

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П.Королева»  
(Самарский университет)

Институт информатики, математики и электроники  
Факультет электроники и приборостроения  
Кафедра конструирования и технологии электронных систем и устройств

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)  
«ДЕТЕКТОР ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ»

по направлению подготовки 11.04.03 Конструирование и технология  
электронных средств  
(уровень магистратуры)

Профиль «Радиоэлектронные средства специального назначения и  
технология их производства»

Студент \_\_\_\_\_ А.А.Асадова

Руководитель ВКР

к.ф.-м.н., доцент \_\_\_\_\_ А.М. Телегин

Рецензент

к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Е.Е. Ярославкина



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П.Королева»  
(Самарский университет)

Институт информатики, математики и электроники  
Факультет электроники и приборостроения  
Кафедра конструирования и технологии электронных систем и устройств

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ /Тюлевин С.В./

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

(магистр)

студентке Асадовой Анне Алиевне

группы № 6275-110403D

Тема работы: «Детектор высокоскоростных микрочастиц»  
утверждена приказом по университету от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.  
№ \_\_\_\_\_

Цель работы: расчет и моделирование работы детектора  
высокоскоростных микрочастиц.

Решаемые задачи:

- 1) Проведение обзора и сравнение характеристик существующих детекторов высокоскоростных микрочастиц;
- 2) Обзор методов расчета электростатических полей;

3) Разработка модели детектора высокоскоростных микрочастиц;

4) Разработка конструкции детектора высокоскоростных микрочастиц.

Научный руководитель  
доцент каф. КТЭСиУ

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ А.М. Телегин

\_\_\_\_\_ А.А. Асадова

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 57 с, 32 рисунка, 4 таблицы, 23 источника, 1 приложение.

НАВЕДЕННЫЙ ЗАРЯД, ВЕКТОР СКОРОСТИ,  
МИКРОМЕТЕОРОИДЫ, ТЕОРЕМА РАМО-ШОКЛИ,  
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Объектом исследований являются структуры, построенные в программе BetaFields.

Целью исследования является: расчет и моделирование детектора высокоскоростных микрочастиц.

Рассмотрены возможные конструкции устройства. Установлено, что в качестве примера для разработки новой конструкции лучше всего использовать датчик на основе измерения индуцированных электрических сигналов, однако, в данном методе каждый из электродов оснащен, чувствительным к заряду, усилителем.

Смоделированы различные вариации пролета микрочастицы

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Методы детектирования заряженных частиц .....	9
1.1 Моделирование с использованием пьезодатчиков.....	9
1.2 Масс-спектрометр.....	11
1.3 Сенсор для регистрации космического мусора .....	13
1.4 Измерение индуцированных электрических сигналов .....	15
1.5 Датчик пыли CCLDAS .....	16
1.6 Космический пылеуловитель на борту КА Кассини CDA .....	17
1.7 Измеритель вектора скорости.....	19
2 Методы расчета электростатических полей.....	22
2.1 Расчет с помощью теоремы Рамо-Шокли .....	22
2.2 Метод функции Грина .....	25
2.3 Метод зеркальных изображений .....	25
2.4 Метод импедансов связи .....	26
2.5 Моделирование в пакете программ CST STUDIO SUITE .....	27
2.6 Программа ELCUT.....	28
2.7 Метод конечных элементов в программе BETAFields .....	28
3 Физико-математическая модель устройства .....	32
3.1 Работа в программе BETAFields .....	32
3.2 Моделирование параметров электростатического поля.....	34
3.3 Моделирование пролета частицы .....	38
3.4 Численный расчет напряженности.....	40
3.5 Электротехническая модель детектора вектора скорости.....	44

4	Разработка конструкции .....	46
4.1	Вид конструкции .....	46
4.2	Выбор материала рамки .....	47
4.2.1	ABS .....	47
4.2.2	Flexible.....	47
4.2.3	PLA .....	47
4.2.4	HIPS .....	48
4.2.5	PETG.....	48
4.2.6	Nylon.....	48
4.2.7	Carbon Fiber Filled .....	48
4.2.8	ASA.....	48
4.2.9	Поликарбонат .....	48
4.2.10	Металлический порошок.....	48
4.2.11	PVA.....	49
4.2.12	Материалы для космической техники .....	49
4.3	Выбор материала электродов .....	51
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	54

## ВВЕДЕНИЕ

Микрометеороиды вращающиеся вокруг нашей планеты на очень высокой скорости, являются одной из основных проблем на низкой орбите. Скорости несколько километров в секунду (а именно такая скорость присуща микрометеороидам) достаточно, чтобы повредить КА. С каждым годом количество космического мусора растет, тем самым увеличивается риск его попадания в КА[1].

На сегодняшний день зарегистрировано около 100 тысяч космических объектов размером более 50 мм, более 500–600 тысяч размером от 10 до 100 мм и 100 миллионов размером от 1 мм до 10 мм. Количество более мелкого космического мусора порядка миллиардов и триллионов объектов [2, 3]. Их средняя скорость составляет 40000 км/ч, что представляет серьезную угрозу не только для МКС, но и для космических аппаратов. С помощью специальных систем происходит отслеживание 18 тысяч самых крупных объектов. Ввиду высокой численности для микрометеороидов таких массовых систем нет. Поэтому даже небольшой обломок способен нанести серьезный ущерб космическому аппарату (в мае 2016 года частица космического мусора сделала 7-миллиметровую трещину в наблюдательном модуле МКС).

Развивая космонавтику практически не думали об отслеживании метеороидов. В России данная тема приобрела актуальность с 1995 года, когда была доказана возможность обнаружения метеороидов метрового и декаметрового размера не только во время их пролета сквозь земную атмосферу, но и задолго до подлета к Земле.

Изучение компонентного состава микрометеоритов проводят химическими и оптическими способами, но гораздо больший интерес вызывают исследования, проводимые в космосе. Помимо состава важно учитывать массу и скорость микрометеороидов.

Актуальность темы моделировании новой конструкции детектора вектора скорости, путем расчета в программном пакете BetaFields.

Для проведения вычислений независимых от программных была использована теорема Рамо-Шокли, в которой говорится о наведенных при движении точечного заряда токах для произвольной формы электродов и однородной диэлектрической среды.

Целью исследования является: расчет детектора высокоскоростных микрочастиц.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести обзор и сравнить характеристики существующих детекторов высокоскоростных микрочастиц;
- 2) Рассмотреть методы расчета электростатических полей;
- 3) Составить модель детектора высокоскоростных микрочастиц;
- 4) Разработать конструкцию детектора высокоскоростных микрочастиц.

## 1 Методы детектирования заряженных частиц

### 1.1 Моделирование с использованием пьезодатчиков

Воздействие высокоскоростных частиц, вызванное антропогенным мусором (как космическим мусором) и природными микрометеороидами, создает угрозу для безопасной эксплуатации орбитальных космических аппаратов.

В работе [4] была разработана гибридная модель, основанная на трехмерной гидродинамике гладких частиц и конечных элементах. Моделирование было выполнено с использованием гибридной модели, в которой снаряд при различных скоростях наносил серию ударов обычным или наклонным образом.

Оборудование электростатического ускорителя высокоскоростных микрочастиц (HVI), установленное в Государственной лаборатории по исследованию взрывов и технологии Китая, использовалось для испытаний HVI. Основным оборудованием является двухступенчатая пушка с легким газом, через которую можно ускорить снаряды, со скоростью до 10 км/с - скорость удара в типичном событии HVI в условиях низкой околоземной орбиты, когда частица мусора от КА сталкивается с космическим аппаратом. Газообразный азот высокого давления, заполненный трубкой первой ступени (с большим поперечным сечением) пушки с легким газом, продвигает поршень для сжатия трубки второй ступени (с гораздо меньшим поперечным сечением) пушки которая заполнена газообразным водородом. После достижения заданного значения давления газообразный водород прорывается через алюминиевую мембрану с предварительно подготовленной выемкой, а затем ускоряется до определенной скорости.

После отделения снаряда от опорного кольца использованием пневматического сепаратора, снаряд воздействует на структуру цели. Скорость удара калибруется в соответствии с разностью времени прибытия между двумя магнитными индукционными катушками в газовом

пистолете с расстоянием 50 мм. В конце газовой пушки помещена испытательная камера, подвижный экранирующий узел которой был иммобилизован с разными углами падения относительно снаряда, как показано на рисунке 1.

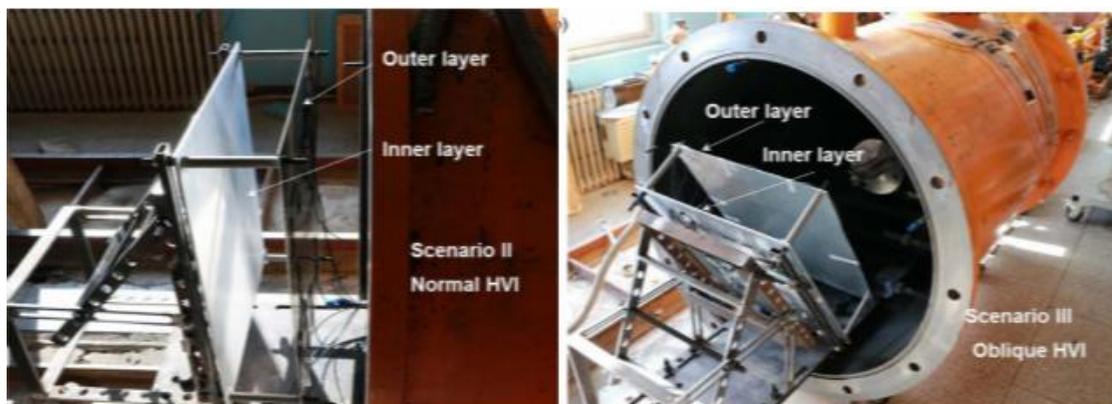


Рисунок 1 - Фотографии двухслойного экранирующего узла, а) для нормального воздействия; и (б) для косо́го удара

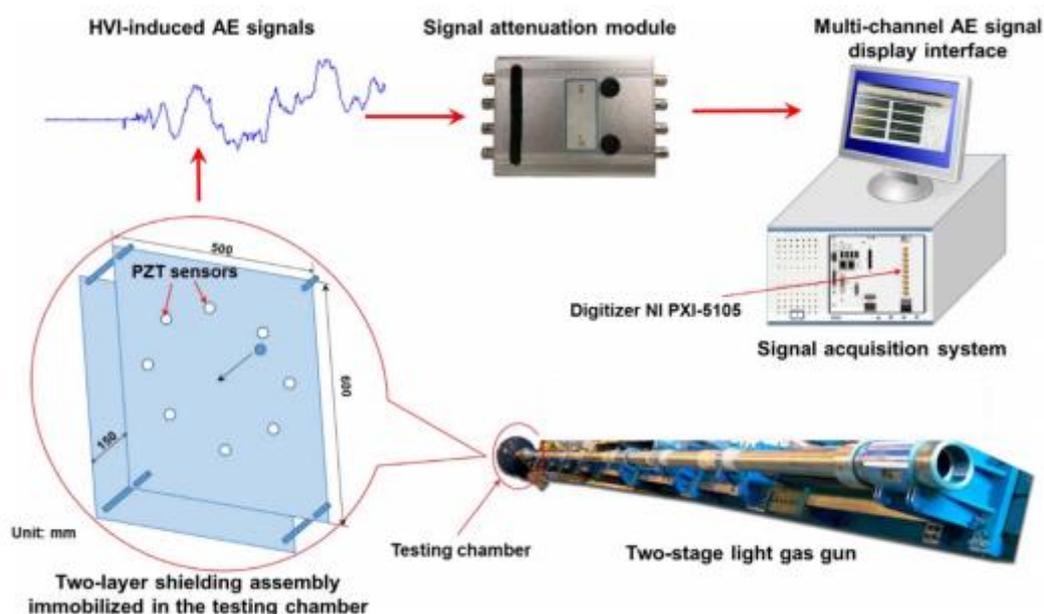


Рисунок 2- Экспериментальная установка

Для сбора сигналов АЕ в режиме реального времени была создана встроенная сенсорная сеть, индуцированных в НВИ. Поверхность смонтирована на наружном слое (обращена к снаряду) с использованием двухкомпонентного клея, сенсорной сети, состоящей из семи миниатюрных и легких пьезоэлектрических пластин. Все пластины, а

также связанные с ними проводки и кабели, были защищены с помощью эпоксидной смолы от отсоединения от сборки при возникновении НВИ. По сравнению с обычными громоздкими АЕ-преобразователями, пьезоэлектрические пластины, используемые в этом исследовании, являются легкими и малыми, что дает возможность местного восприятия индуцированных НВИ сигналов АЕ. Поскольку толщина пьезоэлектрической пластины намного меньше по сравнению с толщиной экранирующего слоя, она преимущественно захватывает деформацию в плоскости вдоль направления распространения волны для представления сигналов АЕ.

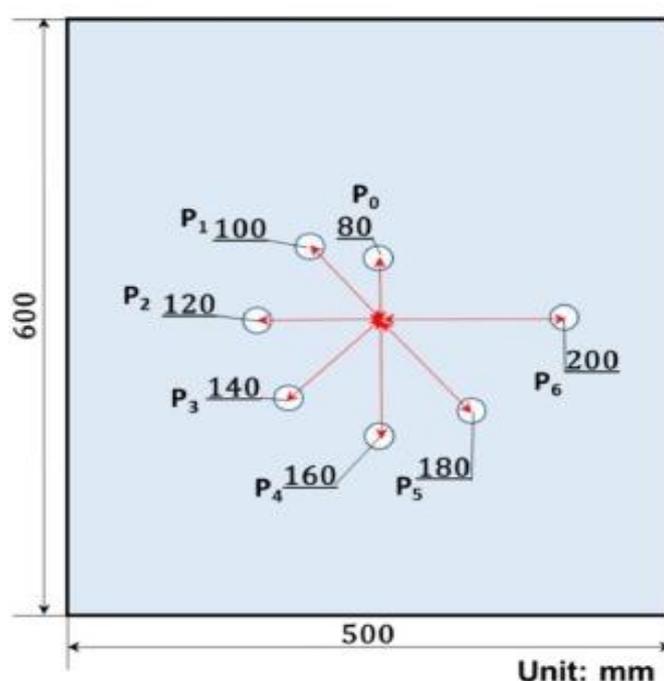


Рисунок 3 - Расположение пластин

Анализ сигналов в временные и частотные области показали, что многоволновые моды, вместе со структурными вибрациями сосуществуют в захваченных сигналах АЭ, влекущих соответствующая обработка сигналов и экранирование.

### 1.2 Масс-спектрометр

Эксперименты по моделированию микрометеороидов [5] проводились с помощью электростатического ускорителя высокоскоростных частиц и фильтра с массовой скоростью. Проведено

измерение и анализ излучения положительных и отрицательных зарядов при ударе частиц железа с массами  $m$  и скоростью  $v$  на толстых мишенях  $W$ , что позволяет обнаруживать частицы с  $m = 10-16$  г при  $v = 10$  км/с, Скорость частиц можно определить непосредственно из формы импульса как положительных, так и отрицательных импульсов заряда. Схема устройства приведена на рисунке 4.

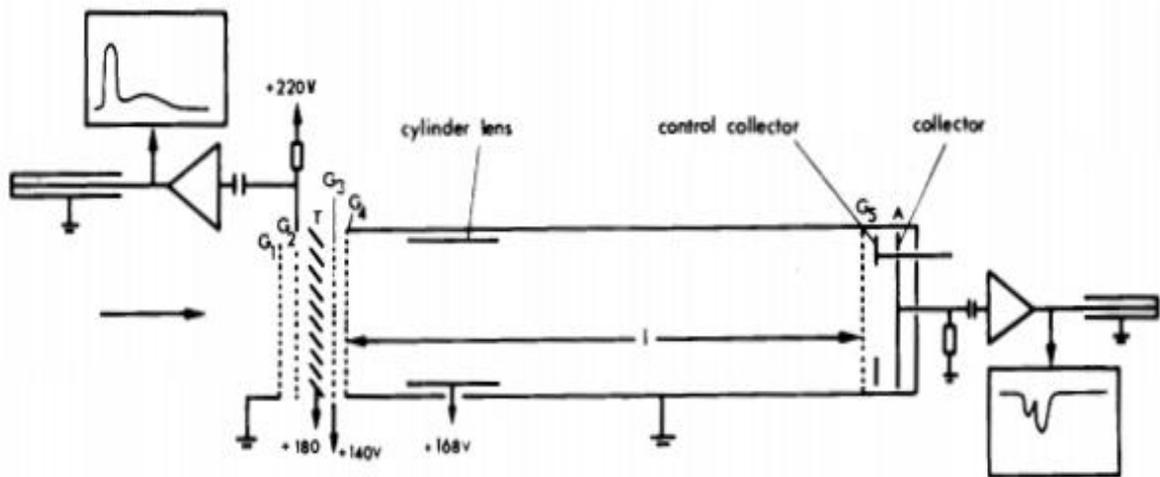


Рисунок 4 - Схематическая диаграмма времяпролетного масс-спектрометра для положительных ионов. Т - цель; G2 - сетка для сбора электронов; G3, G4 - ускоряющие сетки для положительных ионов; А - ионный детектор.

Коллекторная система, состояла из целевой пластины и сетки, которая была установлена на расстоянии 12 мм перед мишенью. Сетка состояла из рамы шириной  $60 \times 60$  мм с окном  $40 \times 40$  мм и параллельными платиновыми проволоками диаметром 0,03 мм. Средняя пропускная способность окна составляла 97%. Частицы от ускорителя проходили через сетку и перпендикулярно ударялись по поверхности мишени.

Заряды измерялись с помощью операционного усилителя, работающего на конденсаторе, который был разработан для использования с твердотельными детекторами в ядерной физике. Уровень шума усилителя составлял 0,1 мВ, соответствующий детектируемому заряду 10 - 16 кулонов. Его время нарастания составляло менее 100 нс, а постоянная

времени RC-дифференциации составляла около 1 мс. Таким образом, величина  $Q(t)$  в момент времени  $t \gg 1$  мс выходного сигнала.

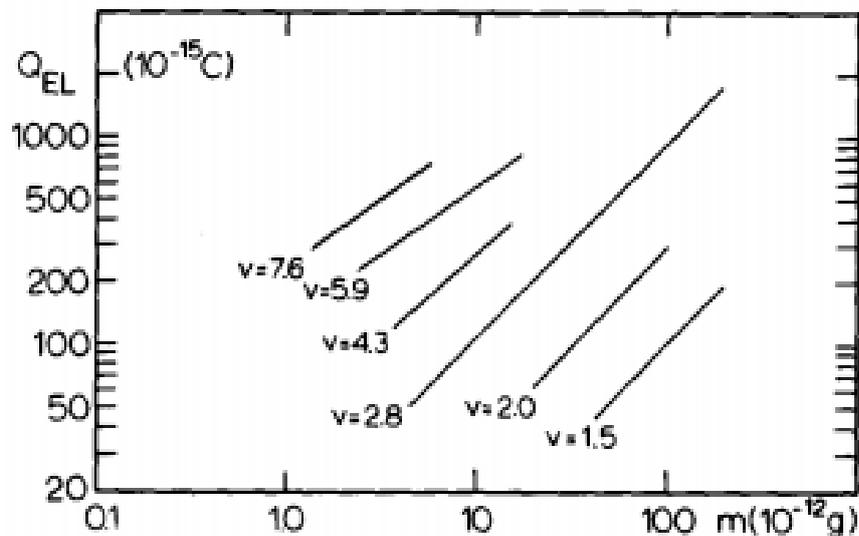


Рисунок 5 - График зависимости заряда от массы при различных скоростях

На рисунке 5 показан общий отрицательный заряд  $Q_{el}$  в зависимости от массы снаряда  $m$  при разных скоростях  $v$ . Наклон линий с постоянной скоростью уменьшается с ростом  $v$ .

### 1.3 Сенсор для регистрации космического мусора

В декабре 2017 года на Международную космическую станцию (МКС) отправили новую разработку для регистрации космического мусора Space Debris Sensor. Уникальностью разработки являлась возможность регистрации космического мусора размером менее 1 мм.

Ввиду актуальности проблемы засорения небольшими обломками околоземной орбиты Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства NASA разработало инструмент Space Debris Sensor.

Для анализа риска полета, связанного с этими опасностями, используются модели потоков и инструменты оценки риска воздействия, такие как MASTER (Справочная информация об окружающей среде метеорологии и космического мусора) или ORDEM (инженерная модель орбитального мусора) и ESABASE2 или BUMPER II. Проверка моделей

потоков основана на измеренных данных. В настоящее время, поскольку большинство объектов слишком малы (от миллиметра до микронного размера) для наземных наблюдений (например, радиолокационных, оптических), единственные доступные данные для проверки модели основаны на извлеченных аппаратных исследованиях. Устройство, выполняет функцию детектора для частиц, размер которых от 50 до 500 мкм. Оно представляет собой конструкцию из нескольких слоев специальных датчиков, встроенных в сетку тонких проводов, при попадании частицы в поверхность SDS, произойдет разрушение некоторых проводов, что укажет на размер частицы мусора. Повреждение нижних слоев позволит выяснить с какой скоростью летел обломок, а так же траекторию. Для регистрации интенсивности удара самый нижний слой будет представлять собой пластину, которая также зафиксирует интенсивность удара и плотность объекта. Площадь устройства  $1\text{ м}^2$ , структура приведена на рисунке 6.

