

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Факультет «Фундаментальные науки»

Кафедра «Физика» ФН4

На правах рукописи

УДК 53.043; 538.931

КУРСОВАЯ РАБОТА

**«Моделирование загрязнения чувствительной поверхности оптической системы
продуктами газовой выделения материала покрытия бленды»**

Студент

Хижик А.И.

Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.

Хасаншин Р.Х.

Оглавление

	Стр.
Постановка задачи	3
Моделирование потери массы ПКМ	4
1.1. Физико-математическая модель	4
1.2. Моделирование осаждения ЛВ на оптические поверхности	5
1.3. Результаты вычислений	7
Список литературы	11

Постановка задачи

Рассчитать распределение продуктов газовыделения по диаметру оптической поверхности. Угловое распределение молекул покидающих поверхность материала покрытия считать изотропным.

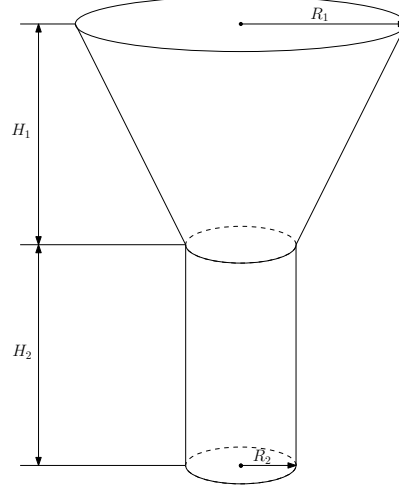


Рис. 1

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, t) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right) - \beta C(x, t), \quad 0 < x < h, \quad 0 < t < 1000, \quad (1)$$

$$C(x, t) \Big|_{t=0} = C_0, \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$\left(D(x, t) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + k(t) C(x, t) \right) \Big|_{x=h} = 0, \quad (4)$$

где $D(x) = D_0 \left(1 + \frac{x}{h} \right)$, $D_0 = 0.002 \text{ мкм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, $k = 0.01 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$, $C_0 = 1 \text{ моль} \cdot \text{мкм}^{-3}$, $R_1 = 5.0 \cdot 10^5 \text{ мкм}$, $R_2 = 2.0 \cdot 10^5 \text{ мкм}$, $\beta = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, $h = 100 \text{ мкм}$, $H_1 = 10^6 \text{ мкм}$, $H_2 = 5 \cdot 10^5 \text{ мкм}$.

$C(x, t)$ – пространственно-временное распределение концентрации потенциальных продуктов газоразделения (ППГ) в материале;

C_0 – начальная концентрация ППГ в материале;

h – толщина внутреннего покрытия из полимерного материала;

D_0 – эффективный коэффициент диффузии ППГ в материале;

k – эффективный коэффициент десорбции ППГ с поверхности материала;

β – эффективная скорость химической реакции с участием ППГ;

R_1, R_2, H_1, H_2 – размеры бленды.

Моделирование потери массы ПКМ

1.1. Физико-математическая модель

Для изучения потери массы полимерного композита при вакуумно-тепловом воздействии в качестве модельных материалов возьмём терморегулирующие покрытия, занимающие большую площадь поверхности КА и являющиеся одними из основных источников продуктов СВА. В модели, описывающей потерю массы образца такого материала, нанесённого на металлическую подложку, постулируется, что изменение концентрации $C_m(x, t)$ m -го компонента газовой выделения (молекулы или атома) в материале при вакуумно-тепловом воздействии обусловлено следующими процессами [Khassanchine et al.(2006a)Khassanchine, Timofeev, Grigorevskiy, and Galygin, Khassanchine et al.(2006b)Kh

1. Десорбцией адсорбированных летучих веществ m -го вида с поверхности материал-вакуум;
2. Химическими реакциями с участием m -ой компоненты;
3. Сублимацией материала с поверхности материал-вакуум;
4. Диффузией и десорбцией летучих веществ m -го вида, абсорбированных или образованных в нём в результате термической деструкции.

