

Московский Авиационный Институт  
(Государственный Технический Университет)  
МАИ

---

Кафедра 208

Отчет о вычислительной практике  
Тема: «Расчетное исследование магнитного поля в  
ускорительном канале СПД-70»

Выполнил  
Студент гр.02-110  
Илюшкин Д. А.

Консультант  
Хартов С. А.

Москва, 2008

**Оглавление.**

Оглавление.....	2
Введение .....	3
Задание .....	6
Алгоритм решения .....	7
Результаты расчётов .....	9
Вывод .....	18
Список используемых источников.....	19

## Введение

Электроракетные двигатели (ЭРД) - это двигатели, в которых ускорение рабочего тела осуществляется силами электромагнитного поля.

Начиная с 1970 года в нашей стране одним из самых распространенных ЭРД, эксплуатирующихся в космосе, стал стационарный плазменный двигатель (СПД). Относительная простота конструкции двигательной установки, систем ее электропитания и управления наряду с высокими тяговыми характеристиками двигателя позволяют СПД успешно конкурировать с другими типами ЭРД для осуществления маневров космических аппаратов, как в околоземном пространстве, так и для межпланетных перелетов.

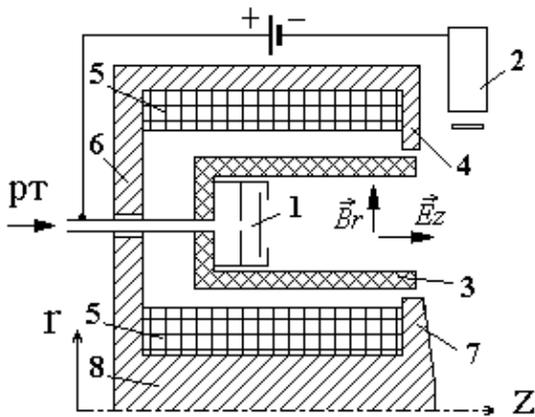


Рис. 1

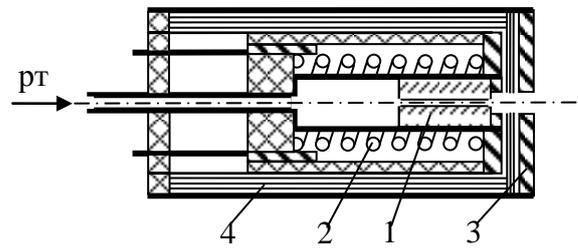


Рис. 2

Современные принципиальные схемы СПД (рис. 1) содержат анод-газораспределитель – 1, расположенный внутри керамической разрядной камеры (РК) – 3, стенки которой образуют ускорительный канал кольцевой формы, катод-компенсатор (К-К) – 2 и магнитную систему, включающую наружный полюс – 4, катушки намагничивания – 5, центральный сердечник – 6 с внутренним полюсом – 7 и магнитопровод – 8.

В качестве катода в СПД, как правило, используются газоразрядные источники электронов типа полого катода (рис. 2), содержащие эмиттер электронов 1, обдуваемый потоком рабочего тела и подогреваемый нагревателем 2. Зажигание разряда в катоде осуществляется с помощью специального поджигного электрода 3. На рабочем режиме электроны, уходящие с поверхности катода, ускоряются в прикатодном скачке потенциала у поверхности эмиттера и ионизируют атомы рабочего тела, находящиеся вблизи этой поверхности. Образующаяся у поверхности эмиттера плазма обеспечивает возможность пропускания большого потока электронов при небольшой разности потенциалов. Необходимая температура эмиттера на установившемся режиме может поддерживаться за счет энергии ионов, выпадающих из прикатодной плазмы на поверхность эмиттера, т. е. можно организовать работу катода в так называемом «авторежиме» (без внешнего подогрева) при обеспечении тепловой изоляции эмиттера с помощью тепловых экранов 4.

Одна часть электронов из катода направляется в ускорительный канал для поддержания горения разряда, а вторая – уходит с истекающей из двигателя струей, компенсируя её объемный заряд. Поэтому, в силу двойной функции, катод в СПД получил название «катод-компенсатор».

Конструктивное выполнение двигательного модуля СПД зависит от конкретного назначения двигательной установки (ДУ) и условий размещения двигателя на космическом аппарате. Вместе с тем имеются и общие элементы, которые могут быть рассмотрены на примере одного из вариантов конструкции (рис. 3):

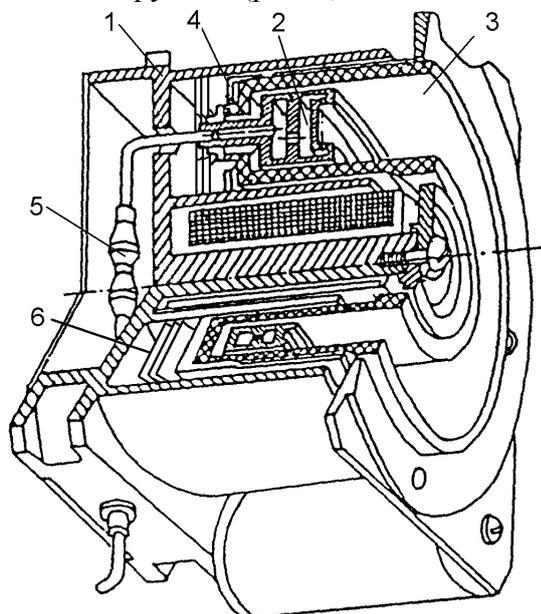


Рис. 3

На рисунке 3 представлена конструктивная схема СПД, в которой:

- а) Магнитная система 1 составляет основу силовой схемы двигателя.
- б) Анод-газораспределитель 2 выполняется в виде полой кольцевой коробки, содержащей перегородки с отверстиями малого диаметра, разделяющими ступени газораспределения. Данная схема газораспределения служит для выравнивания поступления рабочего тела в разрядную камеру в условиях перехода от континуального к свободномолекулярному течению газа.
- в) Керамическая разрядная камера 3 выполняется, как правило, в виде монолитной детали с кольцевым пазом, образующим ускорительный канал.
- г) Разрядная камера крепится к магнитной системе с помощью переходной металлической обоймы 4, которая как элемент с повышенным тепловым сопротивлением уменьшает передачу тепла от анода и керамической камеры к магнитной системе.
- д) Для электрической изоляции анода в трубопроводе подачи рабочего тела используется газоэлектрическая развязка 5, выполненная в виде диэлектрической трубки с металлическими наконечниками, к которым присоединяются подводящие и отводящие газ трубки.
- е) Конструкция содержит экранно-вакуумную изоляцию 6 для снижения потоков тепла к элементам крепления двигателя (или к элементам с ограниченным диапазоном рабочих температур, например катушкам электромагнита).
- ж) Катод-компенсатор располагается снаружи двигателя вблизи наружного полюса; для защиты его поверхностей от распыления ускоренными ионами, ось катода располагают под углом  $45^{\circ}$  к оси двигателя, либо параллельно ей.

