



Московский авиационный институт
(государственный технический университет)
МАИ

Кафедра «Электроракетные двигатели, энергофизические и
энергетические установки»
(Кафедра 208)

Курсовой проект

по дисциплине

«Плазменные ускорители».

Тема:

расчет и проектирование СПД.

Выполнил студент группы 02-414:

_____ Ляховецкий М.А.

Консультант:

_____ Хартов С.А.

Содержание:

1. Исходные данные.
2. Анализ поставленной задачи.
3. Краткое описание ускорителя.
4. Расчет основных характеристик плазменного ускорителя.
5. Результаты расчета магнитной системы ускорителя.

1. Исходные данные:

Рассчитать основные характеристики и геометрические размеры источника ионов, предназначенного для использования на КА, совершающего маневры на геостационарной орбите. Потребляемая мощность 5 кВт, удельный импульс 18 км/с, ресурс работы 6000 часов, рабочее тело ксенон.

2. Анализ поставленной задачи:

На данный режим работы ДУ можно применить два типа двигателей: ПИД и СПД. Оба по своим характеристикам (мощность; удельный импульс; ресурс работы) удовлетворяют поставленной задаче. ПИД имеет преимущество по ресурсу работы, но СПД полностью отрабатывает необходимый ресурс.

Выбор данного типа ускорителя обусловлен относительной простотой конструкции ДУ, систем ее электропитания и управления по сравнению с ПИДом.

3. Краткое описание ускорителя:

Стационарный плазменный двигатель (СПД) создан на базе ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗД).

Параметры плазмы в ускорительном канале современных УЗД характеризуются следующими величинами:

- концентрация плазмы (ионов и электронов) $n_e = n_i \approx 10^{18} \text{ м}^{-3}$
- концентрация нейтральных частиц (атомов) $n_a \approx 10^{20} \text{ м}^{-3}$
- температура электронов $T_e \approx 5 \div 50 \text{ эВ}$

Принцип действия заключается в создании магнитного поля в ускорительном канале и получении виртуального «электрода» из электронов. Которые воздействуют на положительные ионы и ускоряют их до необходимой скорости. Такая схема возможна благодаря разным радиусам Лармора электронов и ионов:

$$r_L = \frac{m \cdot V_{\perp}}{q \cdot B},$$

Из-за такого действия магнитного поля электроны образуют виртуальный «электрод», а ни ионы оно практически не влияет в области ускорительного канала. Ионы ускоряются электрическим полем созданным электронами.

В ускорительном канале двигателя реализуется радиальное магнитное поле с индукцией B_r , достигающей в максимуме $(1 \div 5) \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$ в районе среза ускорительного канала. Разрядное напряжение, прикладываемое между катодом и анодом, создает в ускорительном канале электрическое поле, ускоряющее ионы преимущественно параллельно оси канала. Напряженность электрического поля может достигать значений $\sim 1,5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ и более.

Электрический потенциал в ускорительном канале постепенно спадает от анода к катоду, и энергия ионов на выходе ускорителя соответствует пройденной эффективной разности потенциалов $\Delta\varphi_{\text{эф}}$.

Электроны в ускорительном канале разогреваются до температур, при которых эффективность ионизации ими атомов высока, энергетические затраты в разряде на ионизацию относительно невелики и составляют $\sim 3e \cdot \varphi_i$, где φ_i - вольт эквивалент потенциала ионизации РТ, e - заряд электрона.

Зона интенсивной ионизации и ускорения в канале СПД располагается в области, в которой величина радиальной составляющей индукции магнитного поля на срединной поверхности канала при движении от анода изменяется от $0,6 \cdot B_{r \text{ max}}$ до $B_{r \text{ max}}$.

Экспериментально получено, что СПД обеспечивает получение тяговых характеристик в области относительно больших для ЭРД скоростей истечения $\bar{V}_i = 10\ 000 \div 30\ 000 \text{ м/с}$. Двигатель успешно работает при плотностях тока от $\sim 10^3$ до $\sim 10^5 \text{ А/м}^2$ и обеспечивает возможность получения энергии ионов от десятков электрон-вольт до 1кэВ.

4. Расчет СПД.