Также постулируется, что скорость потери массы $\dot{M}_m(t)$ соответствующая ЛВ m -го типа пропорциональна его концентрации в приповерхностном слое ПМ $C_m(h - vt, t)$:

$$\dot{M}_m(t) = m_m (k_m(t) + v(t)) C_m(l - v(t)t, t),$$

где m_m – масса молекул ЛВ m -го типа, $v(t)$ – скорость сублимации, h – толщина материала, $k_m(t)$ – эффективный коэффициент десорбции ЛВ m -го типа.

Тогда суммарная потеря массы с единицы поверхности материала $M_{total}(t)$ за время t вычисляется по следующей формуле:

$$M_{total} = \sum_{m=1}^M M_m(t) = \sum_{m=1}^M m_m \int_0^t (k_m(\tau) + v(\tau)) C_m(l - v(\tau)\tau, \tau) d\tau,$$

где M – число типов ЛВ в облучённом материале.

При рассмотрении перечисленных процессов в объёме и на их поверхности композиционного материала со сложной энергетической структурой возможен только макроскопический подход. Поэтому далее используются эффективные коэффициенты диффузии, десорбции, термической деструкции и скорости химических реакций – параметры, с помощью которых описываются процессы, наблюдаемые при лабораторных и натурных экспериментах.

Концентрации $C_m(x, t)$, $m = \overline{1, M}$ компонентов газовой выделения в ПКМ в рамках выше сформулированных предположений, описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial C_m(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_m(x, t) \frac{\partial C_m(x, t)}{\partial x} \right) - \beta_m(x, t) C_m(x, t) + S_m(x, t), \quad (5)$$

$$x \in (0, h - vt), \quad t > 0, \quad v(t)t < h,$$

$$C_m(x, t) \Big|_{t=0} = R_m(x), \quad x \in [0, h], \quad (6)$$

$$\left(D_m(x, t) \frac{\partial C_m(x, t)}{\partial x} + (k_m(t) + v(t)) C_m(x, t) \right) \Big|_{x=h-vt} = \frac{\partial C_m(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (7)$$

где $\beta_m(x, t)$ – обобщённая скорость реакций первого порядка с участием m -й компоненты;

$R_m(x)$ – концентрация ЛВ m -го вида в материале в начальный момент времени;

$D_m(x, t)$ – эффективный коэффициент диффузии ЛВ m -го вида;

$S_m(x, t)$ – функция источника m -й компоненты.

1.2. Моделирование осаждения ЛВ на оптические поверхности

Элементарное решение задачи (5)-(7) при следующих параметрах модели: температура материала постоянна и все коэффициенты уравнений являются константами $R_m(x) = R_m$, $D_m(x, t) = D_m$, $k_m(t) = k_m$, $\beta_m(x) = \beta_m$, $v(t) = 0$, будет иметь следующий вид

$$C_m(x, t) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\lambda_{mn} D_m^2 + k_m^2) \cos(\sqrt{\lambda_{mn}} x)}{k_m D_m + h(\lambda_{mn} D_m^2 + k_m^2)} \exp(-(\beta_m + D_m \lambda_{mn}) t) \cdot \left(\frac{R_m \sin(\sqrt{\lambda_{mn}} h)}{\sqrt{\lambda_{mn}}} + \int_0^t \int_0^h S_m(x, \xi) \cos(\sqrt{\lambda_{mn}} x) \exp(\xi(\beta_m + D_m \lambda_{mn})) dx d\xi \right), \quad (8)$$

где $\lambda_{mn} > 0$ – решение трансцендентного уравнения

$$\sqrt{\lambda_{mn}} \operatorname{tg}(\sqrt{\lambda_{mn}} h) = \frac{k_m}{D_m}.$$

Рассмотрим процесс осаждения потенциальных продуктов газовой выделения (ППГ) на оптическую поверхность. На рис. 2 представлена металлическая бленда, в основании которой находится оптика. В силу того, что металлический корпус защищает её внутреннюю поверхность от излучения: $S(x, t) = 0$.