Эффективность преобразования энергии в СПД определяется в основном качеством фокусировки ионного потока, которое, в свою очередь, зависит от характеристик магнитного поля в ускорительном канале. С увеличением градиента индукции магнитного поля от анода к срезу ускорительного канала, фокусировка ионного потока улучшается. При этом увеличивается кривизна силовых линий электрического поля, возрастают значения: отношения ионного тока к току разряда, среднего по струе

значения угла отклонения траекторий ионов от оси двигателя и коэффициента кинетической эффективности ускорения  $\eta_e$ . Это позволяет теоретически довести тяговый КПД двигателя до 0,6. Толщина керамической стенки ограничена шириной межполюсного зазора магнитной системы и экспериментально подобранной оптимальной шириной ускорительного канала. При полном распылении керамической стенки начинается процесс распыления полюсов магнитной системы (скорость распыления металла существенно выше скорости распыления керамики). В результате износа полюсов будет происходить изменение величины индукции и топологии магнитного поля, что приведет к снижению характеристик двигателя, в частности тяги. Данное явление можно отнести к параметрическому отказу двигателя. Время, в течение которого значение тяги двигателя будет обеспечиваться в установленных пределах (как правило,  $\pm 2 \dots 5\%$ ), будем называть временем безотказной работы СПД.

Таким образом, решение проблем, как повышения времени безотказной работы, так и улучшения характеристик двигателя очевидно связано с формированием оптимального распределения магнитного поля в ускорительном канале.

## **Задание**

Исследование изменения конфигурации магнитного поля в канале СПД при изменении длины экрана с помощью программы ELCUT.

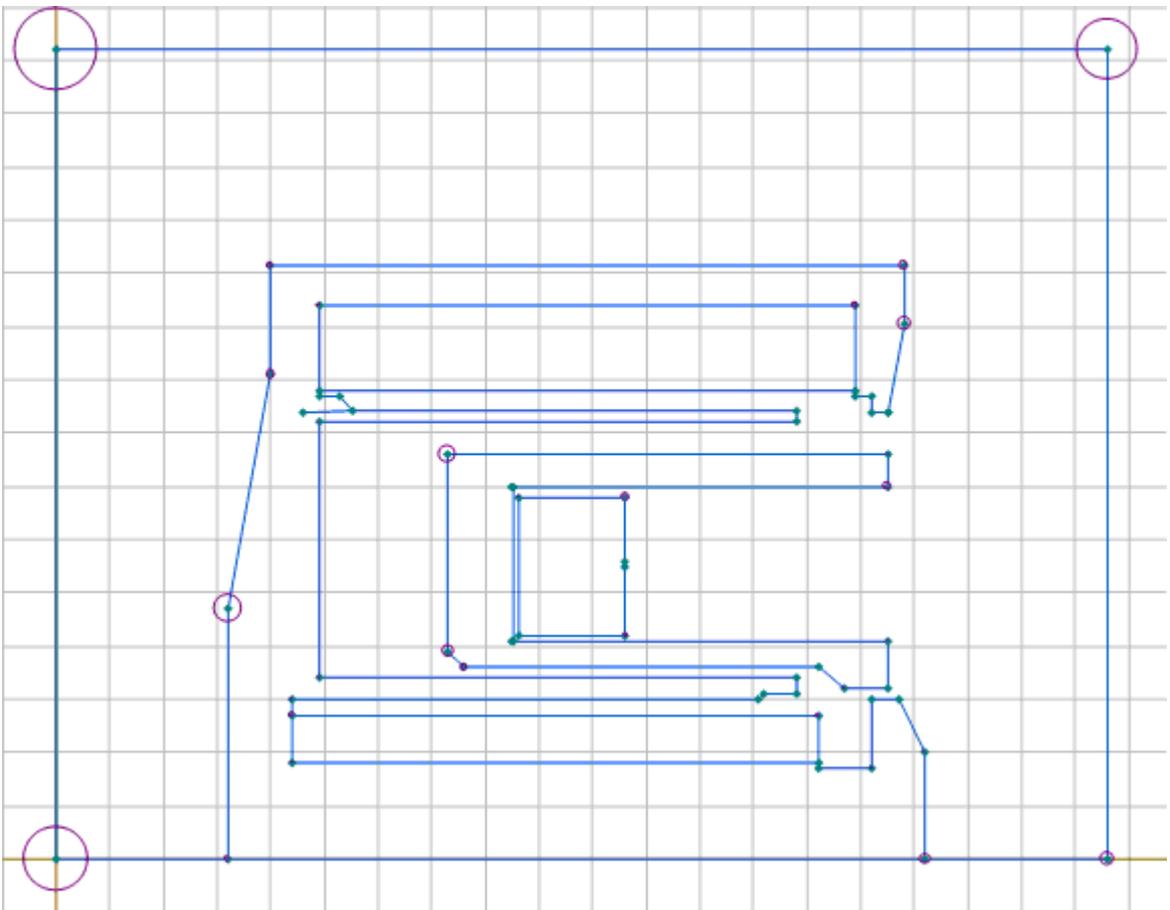
## Алгоритм решения

Первый шаг: Создание задачи ELCUT

- Запуск ELCUT
- Создание новой задачи и геометрической модели
- Настройка свойств задачи