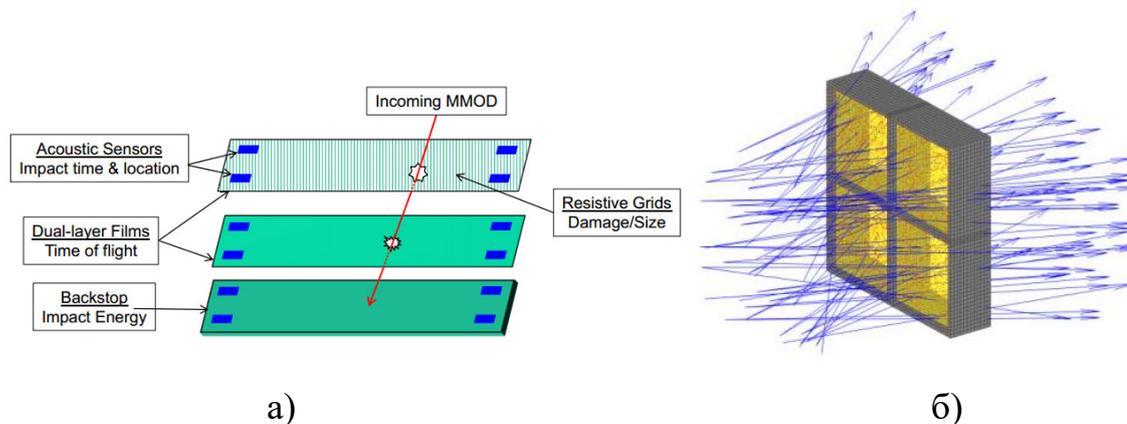


Рисунок 6 – Space Debris Sensor: а) Структура конструкции, б) моделирование прохождения микрометеороидов через конструкцию

Благодаря этой информации, астрономы смогут определить орбиты частиц, а значит и их происхождение. Например, если объект движется по эллиптической траектории, то он, скорее всего, является естественным микрометеороидом, тогда как круговая орбита предполагает, что это осколок спутника. В результате оценки полученных данных, ученые

смогут экстраполировать на все остальные обломки и улучшить качество прогнозов.

#### 1.4 Измерение индуцированных электрических сигналов

В статье [6] траекторию частиц космической пыли определяют путем измерения электрических сигналов, которые индуцируются, когда заряженная частица пролетает через позиционно-чувствительную электродную систему. Типичный датчик траектории пыли имеет четыре сенсорные плоскости, состоящие из примерно 16 проводящих электродов. Две соседние плоскости имеют ортогональные направления проводов. Датчик прозрачный и механически прочный, обеспечивает большую чувствительную область, большое поле зрения благодаря этому может достигать предельной точности.

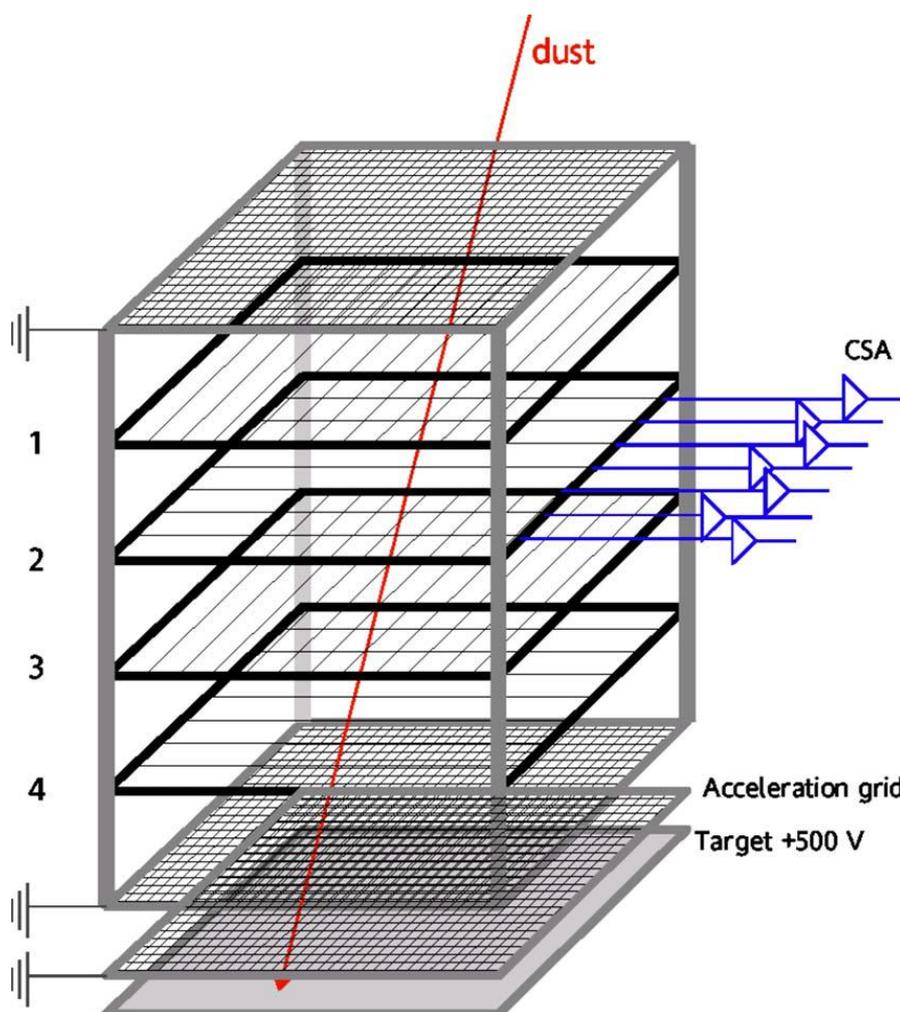


Рисунок 7 - Схемы датчиков траектории пыли

Четыре плоскости несут 16 электродных проводов, каждый из которых оснащен чувствительным к зарядке усилителем. Две экранные решетки расположены спереди и сзади проводов, считывающих заряд. Частица пыли входит в датчик сверху и пересекает все плоскости, а нижняя часть содержит детектор удара.

Этот датчик обеспечивает высокую чувствительность и может достигать неограниченной точности. Его точность была стимулирована как 0,3% в скорости и 0,2° относительно угла при низком отношении сигнал-шум 2,5.

### 1.5 Датчик пыли CCLDAS

В центре пылеулавливающих установок для лунных пылевых и атмосферных исследований (CCLDAS) в Колорадо был создан и используется новый датчик координат пыли (DCS)[7].

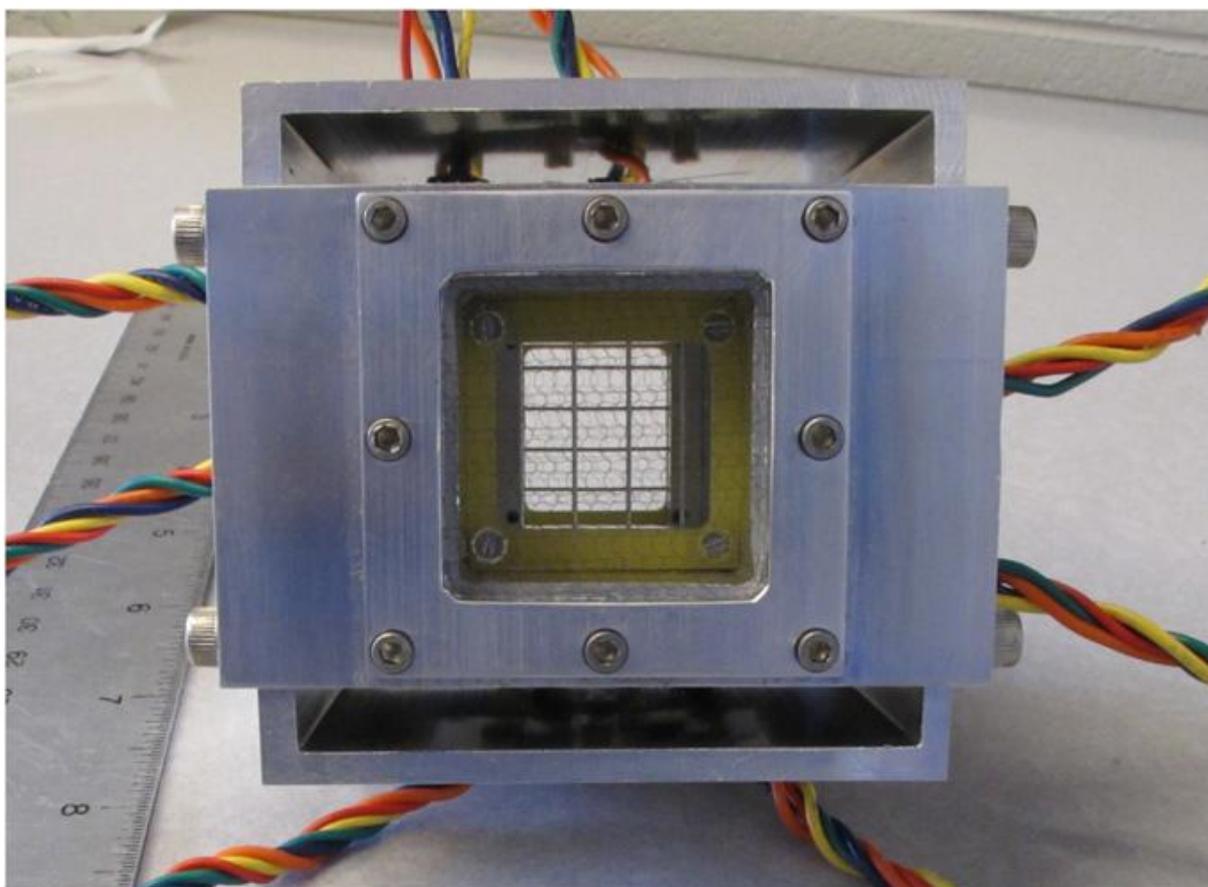


Рисунок 8 – Общий вид датчика

Восемь винтов на передней стороне детектора закрепляют у входа заземленную между двумя пластинами сетку. Проводные электроды толщиной 0,48 мм в направлениях x и y видны посередине.

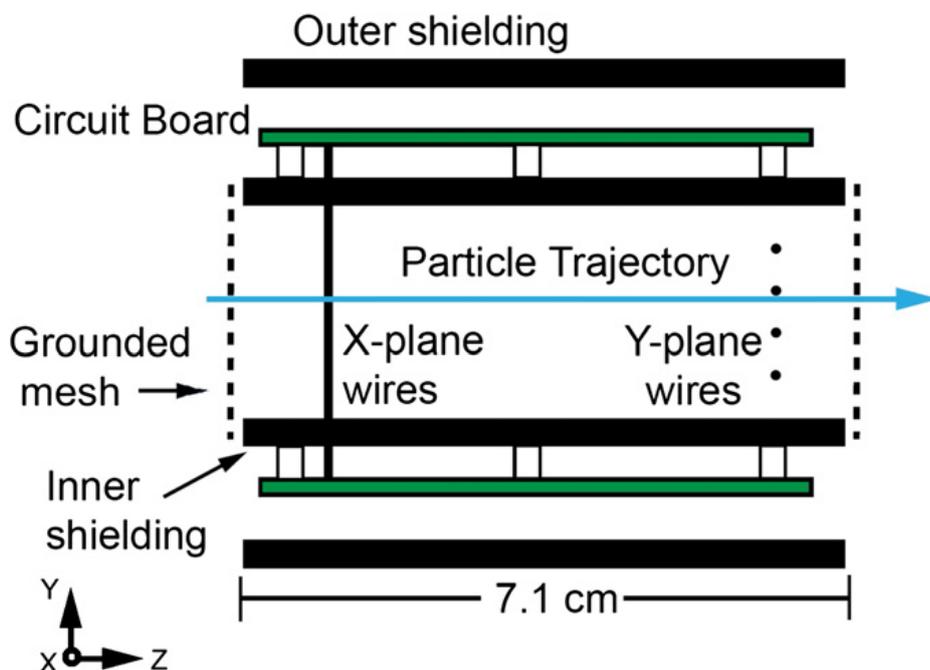


Рисунок 9 - Схематическое сечение детектора проволочной сетки

Показаны внутренние и внешние экраны, монтажные платы, заземленная сетка и обе плоскости проводящих электродов. Расстояния должны быть масштабируемы, причем заметный размер составляет 5,1 см между плоскостями проводов.

Датчик пыли работает путем измерения зарядов изображения, индуцированных на двух плоскостях проволочных электродов, путем пропускания заряженных частиц пыли. Приложения для DCS включают в себя количественную оценку и улучшение фокусирующих и управляющих элементов ускорителя, а также соотношение скорости и массы частиц с ударовыми участками с использованием точного расположения частиц. Можно определить положение типичной частицы в пределах линии луча до  $<0,1$  мм.

### 1.6 Космический пылеуловитель на борту КА Кассини CDA

Космический пылеуловитель на борту космического аппарата Кассини [8] включает в себя детектор заряда и скорости, который измеряет

электрические заряды  $> 10^{-15}\text{C}$  отдельных частиц космической пыли при входе в прибор. Заряд является важным свойством каждой частицы, поскольку он влияет на его орбитальную динамику и является мерой его размера. Длительность и форма сигнала заряда также важны, поскольку они показывают местоположение и скорость частицы. Скорость, в свою очередь, может быть выражена в гелиоцентрической системе координат, и полученные параметры орбиты помогут идентифицировать происхождение частицы.

В то время как метод, разработанный Ауэром (1975) [9], требует трех взаимно наклонных пар сеток для измерения трех составляющих скорости частиц, CDA имеет только две пары пар и измеряет только две компоненты:  $v_y$  и  $v_z$ . Однако при вращении космического корабля CDA может получить статистическую информацию о недостающем компоненте ( $v_x$ ). Вторая разница - это уменьшенный угол наклона между парами сеток только  $9^\circ$  против  $30^\circ$ , что приводит к уменьшенной точности  $v_y$ . Преимуществом является, однако, более крупное трехмерное представление и более низкая объемная, массовая и электрическая сложность.

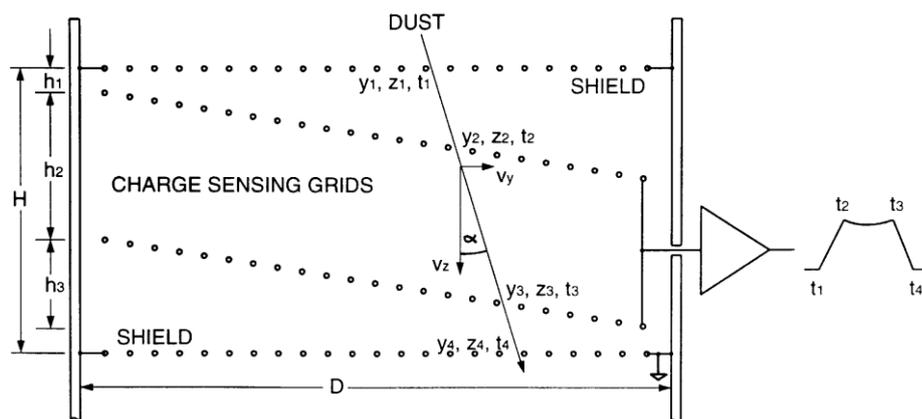


Рисунок 10 - Схематическое сечение детектора заряда и скорости.

Передняя и задняя решетки вместе с цилиндрическими стенками образуют клетку Фарадея, которая защищает две чувствительные к зарядам сетки. Выход чувствительного заряда усилителя имеет трапецевидную форму со временем  $t_1 \dots t_4$ , соответствующее временам,

когда пылевое зерно проходит через 1..4-ую сетки, соответственно. Размеры детектора:  $H = 195: 9$  мм,  $h_1 = 15: 5$  мм,  $h_2 = 100: 4$  мм,  $h_3 = 64: 5$  мм и  $D = 406: 9$  мм.

### 1.7 Измеритель вектора скорости

Заряженные частицы пыли в пространстве могут быть обнаружены датчиками in-situ с использованием индукции заряда [10]. Такие датчики траектории обычно основаны на многих сетчатых или проводных электродах, соединенных с отдельными, чувствительными к зарядам, усилителями. Форма сигнала используется для расчета скорости, массы и траектории частиц. Детектор использует два полукруглых электрода сетки, и электроды подключены к дифференциальному входному каскаду усилителя (рисунок 11)

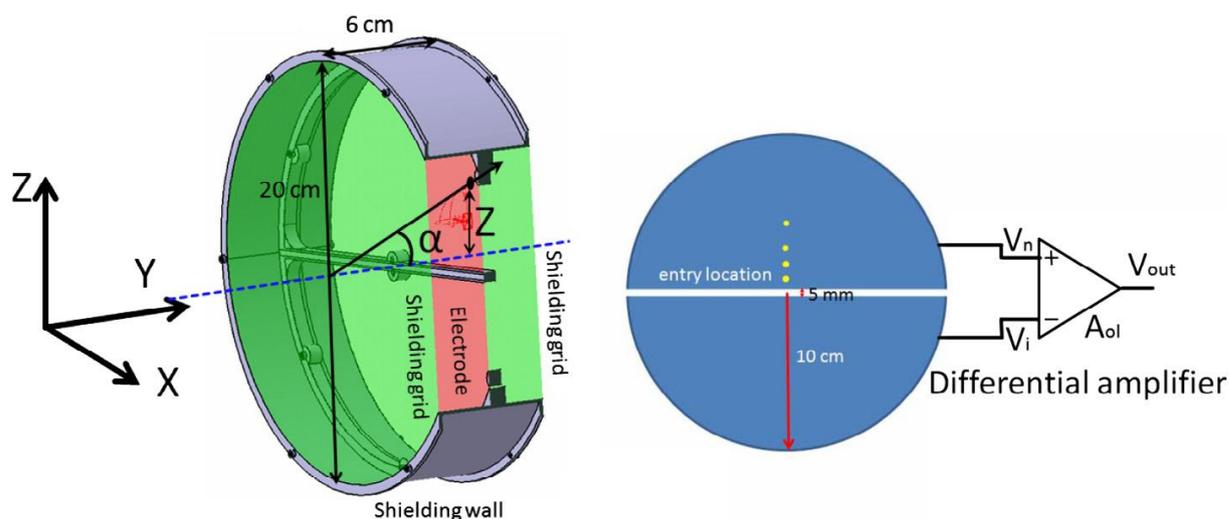


Рисунок 11 – Измеритель вектора скорости

Моделирование траектории заряженной частицы пыли с помощью однозарядного чувствительного усилителя осуществлялось с помощью программного пакета Coulomb 9.0 для определения ожидаемых форм сигнала в зависимости от параметров частиц (местоположение входа и углы падения).

Компоненты скорости траектории частицы могут быть вычислены с помощью угла падения частиц и времени полета между двумя

экранирующими сетками. Длина траектории полета частиц рассчитывается по формуле:

$$D = \sqrt{60^2 + (60 \tan \alpha)^2},$$

затем скорость частиц выделяется через:

$$v_p = D / (t_e - t_s),$$

где  $t_e$  - конечное время, а  $t_s$  – начальное время.

Моделированные индуцированные сигналы заряда для частиц с одинаковыми углами падения, но разным местоположением входа и одинаковым местоположением входа, но с разными углами падения представлены на рисунке 12.

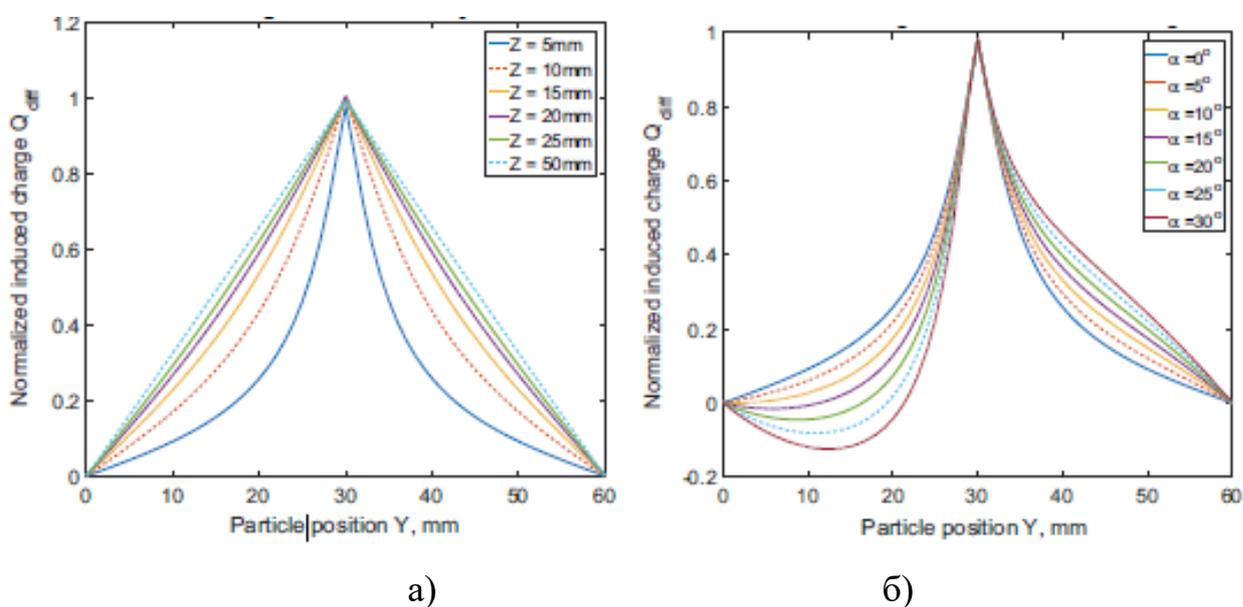


Рисунок 12 - Моделирование индуцированных сигналов заряда: а) для частиц с одинаковыми углами падения, но разным местоположением входа, б) для частиц с одинаковым местоположением входа, но с разными углами падения

Моделируемые сигналы заряда показывают, что выбранная концепция измерения является эффективным методом для маломощных и маломассивных датчиков траектории пыли.