Для расчётов так же как в предыдущем разделе выберем следующие параметры модели: $D_0 = 0.002 \text{ мкм}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ – эффективный коэффициент диффузии ППГ в материале, $k = 0.01 \text{ мкм} \cdot \text{с}^{-1}$ – эффективный коэффициент десорбции ППГ с поверхности материала, $\beta = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ – эффективная скорость химической реакции с участием ППГ, $R = 1 \text{ моль} \cdot \text{мкм}^{-3}$ – начальная концентрация ППГ в

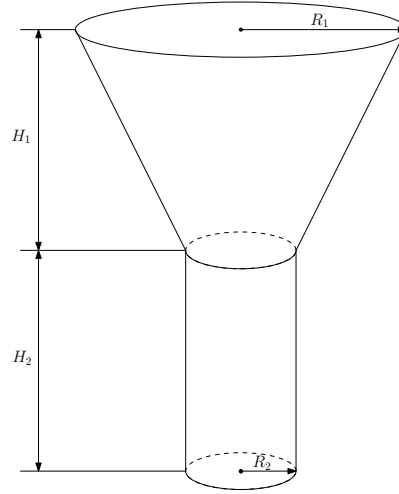


Рис. 2. Бленда.

материале, $h = 100$ мкм – толщина внутреннего покрытия из полимерного материала, $R_1 = 5.0 \cdot 10^5$ мкм, $R_2 = 2.0 \cdot 10^5$ мкм, $H_1 = 10^6$ мкм, $H_2 = 5 \cdot 10^5$ мкм – размеры бленды. Система уравнений (5)-(7), описывающая распределение ППГ в материале бленды, принимает следующий вид:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right) - \beta C(x, t), \quad 0 < x < h, \quad 0 < t < 1000, \quad (9)$$

$$C(x, t) \Big|_{t=0} = R, \quad (10)$$

$$\left(D(x) \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + k C(x, t) \right) \Big|_{x=h} = \left(\frac{\partial C(x, t)}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = 0, \quad (11)$$

где $D(x) = D_0 \left(1 + \frac{x}{h} \right)$, $C(x, t)$ – пространственно-временное распределение концентрации ППГ в материале.

Численное решение

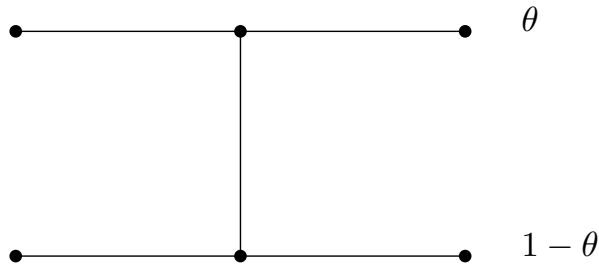


Рис. 3. Расположение узлов разностной схемы

Разностная схема для задачи (9)-(11):

$$-\hat{A}_i \hat{u}_{i-1} + \hat{C}_i \hat{u}_i - \hat{B}_i \hat{u}_{i+1} = \hat{F}_i, \quad i = \overline{1, N_x - 1}, \quad (12)$$

$$u_i^0 = C_0, \quad (13)$$

$$\hat{u}_0 = \hat{\varepsilon}_1 \hat{u}_1 + \hat{\nu}_1, \quad \hat{u}_{N_x} = \hat{\varepsilon}_2 \hat{u}_{N_x-1} + \hat{\nu}_2, \quad (14)$$