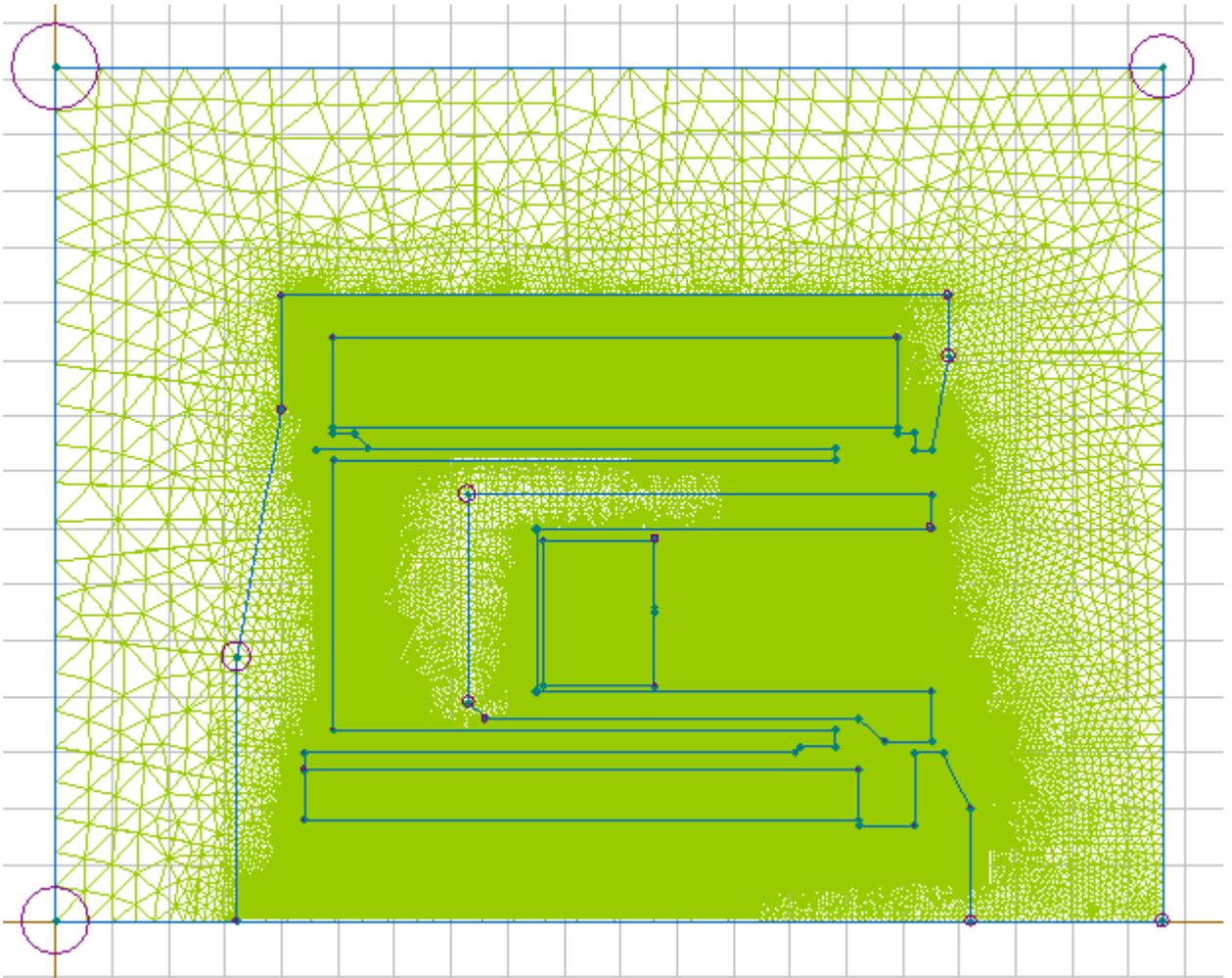
Второй шаг: Рисуем геометрическую модель

- Добавление геометрических объектов
- Настройка масштаба в окне модели
- Сохранение файла модели



Третий шаг: Генерируем сетку конечных элементов и помечаем геометрические объекты

- Управление густотой сетки
- Построение сетки
- Присвоение меток



Четвертый шаг: Создаем и метки и устанавливаем физические свойства

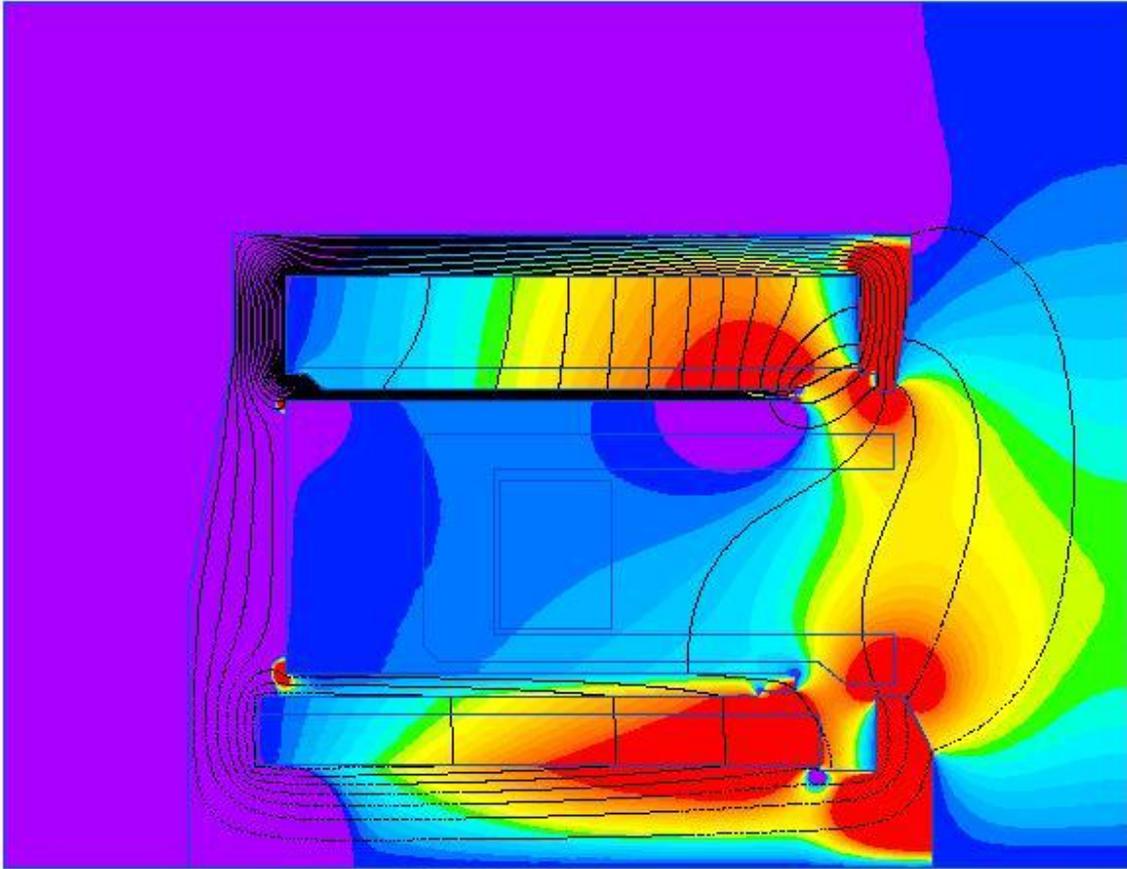
- Создание новых меток
- Определение физических свойств метки
- Физические свойства метки ребра

