, за которое стержень вернется в исходное состояние:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_1} = 90 \text{ с}$$

Введем величину удельной скорости роста покрытия $\frac{\dot{\delta}(t)}{I_p}$ в [м/А*с]. Используя формулу (1) и найденные зависимости (2 – 6) получим функцию, приведенную на рис. 6, она построена для периода T , т.е периода за которое рассматриваемая система возвращается в начальное состояние. Ток разряда не меняется во времени, поэтому данная зависимость соответствует $\dot{\delta}(t)$ с точностью до постоянного множителя.

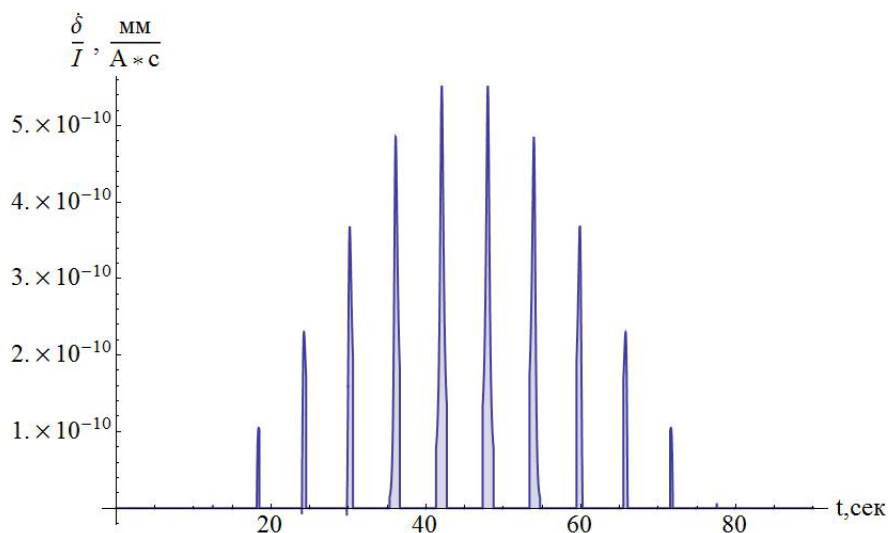


Рис. 6. Зависимость удельной скорости напыления от времени

Определим, толщину слоя, нанесенного за 8 ч. Количество циклов n совершенных системой за это время:

$$n = \frac{8 \cdot 60 \cdot 60}{90} = 320$$

Тогда толщина слоя в зависимости от силы тока:

$$\delta = \int_0^T n \cdot \dot{\delta}(t) dt = \int_0^{90} 640 \cdot \frac{m_p \cdot M \cdot S_\epsilon \cdot \frac{I_p}{e} \cdot \cos(\gamma(t)) \cdot \cos(\epsilon(t))}{\pi \cdot s \cdot L \cdot \rho_{Ni}} \approx 6.46 \cdot 10^{-7} \cdot I_p \frac{m}{A}$$

В результате, для нанесения покрытия толщиной 5 мкм за 8 ч, ток разряда должен составлять:

$$I_p = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{6.46 \cdot 10^{-7}} = 7.74 \text{ A}$$

5. Вывод

Была построена математическая модель процесса напыления вещества на систему планетарно вращающихся заготовок.

Используя полученные зависимости можно смоделировать систему с произвольным количеством стержней и требуемыми геометрическими параметрами.

Список литературы

- [1]. Кузьмичев А.И. Магнетронные распылительные системы. Введение в физику и технику магнетронного распыления. М.: Авекс, 2008. 244 с.
- [2]. Зимин Д.Д. Влияние парциального состава газовой смеси на характеристики магнетронного разряда с алюминиевым катодом // Молодежный научно-технический вестник. 2014. № 7. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/725522.html> (дата обращения 13.11.2015).
- [3]. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Кириллов Д.В. Трибологические свойства серебряных покрытий, полученных методом магнетронного распыления // Наноинженерия. 2014. № 9. С. 30-32.
- [4]. 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.
- [5]. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Влияние выработки катода дугового испарителя на равномерность толщины покрытия и угловое распределение продуктов эрозии // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2014. № 4. С. 1-9. DOI: 10.7463/0414.0707391
- [6]. Каштанов П.В., Смирнов П.В., Хиплер Р., Магнетронная плазма и нанотехнология // Успехи физических наук. 2007. № 5. С. 473–510;
- [7]. Oliver J. B., Talbot D., Optimization of Deposition Uniformity for Large-Aperture NIF Substrates in a Planetary Rotation System // LLE Review. 2003. Vol. 94. P.67–75.