где

$$\hat{A}_i = \theta \hat{\alpha}_{i-\frac{1}{2}}, \quad \hat{C}_i = 1 + \theta \left(\hat{\alpha}_{i+\frac{1}{2}} + \hat{\alpha}_{i-\frac{1}{2}} \right), \quad \hat{B}_i = \theta \hat{\alpha}_{i+\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

$$\hat{F}_i = (1 - \theta) \alpha_{i-\frac{1}{2}} u_{i-1} + \left(1 - (1 - \theta) \left(\alpha_{i+\frac{1}{2}} + \alpha_{i-\frac{1}{2}} \right) - \beta \tau \right) u_i + (1 - \theta) \alpha_{i+\frac{1}{2}} u_{i+1}, \quad (16)$$

$$\hat{\kappa}_1 = 1, \quad \hat{\kappa}_2 = \frac{\hat{D}_{N_x}}{\hat{D}_{N_x} + h}, \quad \hat{\nu}_1 = \hat{\nu}_2 = 0, \quad \alpha(x) = \frac{\tau}{h^2} D(x). \quad (17)$$

Для решения трёхточечных разностных уравнений вида (12) с краевыми условиями (14) применяется метод прогонки.

Формулы прямой прогонки:

$$\hat{\xi}_{i+1} = \frac{\hat{B}_i}{\hat{C}_i - \hat{A}_i \hat{\xi}_i}, \quad \hat{\xi}_1 = \hat{\kappa}_1, \quad i = \overline{1, N_x - 1}, \quad (18)$$

$$\hat{\eta}_{i+1} = \frac{\hat{A}_i \hat{\eta}_i + \hat{F}_i}{\hat{C}_i - \hat{\xi}_i \hat{A}_i}, \quad \hat{\eta}_1 = \hat{\nu}_1, \quad i = \overline{1, N_x - 1}. \quad (19)$$

Формулы обратной прогонки:

$$\hat{u}_{N_x} = \frac{\hat{\nu}_2 + \hat{\kappa}_2 \hat{\eta}_{N_x}}{1 - \hat{\kappa}_2 \hat{\xi}_{N_x}}, \quad (20)$$

$$\hat{u}_i = \hat{\xi}_{i+1} \hat{u}_{i+1} + \hat{\eta}_{i+1}, \quad i = \overline{N_x - 1, 0}. \quad (21)$$

1.3. Результаты вычислений

Считая поток изотропным, получаем, что плотность потока молекул с единицы поверхности материала равна $\Phi(t) = k \cdot C(h, t)$.