Исходные данные:

В виде рабочего тела используем газ ксенон (Xe).

$$J_{\text{об.}} := 1800 \left(\frac{\text{и}}{\text{н}} \right) \quad - \text{удельный импульс}$$

$$N_{\Sigma} := 500 \quad (\hat{\text{А}}) \quad - \text{суммарная мощность}$$

$$\tau := 600 \quad (\hat{\text{ч}}) \quad - \text{ресурс работоспособности}$$

Используемые постоянные:

$$\phi_i := 12.1 \quad (\hat{\text{А}}) \quad - \text{потенциал ионизации ксенона}$$

$$M_{\text{Xe}} := 2.19 \cdot 10^{-25} \quad (\hat{\text{а}}) \quad - \text{масса иона ксенона}$$

$$e := 1.6 \cdot 10^{-19} \quad (\hat{\text{е}}) \quad - \text{заряд электрона}$$

$$m_e := 9.1 \cdot 10^{-31} \quad - \text{масса электрона}$$

$$\nu := 3.7 \quad - \text{величина потерь}$$

Расчет основных параметров:

Мощность на поддержание заряда рассчитываем с учетом затрат на вспомогательные системы:

$N_{\text{e}} := 130 \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}$ - мощность подводимая на разогрев катода.

$N_{\text{e}\ddot{\text{e}}} := 20 \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}$ - мощность обеспечивающая работу клапанов системы подачи.

$$N_{\text{p}} := N_{\Sigma} - N_{\text{e}} - N_{\text{e}\ddot{\text{e}}}$$

$N_{\text{p}} = 4.85 \times 10^3 \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}$ - мощность разряда.

Определяем разрядную разность потенциалов:

$$\Theta := 0.8;$$

$$U_{\text{p}} := \frac{J_{\text{о}\ddot{\text{a}}}^2 \cdot M_{\text{Xe}}}{\Theta^2 \cdot 2e} + v \cdot \phi_j$$

$$U_{\text{p}} = 366.642 \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}$$

Принимаем что напряжение разряда равно: $U_{\text{p}} := 350 \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}$

Значение тока разряда составит:

$$I_{\text{p}} := \frac{N_{\text{p}}}{U_{\text{p}}}$$

$$I_{\text{p}} = 13.857 \text{ (}\hat{\text{A}}\text{)}$$

Определим расход рабочего тела:

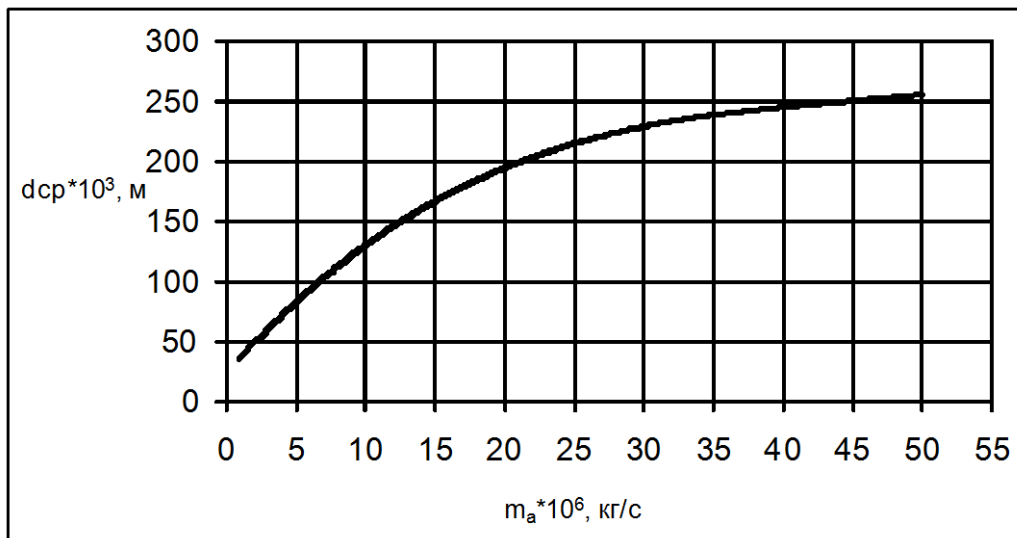
$$k := 1.2$$

$$m_{\text{a}} := \frac{I_{\text{p}} \cdot M_{\text{Xe}}}{k \cdot e}$$

$$m_{\text{a}} = 1.581 \times 10^{-5} \text{ (}\hat{\text{a}}\text{)}$$

Геометрический расчет:

Из графика по расходу рабочего тела найдем значение среднего диаметра.

