

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет
Кафедра общей физики
Шигаев Замир Рафаэлевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Изучение параметров инверсно-магнетронного датчика

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа № 20302

Научный руководитель:

А.С. Стюф
Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

А. А. Инжеваткина
Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин
Итоговая оценка

« _____ » _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Инверсно-магнетронные датчики (ИМД) имеют широкое применение среди вакуумных датчиков. Обусловлено это тем, что ИМД не имеет перегораемой нити накала, измеряет в достаточно широком диапазоне (от $1 \cdot 10^{-8}$ до $1 \cdot 10^{-4}$ Торр), легко чистится, достаточно прост в изготовлении. Благодаря своим свойствам ИМД применяются, измерения и мониторинга среднего и высокого вакуума, измерения базового давления в системах распыления и напыления. Также, благодаря простоте и надежности, ИМД применяется в космической отрасли: например, ИМД может измерить спектр давлений атмосферы при запуске ракеты и давление окружающей среды космического аппарата на околоземной орбите – эти данные очень важны при изучении атмосферы и околоземной орбиты, корректировки работы аппаратов.

Целью работы являлось изучение инверсно-магнетронного датчика. Для достижения поставленной цели ставились следующие задачи: промоделировать движение заряженных частиц в ИМД, экспериментально получить зависимость давления от тока, проанализировать и сравнить с теоретической, откалибровать датчик.

Моделирование движения заряженных частиц было осуществлено при помощи языка программирования Python. Получены зависимости траектории частиц от величин полей.

Была собрана экспериментальная установка: блок датчиков давления (БДД) с исследуемым датчиком помещался в вакуумную камеру, к которой были подключены форвакуумный и турбомолекулярный насосы, способные создать в камере средний и высокий вакуум. БДД был подключен к источнику питания и ПК. К камере был также подключен эталонный датчик давления. При давлениях от $1 \cdot 10^{-7}$ Торр до 760 Торр одновременно снимались показания с БДД и эталонного датчика. По этим показаниям проводилась калибровка инверсно-магнетронного датчика.

Оглавление

Введение	4
Описание блока датчиков давления (БДД).....	6
Описание инверсно-магнетронного датчика (ИМД).....	8
Моделирование движения заряженных частиц в ИМД	10
Эксперимент	16
Теоретические результаты.....	19
Заключение	21
Список литературы	22

Введение

При изучении атмосферы Земли на различных высотах, в том числе суборбитальном и орбитальном пространстве важным компонентом исследования является измерение окружающего давления. Блок датчиков давления (БДД), разработанный в ОАИ НГУ, способен измерять давление в диапазоне 10^{-8} Торр ÷ 760 Торр. БДД состоит из двух преобразователей давления, одним из которых является инверсно-магнетронный датчик (ИМД), работающий при среднем и высоком вакууме.

ИМД относится к магнитным электроразрядным вакуумметрам. В датчике используется зависимость разрядного тока в анодно-катодном промежутке от давления. Магнитный электроразрядный датчик представляет собой двухэлектродную систему, состоящую из катода и анода.

Через балластное ограничивающее сопротивление на анод подается высокое напряжение. Балластное сопротивление автоматически снижает разность рабочих напряжений на электродах датчика при высоких давлениях, тем самым исключая возможность образования дугового разряда в межэлектродном пространстве.

Вдоль оси анода прикладывается постоянное магнитное поле напряженностью от 200 до 2000 Э, стабилизирующее плазму в разрядном промежутке и повышающее чувствительность датчика. Если вблизи катода в результате случайной ионизации возникнет электрон, то он под действием скрещенных полей будет двигаться к аноду по удлиненной траектории. При этом повышается шанс соударения и ионизации газа.

Образовавшиеся положительные ионы двигаются к катоду и нейтрализуются на нем, при этом высока вероятность образования вторичных электронов в результате нейтрализации.

Ток положительно ионов и электронов в сумме равны электронному току в цепи анода. В результате ионизации газа образуется электрический разряд, ток которого в достаточно широком диапазоне зависит от давления [1].

Целью моей работы является исследование параметров инверсно-магнетронного датчик. Для достижения этой цели необходимо построить модель движения заряженных частиц в электромагнитном поле, экспериментально получить зависимость измеряемого давления от ионного тока.

Описание блока датчиков давления (БДД)

Блок датчиков давления (БДД) - прибор, предназначенный для измерения абсолютного давления в диапазоне 10^{-8} Торр ÷ 760 Торр при температурах посадочного места блока от -20 °С до $+50$ °С. Для измерения абсолютного давления применяются два типа датчиков:

- Полупроводниковый датчик MicroPirani на основе МЭМС-технологии (микро–электромеханическая система) для работы в диапазоне от 10^{-3} до 760 Торр.
- Инверсно-магнетронный датчик с холодным катодом ПОММ-32-1 для работы в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-3} Торр.

Полупроводниковый датчик на основе МЭМС-технологии представляет собой высокоточный измеритель значения теплопроводности исследуемого образца [2].

Инверсно-магнетронный датчик ПММ-32-1 является объектом исследования, который рассмотрен подробно далее.