Пятый шаг: Решение задачи и анализ результатов

Шестой шаг: Варьируем параметры задачи

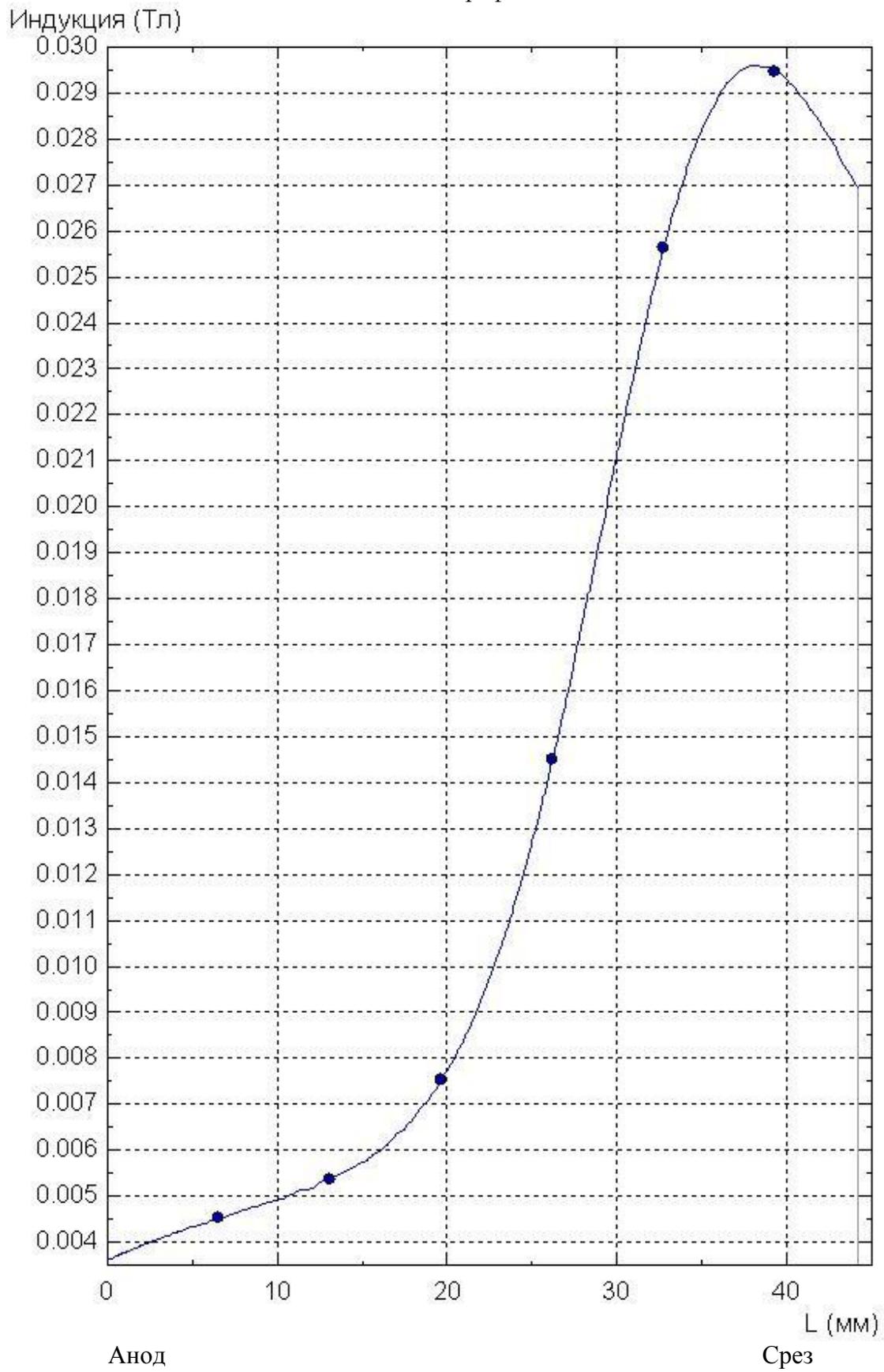
Дополнительный шаг: Картины поля и графики