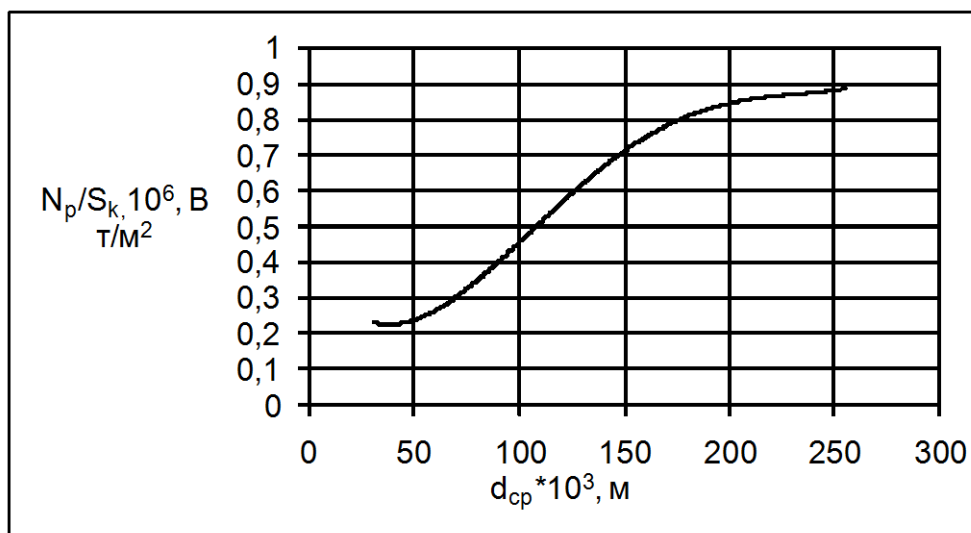


$$d_{\text{н\ddot{o}}} := 175 \cdot 10^{-3} \quad (\text{г})$$

Из представленного ряда двигателей выбираем значение среднего диаметра равного:

$$d_{\text{с\ddot{a}}} := 120 \cdot 10^{-3}$$

Используя найденный диаметр, из графика находим значение соотношения:



$$\frac{N_{\delta}}{S_{\hat{e}}} = 0.55 \cdot 10^6 \quad \left(\frac{\hat{A}\delta}{i^2} \right)$$

Отсюда легко найти площадь ускорительного канала:

$$S_{\hat{e}} := \frac{N_p}{0.55 \cdot 10^6}$$

$$S_{\hat{e}} = 8.818 \times 10^{-3} \quad (i^2)$$

Из площади вычисляем:

$$b_k := \frac{S_{\hat{e}}}{\pi \cdot d_{\hat{n}\delta}}$$

$$b_k = 0.023 \quad (i) \quad - \text{ширина канала}$$

Из представленного ряда двигателей выбираем значение длины канала равное:

$$b_k := 0.02$$

$$d := d_{\hat{n}\delta} + b_k$$

$$d = 0.14 \quad (i) \quad - \text{диаметр ускорительного канала}$$

$$l_k := 2b_k$$

$$l_k = 0.04 \quad (i) \quad - \text{длина ускорительного канала}$$

$$\delta := 0.5b_k$$

$$\delta = 0.01 \quad (i) \quad - \text{толщина выходных кромок разрядной камеры}$$

$$D_d := 2d \quad D_d = 0.28 \quad (i) \quad - \text{диаметр установки}$$

$$L := 2l_k \quad L = 0.08 \quad (i) \quad - \text{длина установки}$$

Находим эффективную разность потенциалов определяющую энергию ионов:

$$U_{\gamma\delta} := \frac{N_p}{I_p} - v \cdot \phi_i$$

$$U_{\gamma\delta} = 305.23 \quad (\hat{A})$$

Средняя скорость ускоренных ионов определяем из закона сохранения энергии:

$$V_i := \sqrt{\frac{2e \cdot U_{y\delta}}{M_{Xe}}}$$

$$V_i = 2.112 \times 10^4 \left(\frac{i}{\tilde{n}} \right)$$

Также вычислим тягу двигателя:

$$P := 0.85 V_i \cdot m_a$$

$$P = 0.284 \quad (\text{I})$$

Вычислим цену тяги - затраты мощности на единицу тяги:

$$c_{\delta} := \frac{N_p}{P}$$

$$c_{\delta} = 1.709 \times 10^4 \left(\frac{\hat{A}_{\delta}}{\hat{I}} \right)$$

Тяговая эффективность:

$$\eta_{\delta} := \frac{P^2}{2m_a \cdot N_p}$$

$$\eta_{\delta} = 0.525$$

Расчет магнитной системы:

Найдем ширину магнитного зазора:

$$\delta_m := 2 \cdot 10^{-3} \quad \text{- технологический зазор}$$

$$l_{\zeta} := b_k + 2\delta + \delta_{\text{пр}}$$

$$l_{\zeta} = 0.042 \quad (\text{м})$$

Максимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного поля:

$$B_{\text{rmax}} := 0.15 \left(b_k \cdot 10^3 \right)^{-0.8} = 0.014 \quad (\text{Тл})$$