Внешний вид, принципиальная схема основные и технические характеристики БДД представлены на рисунках 1 и 2, в таблице 1:



Рисунок 1. Внешний вид блока датчиков давления (БДД)

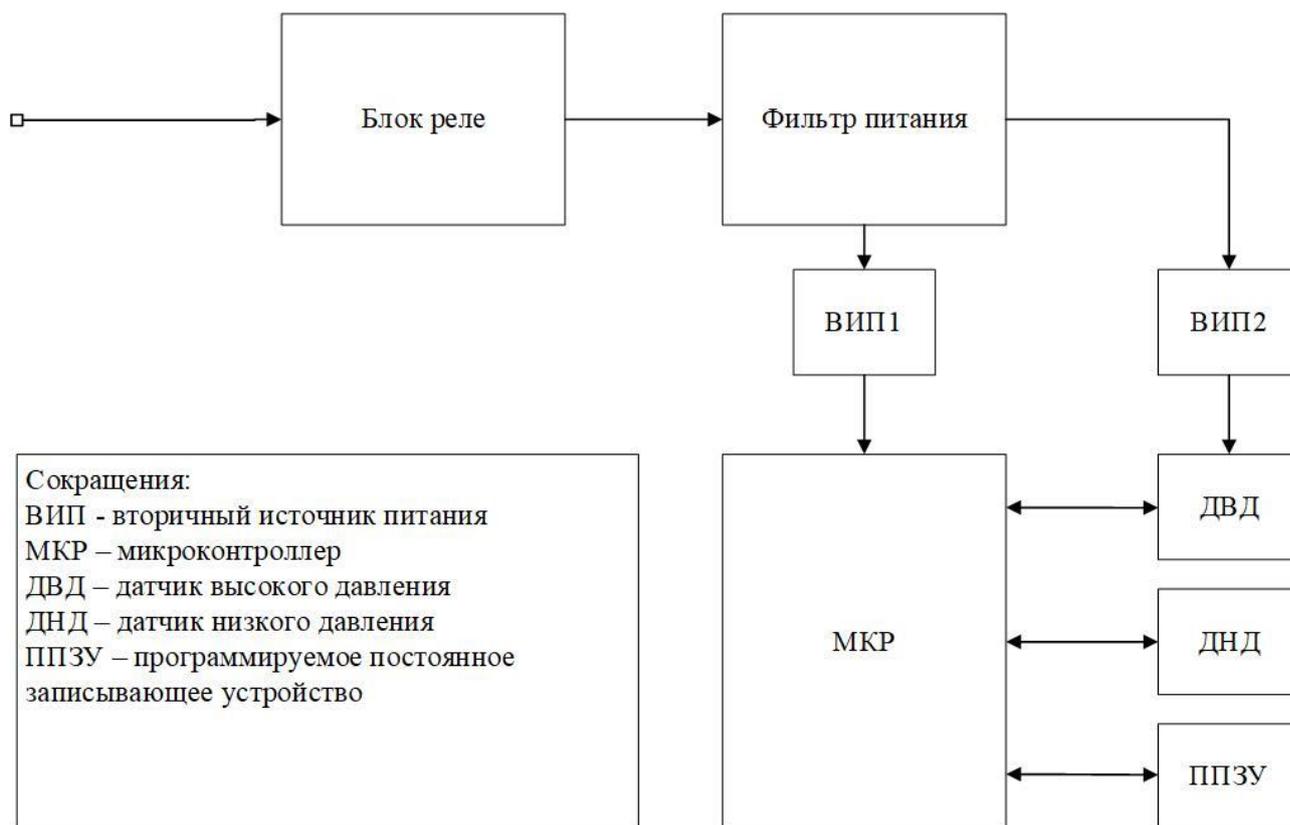


Рисунок 2. Функциональная схема БДД

Таблица 1. Технические характеристики БДД

габариты, мм ³	134×134×69
масса, кг	1,4
потребление, Вт	8
рабочий температурный диапазон, °С	от -20°С до +50°С

БДД обеспечивает:

- измерение давления внутри и снаружи НГПО (негерметичного приборного отсека) в диапазоне от 760 до $1 \cdot 10^{-8}$ Торр;
- по подаче питания и циклически через каждые 30 минут формирование сигнала телеметрии;
- прием команд от бортового комплекса управления (ВКЛ. БДД, ОТКЛ. БДД);
- выдача технологического сигнала – контроля наличия питания блока;
- благодаря энергонезависимой ППЗУ (рисунок 2) есть возможность хранения данных за время не менее 72 ч и последующей передаче её в блок электроники [3].

Описание инверсно-магнетронного датчика (ИМД)

Инверсно-магнетронный датчик – первичный преобразователь концентрация-ток для измерения среднего и высокого вакуума. Датчик состоит из анодного стержня, окруженного цилиндрическим катодом. На анод подается высокое напряжение, катод находится под нулевым потенциалом, за счет чего между анодом и катодом возникает сильное электрическое поле ($\sim 1,5 \div 2,5$ кВ/см). При этом цилиндрический катод представляет собой магнит с полюсами на торцах цилиндра, создающий в разряднике магнитное поле ~ 1100 Э, перпендикулярное электрическому полю.

Возникающие в результате какого-нибудь первичного акта ионизации электроны движутся в скрещенных полях по замкнутым гипоциклоидам (рисунок 1). Движущийся электрон ионизирует молекулы газа, с которыми сталкивается, при этом тяжелые ионы под действием сильного электрического поля мгновенно передвигаются к катоду, а освобожденные электроны также участвуют в ионизации газа. При избытке электронов, часть из них из-за взаимоотталкивания нейтрализуются на аноде. При достаточных магнитном и электрическом полях система приходит в баланс, и наблюдается самостоятельный разряд между анодом и катодом (рисунок 3). Величина ионного тока зависит от концентрации газа в разряднике, поэтому, зная величину тока, можно определить давление исследуемого газа.