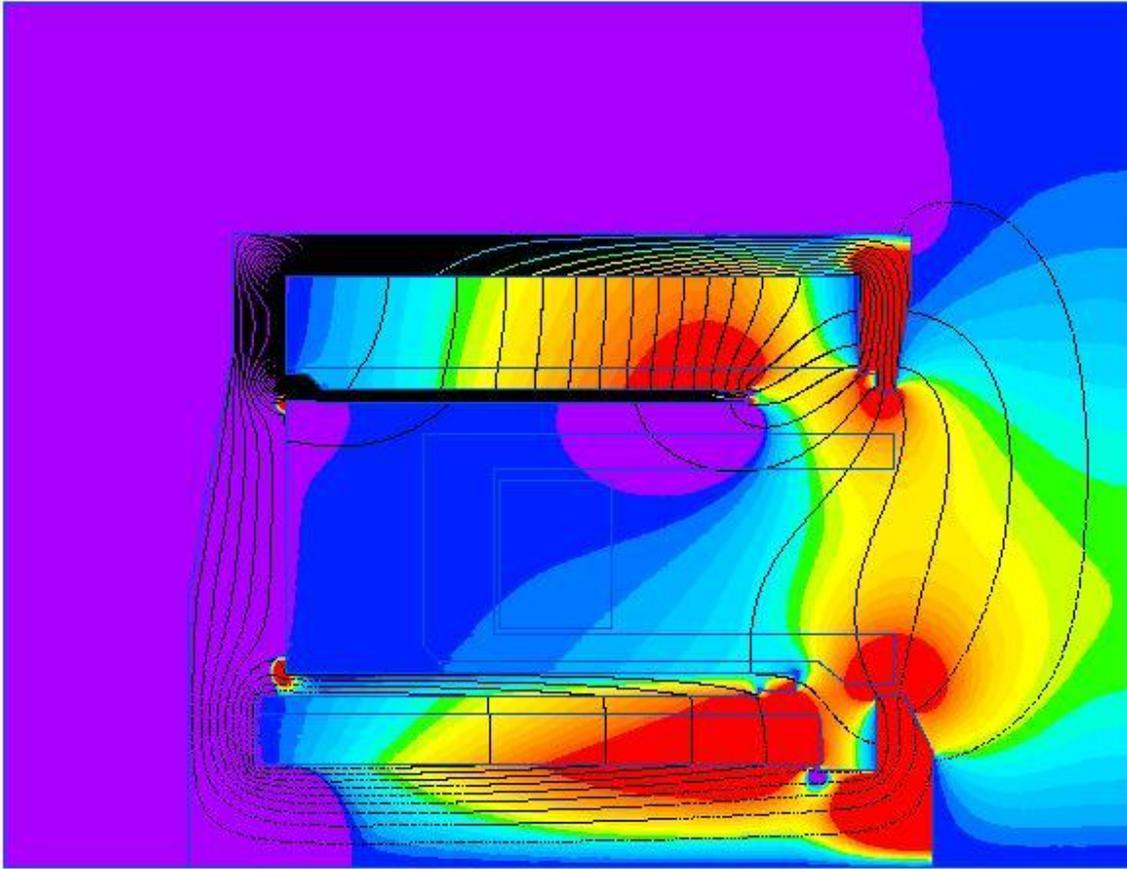
## Результаты расчётов



Исходная геометрия

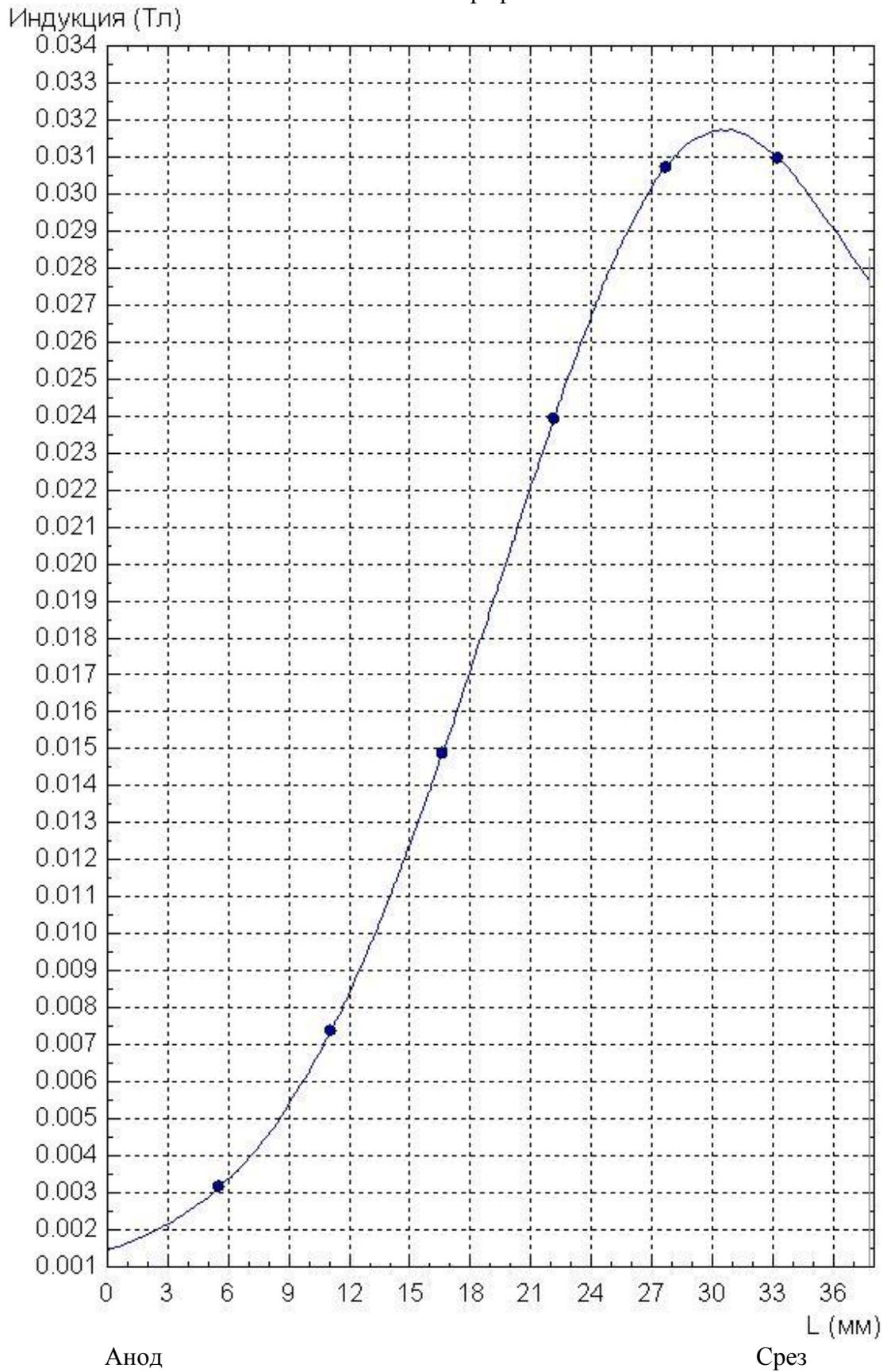
График 1

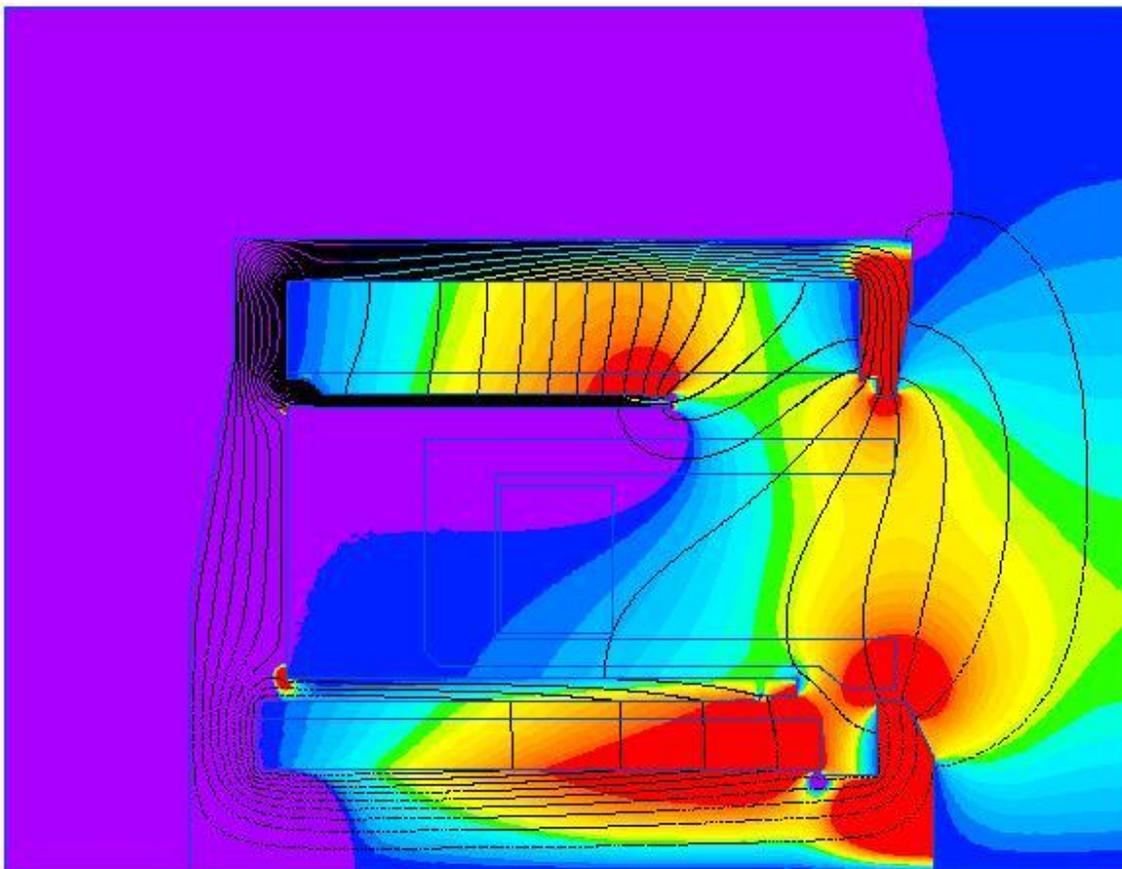




Геометрия при изменении шага в направлении к аноду на 3 мм от исходной

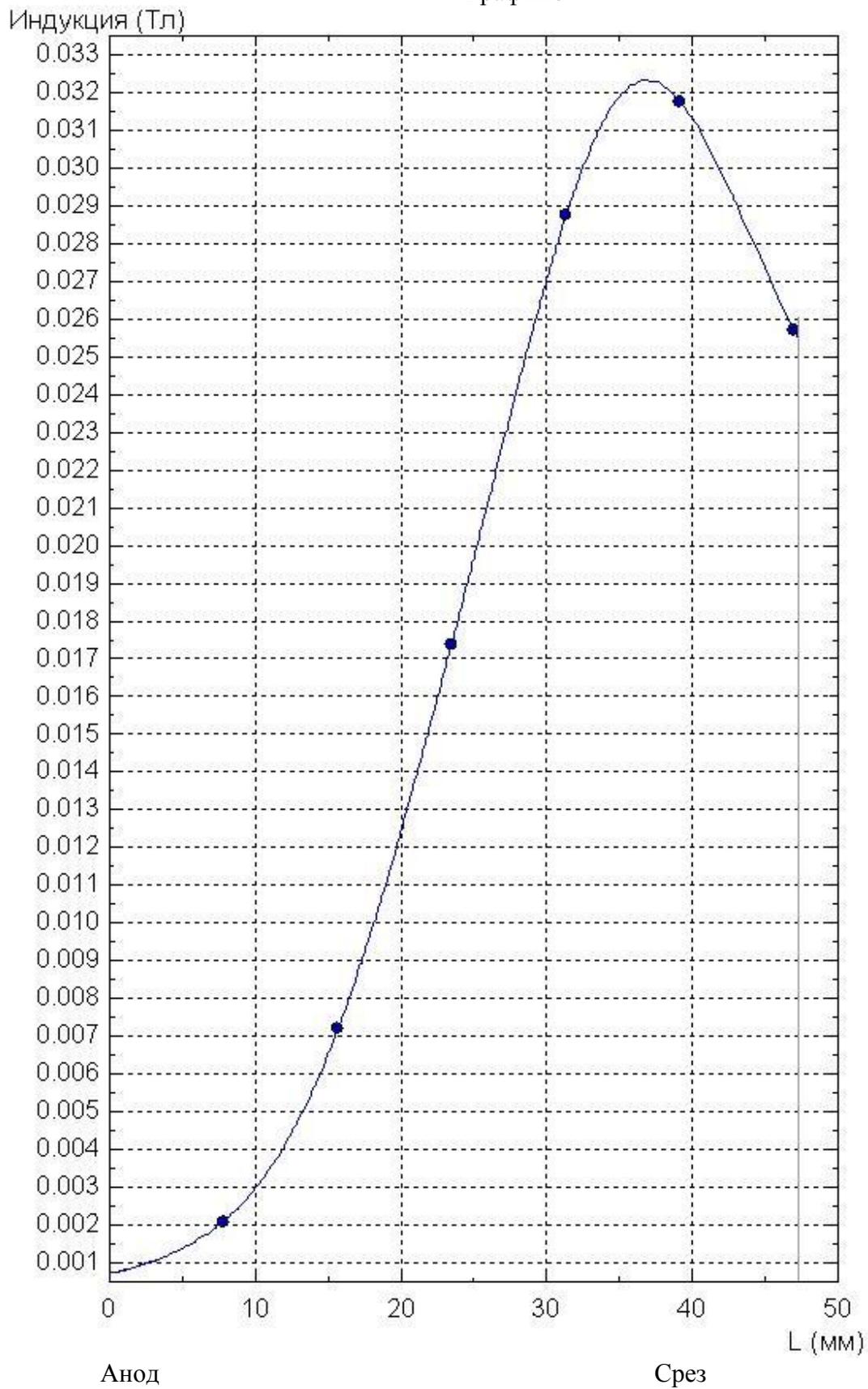
График 2

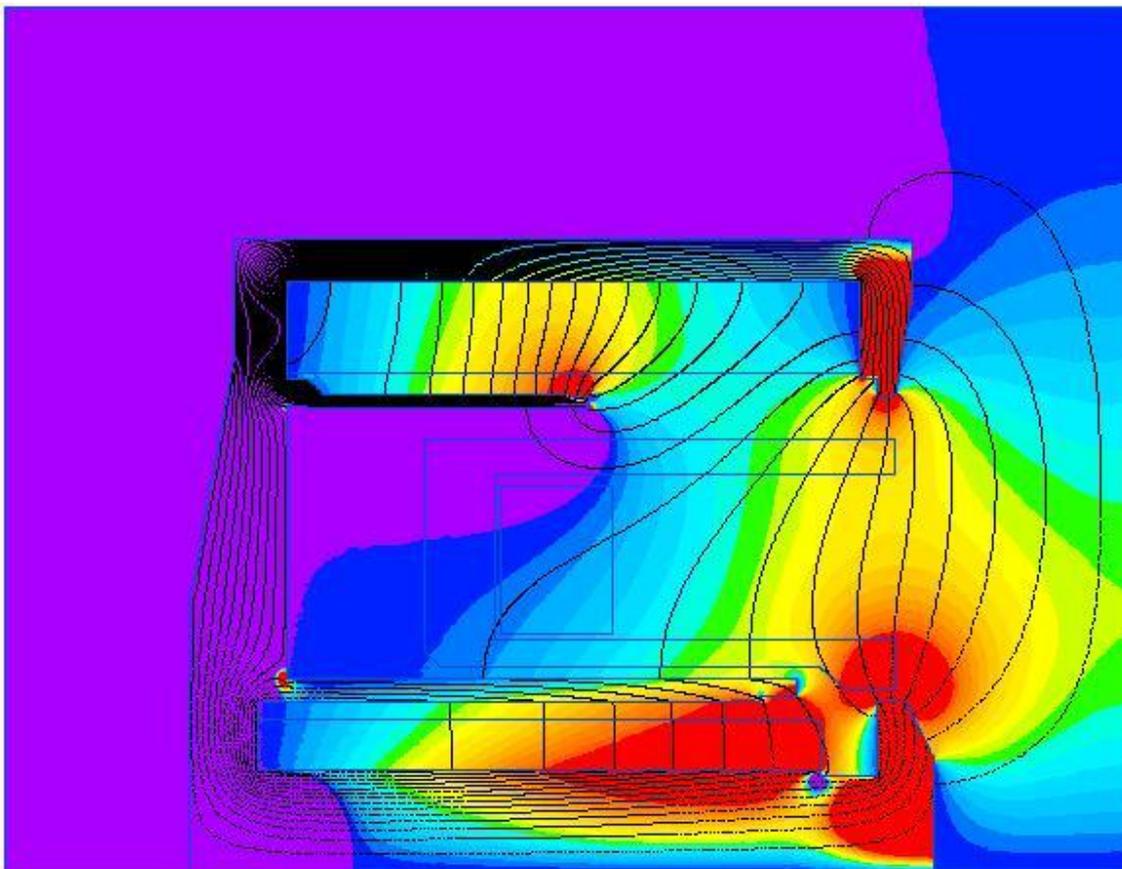




Геометрия при изменении шага на 10 мм от предыдущей