Тогда значение тока в соленоиде:

$$k_{\text{пр}} := 2.5 \quad \text{- коэффициент потерь.}$$

$$\mu_0 := 1.257 \times 10^{-6} \quad \text{- магнитная проницаемость в вакууме.}$$

$$I_{\text{сW}} := k_{\text{пр}} \cdot l_{\zeta} \cdot \frac{B_{\text{rmax}}}{\mu_0}$$

$$I_{\text{сW}} = 1.141 \times 10^3 \quad (\text{А})$$

Для создания оптимального магнитного поля определяем количество ампер-витков:

$$I_{\text{сW}350} := I_{\text{сW}} \cdot \sqrt{\frac{U_p}{300}}$$

$$I_{\text{сW}350} = 1.232 \times 10^3 \quad (\text{А})$$

$$W := \frac{I_{\text{сW}350}}{I_p} = 88.904 \quad (\text{витки})$$

$$W := 90$$

Число витков во внутренней и наружной катушках:

$$W_{\text{H}} := 0.4W = 36$$

$$W_{\text{BH}} := 0.6W = 54$$

Расчет работоспособности двигателя:

$$k_s := 1.75 \cdot 10^{-11} \left(\frac{i}{\hat{E}\hat{e}} \right)^3 - \text{коэффициент распыления стенки для материала БГП}$$

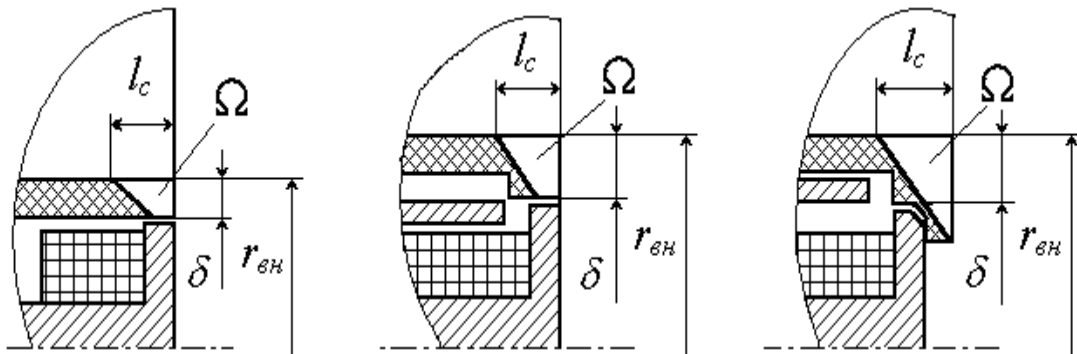
$$j_{icm} := 3C \left(\frac{\Delta}{i} \right)^2 - \text{плотность тока на стенке камеры}$$

Оценим время работоспособность двигателя для материала стенок БГП:

$$\tau := \frac{0.5(d_{\hat{n}\hat{\delta}} - b_k) \cdot \delta^2}{j_{icm} \cdot (d_{\hat{n}\hat{\delta}} - b_k) \cdot \delta \cdot k_s \cdot 3600}$$

$$\tau = 2.381 \times 10^3 \text{ (ч)} - \text{время не удовлетворяет заданному ресурсу } \tau = 6000 \text{ часов, поэтому выбираем другую схему камеры канала.}$$

Для обеспечения заданного ресурса выбираем 3 схему - с вынесенным магнитным полем:



Вычислим внутренний радиус камеры:

$$r_{\hat{a}\hat{i}} := \frac{d_{\hat{n}\hat{\delta}} - b_k}{2}$$

$$r_{\hat{a}\hat{i}} = 0.05 \text{ (м)}$$

Определим протяженность слоя ионизации и ускорения:

$$l_c := 5 \cdot \frac{\sqrt{m_e \cdot U_p}}{e \cdot B_{\max}}$$

$$l_c = 0.016 \text{ (м)}$$

Вычислим объем распыления стенки:

$$\Omega := \pi \cdot \left[2 \cdot \left(r_{\text{â}} + \frac{\delta}{3} \right) \cdot l_c^2 - r_{\text{â}} \cdot l_c \cdot \delta - l_c^3 \right] \quad \Omega = 5.008 \times 10^{-5} \quad (\text{î } 3)$$