Электрическая схема подключения инверсно-магнетронного датчика представлена на рисунке 4. Источник напряжения может работать в двух режимах: подача напряжения 2,5 кВ и 1,5 кВ в зависимости от ионного тока, образуемого в разряднике ИМД. Напряжение подается на стержневой анод ИМД через шунт с сопротивлением 1,1 МОм,

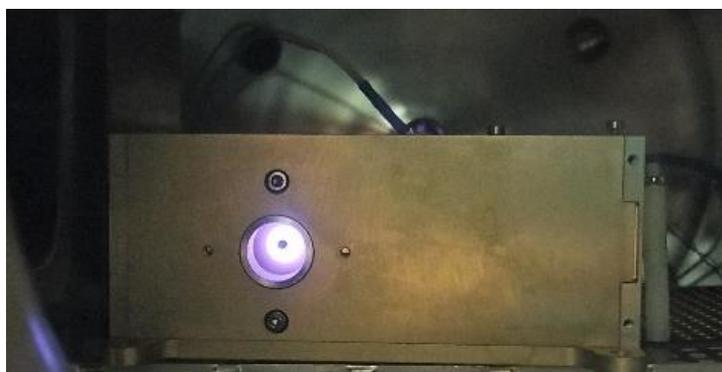


Рисунок 3. Фотография разряда в инверсно-магнетронном датчике блока датчиков давления, помещенного в вакуумную камеру

предназначенный для предотвращения образования дугового разряда. Образующие в разряднике ионы собираются на катоде датчика, образуя ионный ток, который подается на усилительный каскад с коэффициентами усиления 1, 10, 100 и 1000. Усиленный сигнал передается на АЦП, а затем в микроконтроллер для дальнейшей обработки.

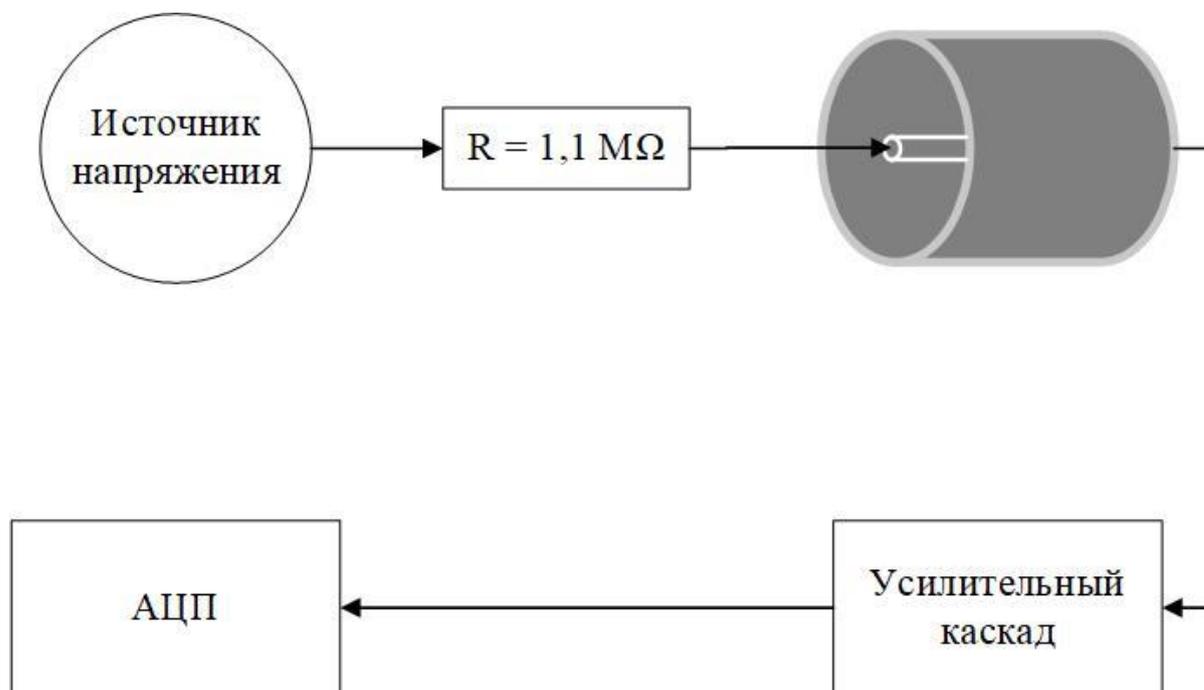


Рисунок 4. Схема подключения инверсно-магнетронного датчика

Моделирование движения заряженных частиц в ИМД

Для изучения процессов, происходящих в инверсно-магнетронном датчике, была создана модель частицы, двигающейся в скрещенных магнитном и электрическом полях. Магнитное поле распределено равномерно и постоянно в каждой точке пространства. Электрическое поле имеет цилиндрическую симметрию. Для моделирования использовался язык программирования Python.