### 1.8 Сравнение датчиков

Для проведения сравнительного анализа приведенных выше датчиков построим таблицу:

Таблица 1 – Сравнение детекторов

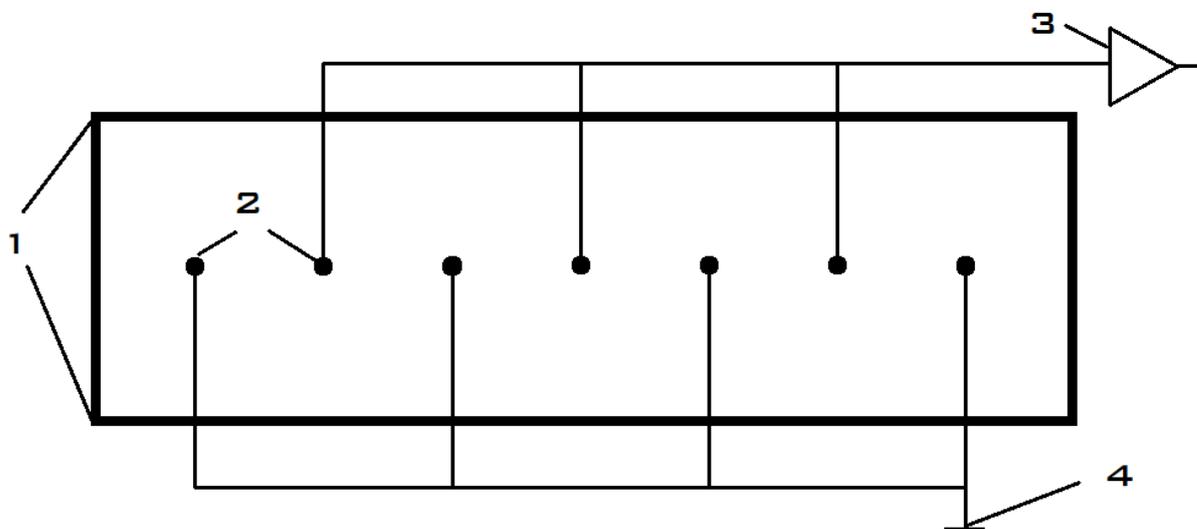
Наименование	Размер окна, мм	Реализация	Измеряемые величины
Детектор высокоскоростных частиц с использованием пьезодатчиков (HVI)[4]	500×600×150	Лабораторные исследования	$V_x, V_y, V_z,$
Масс-спектрометр[5]	60×60	Лабораторные исследования	$V_x$ и $V_y,$ $V_y$ и $V_z,$
Spase Derbis Sensor[6]	1000×1000	2014-2017 Лабораторные исследования В космосе с декабря 2017	$V_x, V_y, V_z,$
CCLDAS[7]	71×71	Лабораторные исследования	$V_x, V_y$
CDA[8]	507×450	Исследования в космосе	$V_x, V_z,$

Вывод:

-Рассмотрены возможные конструкции устройства. Установлено, что в качестве примера для разработки новой конструкции лучше всего использовать датчик на основе измерения индуцированных электрических сигналов, однако, в данном методе каждый из электродов оснащен, чувствительным к заряду, усилителем.

## 2 Методы расчета электростатических полей

В работе необходимо разработать модель насадки для масс-спектрометра. Структурный вид конструкции представлен на рисунке 13.



1 – сетки, 2 – электроды, 3 – усилитель, 4 – заземление

Рисунок 13 – Структурный вид детектора высокоскоростных микрочастиц

Конструкция представляет из себя модель, состоящую из 2 сеток между которыми расположены электроды.

Рассмотрим методы для расчета электростатических полей в данной конструкции.

### 2.1 Расчет с помощью теоремы Рамо-Шокли

Метод электростатической индукции (наведенного тока) основан на явлении электростатической индукции, т. е. он использует наведение зарядов и токов в системе проводников неподвижными или движущимися заряженными телами.

Для случая относительно малой скорости движения заряженных частиц и неподвижных электродов Шокли и Рамо сформулировали теорему, известную в литературе под названием теоремы Шокли — Рамо [11,12]. В ней выведено основное количественное соотношение явления электростатической индукции.

Обычно при изложении этой теоремы не уделяется достаточного внимания важному промежуточному выражению для наведенного заряда.

Часто остается в тени богатое физическое содержание этой теоремы. Как правило, вывод или изложение ее приводится только в книгах по радиоэлектронике [13-15] и не освещается в литературе по электрическому моделированию.

В основе явления электростатической индукции лежит наличие в незаряженных проводниках положительных и отрицательных свободных зарядов, могущих перемещаться по проводнику. Поскольку число положительных зарядов равно числу отрицательных, в целом, с точки зрения внешних проявлений, такой проводник электрически нейтрален.

При введении в систему нейтральных проводников заряженного тела электрическое поле последнего воздействует на них и вызывает пространственное разделение положительных и отрицательных зарядов. При этом силовые линии, выходящие из заряженного тела, искривляются и заканчиваются на поверхности проводников, будучи нормальными к ней. Если заземлить проводники системы, то не связанные с силовыми линиями влияющего тела заряды уйдут в землю и останутся заряды одного знака, проводники зарядятся.

Если же между каким-либо из этих проводников и землей включить электромметр, то он покажет наличие заряда, наведенного на нем в результате электростатической индукции. Наведенный заряд зависит как от величины заряда влияющего тела, так и от расположения его относительно системы проводников. Последнее трудно характеризовать при помощи расстояний от проводников или других геометрических величин, поскольку форма проводников в общем случае может быть произвольная. Как будет показано ниже, наиболее объективная характеристика положения влияющего тела в системе проводников получается при помощи представления о некотором фиктивном поле, которое было бы создано, если задать на проводниках определенные потенциалы, а само влияющее тело удалить.

При движении заряженного тела относительно неподвижной системы электродов величины наведенных на электродах зарядов изменяются, и во внешних цепях электродов протекает ток, обусловленный перераспределением наведенных зарядов. Этот ток называется наведенным током. Он протекает во время движения заряженного тела, и можно предположить, что величина его должна зависеть от заряда и скорости перемещения влияющего тела, а также от распределения фиктивного поля электродов вдоль траектории влияющего тела.

Таким образом, электростатическая индукция проявляется как в наведении на проводниках зарядов неподвижным заряженным телом, так и в появлении токов при движении этого тела относительно них.

Если заряд  $q$  движется в направлении  $r$  со скоростью  $V$ , наведенный в цепи  $k$ -го электрода ток определится из условия:

$$i_{\text{нк}} = \frac{dq_{\text{нк}}}{dt} = -q \frac{d\varphi}{dr} \times \frac{dr}{dt} \quad (1)$$

Поскольку потенциал  $\varphi$  удовлетворяет уравнению Лапласа, т. е. поле является потенциальным, можно ввести в выражение для наведенного тока напряженность фиктивного поля электродов, определяемую как:

$$E = -\text{grad}\varphi \quad (2)$$

и записать формулу для  $q_{\text{нк}}$  в векторной форме

$$i_{\text{нк}} = q \times \vec{V} \times \vec{E}(x, y, z) \quad (3)$$

т. е. наведенный ток получается в результате умножения заряда  $q$  на скалярное произведение векторов скорости его движения и напряженности фиктивного поля электродов в точке нахождения заряда.

Практически удобнее пользоваться скалярной формой записи выражения для  $i_{\text{нк}}$ :

$$i_{\text{нк}} = q \times V \times E_v(x, y, z) \quad (4)$$

Запись теоремы Рамо-Шокли обычно приводится в виде (4), а сама теорема формулируется следующим образом:

Ток, наведенный в любом заземленном электроде произвольной системы электродов зарядом  $q$ , движущимся относительно этой системы, равен произведению заряда на скорость его движения и на взятую вдоль направления скорости компоненту напряженности фиктивного лапласовского поля этой системы, которое возникло бы, если бы на электрод, в цепи которого измеряется ток, был задан безразмерный потенциал  $+1$ , а остальные электроды системы были заземлены.

## 2.2 Метод функции Грина

Электромагнитное поле, созданное пучком заряженных частиц в волноводной структуре можно вычислить аналитически, используя функцию Грина (5) [16].

$$L_u=f(x) \quad (5)$$

Она используется для представления данных о заряженной частице и ее траектории в волноводе, и в самой волноводной структуре. Плотность функции распределения описывает распределение заряженных частиц в пучке. Свертка плотности функции распределения с функцией Грина по координате есть полное поле, возбуждаемое пучком заряженных частиц в волноводной структуре.

## 2.3 Метод зеркальных изображений

Концепция метода зеркальных изображений заключается в том, что исходная задача поиска поля заданных источников сводится к расчёту поля тех же и некоторых добавочных источников в безграничной среде, которые помещаются вне области поля исходной задачи [17]. Их принято называть источниками-изображениями. Построение аналогично изображению точечных источников в оптике в системе зеркал (при этом зеркала повторяют форму граничных поверхностей). Величины источников-изображений определяются граничными условиями на поверхностях, а также требованиями одинаковости поля, создаваемого двумя системами зарядов и поверхностей.

Наибольшее распространение метод изображений получил в электростатике, так как с помощью метода изображений принято решать задачи, в которых каждому заданному точечному источнику можно сопоставить конечную систему однотипных точечных источников-изображений. Также метод изображений можно распространить на более широкий класс границ и граничных условий в рамках метода геометрической оптики при достаточно малой длине волны и некоторых уточняющих его коротковолновых приближений. В этом случае он сводится к построению картины лучей и геометрооптических изображений.

#### 2.4 Метод импедансов связи

Взаимодействие интенсивного пучка заряженных частиц с электромагнитными полями, индуцированными им в вакуумной камере, приводит к различным коллективным эффектам динамики пучка [18]. Эти эффекты становятся заметны при большом количестве частиц в пучке и, следовательно, зависят от интенсивности пучка. Это следует из того, что при движении пучка в вакуумной камере возникают значительные электромагнитные поля (вейк-поля), которые действуют на сам пучок.

Динамика частиц в пучке отличается от динамики одной частицы, движение которой определяется только ведущим полем. Наиболее значительным следствием коллективных эффектов является неустойчивость движения. Малые отклонения положения или энергии пучка создают поля, которые могут увеличить исходное отклонение, таким образом возникает положительная обратная связь, приводящая к потерям пучка.

Поскольку причиной коллективных эффектов является взаимодействие пучка с элементами вакуумной камеры, то для их анализа, очевидно, необходимо соответствующее описание как самого пучка, так и вакуумной камеры. В пространстве частот каждая часть вакуумной камеры

может быть представлена как частотно-зависимый импеданс связи, представляющий собой фурье-образ вейк-потенциала точечного заряда.

## 2.5 Моделирование в пакете программ CST STUDIO SUITE

CST Studio Suite - программа для трехмерного электромагнитного моделирования, в которую входят задачи проектирования и расчета статических и низких частот EM приложений, таких как исполнительные механизмы, двигатели, трансформаторы, датчики и экранирование корпуса. Применение программы CST STUDIO SUITE подходит для решения широкого спектра задач моделирования и оптимизации электромагнитных систем.

Модули программы, способны взаимодействовать друг с другом, покрывают широкий диапазон частот и размеров исследуемой модели, что вместе со специализированными технологиями моделирования позволяет анализировать как процессы в печатных платах и кабельных системах, так и внутри ускорительных модулей.

CST PARTICLE STUDIO (CST PS) —использовался в ускорителях частиц с самых ранних дней, он включает в себя несколько инструментов для проектирования устройств заряженных частиц, начиная от микроволновых приборов, таких как магнетроны и электронные трубки, до ультрарелятивистских компонентов для ускорителей частиц. Для частиц в статических полях решатель для отслеживания частиц с итерацией пушки может быстро вычислить свою траекторию через устройство, что делает его полезным инструментом для проектирования электронных пушек. Решатель частиц в ячейке (PIC) в то же время учитывает поля, создаваемые частицами, и подходит для таких устройств, как магнетроны, клистроны и бегущие волновые трубки (TWT), а также для многопараметрического анализа. Ускорение GPU может быть использовано для дальнейшего улучшения производительности PIC-решателя. Чтобы помочь с компоновкой компонентов, модуль «wakefield» вычисляет поля вокруг пучков частиц, проходящих через ускоритель. Эти

частицы создают воронки при прохождении через такие структуры, как коллиматоры и детекторы лучей, и это может нарушить пучок.

## 2.6 Программа ELCUT

Программа ELCUT предназначена для моделирования электромагнитных, тепловых и упругих полей. В основе программы используется метод конечных элементов.

Широкое применение ELCUT охватило не только Россию. Основными потребителями являются исследующие университеты, предприятия, научные центры. ELCUT позволяет анализировать не только линейные электростатические поля в плоской, осесимметричной и трехмерной постановках, но и формировать их в виде уравнения Пуассона относительно электрического потенциала.

## 2.7 Метод конечных элементов в программе BETAFields

Программа BETAFields [19] была разработана для расчета электрических полей в плоскости и аксиально-симметричном определении. Кроме того, программа имеет возможность вычисления мощности трансформаторов основной изоляции. Таким образом, эта программа может использоваться как для простого расчета электростатического поля, так и для проектирования силовых трансформаторов.

Расчет электростатического поля в программе выполняется методом конечных элементов (МКЭ) с использованием треугольных конечных элементов высоких порядков, что обеспечивает высокую точность расчета поля.

Этот метод основан на том, что градиенты, полученные путем простого дифференцирования функций формы элемента, в некоторых точках элемента совпадают с действительными значениями градиента потенциала. Для треугольного элемента такими точками являются Гауссовы точки, используемые в квадратурных формулах численного интегрирования. Таким образом, используя значения в этих точках, можно

попытаться восстановить распределение градиента потенциала на элементе и найти значения градиента в узлах элемента.

В этом методе определение значений градиентов в узле проводится с использованием значений производных потенциала, полученных путем прямого дифференцирования функций формы в Гауссовых точках всех окружающих этот узел элементов. Для данного узла с помощью метода наименьших квадратов определяются полиномы, степень которых соответствует степени используемых функций формы конечных элементов. Эти полиномы наилучшим образом описывают поведение градиентов вокруг данного узла в соответствии с рассчитанными значениями производных потенциала в Гауссовых точках. Определив эти полиномы, можно определить значения градиентов в рассматриваемом узле. Элементы, через которые определяются значения градиентов в данном узле, называются "заплаткой". Процесс нахождения градиентов поясняет следующий рисунок, изображающий фрагмент сетки конечных элементов.

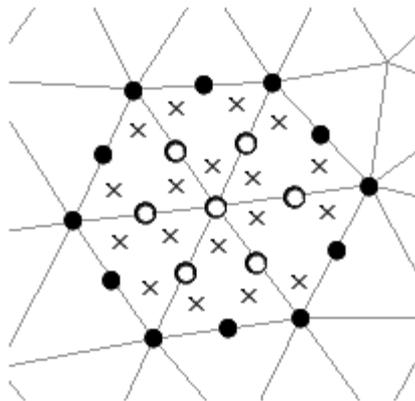


Рисунок 14 - Фрагмент сетки конечных элементов

На рисунке изображены элементы второго порядка, которые образуют "заплатку". Пустыми точками обозначены узлы, в которых по данной "заплатке" определяются значения градиентов. Простыми точками обозначены остальные узлы конечных элементов, образующих "заплатку". Крестиками обозначены Гауссовы точки.

При нахождении градиента в узле элемента, совпадающим с узлом сетки, попутно могут быть найдены градиенты и в других узлах конечного элемента, располагающихся рядом с этим узлом, что отображено на вышеприведенном рисунке.

Таким образом, для нахождения градиентов в некотором узле находятся все элементы, которые окружают этот узел. Затем определяются значения производных потенциала в Гауссовых точках и по ним, используя метод Наименьших квадратов, определяются коэффициенты вспомогательных полиномов для определения значений истинных градиентов. Используя эти полиномы, можно определить значения градиентов в самом узле, а также узлах конечных элементов, соседних с данным узлом. После того, как найдены значения во всех узлах, градиенты могут быть интерполированы с помощью тех же функций формы элемента, что используются для интерполяции потенциала.

Использование этого метода позволяет получить распределение градиентов с достаточно высокой точностью по сравнению с другими методами определения градиентов, особенно в условиях неоднородных полей.

Программа имеет большой набор инструментов, которые облегчают работу программы на всех этапах, начиная с ввода исходных данных и заканчивая анализом полученных данных.

Встроенный редактор геометрии имеет много общего с CADsystem. Он позволяет рисовать и редактировать геометрию вычислительной области. Он содержит широкий набор операций рисования, таких как рисование простых геометрических объектов (линий, дуг окружностей, кругов и прямоугольников), а также составных объектов (прямоугольник с закругленными углами и углами). Также он содержит широкий набор операций редактирования, таких как перемещение, масштабирование, вращение, копирование, зеркальное отображение, создание изображений и многое другое. Кроме того, геометрия поддерживает импорт и экспорт

данных геометрии с другими САD-системами через файл формата DXF. После этого импортированная геометрия может быть изменена с помощью редактора геометрии.

После завершения решения системы уравнений автоматически выполняется восстановление градиентов в программе. Итогом этого является получения непрерывного распределения градиентов ( $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_m$ ) во всей расчетной области. Программа обладает встроенными средствами анализа полученных результатов. В программе есть возможность отображать графики контура и цветовые карты потенциала и интенсивности ( $E_x$ ,  $E_y$  и  $E_m$ ). Существует также возможность создания графика полевых линий с любыми границами. Линии поля также могут быть применены к графику контура. Кроме того, программа имеет возможности графического отображения потенциала и интенсивности (включая тангенциальные и нормальные компоненты интенсивности) вдоль любых границ, а также вдоль заданного пользователем набора линий и дуг окружностей и вдоль вычисленных линий поля. Полученные результаты можно сохранить в отчете в форме таблицы (в формате HTML). Как общая статистика всех полевых линий, так и подробная информация в отношении каждой строки поля сохраняются в отчете.

Выводы:

- Рассмотрены методы расчета электростатических полей;
- Установлено, что для получения картины электростатического поля лучше использовать метод конечных элементов, реализуемый программой BETAFields, так как в отличие от ELCUT и CST STUDIO в нет ограничений по количеству исследуемых элементов;
- Для оценки физических процессов в конструкции рекомендуется использовать теорему Рамо-Шокли.

### 3 Физико-математическая модель устройства

#### 3.1 Работа в программе BETAFields

BETAFields содержит серию окон, меню, панелей инструментов и диалогов, необходимых для создания и редактирования геометрии, определения исходных данных, выполнения расчетов и анализа результатов и построения графиков (рисунок 15).