$\beta_{\text{cm}} := 0.0$ - доля ионизовавшихся атомов выпадающих на стенку

Площадь зоны распыления на стенках разрядной камеры:

$$S_{\text{ðâî}} := 2\pi \cdot d_{\text{ñ}} \cdot l_c$$

$$S_{\text{ðâî}} = 0.012 \quad (\text{î } 2)$$

Плотность ионного тока на стенке:

$$j_{\text{cm}} := \frac{m_a \cdot e \cdot \beta_{\text{cm}}}{M_{\text{Xe}} \cdot S_{\text{ðâî}}}$$

$$j_{\text{cm}} = 18.748 \quad \left(\frac{\text{Å}}{\text{î } 2} \right)$$

Ток ионов на стенку:

$$I_{\text{cm}} := j_{\text{cm}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{â}} \cdot l_c$$

$$I_{\text{cm}} = 0.096 \quad (\text{Å})$$

Рассчитаем время безотказной работы:

$$T := \frac{\Omega}{k_s \cdot I_{\text{cm}} \cdot 3600}$$

$$T = 8.261 \times 10^3 \quad (\text{÷âîâ})$$

Рассчитаем запас рабочего тела:

$$m_k := 0.1 m_a = 1.581 \times 10^{-6} \quad (\text{êâ}) \quad \text{- расход рабочего тела через катод}$$

$$m_{\Sigma} := m_a + m_k = 1.739 \times 10^{-5} \quad (\text{êâ}) \quad \text{- суммарный расход}$$

$$\tau := 600 \quad (\text{÷âîâ})$$

$$M_{\text{ðâ}} := 1.2 m_{\Sigma} \cdot \tau \cdot 3600$$

$$M_{\text{ðâ}} = 450.655 \quad (\text{êâ})$$

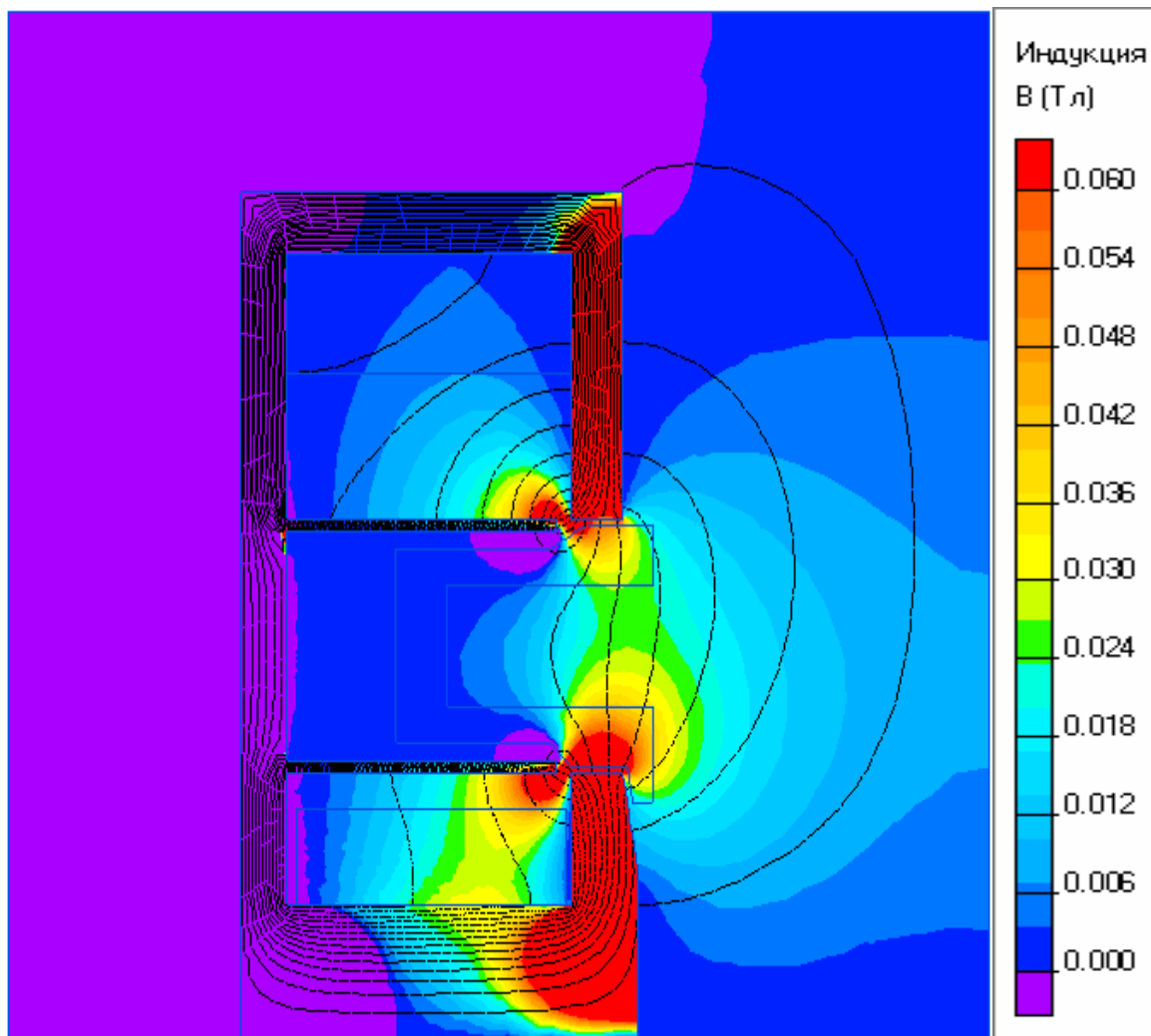
5. Результаты расчета магнитной системы.