Параметры частицы:

1. заряд q ;
2. масса m ;
3. координаты $\mathbf{r} = [x, y, z]$;
4. мгновенная скорость $\mathbf{v} = [v_x, v_y, v_z]$;

На частицу, двигающуюся в полях $\mathbf{E} = [E_x, E_y, E_z]$ и $\mathbf{B} = [B_x, B_y, B_z]$, действует сила:

$$m\ddot{\mathbf{x}} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}].$$

На основе этой формулы и начальных условиях $\mathbf{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]$ и $\mathbf{v}_0 = [v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}]$ производятся вычисления координат частицы в определенное время. Задав время итерации между последующими вычислениями координат, и записав их, можно получить траекторию частицы. Полученная траектория представляет собой замкнутую гипоциклоиду: частица движется вокруг некоторой точки - ось А, которая движется вокруг некоторой другой точки – оси Б. В случае ИМД осью Б является центр анода, вокруг которого со скоростью дрейфа движется ось А. Дополнительно, назовем расстояние между наименьшим и наибольшим расстоянием от анода амплитудой L , частоту обращения вокруг оси А частотой Ч1, а частоту обращения вокруг оси Б частотой Ч2.

На основе данной модели рассмотрим движение электрона и положительно заряженного иона азота – основного компонента воздуха при различных условиях.

Параметры электрона: $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг, $q = -1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Параметры иона азота: $m = 4.67 \cdot 10^{-26}$ кг, $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Параметры камеры: радиус анода $r_1 = 2$ мм, радиус катода $r_{20} = 10$ мм.

1. Траектории движения электрона и положительно заряженного иона в инверсно-магнетронном датчике ПММ-32-1 (рисунок 5)

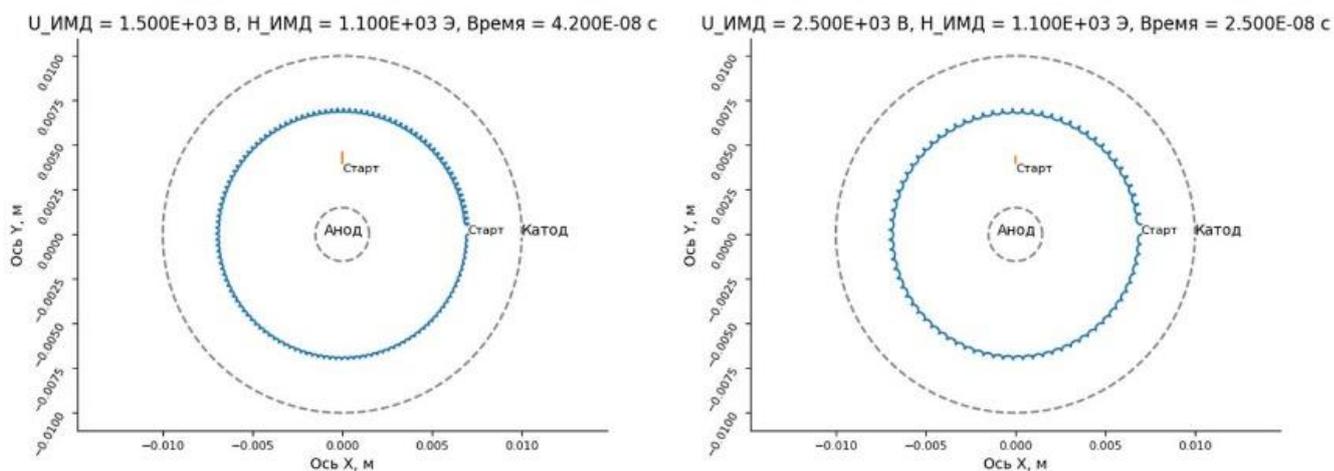


Рисунок 5. Траектории движения электрона(синяя траектория) и иона азота(оранжевая траектория) в инверсно-магнетронном датчике при напряжении анода 1,5 кВ (слева) и 2,5 кВ (справа); $H = 1100$ Эрстед

Электрон при 1,5 кВ чаще обращается вокруг оси А за оборот вокруг анода, но частота обращения вокруг анода меньше, чем при 2,5 кВ. Параметр L больше при 2,5 кВ.

2. Зависимость траектории движения заряженных частиц от величины электрического поля, задаваемым напряжением анода (рисунок 6):

Наблюдаем (рисунок 6), что с увеличением электрического поля для электрона частота χ_1 уменьшается, частота χ_2 увеличивается. Параметр L увеличивается.