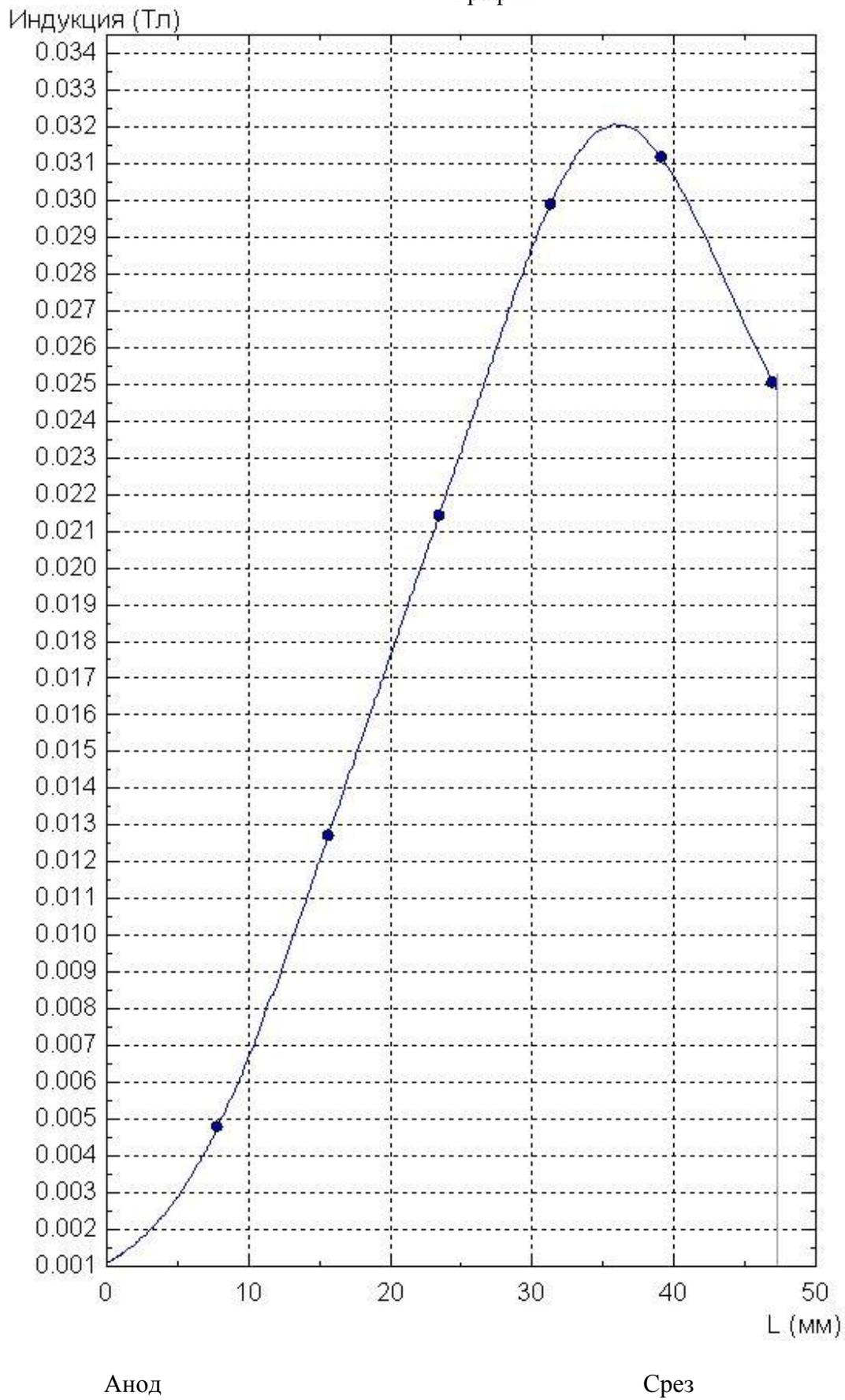
График 3

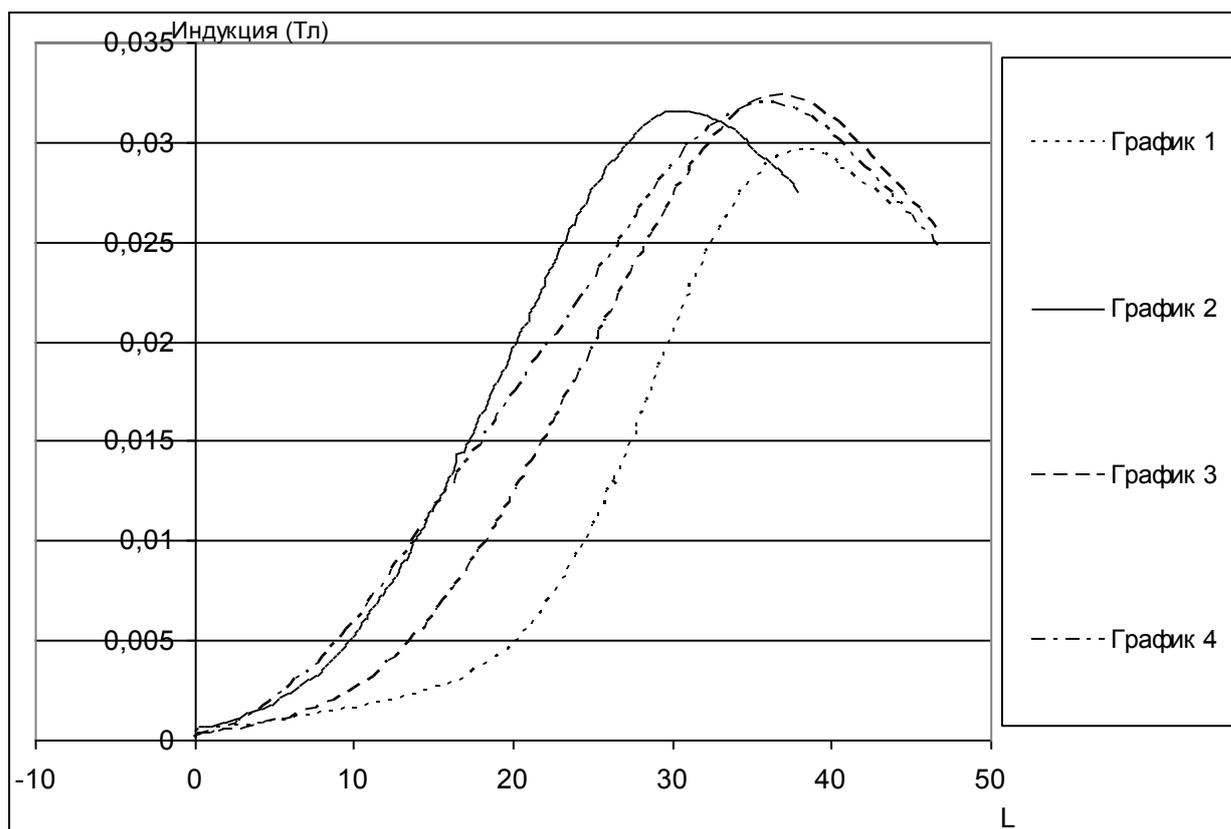




Геометрия при изменении шага на 10 мм от предыдущей

График 4





№ графика	Геометрия
График 1	Исходная геометрия
График 2	Геометрия при изменении шага в направлении к аноду на 3 мм от исходной
График 3	Геометрия при изменении шага на 10 мм от предыдущей
График 4	Геометрия при изменении шага на 10 мм от предыдущей

## Вывод

По мере удаления торца экрана от межполосного зазора величина максимума радиальной составляющей индукции  $B$  увеличивается, изменяется скорость нарастания  $B$  по длине канала (График 3, График 4). При большем перемещении торца экрана к аноду градиент уменьшается (График 3, График 4) и смещается обратно к срезу (График 3, График 4).

Таким образом, путём изменения геометрии магнитных экранов можно управлять положением магнитного поля в канале двигателя СПД.

## **Список используемых источников**

- 1) ELCUT®. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. – Версия 5.4, руководство пользователя. – Санкт-Петербург: Производственный кооператив ТОР, 2006.
- 2) Белан Н.В., Ким В.П., Оранский А.И., Тихонов В.Б. Стационарные плазменные двигатели. – Харьков: Харьк. авиац. институт, 1989.