Для построения геометрической модели и расчета магнитной системы СПД используем программный комплекс ELCUT.

Все размеры установки берем из пункта 4 проекта.

Задача состоит в получении максимума магнитного поля на конце ускоряющего канала, получение большого градиента магнитного поля, а также получение нулевого поля на аноде.

После построения модели решаем задачу и получаем картину радиальной составляющей магнитной индукции поля:

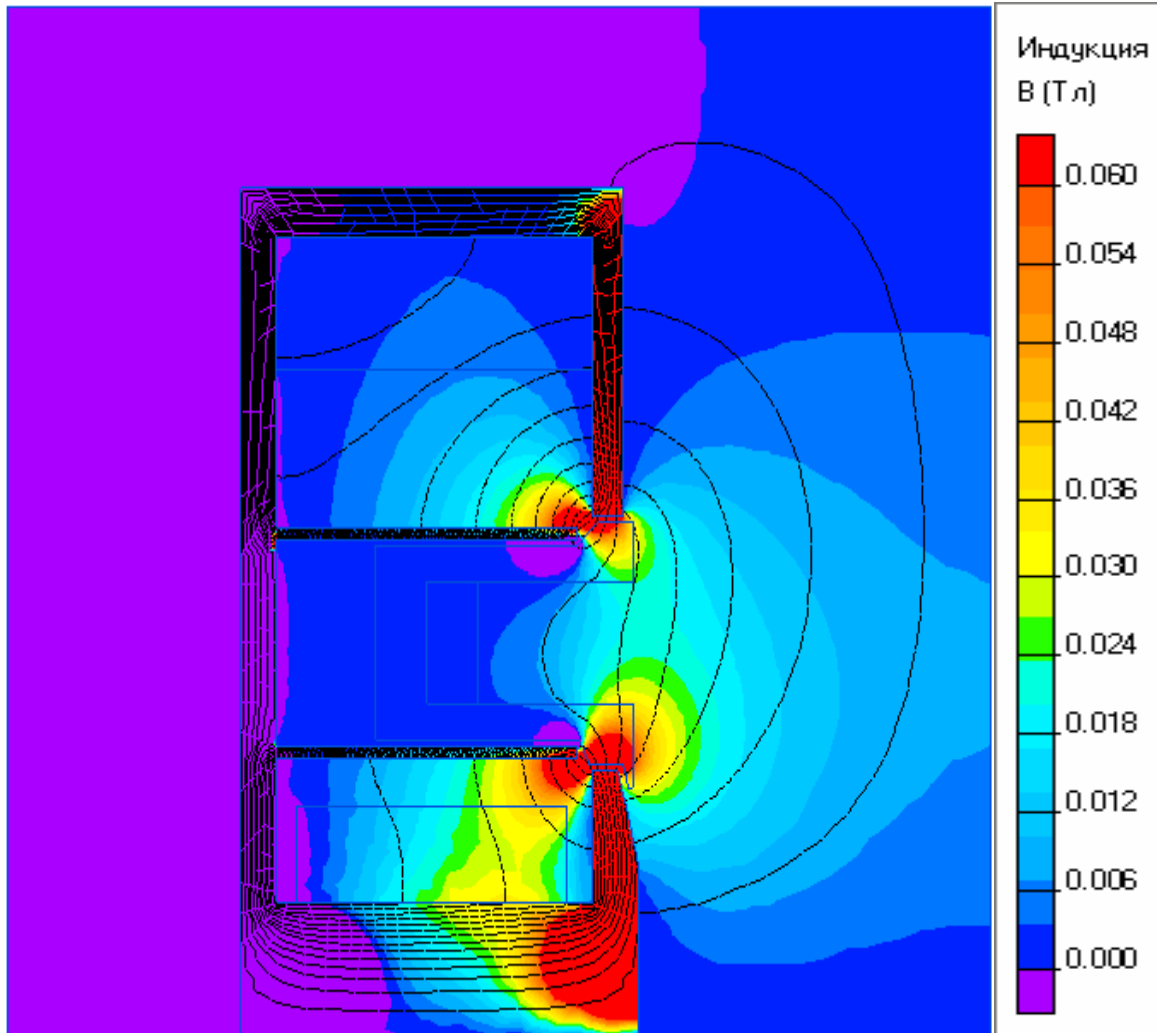


Недостатки полученной системы:

- 1) большая толщина стенок магнитопровода и его наконечников;
- 2) магнитное поле на аноде не равно нулю;
- 3) канал слишком сильно вынесен относительно магнитопровода.