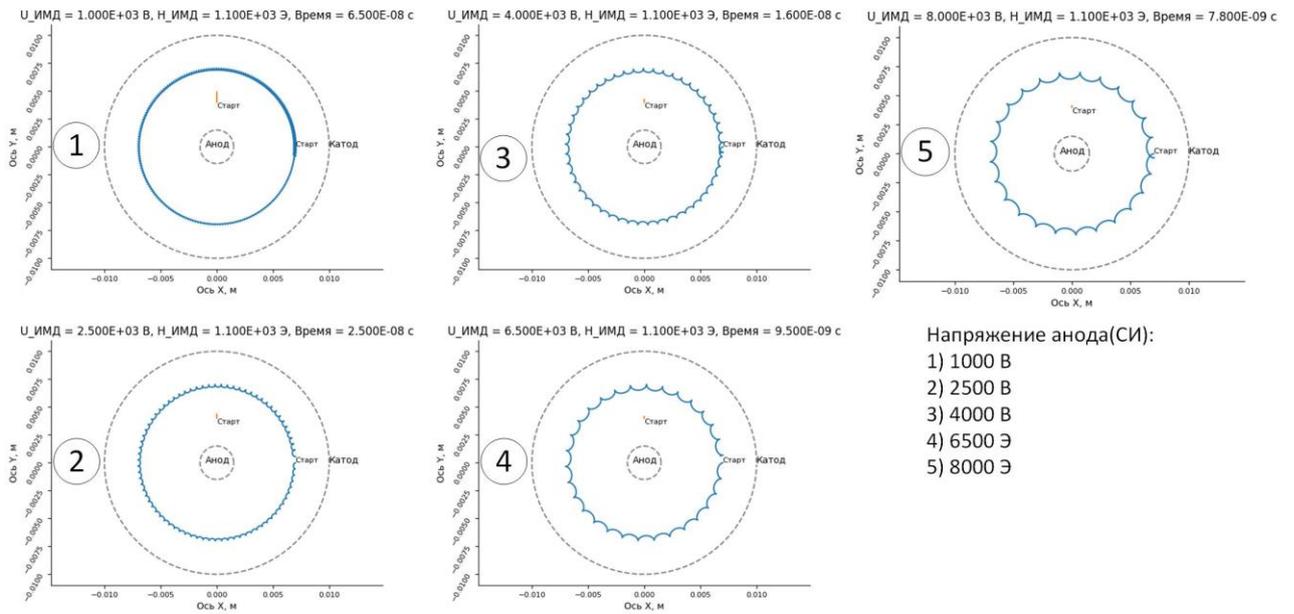


Рисунок 6. Траектории движения электрона(синяя траектория) и иона азота(оранжевая траектория) в инверсно-магнетронном датчике при $H = 1100$ Э, напряжение на аноде изменяется от 1 кВ до 8 кВ

3. Зависимость траектории движения заряженных частиц от величины магнитного поля, задаваемого напряженностью H (СГС):

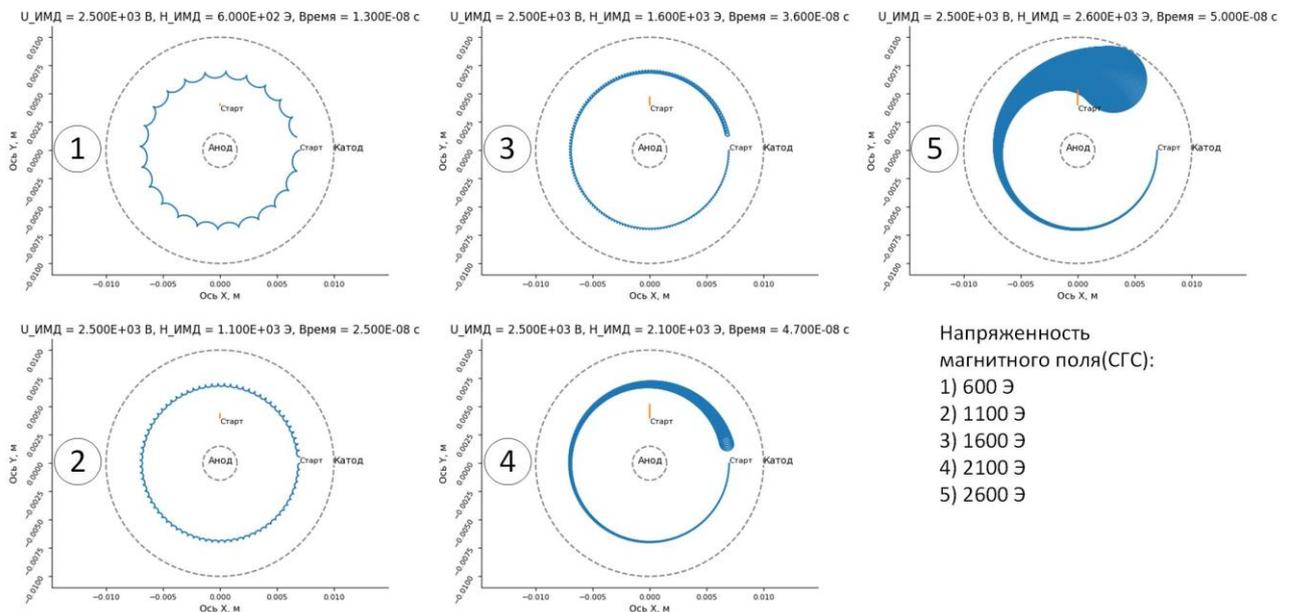


Рисунок 7. Траектории движения электрона(синяя траектория) и иона азота(оранжевая траектория) в инверсно-магнетронном датчике при U (анод) = 2,5 кВ, напряженность магнитного поля меняется от 600 Э до 2600 Э

Наблюдаем (рисунок 7), что с увеличением величины магнитного поля частота Ч1 для электрона увеличивается, при этом частота Ч2 уменьшается, параметр L увеличивается. Интересно отметить, что при довольно сильном магнитном поле ($H > 1600$ Э) явно наблюдается увеличение радиуса движения вокруг оси A.

4. $T = \text{const}$

Так как в пунктах 1 – 3 сложно пронаблюдать за зависимостью траектории иона, зафиксируем время наблюдения и пронаблюдаем интересующие нас зависимости.