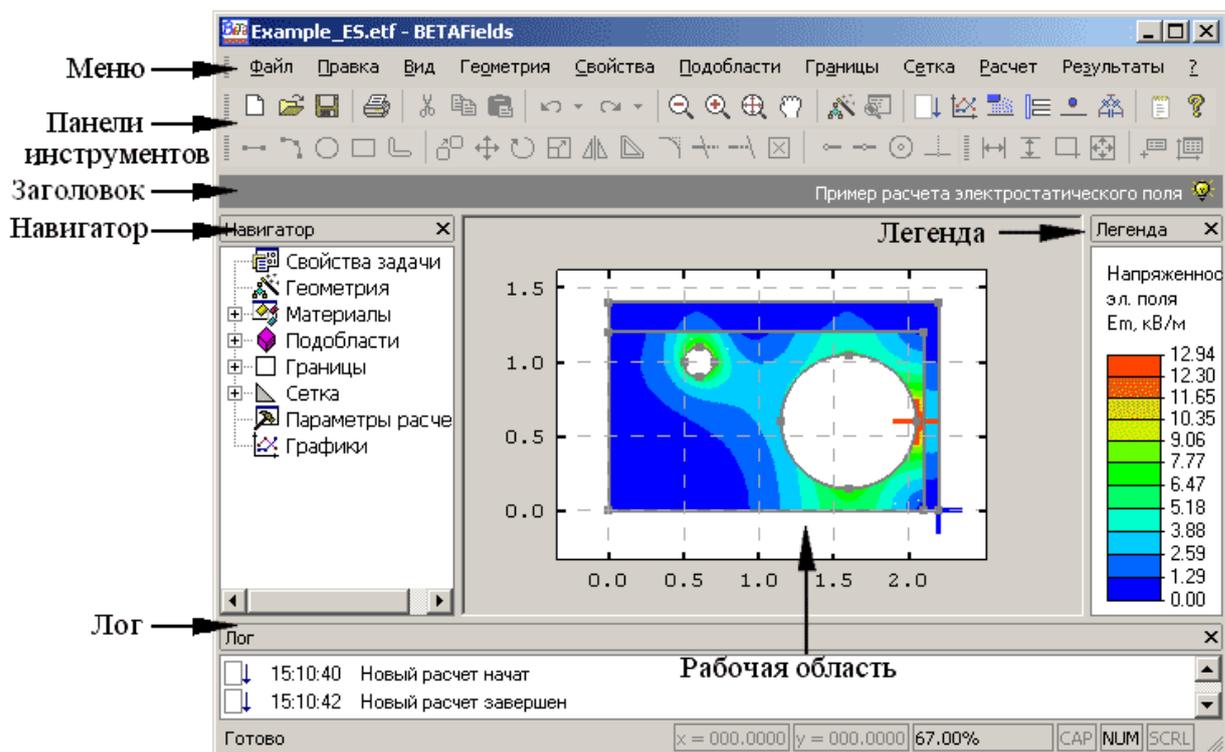


Рисунок 15 – Меню программы BETAFields

Во время работы с программой существует определенная последовательность действий. Процесс решения задачи состоит из следующих этапов:

1. Выбор типа решаемой задачи, порядка конечных элементов и глобальных единиц, используемых во время решения.
2. Настройка геометрии задачи.
3. Настройка параметров подобласти и граничных условий.
4. Создание сетки конечных элементов.
5. Выполнение расчета.
6. Анализ полученных результатов.

Тип задачи - в этой версии программы возможные типы задач: Электростатическая и Электростатическая (осевая симметрия).

Первым типом задачи является расчет электростатического поля в плоских областях. Вторым типом - это соответственно вычисление электростатического поля в осесимметричных областях. Расчет основной изоляции выполняется в осесимметричном определении.

Глобальные единицы - для удобства использования программы в нем реализована возможность работы в различных единицах измерения длины (миллиметры, сантиметры, метры и т. д.), Напряжение (В, кВ), заряд (рС, нС, мС) и другие.

Их изменение автоматически отслеживается во всех диалоговых окнах, где при вводе или отображении значений, связанных с глобальными единицами, и программа выполняет перерасчет исходных данных, введенных пользователем. Например, при установке «кВ» в качестве глобальной единицы измерения напряжения в процессе настройки граничных условий введенные значения напряжения будут считаться киловольты. В случае перехода от блока измерения напряжения «кВ» к «В» выполняется пересчет введенных значений граничных условий, а в диалоговом окне задач условий «Границы» будет отображаться новый блок измерения напряжения, при этом вход потенциальные значения будут иметь размерность «В».

Настройка геометрии задачи возможна двумя способами. Это создание и редактирование геометрии непосредственно в самой программе с помощью встроенного редактора геометрии и импорта из других САПР через формат DXF. Также, используя формат DXF, возможен экспорт геометрии из программы.

Установка параметров подобласти - это установка типов материалов (диэлектрик или проводник), а также относительной диэлектрической проницаемости для диэлектрических материалов. Расчет поля выполняется

только в диэлектрических материалах, а в материалы, отмеченные как металл, должны быть исключены из рассмотрения.

Установка граничных условий осуществляется в настройках программы. Граничные условия 1-го и 2-го типов, как постоянные, так и изменяющиеся вдоль границы. Граничные условия в программе были разделены на 5 групп:

- «Изоляция или ось симметрии» (ноль 2-го типа);
- «Изолированный проводник (эквипотенциальный)» (непознаваемое значение потенциала);
- «Земля» (ноль 1-го типа);
- «Электрический потенциал» (отличные от нуля 1-го типа);
- «Поверхностный заряд» (отличные от нуля 2-го типа).

Создание сетки конечных элементов - в программе встроен сетчатый генератор. Пользователь может полагаться на сетку конечных элементов, созданную в автоматическом режиме, или устанавливать функции изменения сетки. Кроме того, сетка может быть задана в требуемых областях путем установки элементов и подобласти, где сетка необходима.

Анализ полученных результатов - программа имеет возможность графического отображения ряда графиков: контурные графики, цветные карты и XYGraph (вдоль контуров). Кроме того, программа может рисовать полевые линии. Так же в программе предусмотрен экспорт данных, с помощью которых можно совершать дальнейшие итерации для построения полной картины электростатического поля.

### 3.2 Моделирование параметров электростатического поля

Для моделирования параметров электростатического поля создадим систему заряженных электродов в диэлектрической среде, после чего зададим граничные условия (рисунок 16).

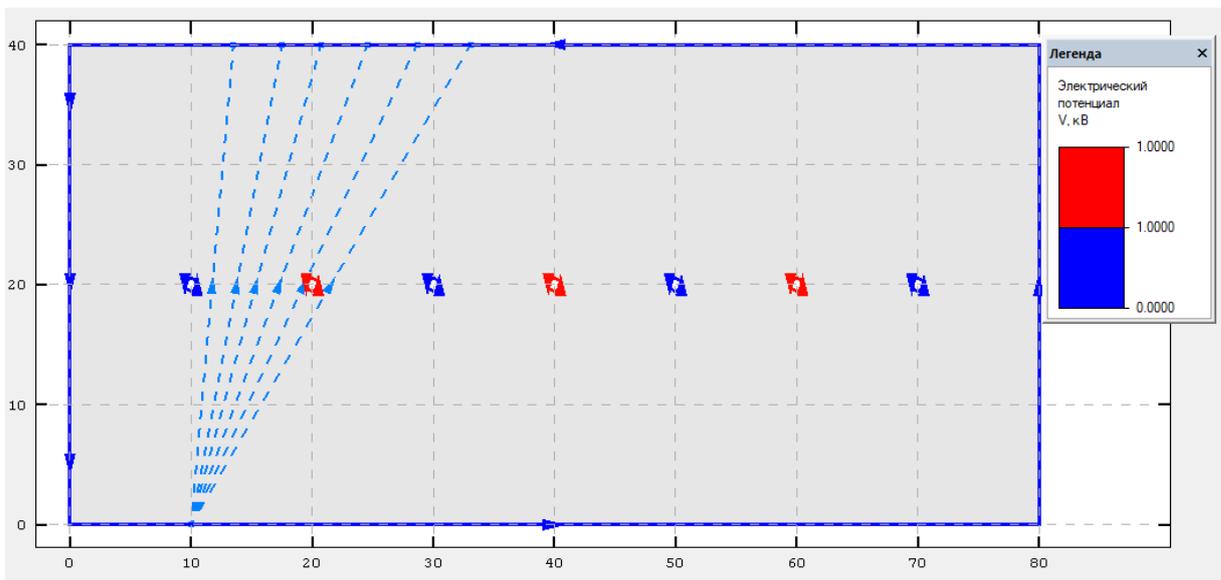


Рисунок 16 - Граничные условия

Одним из основных этапов решения задачи является построение сетки конечных элементов. Точность получаемого результата будет зависеть от того, какая сетка была использована при решении задачи, а также степени ее дискретизации. В программе имеется три режима работы генератора сетки: «Автоматический», «Автоматический + ручной» и «Ручной». В случае если сетка, создаваемая в автоматическом режиме не устраивает, Вы можете скорректировать работу генератора или отказаться от автоматического режима. Для коррекции сетки можно воспользоваться режимом «Автоматический + ручной», выбрав этот режим в закладке «Шаг сетки» диалога «Свойства сетки».

Можно отказаться от использования автоматически создаваемых функций изменения шага сетки, для чего в программе предусмотрен режим «Ручной». В этом случае Вам придется задать собственный набор функций, которые будут полностью определять изменение сетки в расчетной области. Для режима «Автоматический + ручной» и «Ручной» задание функций изменения шага сетки производится в закладке «Шаг сетки» диалога «Свойства сетки».

Для минимизации погрешности расчета в областях с большими градиентами потенциала, вокруг границ с малым радиусом кривизны,

необходимо сделать достаточно мелкую сетку. Распределение сетки для исследуемой задачи выглядит следующим образом (рисунок 17).

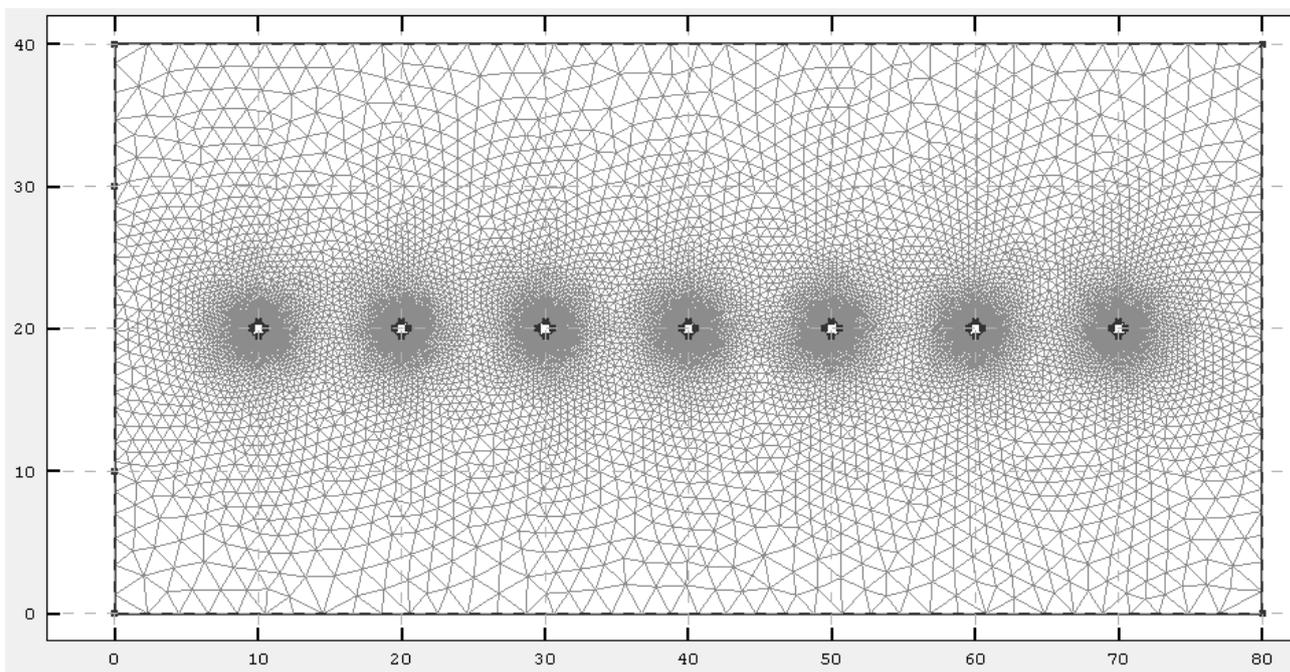


Рисунок 17 - Сетка конечных элементов

Разработанный алгоритм построения силовых линий позволяет строить силовые линии из любой точки границы, но для упрощения задания исходных точек их построения, они строятся из узлов сетки конечных элементов, принадлежащих заданным границам. В разработанном алгоритме шаг построения силовой линии переменный по всей длине силовой линии и выбирается автоматически, исходя из размеров конечного элемента, через который проходит силовая линия на текущем шаге построения силовой линии. Это позволяет избавить пользователя от необходимости задания шага построения, кроме того, значительно ускоряет процесс построения и улучшает сглаженность силовой линий. Такой подход обоснован тем, что в областях малых радиусов кривизны границ силовые линии имеют малый радиус закругления, а встроенный в программу генератор сетки конечных элементов создает мелкие элементы. Соответственно в этих областях шаг построения силовых линий достаточно мелкий и они достаточно точно описывают кривизну реальных силовых линий. С другой стороны, в

областях с большими радиусами кривизны границы, силовые линии так же имеют большие радиусы кривизны, сетка конечных элементов достаточно крупная и соответственно шаг построения силовых линий тоже крупный. Для данного расчета силовые линии будут выглядеть следующим образом (рисунок 18).

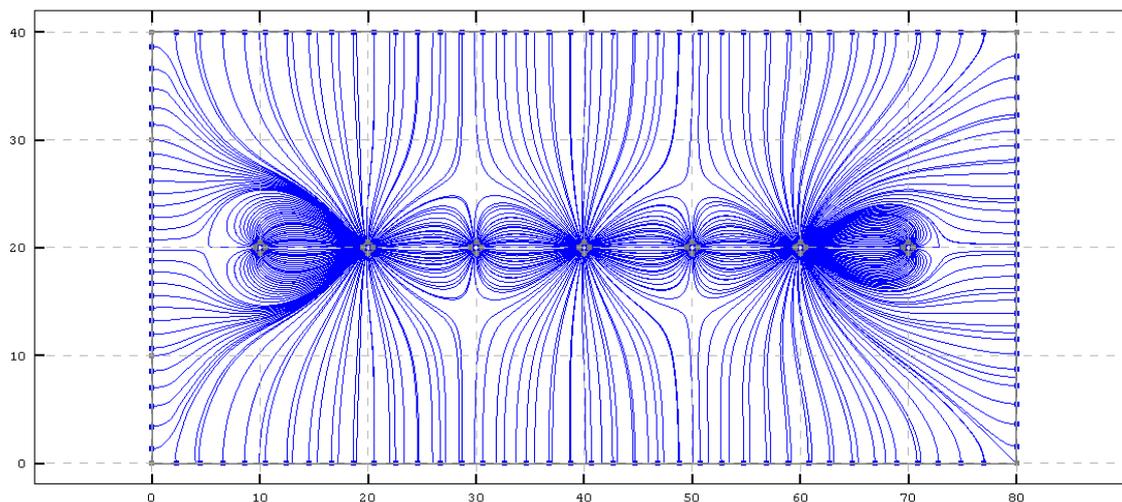


Рисунок 18 - Силовые линии

На рисунке 19 представлен график линий уровня электрической напряженности  $E_m$ . С помощью группы Уровни можно добавить или удалить уровни для построения. Значения уровней задаются в процентах от максимального значения величины, график которой требуется построить. Для поставленной задачи график уровней будет выглядеть следующим образом.

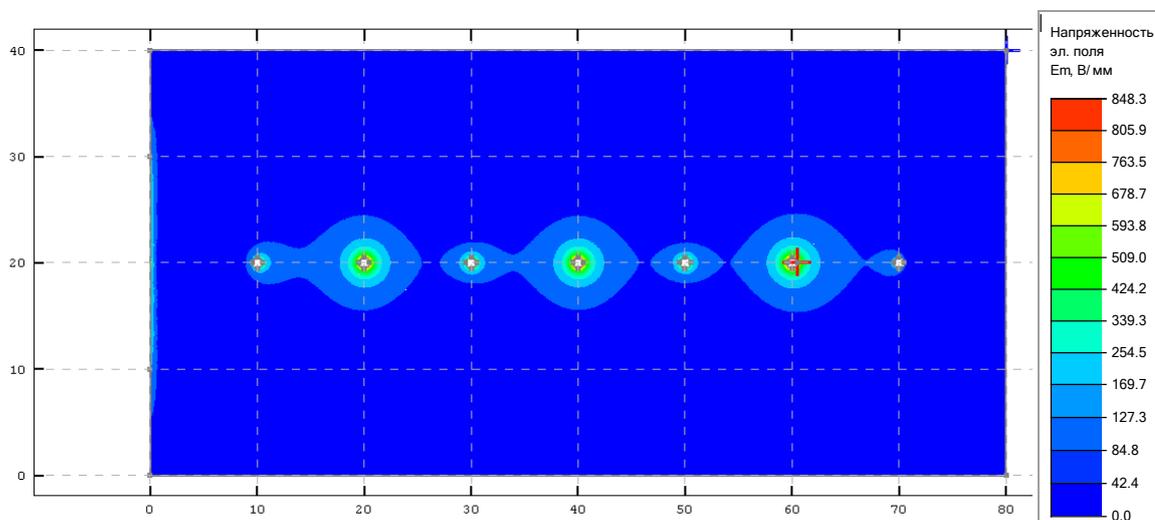


Рисунок 19 - Линии уровня напряженности  $E_m$

### 3.3 Моделирование пролета частицы

Графики строятся с использованием разработанного алгоритма, принцип работы которого схож с алгоритмом построения силовых линий. Как и в случае силовых линий, шаг по контуру, с которым происходит выборка значений величины потенциала или напряженности при прохождении заданного контура, не постоянен, а зависит от размера сетки на текущем шаге выборки. Это связано с тем, что при решении задачи для получения достаточной точности решения в областях с большими градиентами потенциала и напряженности поля сетка должна быть достаточно мелкой. С другой стороны, в областях с малыми градиентами потенциала и напряженности сетка конечных элементов может быть крупной.

Таким образом, руководствуясь для определения шага выборки значений размерами элементов, через которые проходит контур, шаг выборки получается в некоторой степени зависящим от изменения величины потенциала или напряженности, что приводит к более точной интерпретации графика при его последующем построении с учетом применяемой при этом интерполяции (линейной или с использованием кубических сплайнов).

Для построения графика напряженности электрического поля смоделируем пролеты частиц. Для этого воспользуемся программой для расчета случайных чисел, написанной на языке Python (ПРИЛОЖЕНИЕ А) и получим следующие координаты точек (таблица 2).

Таблица 2 – Координаты точек

Номер	Начальная точка		Конечная точка	
	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
1	62,13613725419841	0	58,86161204962982	40
2	15,012556610247145	0	0,9330060652390415	40
3	60,72577444960367	0	38,500729749329 40	40

Продолжение таблицы 2

Номер	Начальная точка		Конечная точка	
	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
4	18,65030410928557	0	69,16566600718475	40
5	67,72617919961432	0	66,02275073898893	40

Построим график напряженности электрического поля для данных траекторий (рисунок 20).

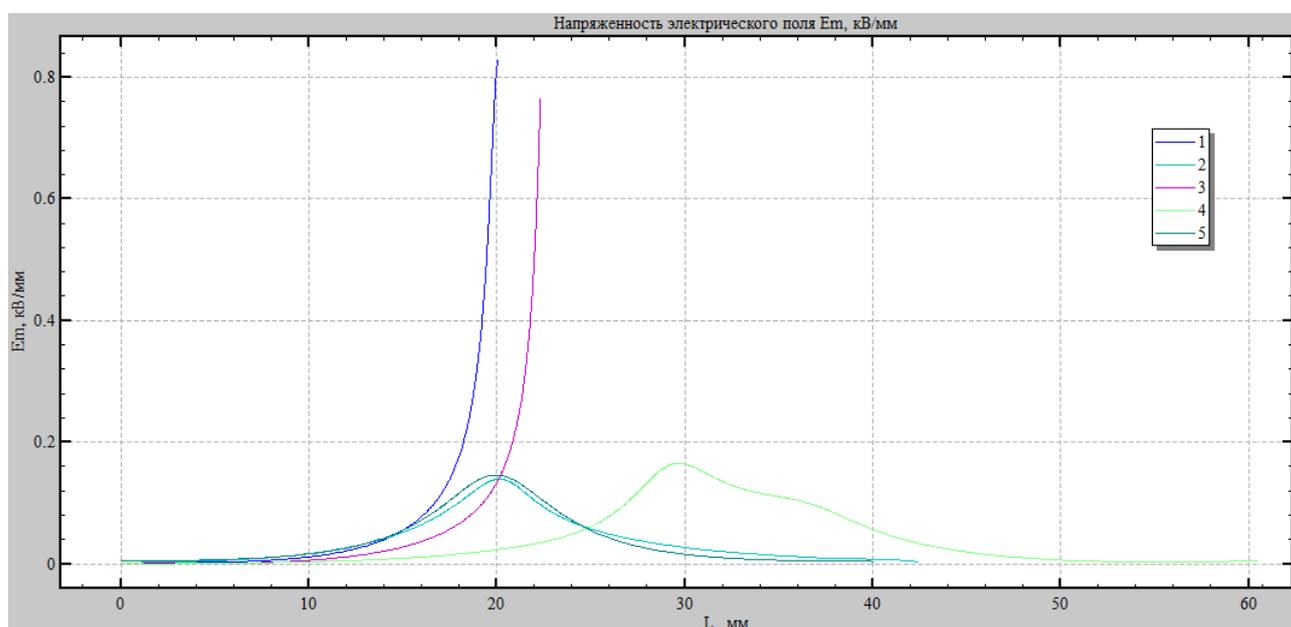


Рисунок 20– Зависимость напряженности электрического поля для данных траекторий

Из рисунка видно, что при прохождении траектории 1 и 3 заряд попадает в электрод. Прохождение заряда 4 свидетельствует о угле падения около  $45^\circ$ . 2 и 5 случай являются наиболее распространенными при моделировании заряда. Рассмотрим зависимости движения зарядов относительно электродов более подробно.