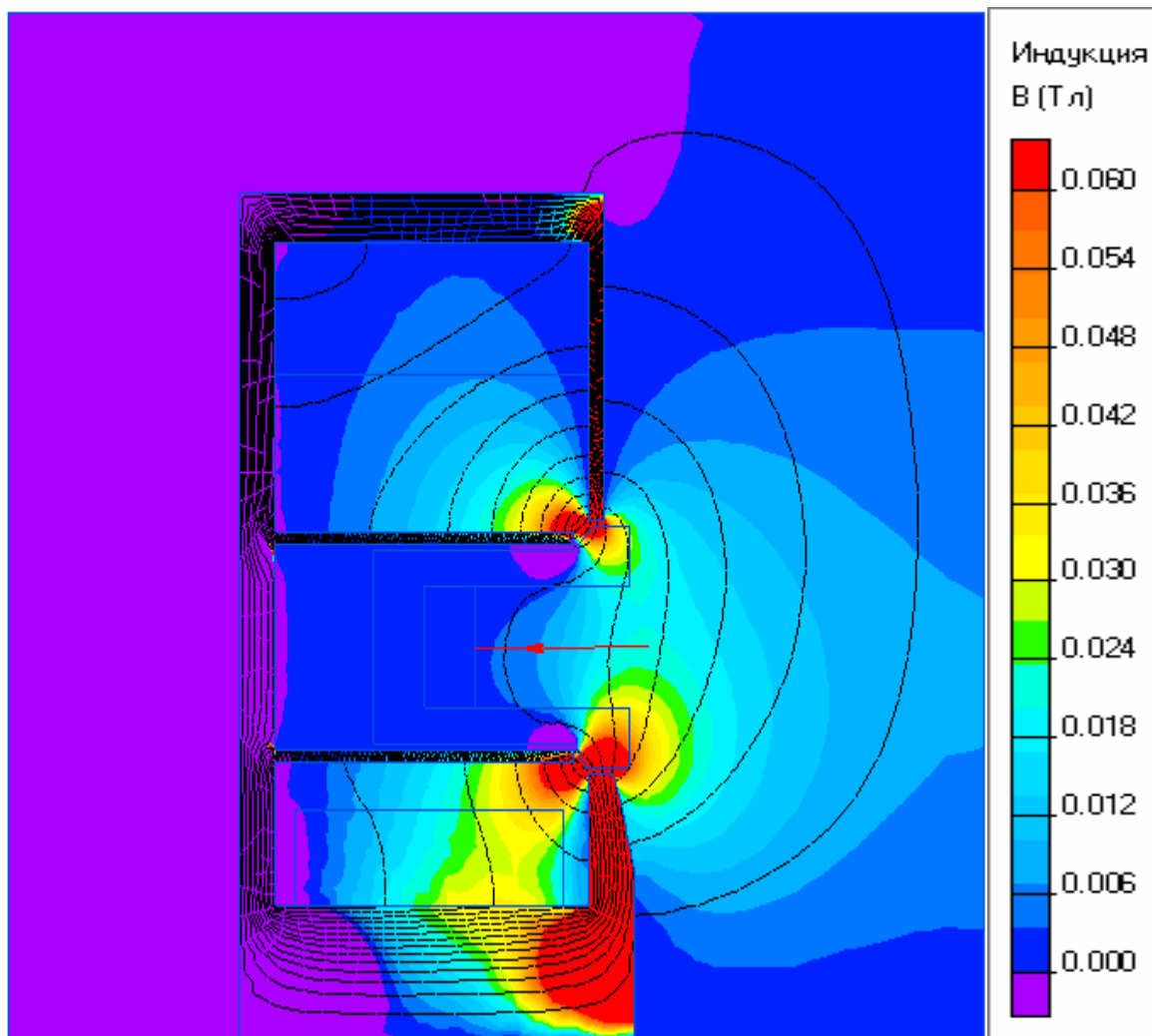
Усовершенствование системы:

- 1)уменьшаем стенки магнитпровода;
- 2)уменьшаем вынос канала относительно магнитпровода;
- 3)уменьшаем расстояние между экраном и каналом, и между экраном и наконечниками магнитпровода.



Значение поля на аноде стало равным нулю.