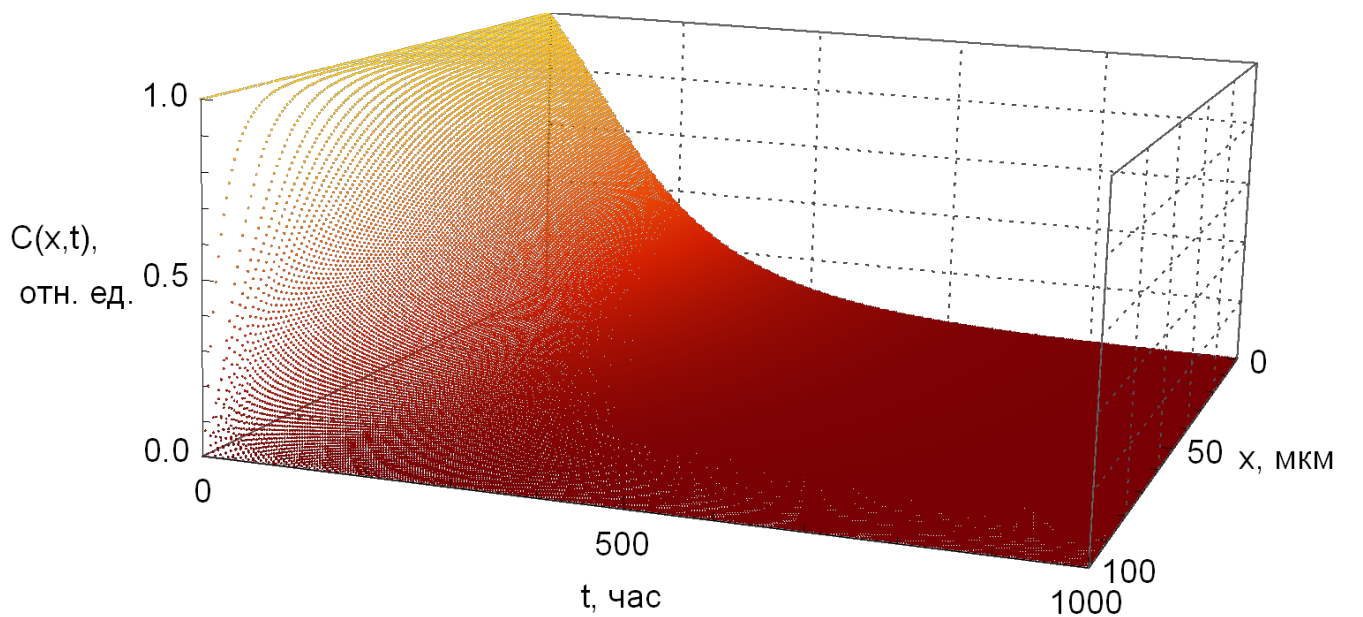


Рис. 4. Пространственно-временное распределение ППГ в blendе.

В результате численного решения задачи (9-11), получено распределение ППГ в бленде, представленное на рис. 4.

Получим распределение частиц ППГ по поверхности оптики. Для этого решим задачу переноса частиц ППГ в бленде, используя метод Монте-Карло. На рис. 5 представлены распределения частиц при различных геометрических конфигурациях бленды, на рис. 6 – примеры смоделированных траекторий частиц.