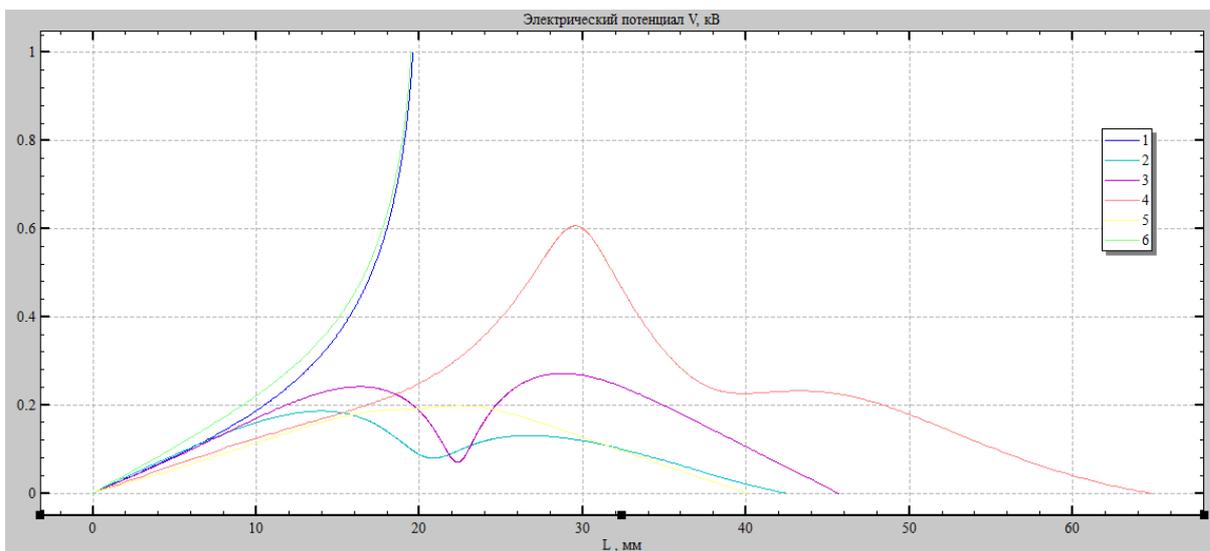


Рисунок 21 – Зависимость электрического потенциала от траектории пролета для случайных точек

### 3.4 Численный расчет напряженности

Для исследования зависимости напряженности от траектории заряда рассчитаем численно напряженности в зависимости от начального положения, но с постоянным нормальным углом падения ( $\alpha = 0^\circ$ ). Траектории показаны на рисунке 22.

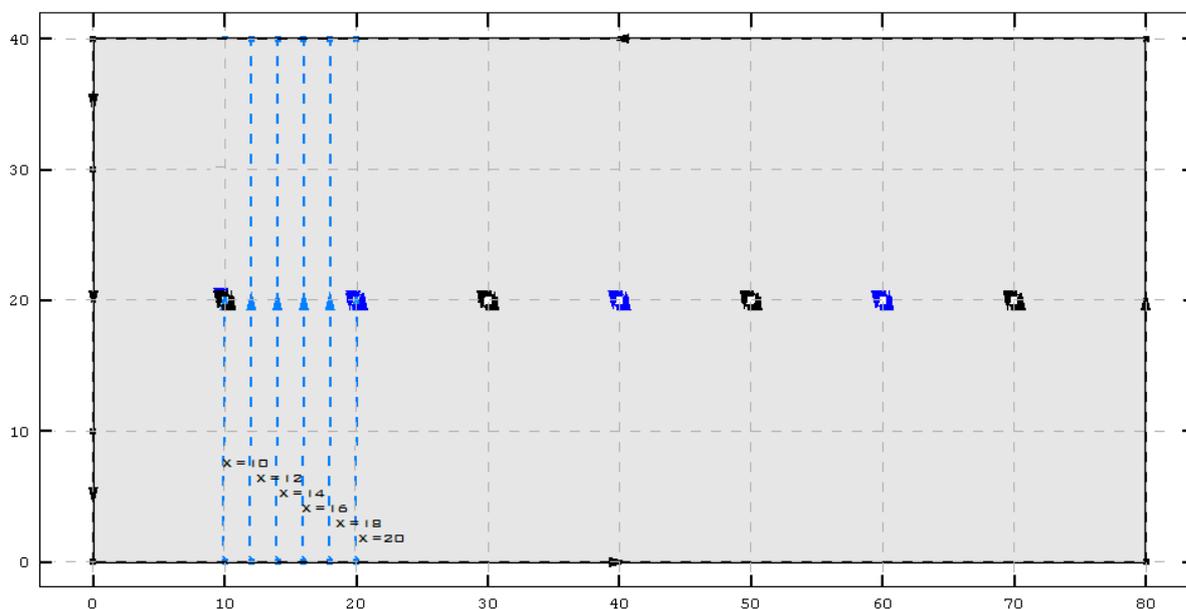


Рисунок 22 – Моделирование начального положения влета

Изобразим нормированный график напряженности при разных начальных положениях (рисунок 23), и выведем формулу для различных начальных положений в формате  $y=e^{\alpha x}$

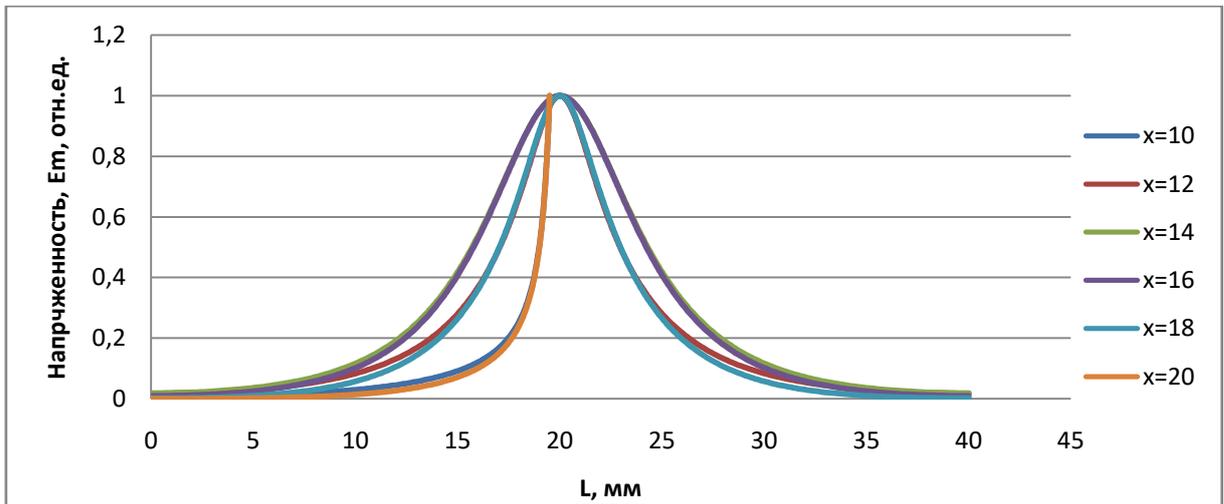


Рисунок 23– Зависимость напряженности электрического поля при разных начальных положениях влета

Из рисунка 23 следует, что для  $x=10$  и  $x=20$  при попадании на электрод зависимость может быть записана следующим выражением (6):

$$y = 0,00015e^{0,42122x} . \quad (6)$$

При  $x=12$  и  $x=18$  выражения примут следующий вид (7):

$$\begin{cases} y = 0,0097e^{0,2311x}, & 0 < x < 20 \\ y = 103,6876e^{-0,2326x}, & 20 \leq x < 40 \end{cases} , \quad (7)$$

а при  $x=14$  и  $x=16$  выражения примут вид (8):

$$\begin{cases} y = 0,0123e^{0,2307x}, & 0 < x < 20 \\ y = 121,7093e^{-0,2294x}, & 20 \leq x < 40 \end{cases} \quad (8)$$

Из этого следует вывод, что распределение напряженности между электродами симметрично относительно центра.

Форма электрического потенциала будет выглядеть следующим образом (рисунок 25).

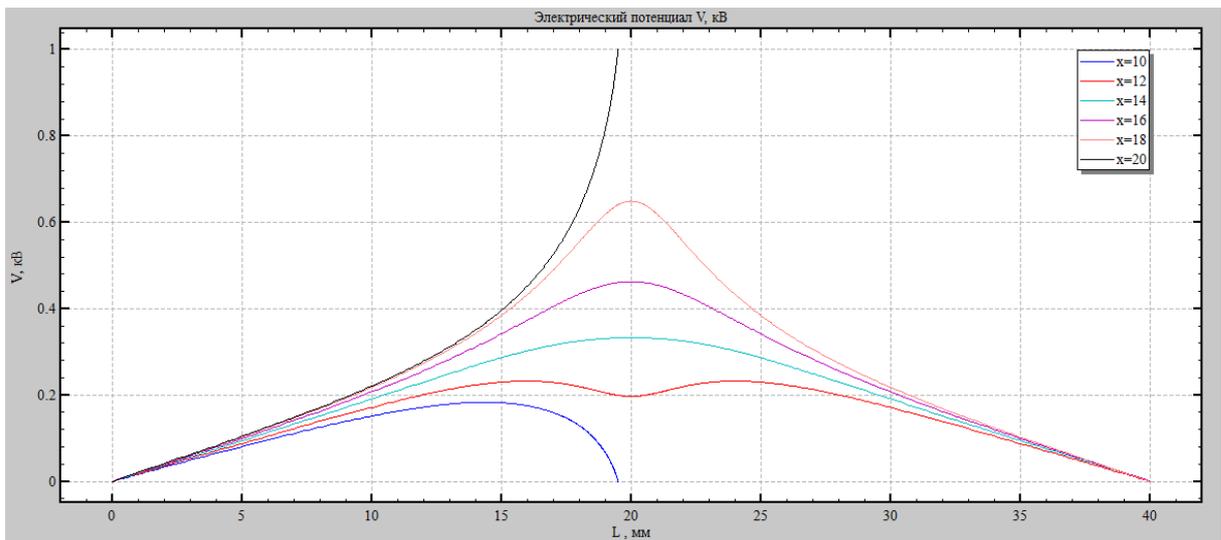


Рисунок 25 – Зависимость электрического потенциала от траектории полета при разных начальных положения

Численно рассчитаем напряженности в зависимости от угла падения, но с постоянным начальным положением ( $x = 10$ ). Траектории показаны на рисунке 26. На рисунке 27 показан нормированный график напряженности при разных углах влета.

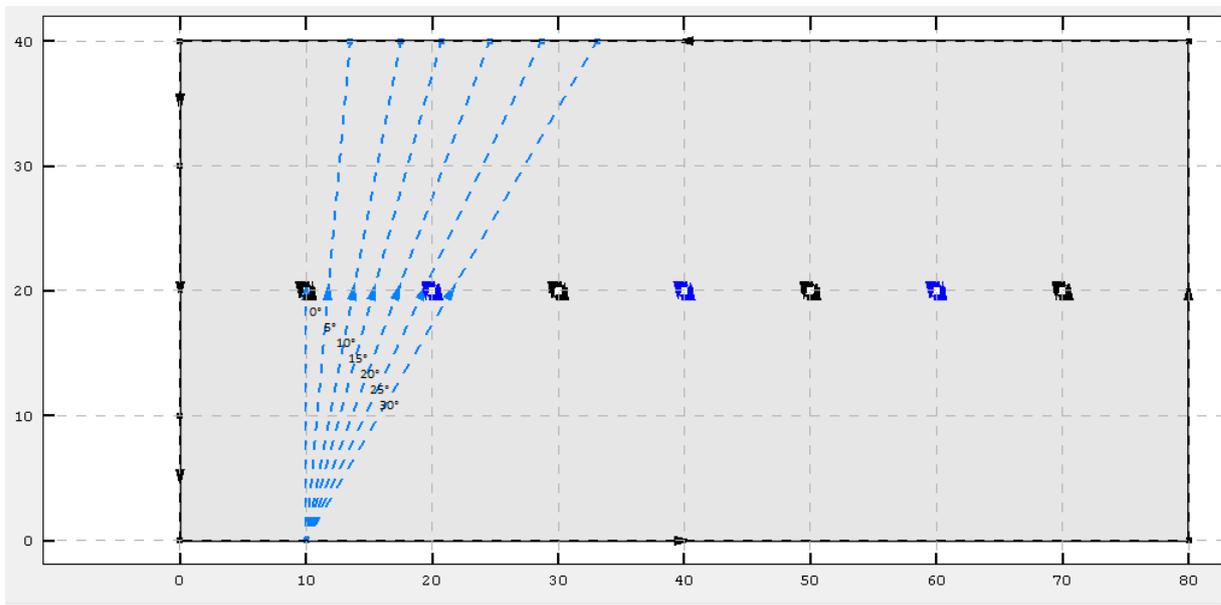


Рисунок 26 – Моделирование угла влета

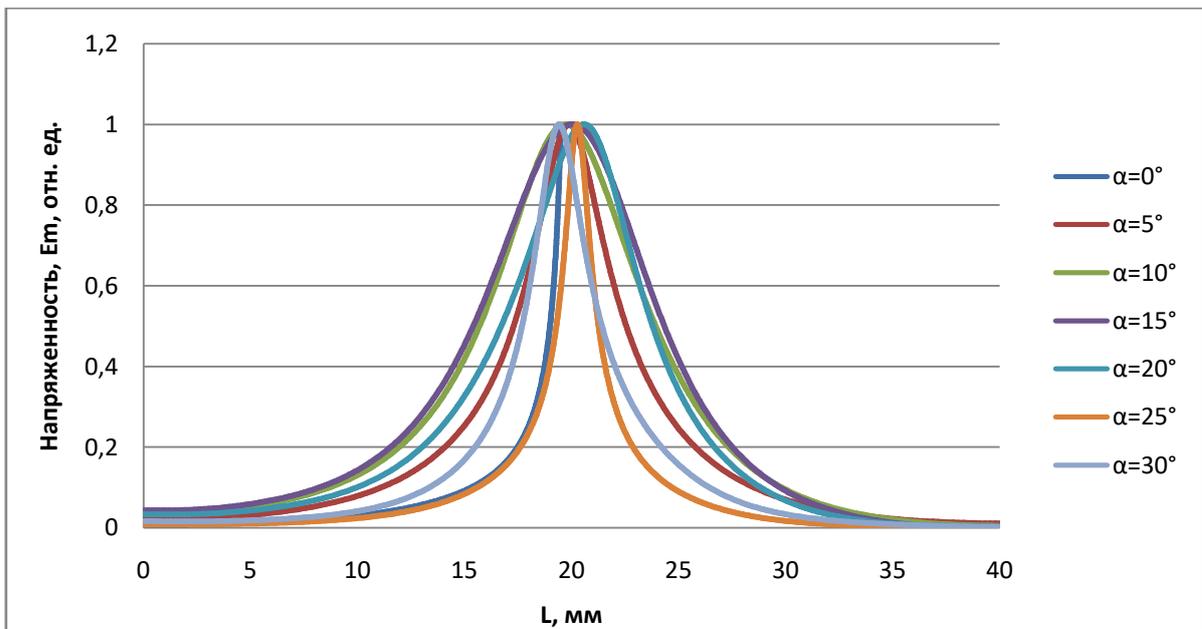


Рисунок 27 – Зависимость напряженности электрического поля при разных углах падения

На рисунке 27 показаны смоделированные индуцированные сигналы заряда для частиц с одинаковым местоположением входа, но с разными углами падения. Все заряженные частицы пролетают через одно и то же место входа при  $x = 10$  мм, в то время как их углы падения меняются от  $0^\circ$  до  $30^\circ$  с интервалом  $5^\circ$ . Установлена закономерность, что чем ближе к электроду находится наведенный заряд, тем сжатее по оси  $x$  будет график.

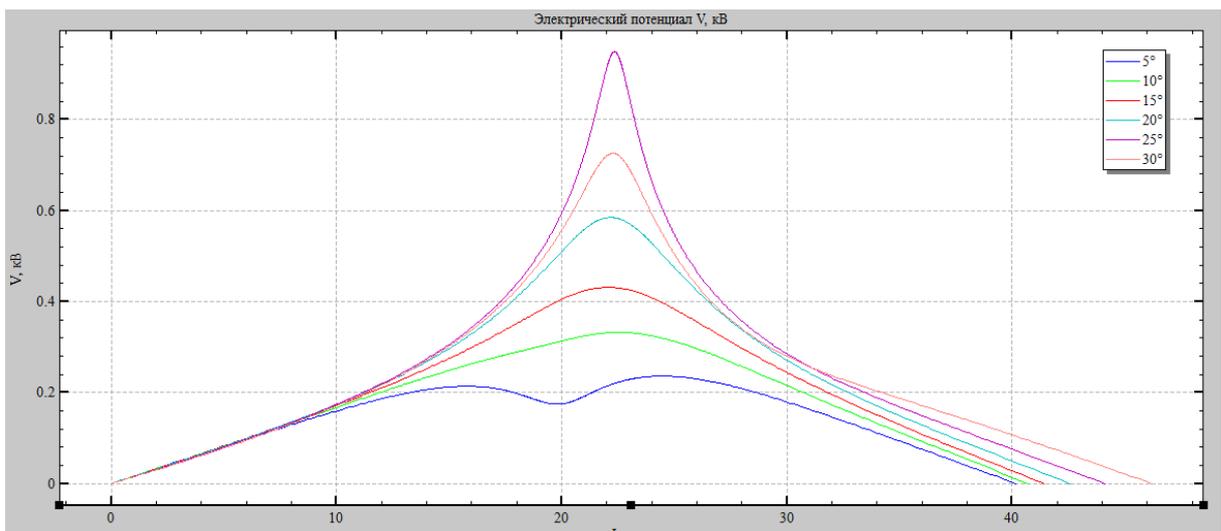


Рисунок 28 – Зависимость электрического потенциала от траектории полета при разных углах влета

### 3.5 Электротехническая модель детектора вектора скорости

Приведем эквивалентную измерительную схему для оценки сигнала с измерительной сетки (рисунок 29).

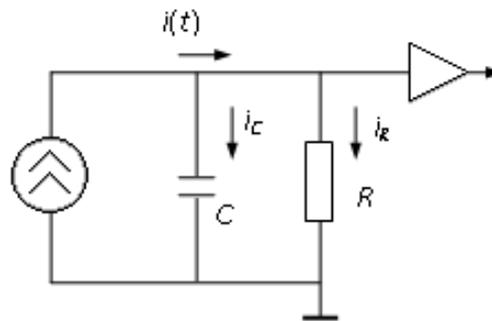


Рисунок 29 - Эквивалентная схема включения

Ток  $i(t)$  разветвляется на две составляющие: ток  $i_C(t)$ , характеризующий изменение заряда  $Q(t)$  на емкости  $C$ :

$$i_C = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (9)$$

и ток  $i_R(t)$  через сопротивление  $R$ , определяемый законом Ома:

$$i_R(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{Q(t)}{RC}. \quad (10)$$

В соответствии с законом Кирхгофа:

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t). \quad (11)$$

Отсюда заряд  $Q(t)$  может быть получен решением дифференциального уравнения:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{RC}. \quad (12)$$

Уравнение можно записать в виде:

$$Q(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t i(t') e^{\frac{t'}{RC}} dt'. \quad (13)$$

На основании уравнения (4) произведем расчет тока в зависимости от времени, где время выражается как:

$$t = x/V \quad (14)$$

Примем скорость микрочастиц  $V=10$  км/с, ранее был произведен

численный расчет напряженности и уравнение ( 4) примет вид:

$$i(t)=q \times (V_x \times E_x + V_y \times E_y) \quad (15)$$

при этом

$$V_x = V \times \cos \alpha \quad (16)$$

$$V_y = V \times \sin \alpha \quad (17)$$

где  $\alpha$  - угол влета.