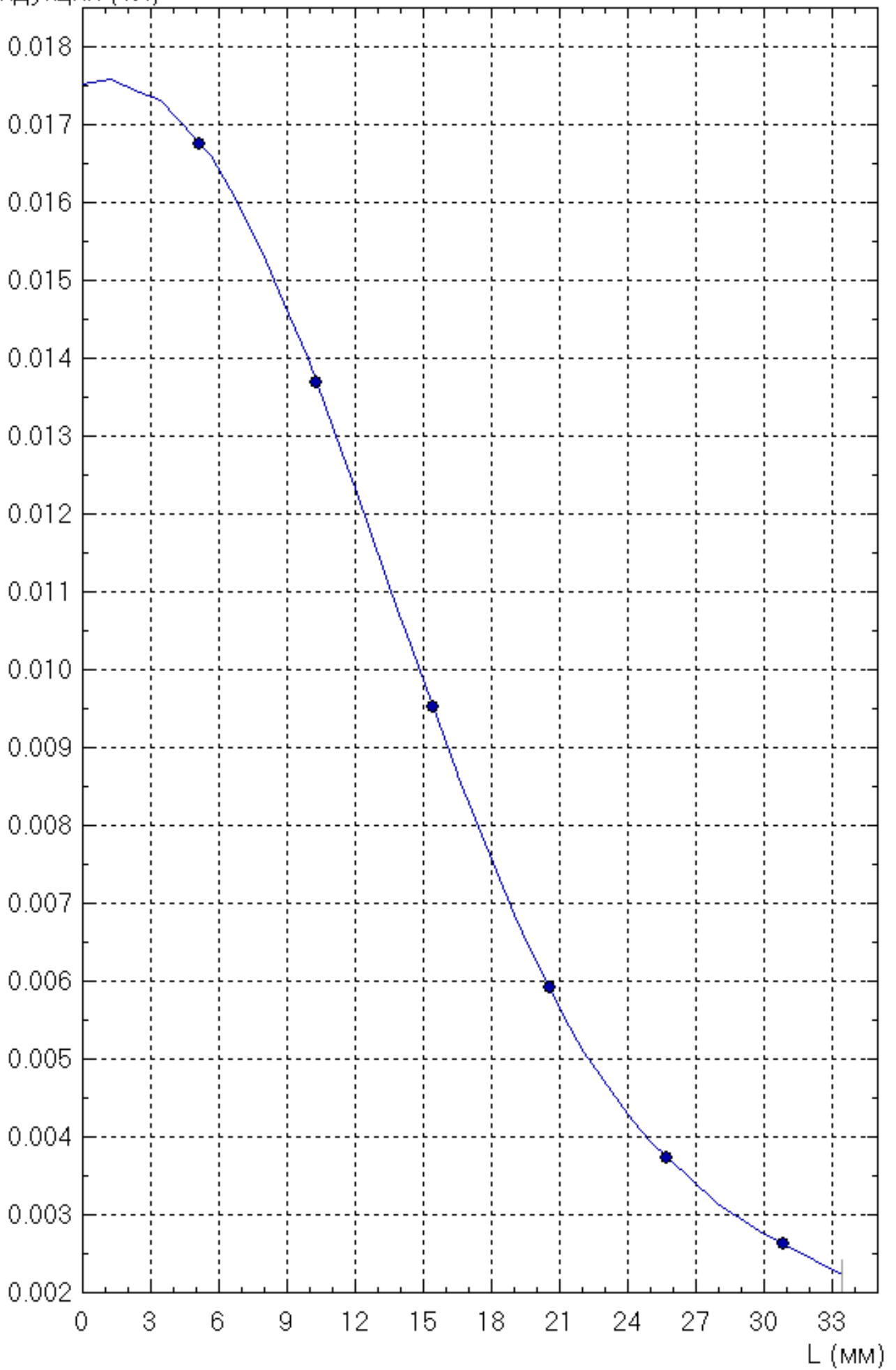
Уменьшим наконечники магнитопровода для получения большего градиента магнитного поля, а также уменьшения веса установки:



Данная система удовлетворяет задаче расчета.

График показывает что на конце канала локализовано необходимое значение радиальной составляющей индукции магнитного поля, градиент имеет необходимую крутость, а поле на аноде практически равно нулю.

Индукция (Тл)



Список литературы:

1. Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б. Стационарные плазменные двигатели. – Харьков: Харьк.авиацинститут, . – 1989.
2. Белан Н.В., Ким В.П., Севрук Д.Д. Методика инженерного расчета стационарных плазменных двигателей. – Харьков: Харьк.авиацинститут, . – 1980.
3. Хартов С.А. Расчет элементов двигательной установки со стационарным плазменным двигателем / Учебное пособие. – М.: МАИ, в печати.
4. ELCUT[®]. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. – Версия 5.4, руководство пользователя. – Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2006. – 54