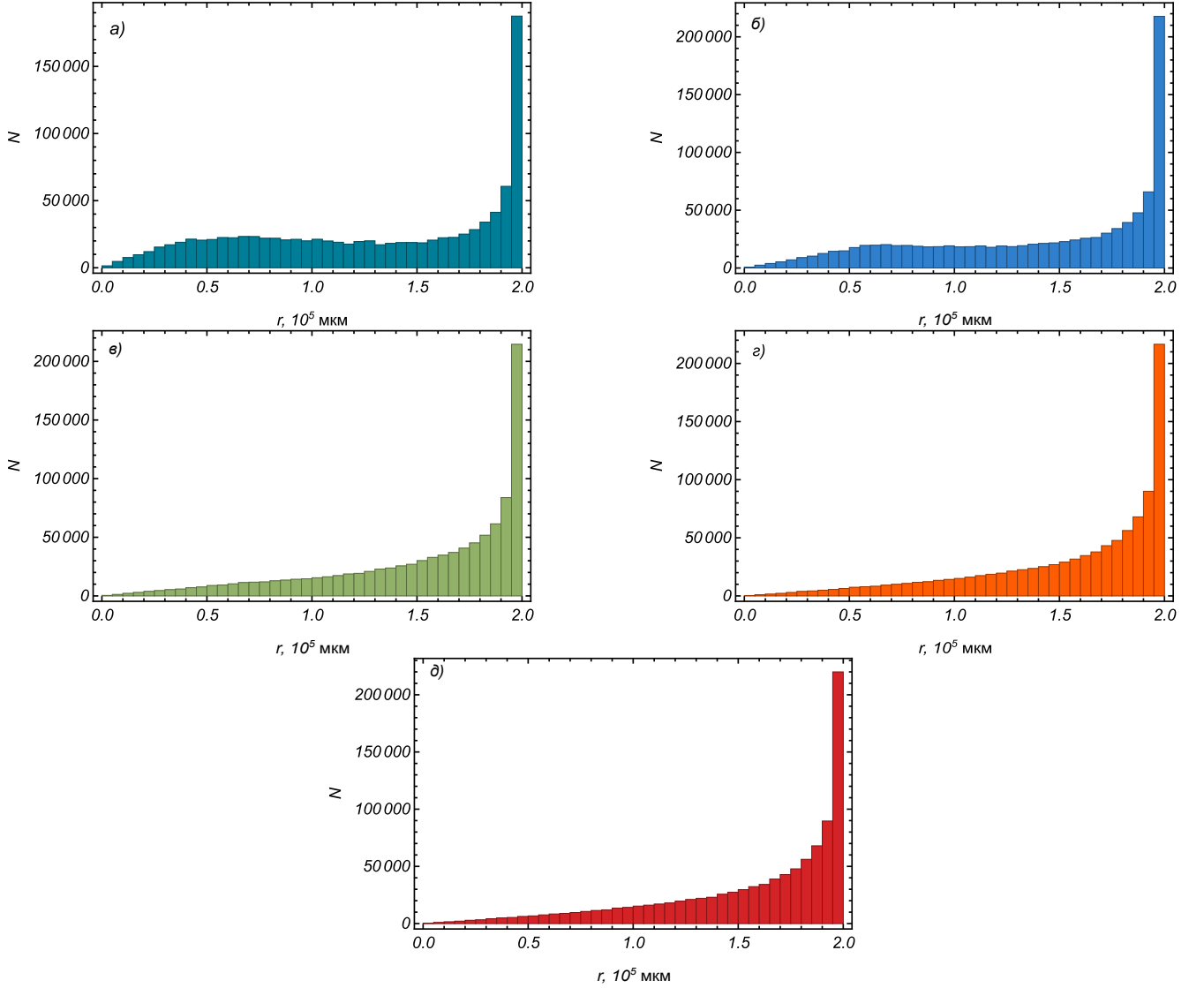
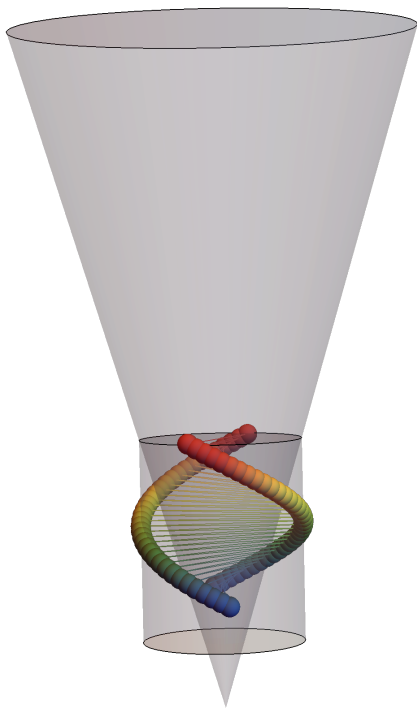


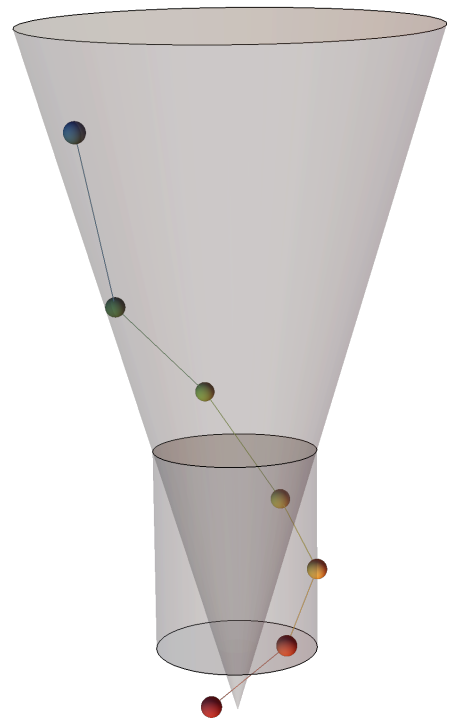
Рис. 5. Распределения $N = 10^6$ частиц по поверхности оптики при различных значениях высоты цилиндрической части бленды

а) $H_2 = 0.5 \cdot 10^5$ мкм, б) $H_2 = 1 \cdot 10^5$ мкм, в) $H_2 = 2 \cdot 10^5$ мкм, г) $H_2 = 5 \cdot 10^5$ мкм, д) $H_2 = 10 \cdot 10^5$ мкм.