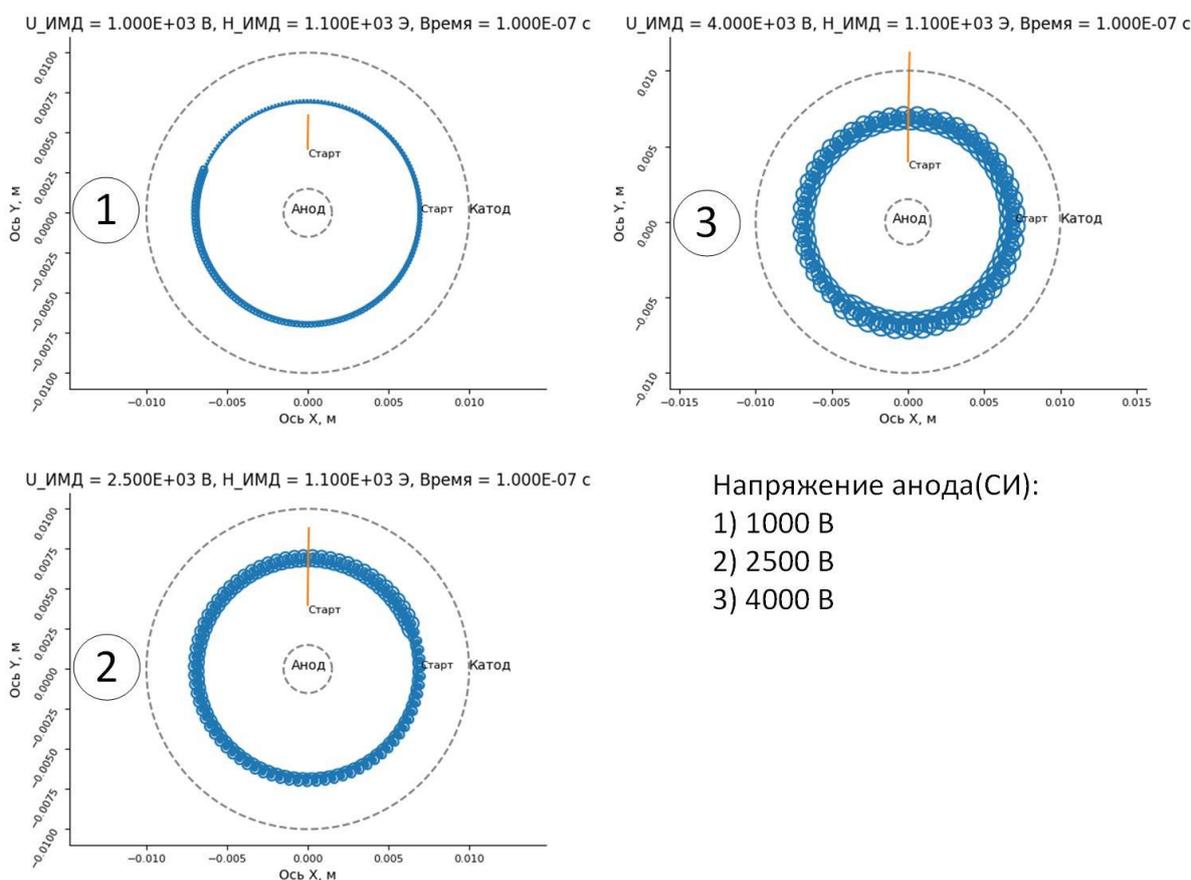


Рисунок 8. Траектории движения электрона(синяя траектория) и иона азота(оранжевая траектория) в инверсно-магнетронном датчике при $H = 1100$ Э, U (анод) изменяется от 1 кВ до 4 кВ

Положительно заряженный (рисунок 8) ион при увеличении анодного напряжения двигается быстрее к катоду, искривления траектории не наблюдается.