Примем  $q=1$ , тогда:

$$i(t)=V_x \times E_x + V_y \times E_y \quad (18)$$

Построим зависимость  $i(t)$

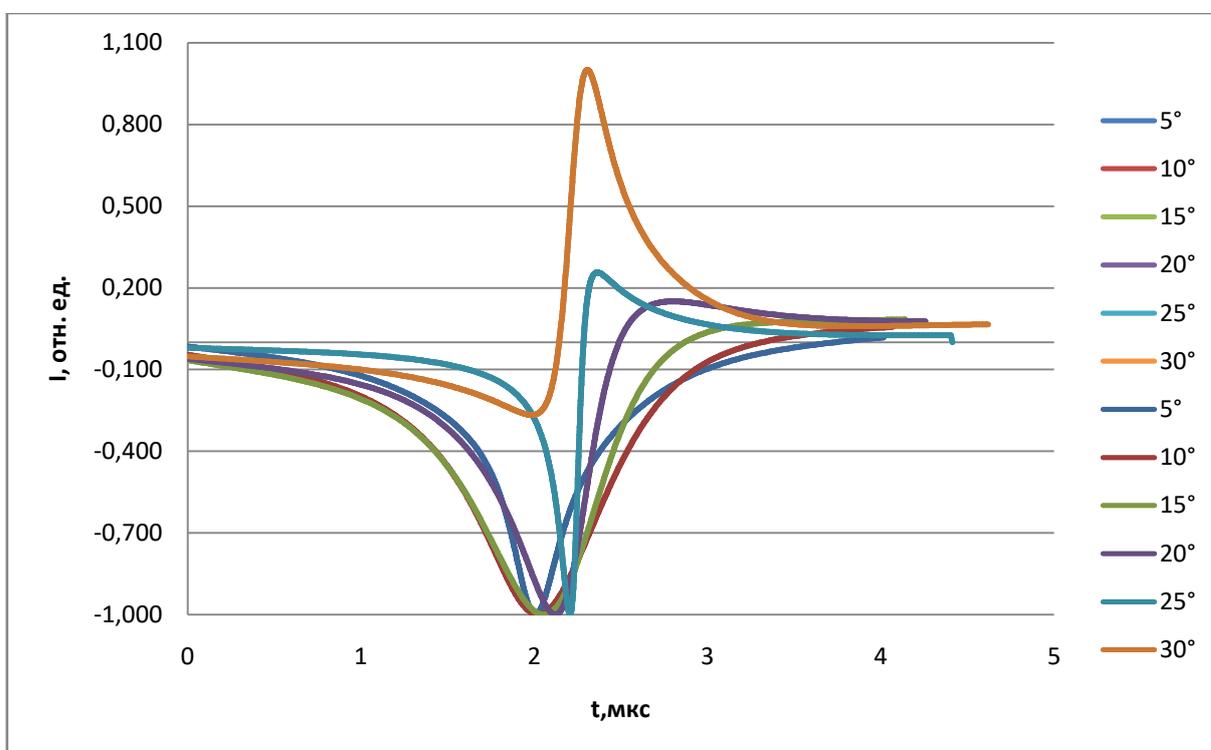


Рисунок 30 – График зависимости тока от времени

Вывод:

-В главе продемонстрированы возможности программы BETAFields. Установлена зависимость от начального положения влета и от угла влета.

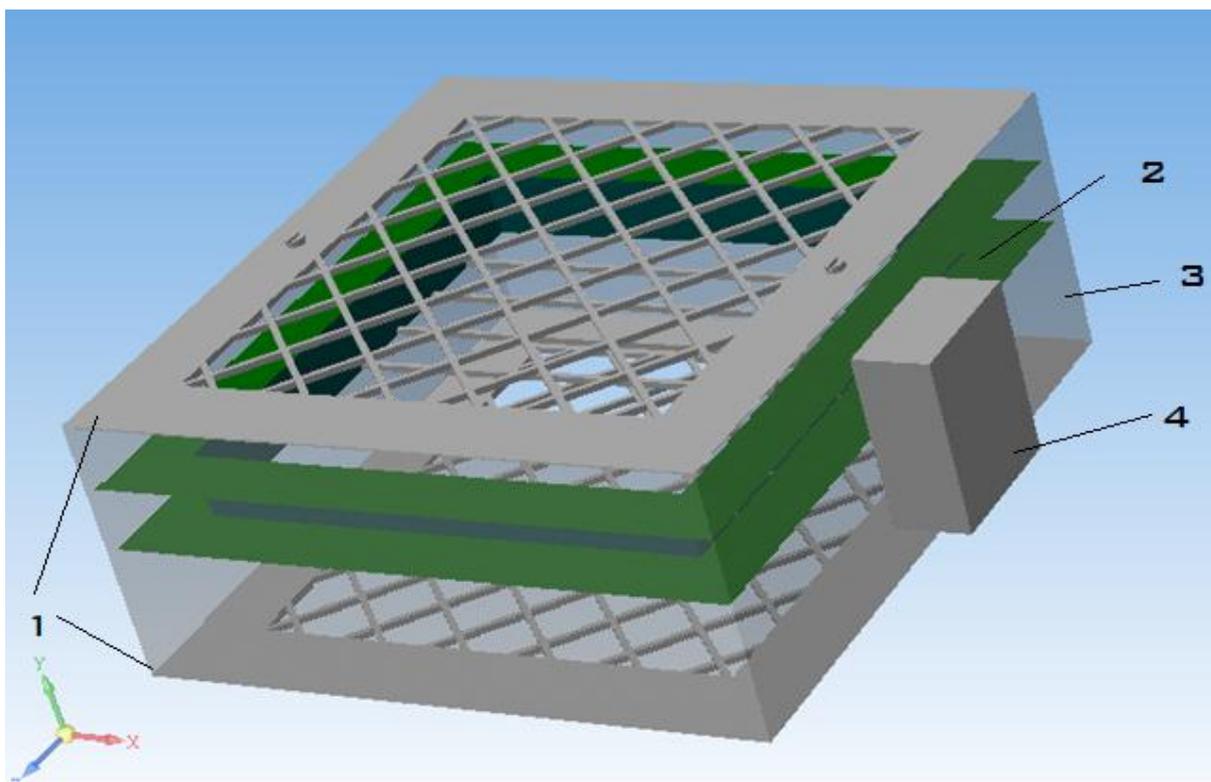
-Произведен численный расчет напряженности и электрического потенциала;

-Получен график зависимости тока от времени на основании которого можно решить обратную задачу и найти вектор скорости

## 4 Разработка конструкции

### 4.1 Вид конструкции

Конструкция детектора высокоскоростных частиц представляет из себя модель, состоящую из 2 сеток между которыми расположена рамка с электродами. Общий вид конструкции будет выглядеть следующим образом (рисунок 31).



1 – сетки, 2 – система электродов, 3 – экранирующие стенки, 4 – измерительный блок

Рисунок 31 - Общий вид

Для создания системы электродов необходимо смоделировать конструкцию для фиксации электродов, а также выбрать материал электродов.

### 4.2 Конструкция рамки

Так как электроды чередуются, то необходимо разработать рамку, позволяющую расположить электроды таким образом, чтобы минимизировать их пересечение и сделать расположение удобным, относительно конструкции.

Рамка, спроектированная в программе КОМПАС 3D изображена на рисунке 32.

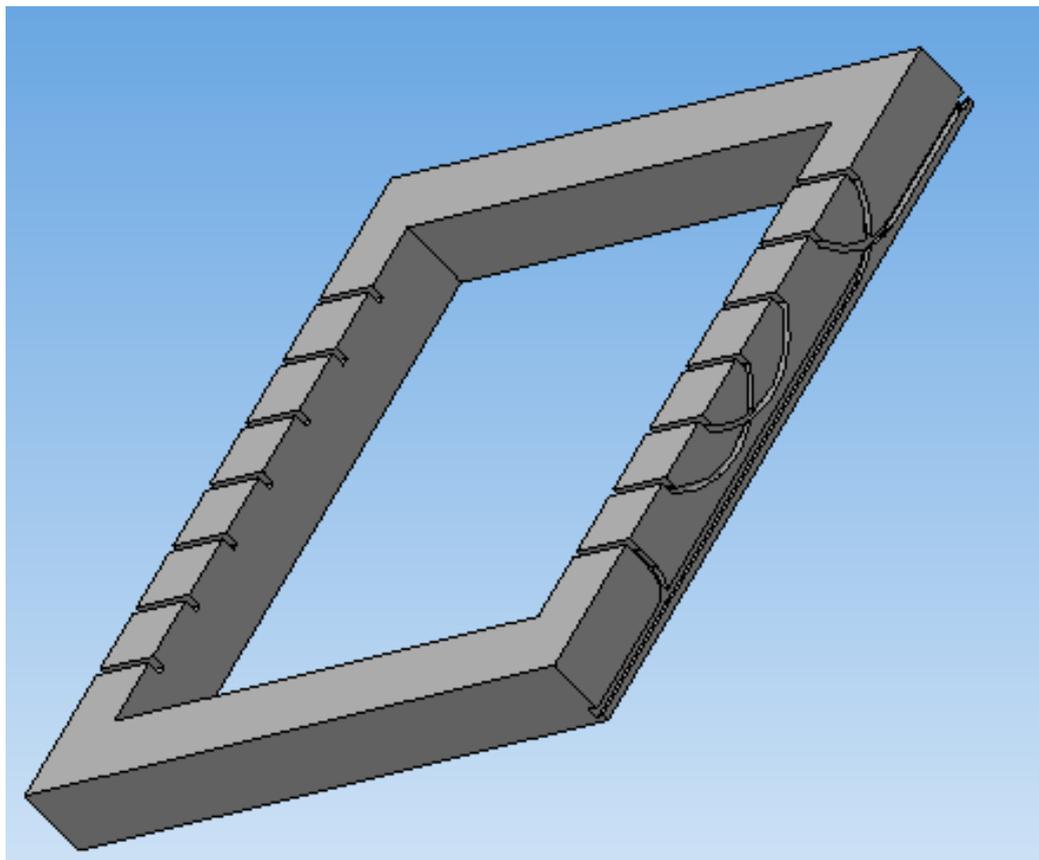


Рисунок 32 – Рамка для электродов

#### 4.2 Выбор материала рамки

Рамка будет создана про помощи 3D печати. Рассмотрим материалы и подберем наиболее подходящий.

##### 4.2.1 ABS

ABS - недорогой материал, отлично подходит для печати жестких и прочных деталей, которые могут выдерживать высокие температуры. материал не подвержен разложению и обладает высокой прочностью.

##### 4.2.2 Flexible

Гибкие нити, обычно называемые TPE или TPU, известны своей эластичностью, позволяя материалу легко растягиваться и изгибаться.

##### 4.2.3 PLA

PLA является основным материалом для большинства пользователей благодаря простоте использования, точности размеров и низкой

стоимости. PLA может быстро потерять свою структурную целостность и может начать падать и деформироваться, особенно при нагрузке, когда она приближается к 60 ° C.

#### 4.2.4 HIPS

HIPS представляет собой легкий материал, наиболее часто используется в качестве растворимой структуры поддержки для моделей ABS.

#### 4.2.5 PETG

PET и PEG-волокна известны своей легкостью печати, гладкой поверхностью и водостойкостью.

#### 4.2.6 Nylon

Нейлон - это жесткий и полугибкий материал, который обеспечивает высокую ударную стойкость и стойкость к истиранию. Это идеальный выбор для печати прочных деталей.

#### 4.2.7 Carbon Fiber Filled

Волокна из углеродного волокна содержат короткие волокна, которые вводятся в базовый материал PLA или ABS, чтобы повысить прочность и жесткость.

#### 4.2.8 ASA

ASA является распространенной альтернативой ABS и отлично подходит для наружного применения благодаря высокой УФ, температуре и ударопрочности.

#### 4.2.9 Поликарбонат

Поликарбонат известен своей прочностью и долговечностью. Он обладает очень высокой теплостойкостью и ударопрочностью, что делает его идеальным выбором для сложных условий.

#### 4.2.10 Металлический порошок

Заполненные металлом нити изготавливаются путем смешивания мелкого металлического порошка в базовый материал, обеспечивая уникальную металлическую отделку и добавленную массу.

#### 4.2.11 PVA

PVA обычно известен своей способностью растворяться в воде и часто используется в качестве материала для поддержки сложных элементов.

Для изготовления диэлектрической рамки для сетки наиболее подходящим будет являться поликарбонат

Поликарбонат – представляет собой. Совокупность прозрачности поликарбоната и высокой прочности, позволяет изготавливать даже пуленепробиваемые стекла.

Так же среди преимуществ поликарбоната следует отметить высокую устойчивость к высоким и низким температурам – от -40 до 120°C. Кроме того, поликарбонат склонен к затуханию при воздействии открытого огня, способствуя пожарной безопасности, и устойчив к воздействию кислот. Среди недостатков поликарбоната можно выделить достаточно высокую гигроскопичность и уязвимость к УФ излучению.

Сплав поликарбоната и ABS сочетает возможность шлифовки и окраски, свойственную ABS, с более высокой ударопрочностью и рабочей температурой. Сохраняет прочность при низких температурах — до -50 °С. В отличие от чистого PC, лучше применим в тех случаях, когда необходимо ликвидировать слоистую структуру детали шлифовкой или пескоструйной обработкой. Применение: производство корпусов и элементов органов управления для штучного и мелкосерийного выпуска, замена серийных пластиковых деталей в оборудовании, детали к которому перестали выпускать.

#### 4.2.12 Материалы для космической техники

Для космической техники используют следующие материалы (таблица 3)

Полиэфирэфиркетон, РЕЕК

Рабочая температура изделий из РЕЕК достигает 250 °С, возможен кратковременный нагрев до 300 — показатели для армированных

филаментов. Недостатков у PEEK два: высокая цена и умеренная ударопрочность. Остальное — плюсы. Пластик самозатухающий, термостойкий, химически инертный. Из PEEK производится медицинское оборудование и импланты, стойкость к истиранию позволяет печатать из него детали механизмов.

#### Полиэфиримид

Он же — Ultem. Семейство пластиков, разработанных компанией SABIC. Характеристики

PEI скромнее показателей PEEK, но стоимость заметно ниже. Ultem 1010 и 9085 — основные материалы Stratasys для печати функциональных деталей. PEI востребован в аэрокосмической отрасли — масса значительно меньше, в сравнении с алюминиевыми сплавами. Рабочие температуры изделий, в зависимости от модификации материала, достигают 217 °C по информации производителя и 213 — по результатам испытаний Stratasys.

Преимущества у PEI те же, что и у PEEK — химическая и температурная стойкость, механическая прочность. Именно этот материал Stratasys продвигает как частичную замену металлу в аэрокосмической отрасли, для беспилотников, изготовления оснастки для формовки, быстрой печати функциональных деталей в опытном производстве.

#### Полифенилсульфон, PPSF/PPSU

Еще один материал, который сочетает в своих свойствах температурную стойкость, механическую прочность и устойчивость к химическим воздействиям. PPSF от Stratasys сертифицирован для аэрокосмического и медицинского применения. Позиционируется как сырье для производства вспомогательных медицинских приспособлений, может быть стерилизован в паровых автоклавах. Применяется в производстве деталей для лабораторных установок в химической промышленности.

Таблица 3 – Сравнение характеристик филаментов

Название	Прочность на разрыв, МПа	Модуль Юнга, МПа	Ударная вязкость, Дж/м	Термостойкость, °С
PC	30-40	1944-1958	28-73	127
PC/ABS	41	1900	196	96
PA6	28,9-49,3	1817-2232	43-106	93
PA12	28-32	1138-1282	53-135	82
PA12CF	28,8-63,4	2300-7515	21,4-85	143
PEEK	97	3700		160
Ultem 1010	42-64	2200-2770	48-120	213
Ultem 9085	33-47	2150-2270	48-120	153
PPSF	55	2100	58,7	189

#### 4.3 Выбор материала электродов

В качестве материалов рекомендуется использовать материалы с высокой проводимостью. Такие как медь, алюминий, нихром, тантал. Составим таблицу их свойств и выберем оптимальный материал.

Таблица 4 – Материалы для электродов

	Медь	Алюминий	Нихром	Тантал
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \times 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup> , при 0-100°С	16,8	24,58	18	6,5
Удельное электросопротивление, $\rho \times 10^{-8}$ , Ом×м	1,724	2,65	11,2	12,5
Температурный коэффициент электросопротивления, град <sup>-1</sup> , $\times 10^{-3}$ при 20-100°С	2,8	4,3	0,25	3,8

Медная и алюминиевая проволоки имеют хорошую проводимость, но ввиду своей мягкости будут провисать в конструкции, по остальным параметрам нихромовая проволока является наиболее успешным материалом для данной конструкции. При оценке свойств материалов установлено, что в качестве материала для электродов лучше использовать нихромовую проволоку.

Вывод:

- Разработана конструкция насадки для масс-спектрометра;
- Проведен анализ и выбраны компоненты для детектора высокоскоростных микрочастиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения ВКР рассмотрены методы и механизмы детектирования высокоскоростных микрочастиц.

Рассмотрены возможные конструкции устройства. Установлено, что в качестве примера для разработки новой конструкции лучше всего использовать датчик на основе измерения индуцированных электрических сигналов.

Рассмотрены методы расчета полей в соединительных элементах ускорительных систем, установлено, что для получения картины электростатического поля лучше использовать метод конечных элементов, реализуемый программой BETAFields, так как в отличие от ELCUT и CST STUDIO в нет ограничений по количеству исследуемых элементов.

Разработана конструкция насадки для масс-спектрометра. Проведен анализ и выбраны компоненты для детектора высокоскоростных микрочастиц.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Кузнецов Л. И., Савичев В. Ю., Тихонов Н. Н. Лазерно-реактивная защита космических аппаратов от малоразмерного мусора //Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – №. 4. – С. 372-376.
- 2 Вениаминов С. С. Космический мусор – угроза человечеству. 2-е издание, исправ. и доп. М.: ИКИ РАН, 2013. (Сер. Механика, управление, информатика).
- 3 Аксёнов О., Олейников И. и др. Анализ заселённости ОКП объектами техногенного происхождения // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2014. № 9. С. 8–14.
- 4 Liu M. et al. Characterizing hypervelocity ( $> 2.5$  km/s)-impact-engendered damage in shielding structures using in-situ acoustic emission: Simulation and experiment //International Journal of Impact Engineering. – 2018. – Т. 111. – С. 273-284.
- 5 Auer A., Sitte K. Detection technique for micrometeoroids using impact ionization //Earth and Planetary Science Letters. – 1968. – Т. 4. – №. 2. – С. 178-183.
- 6 Auer S. et al. Characteristics of a dust trajectory sensor //Review of Scientific Instruments. – 2008. – Т. 79. – №. 8. – С. 084501
- 7 Northway P. et al. Characteristics of a new dust coordinate sensor //Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 23. – №. 10. – С. 105902.
- 8 Auer S. et al. The charge and velocity detector of the cosmic dust analyzer on Cassini //Planetary and Space Science. – 2002. – Т. 50. – №. 7-8. – С. 773-779.
- 9 Auer, S., 1975. Two high resolution velocity vector analyzers for cosmic dust particles. Rev. Sci. Instrum. 46, 127–135.

- 10 Li Y. et al. Instrument concept of a single channel dust trajectory detector //Advances in Space Research. – 2017. – Т. 59. – №. 6. – С. 1636-1641.
- 11 Ramo S. Currents induced by electron motion //Proceedings of the IRE. – 1939. – Т. 27. – №. 9. – С. 584-585.
- 12 Shockley W. Currents to conductors induced by a moving point charge //Journal of applied physics. – 1938. – Т. 9. – №. 10. – С. 635-636.
- 13 Калинин В. И. Генерирование дециметровых и сантиметровых волн. М., Связьиздат, 1948.
- 14 Калинин, В. И., Герштейн Г. М. Введение в радиофизику . М., Гостехиздат, 1957
- 15 Лопухин В. М. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками. М., Госгехиздат, 1953.
- 16 Болотовский Б.М., Гинзбург В.Л. Эффект Вавилова – Черенкова и эффект Допплера при движении источников со скоростью большей скорости света в вакууме// Успехи физических наук. 1972, Т. 106, Вып. 04. С. 577–592
- 17 В.В. Никольский, Т.И. Никольская Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука, 1989. 544 с.
- 18 Графов Б. М., Пекар Э. В. Метод эквивалентного многополюсника в теории электродного импеданса //Электрохимия. – 1970. – Т. 6. – №. 4. – С. 547-556.
- 19 Ларин В. С., Лоханин А. К., Матвеев Д. А. Методическое обеспечение ФГУП ВЭИ и реализующий его комплекс программ для проектирования изоляции силовых трансформаторов // Сб. науч. трудов VII междунар. науч.-техн. конф. «Силовые трансформаторы и системы диагностики». - 2010.
- 20 Асадова А.А., Телегин А.М. Расчет измерителя вектора скорости// Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. — 2018. — С. 59-60

- 21 Поклонский Н. А., Вырко С. А., Кочерженко А. А. Соотношения Рамо-Шокли для последовательной RCL-цепи //Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74. – №. 11. – С. 75-78.
- 22 Сёмкин Н. Д., Телегин А. М. Расчёт силы тока в измерительной цепи детектора высокоскоростных микрочастиц //Измерительная техника. – 2016. – №. 12. – С. 45-48
- 23 Иновенков, А.Н Обобщение теоремы Рамо-Шокли на случай высокоимпедансного внешнего включения, А.Н. Иновенков, О.В.Константинов, В.И. Пирогов //ЖУРНАЛ ТЕХНИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ. – 1993. – Т. 63. – №. 9.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Листинг программы случайных чисел

```
import random #подключаем модуль генерации случайных чисел
x1=random.uniform(0,80) #начальная координата по x, случайное число в
диапазоне от 0 до 80
x2=random.uniform(0,80) #конечная координата по x, случайное число в
диапазоне от 0 до 80
y1=0 #задаем начальную координату по y
y2=40 #задаем конечную координату по y
print(x1,y1) #выводим координаты первой точки
print(x2,y2) #выводим координаты второй точки
```



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

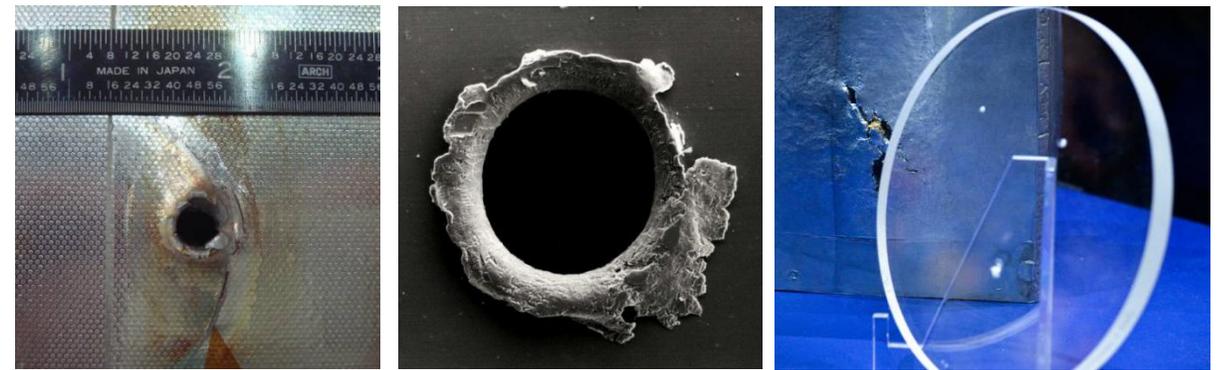
# Детектор ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

Студент : Асадова Анна Алиевна  
Научный руководитель : к. ф.-м. н, доцент кафедры  
КТЭСиУ Телегин Алексей Михайлович

Самара 2018 год



Рисунок 1 – Космический мусор



а)

б)

в)



г)

Рисунок 2 – Последствие попадания космического мусора:  
а) пробоина в панели спутника SolarMax (NASA), сделанная осколком космического мусора; б) Сквозное отверстие в радиаторной панели шаттла «Индевор»; в) повреждение иллюминатора; г) след от удара по обшивке МКС



Целью исследования является: расчет и моделирование детектора высокоскоростных микрочастиц.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести обзор и сравнить характеристики существующих детекторов высокоскоростных частиц;
- 2) Рассмотреть методы расчета полей;
- 3) Разработать модель детектора высокоскоростных микрочастиц;
- 4) Разработать конструкцию детектора высокоскоростных микрочастиц.