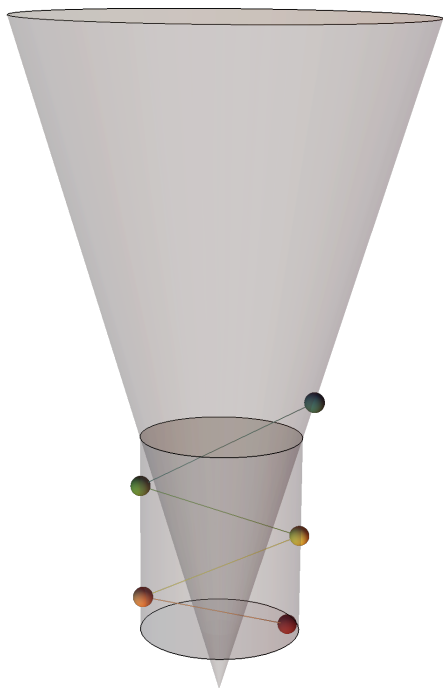
Из рис. 5 видно, что с увеличением высоты цилиндрической части бленды происходит «сглаживание» распределения – это результат уменьшения потока частиц, падающих на оптику напрямую с поверхности конусной части бленды.



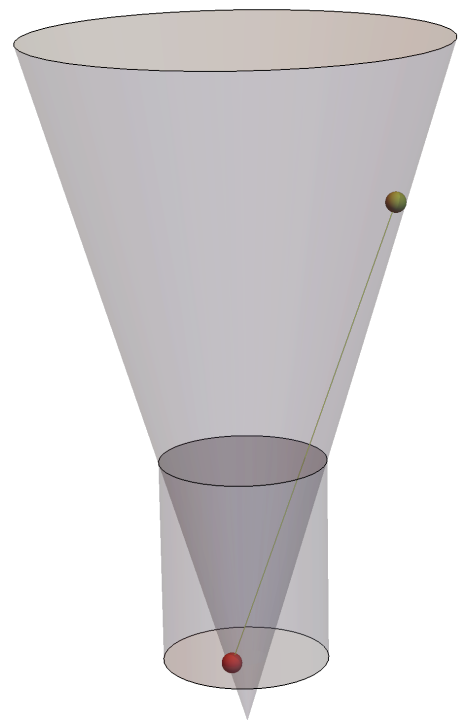
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Траекторий частиц.

Выводы

- Получено пространственно-временное распределение потенциальных продуктов газовой выделения во внутреннем полимерном покрытии бленды бортового оптического прибора космического аппарата.
- Исследованы закономерности распределения потенциальных продуктов газовой выделения по чувствительной к загрязнениям поверхности оптического прибора для разных геометрических конфигураций бленды.

Список литературы

- Khassanchine et al.(2006a)Khassanchine, Timofeev, Grigorevskiy, and Galygin. Influence of UV radiation on outgassing of polymeric composites / R. H. Khassanchine, A. N. Timofeev, A. V. Grigorevskiy, A. N. Galygin // *Journal of spacecraft and rockets*. — 2006a. — Vol. 43, no. 2. — P. 410–413.
- Khassanchine et al.(2006b)Khassanchine, Timofeev, Galygin, and Kostiuk. Simulation of electron radiation on outgassing of spacecraft materials / R. H. Khassanchine, A. N. Timofeev, A. N. Galygin, V. I. Kostiuk // *Journal of spacecraft and rockets*. — 2006b. — Vol. 43, no. 3. — P. 509–513.