# ДЕТЕКТОРЫ СКОРОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

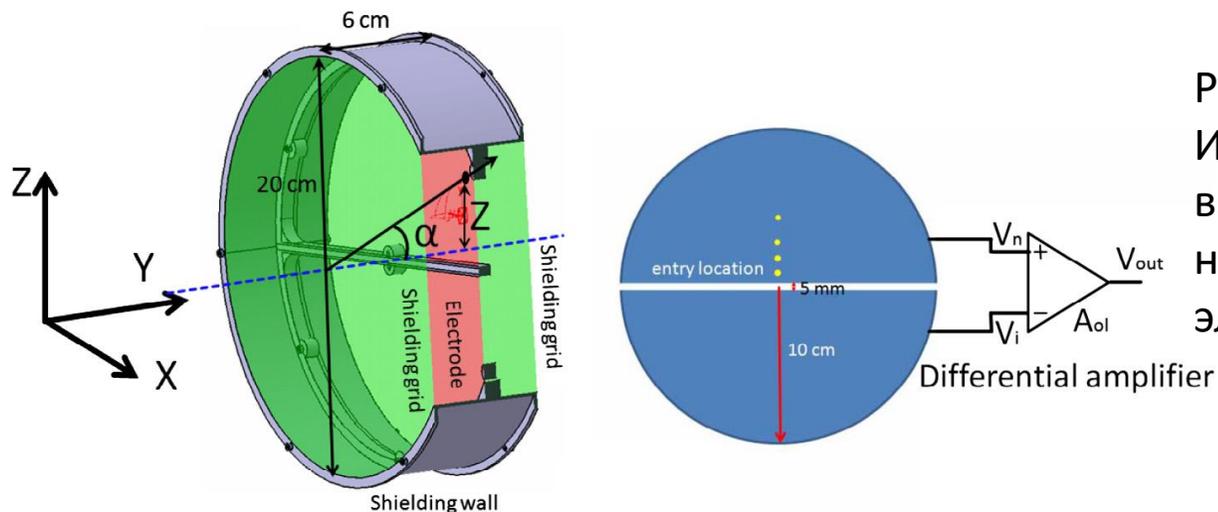


Рисунок 3 –  
Измеритель  
вектора скорости  
на полукруглых  
электродах

Рисунок 4 – Общий  
вид конструкции  
датчик пыли CCLDAS

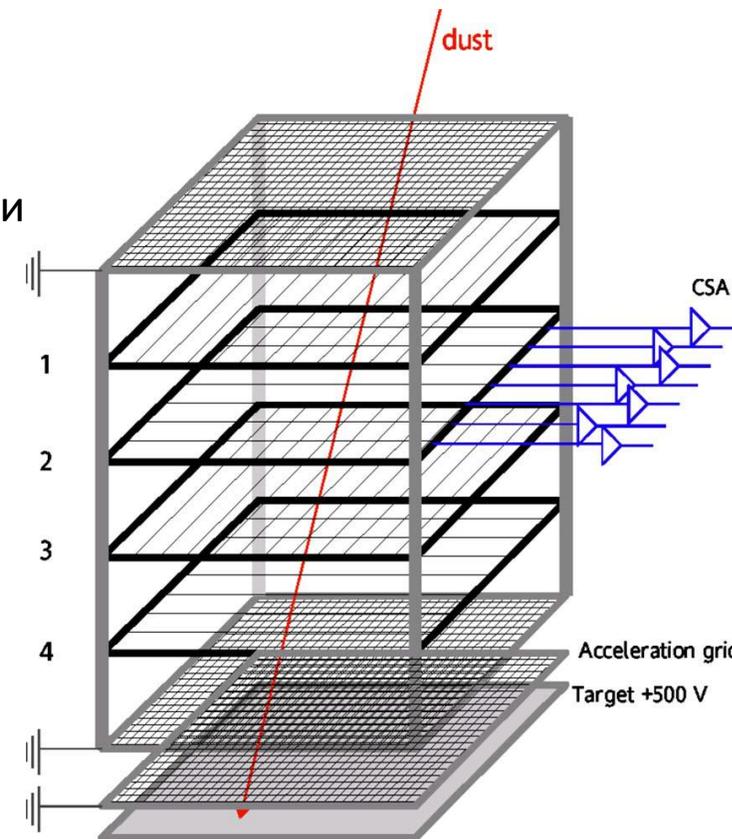
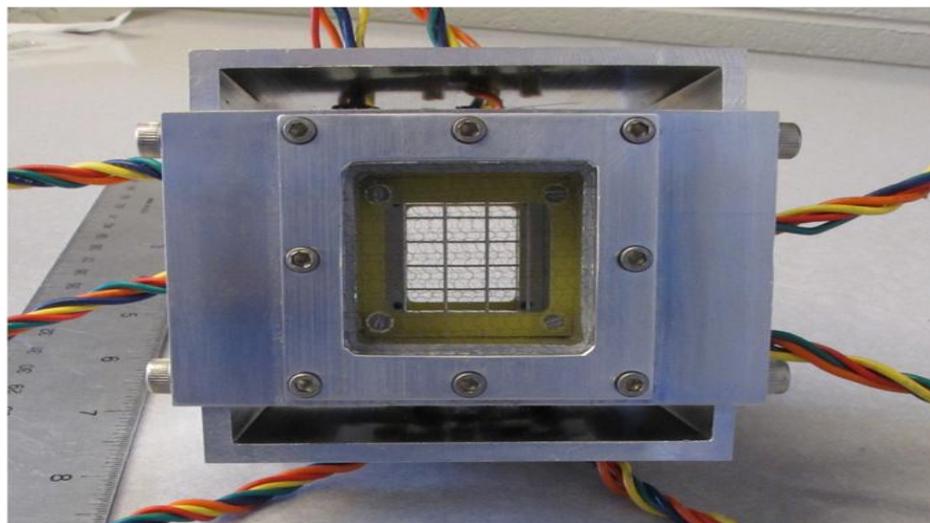


Рисунок 5 – Датчик траектории пыли

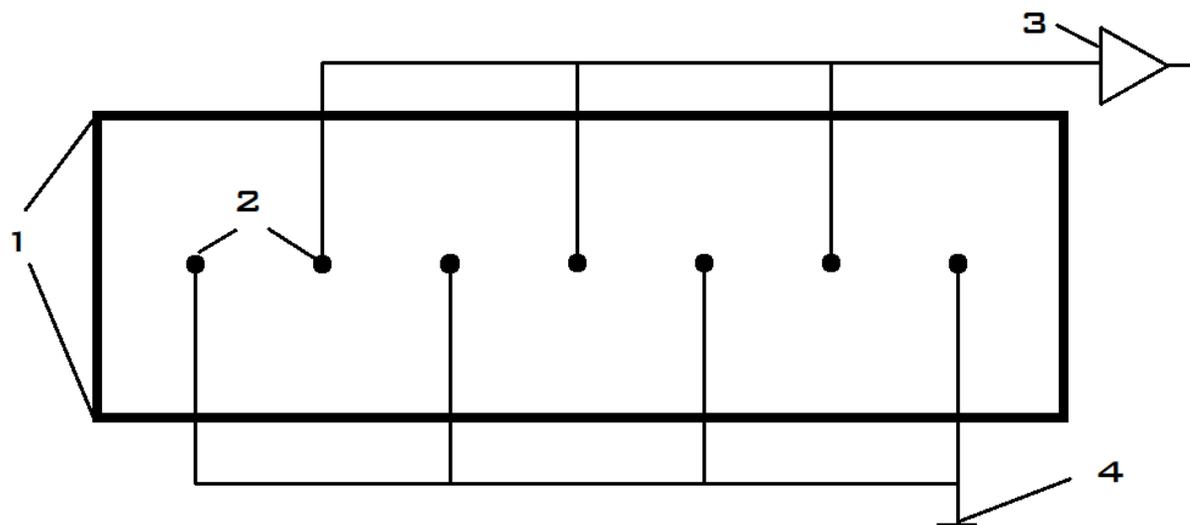


Таблица 1 – Сравнение детекторов

Наименование	Размер окна, мм	Реализация	Измеряемые величины
Детектор высокоскоростных частиц с использованием пьезодатчиков (HVI)[4]	500×600×150	Лабораторные исследования	$V_x, V_y, V_z,$
Масс-спектрометр[5]	60×60	Лабораторные исследования	$V_x$ и $V_y,$ $V_y$ и $V_z,$
Spase Derbis Censor[6]	1000×1000	2014-2017 Лабораторные исследования В космосе с декабря 2017	$V_x, V_y, V_z,$
CCLDAS[7]	71×71	Лабораторные исследования	$V_x, V_y$
CDA[8]	507×450	Исследования в космосе	$V_x, V_z,$



В работе необходимо разработать модель насадки для масс-спектрометра для измерения вектора скорости.



1 – сетки, 2 – электроды, 3 – усилитель, 4 – заземление

Рисунок 6 – Структурный вид детектора высокоскоростных микрочастиц

## Теорема Рамо-Шокли

Ток, наведенный в любом заземленном электроде произвольной системы электродов зарядом  $q$ , движущимся относительно этой системы, равен произведению заряда на скорость его движения и на взятую вдоль направления скорости компоненту напряженности фиктивного лапласовского поля этой системы, которое возникло бы, если бы на электрод, в цепи которого измеряется ток, был задан безразмерный потенциал +1, а остальные электроды системы были заземлены.

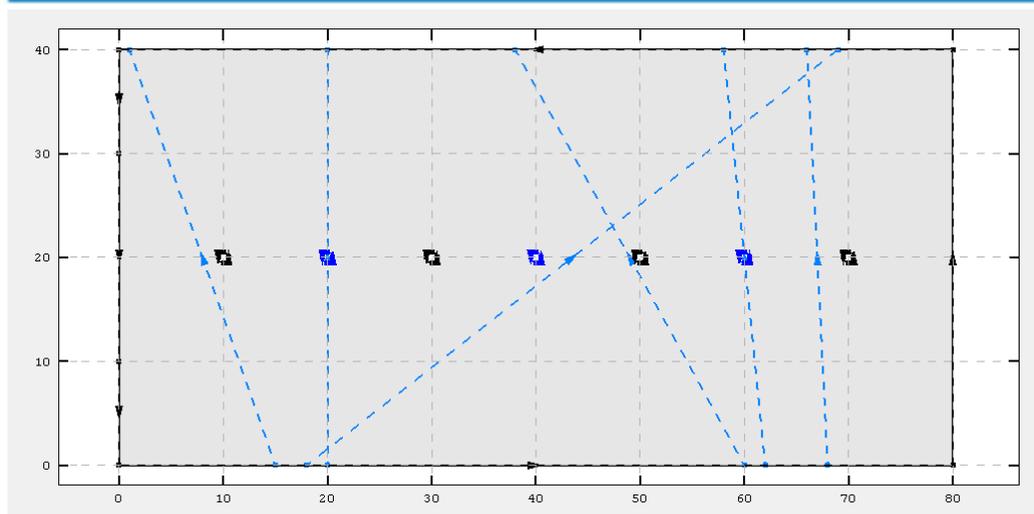
$$i_{нк} = q \times V \times E_v(x, y, z)$$

## Программы для расчета

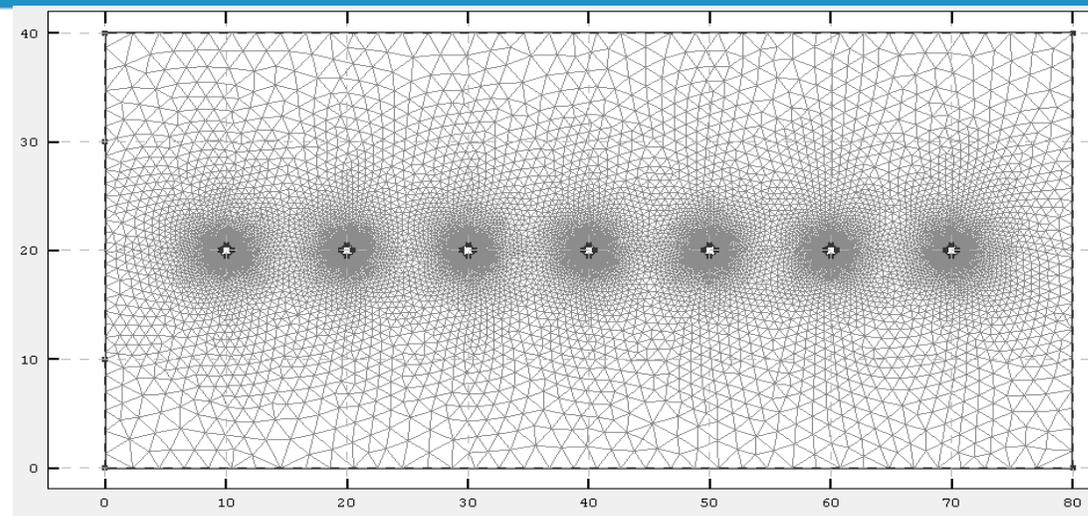
1. CST STUDIO SUITE
2. ELCUT
3. BETAFields
4. Ansys
5. Comsol



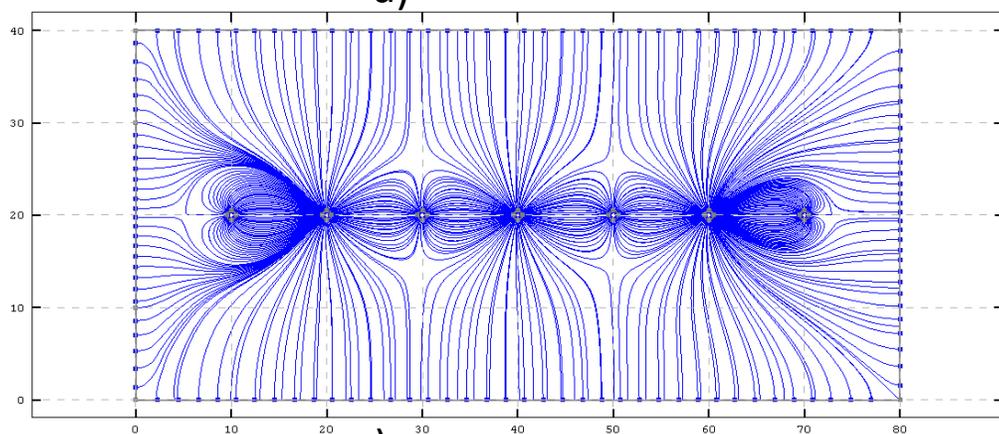
# ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УСТРОЙСТВА



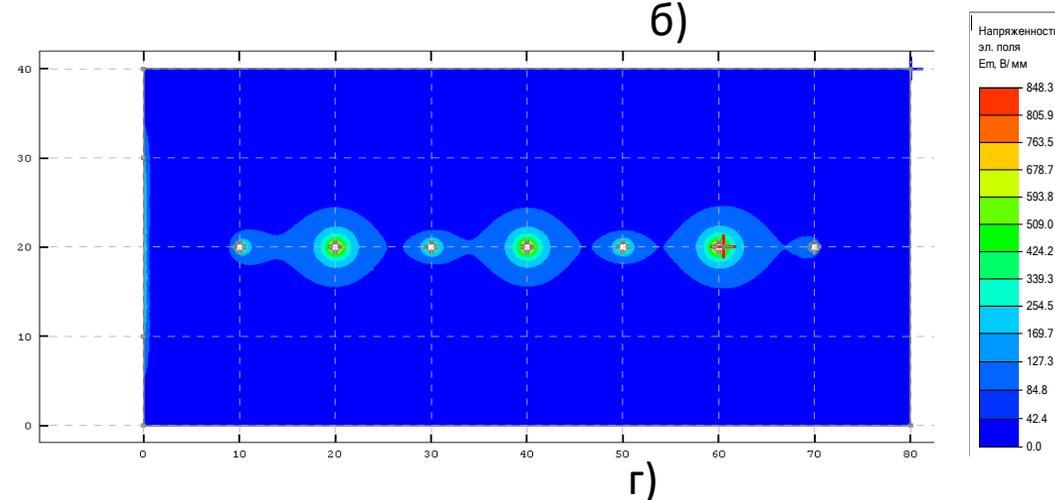
а)



б)



в)

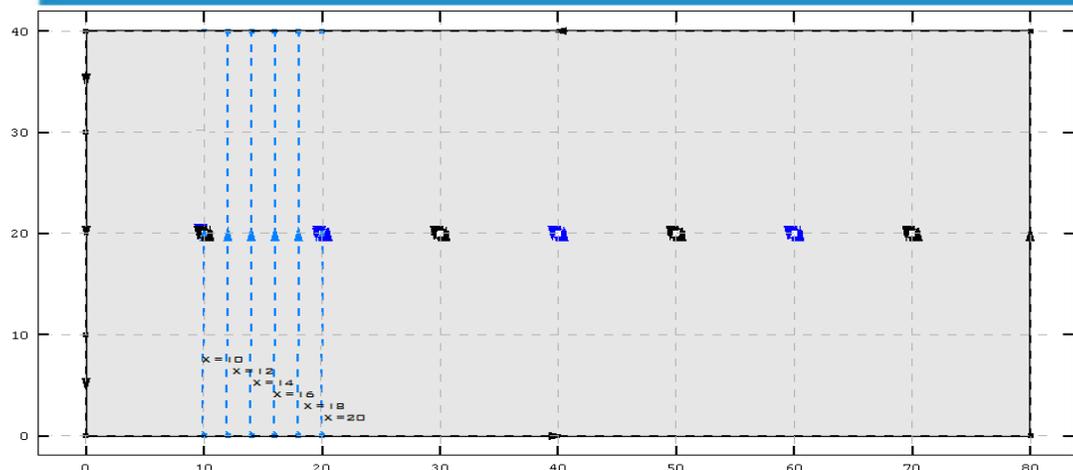


г)

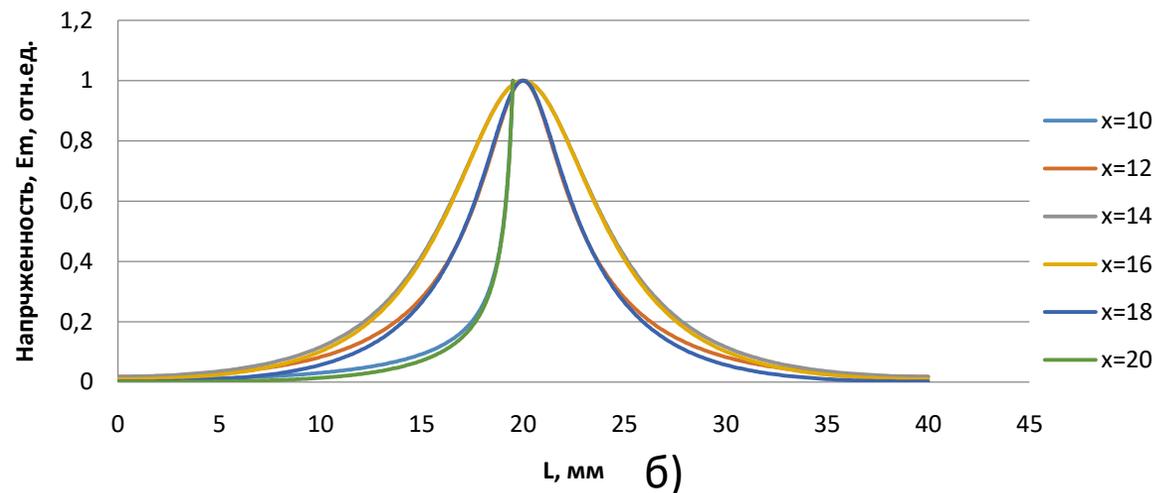
Рисунок 7 – Моделирование электростатического поля:  
а) расположение траекторий микрочастиц; б) сетка конечных элементов;  
в) силовые линии; г) линии напряженности  $E_m$



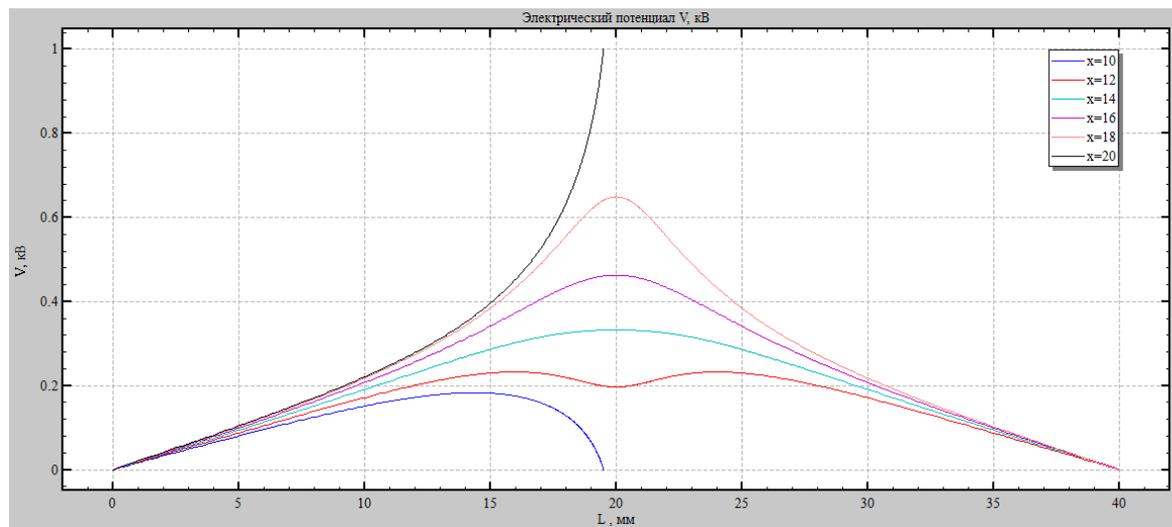
# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ УГЛЕ ВЛЕТА



а)



б)



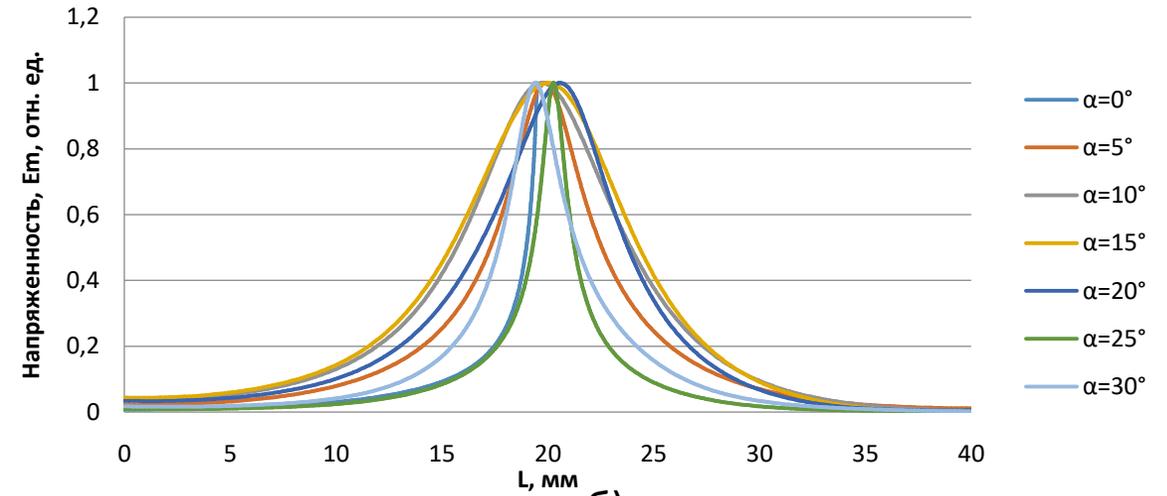
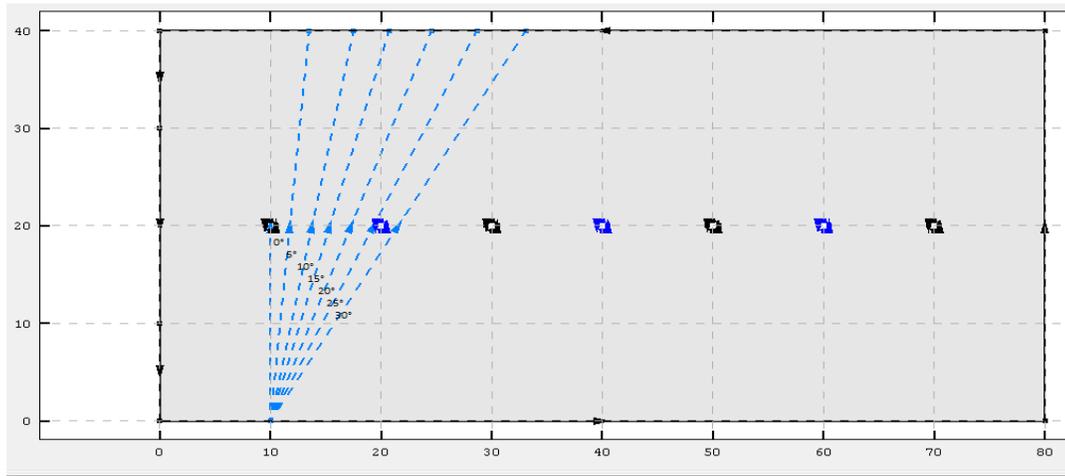
в)

Рисунок 8 – Моделирование при постоянном угле влета:

а) траектория полета; б) напряженность электрического поля; в) электрический потенциал



# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАЧАЛЬНОМ ПОЛОЖЕНИИ



а)

б)

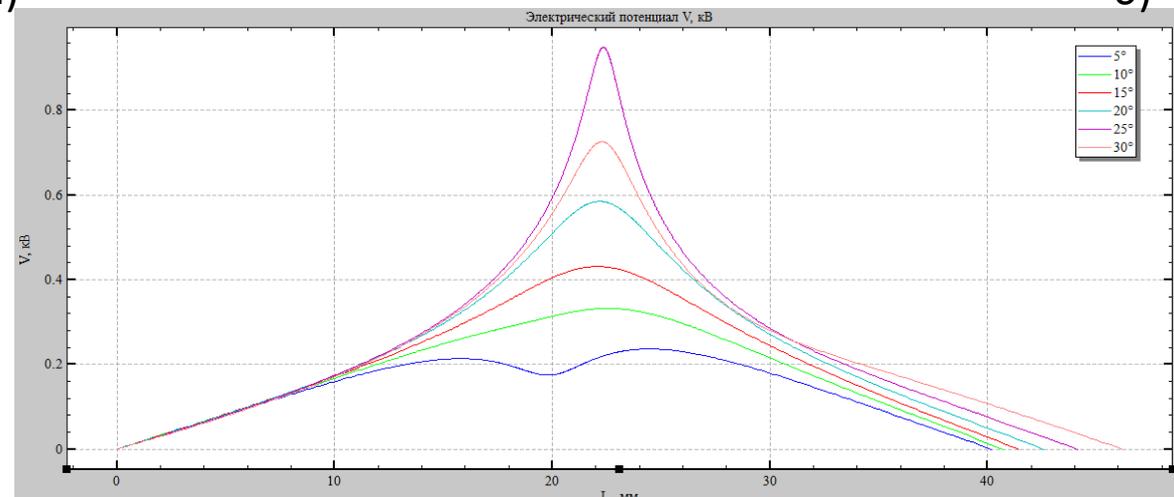
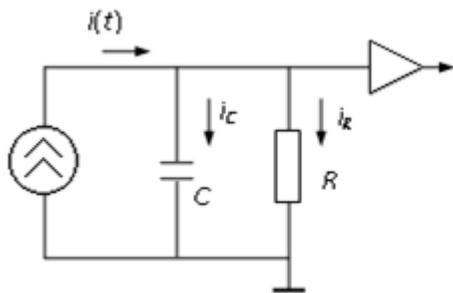


Рисунок 9 – Моделирование при постоянном начальном положении:

а) траектория полета; б) напряженность электрического поля; в) электрический потенциал



Ток  $i(t)$  разветвляется на две составляющие: ток  $i_C(t)$ , характеризующий изменение заряда  $Q(t)$  на емкости  $C$ :

$$i_C = \frac{dQ(t)}{dt}$$

и ток  $i_R(t)$  через сопротивление  $R$ , определяемый законом Ома: .

$$i_R(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{Q(t)}{RC}$$

Рисунок 10 – Эквивалентная схема включения

В соответствии с законом Кирхгофа:

$$i(t) = i_C(t) + i_R(t).$$

Отсюда заряд  $Q(t)$  может быть получен решением дифференциального уравнения:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{RC}$$

Уравнение можно записать в виде:

$$Q(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t i(t') e^{\frac{t'}{RC}} dt'$$

На основании теоремы Рамо Шокли произведем расчет тока в зависимости от времени, где время выражается как:

$$t = x/V$$

Примем скорость микрочастицы  $V=10$  км /с, ранее был произведен численный расчет напряженности и уравнение примет вид:

$$i(t) = q \times (V_x \times E_x + V_y \times E_y)$$

при этом  $V_x = V \times \cos \alpha$ ,  $V_y = V \times \sin \alpha$

где  $\alpha$  - угол влета.



Для удобства представления примем  $q=1$ , тогда:

$$i(t) = V_x \times E_x + V_y \times E_y$$

Построим зависимость  $i(t)$

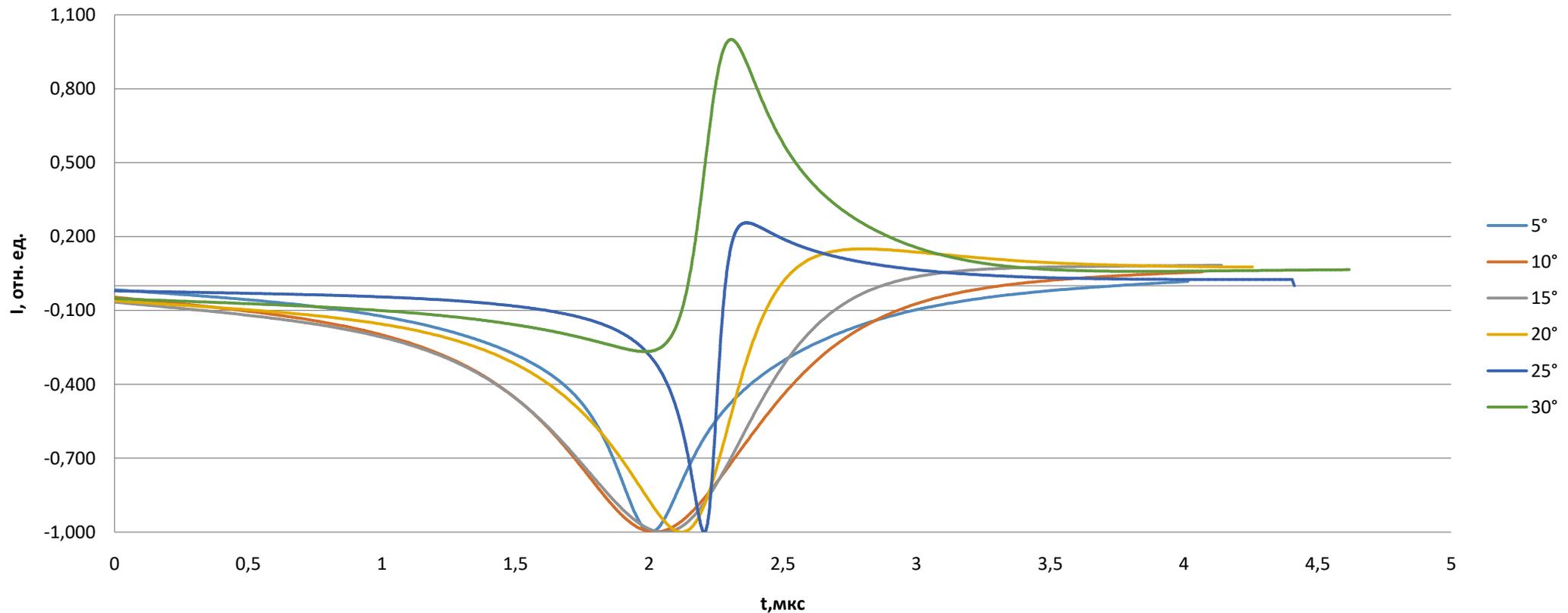
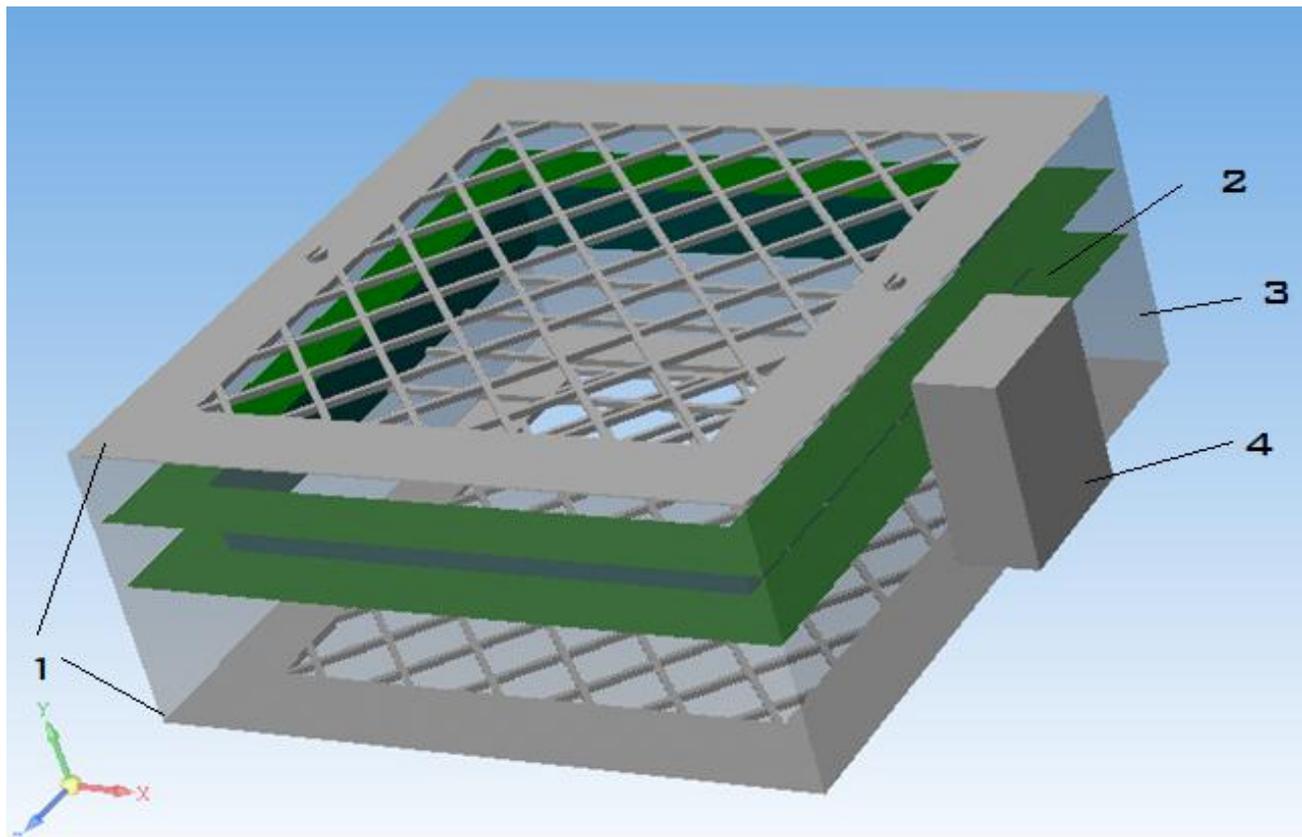


Рисунок 11 – График зависимости тока от времени



1 – сетки, 2 – система электродов, 3 –  
экранирующие стенки, 4 – измерительный блок

Рисунок 12 – Общий вид конструкции

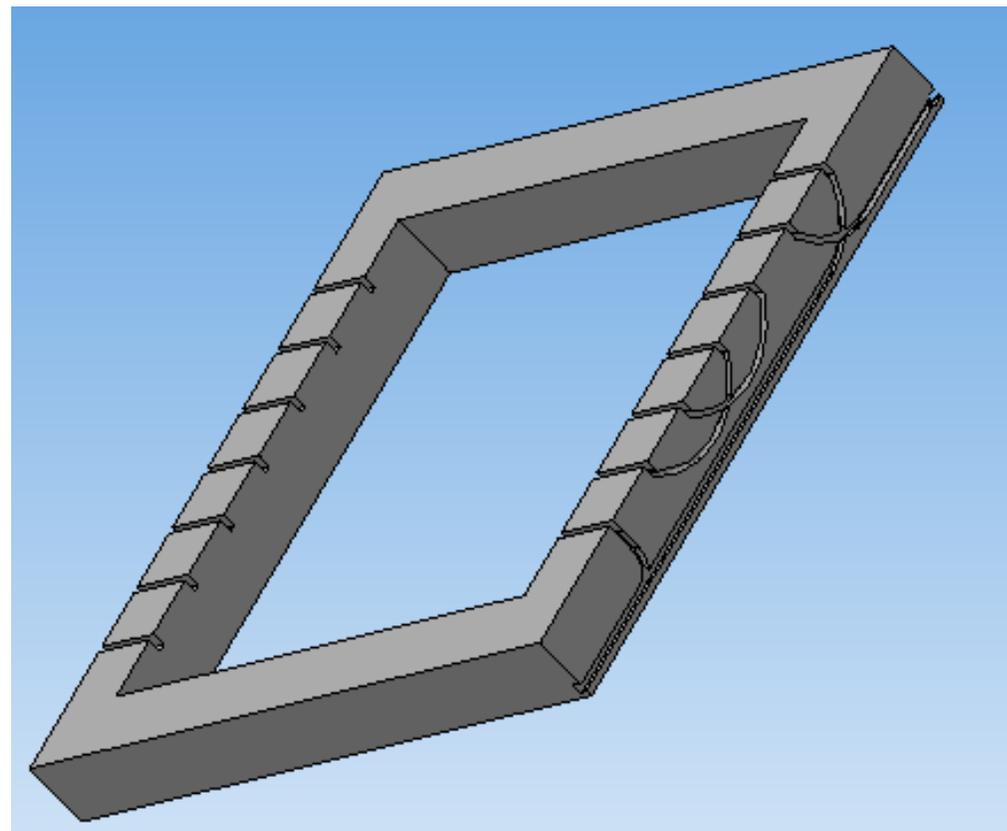


Рисунок 13 – Рамка для электродов



## МАТЕРИАЛ ДЛЯ ДЕТЕКТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИКРОЧАСТИЦ

Таблица 2 – Сравнение характеристик филаментов\*

Название	Прочность на разрыв, МПа	Модуль Юнга, МПа	Ударная вязкость, Дж/м	Термостойкость, °С
PC	30-40	1944-1958	28-73	127
PC/ABS	41	1900	196	96
PA6	28,9-49,3	1817-2232	43-106	93
PA12	28-32	1138-1282	53-135	82
PA12CF	28,8-63,4	2300-7515	21,4-85	143
PEEK	97	3700		160
Ultem 1010	42-64	2200-2770	48-120	213
Ultem 9085	33-47	2150-2270	48-120	153
PPSF	55	2100	58,7	189

\*<http://3dtoday.ru/blogs/top3dshop/overview-of-high-temperature-fdm-plastics-for-industrial-3d-printing/>



В ходе выполнения ВКР рассмотрены методы и механизмы детектирования высокоскоростных микрочастиц.

-Рассмотрены возможные конструкции детектора высокоскоростных микрочастиц. Установлено, что в качестве примера для разработки новой конструкции лучше всего использовать датчик на основе измерения индуцированных электрических сигналов;

-Рассмотрены методы расчета электростатических полей . Установлено, что для получения картины электростатического поля лучше использовать метод конечных элементов, реализуемый программой BETAFields, так как в отличие от ELCUT и CST STUDIO в ней нет ограничений по количеству исследуемых элементов;

-Разработана конструкция детектора высокоскоростных микрочастиц, которая может быть интегрирована как дополнительная насадка для масс-спектрометра.



**САМАРСКИЙ** УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY

**БЛАГОДАРЮ  
ЗА ВНИМАНИЕ**

[355709638@mail.ru](mailto:355709638@mail.ru)