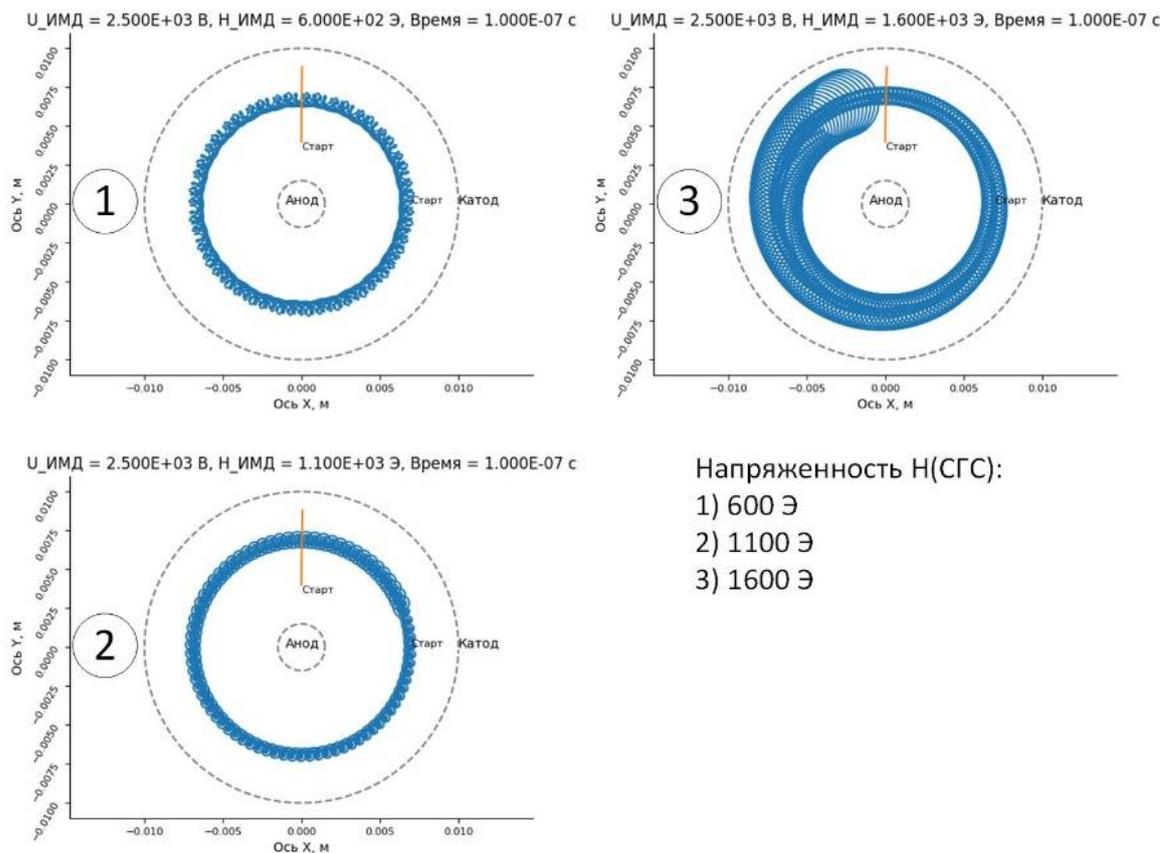


Рисунок 9. Траектории движения электрона(синяя траектория) и иона азота(оранжевая траектория) в инверсно-магнетронном датчике при U (анод) = 2,5 кВ, H изменяется от 600 Э до 1600 Э

Положительно заряженный ион (рисунок 9) при увеличении величины магнитного поля, не изменяет свою скорость движения к катоду, наблюдается небольшое искривление траектории иона при увеличении напряженности магнитного поля.

По результатам моделирования движения заряженных частиц в цилиндрически симметричном электрическом поле и скрещенном с ним однородном магнитном поле ИМД выявлены следующие зависимости траектории движения заряженных частиц от различных параметров:

1. при увеличении электрического поля для электрона частота обращения вокруг оси А уменьшается, а вокруг анода увеличивается, положительный ион движется быстрее к катоду.

2. при увеличении магнитного поля электрон двигается вокруг оси А чаще, а вокруг анода реже, при этом тяжелый ион практически не изменяет свою траекторию, не изменяя скорости;
3. при довольно большом магнитном поле ($H > 1600 \text{ Э}$) радиус обращения электрона вокруг точки А увеличивается.

Построенная модель подтверждает, что при рабочих параметрах измерительной системы ИМД ($U = 1,5 \text{ кВ}$ и $2,5 \text{ кВ}$, $H = 1100 \text{ Э}$) электроны в рабочем пространстве двигаются по замкнутым гипоциклоидам, ионизированные молекулы газа под действием силы Кулона, превосходящей воздействие магнитного поля двигаются прямо к аноду. Получены качественные зависимости параметров траектории заряженных частиц от величины полей, которые могут быть использованы для улучшения или создания ИМД.

Эксперимент

При проведении эксперимента использовалось следующее оборудование:

1. вакуумные камеры среднего и высокого вакуума;
2. турбомолекулярный насос (ТМН);
3. форвакуумный насос;
4. измеритель давления Pfeiffer IKR360;
5. источник питания GW-Instek PPT-3615;
6. контрольно-проверочная аппаратура (КПА);
7. кабели питания и передачи данных;
8. компьютер с установленной ПО для калибровки БДД.

Исследуемые объекты: БДД №2 и №3.

Схема установки представлена на рисунке 10:

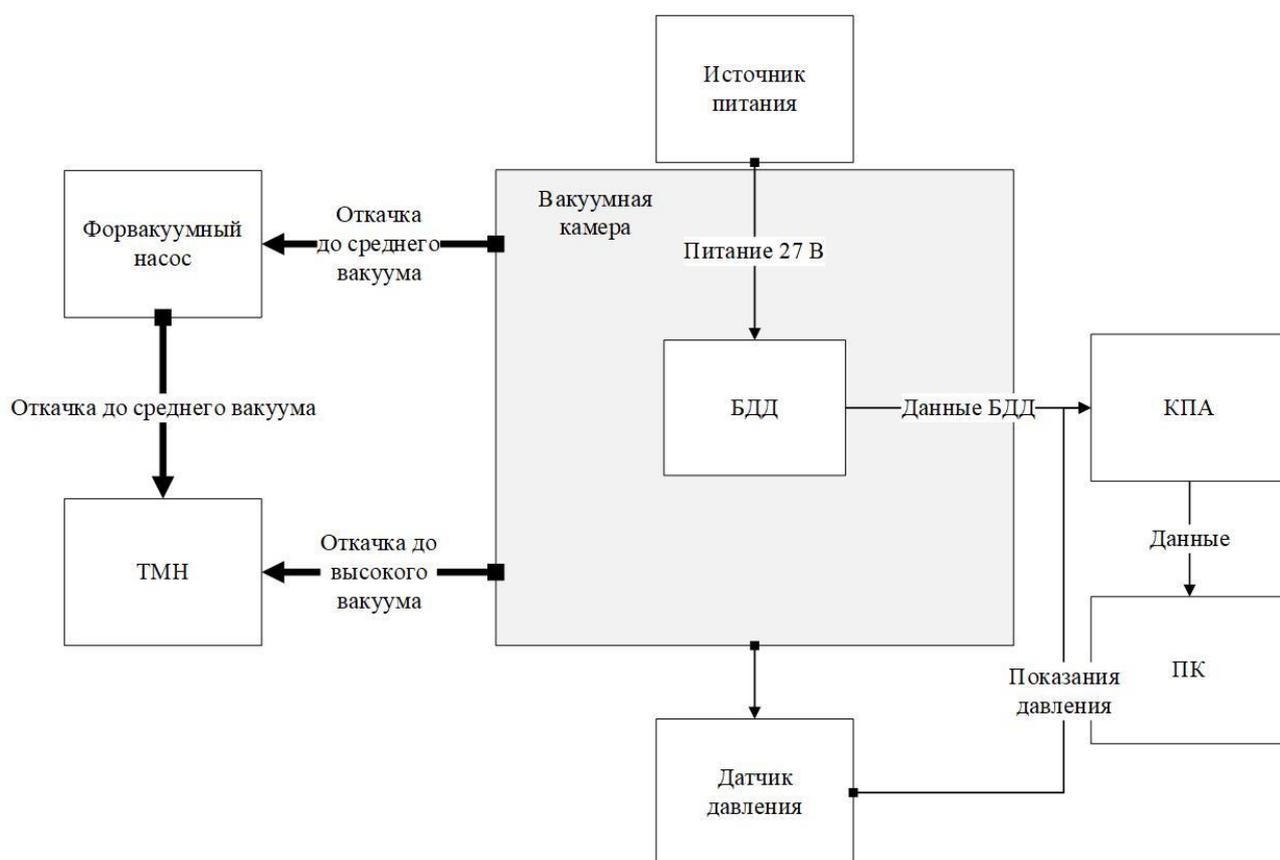


Рисунок 10 - Схема экспериментальной установки

Проведены калибровочные измерения БДД №2 и №3. Измерения проводились в диапазоне давлений от $1 \cdot 10^{-7}$ Торр до 760 Торр при комнатной температуре. Также были проведены измерения в диапазоне давлений $1 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ Торр при различных температурах плиты, на которой устанавливались БДД.

С БДД поступали следующие данные: температура БДД, показания давления полупроводникового датчика и инверсно-магнетронного датчика, напряжение между анодом и катодом, ток ИМД в квантах АЦП, коэффициент усиления ИМД. Также снимались показания давления с эталонного датчика Pfeiffer.

По показаниям эталонного датчика давления и значения тока в приведенных квантах АЦП (то есть показания тока в квантах АЦП, поделенных на коэффициент усиления) можно построить калибровочную кривую $P(I \text{ БДД})$. Аппроксимируя данную кривую и исключая точки выброса показаний, можно найти зависимости давления от показаний тока инверсно-магнетронного датчика. С помощью полученных зависимостей можно составить калибровочные таблицы, в столбцах которых будут значения приведенных квантов АЦП инверсно-магнетронного датчика и соответствующего ему давления. Табличное представление результатов калибровок приведено в приложении 1, графики получившихся калибровочных кривых представлены на рисунках 11, 12:

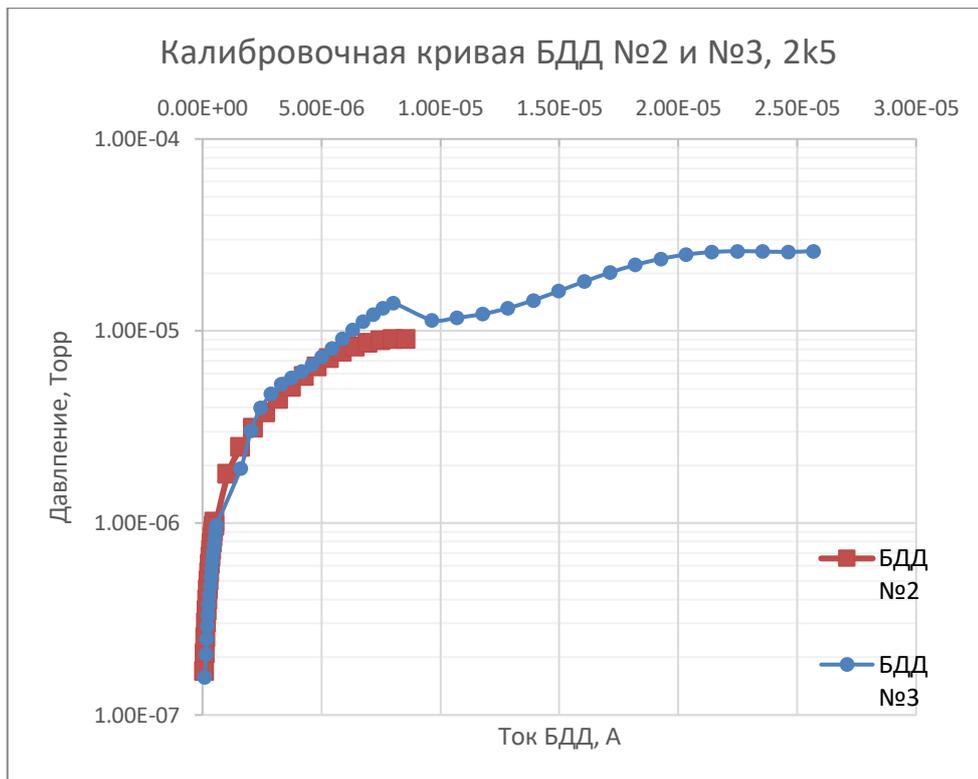


Рисунок 11. Калибровочная кривая БДД №2 и №3 в диапазоне $1 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-4}$

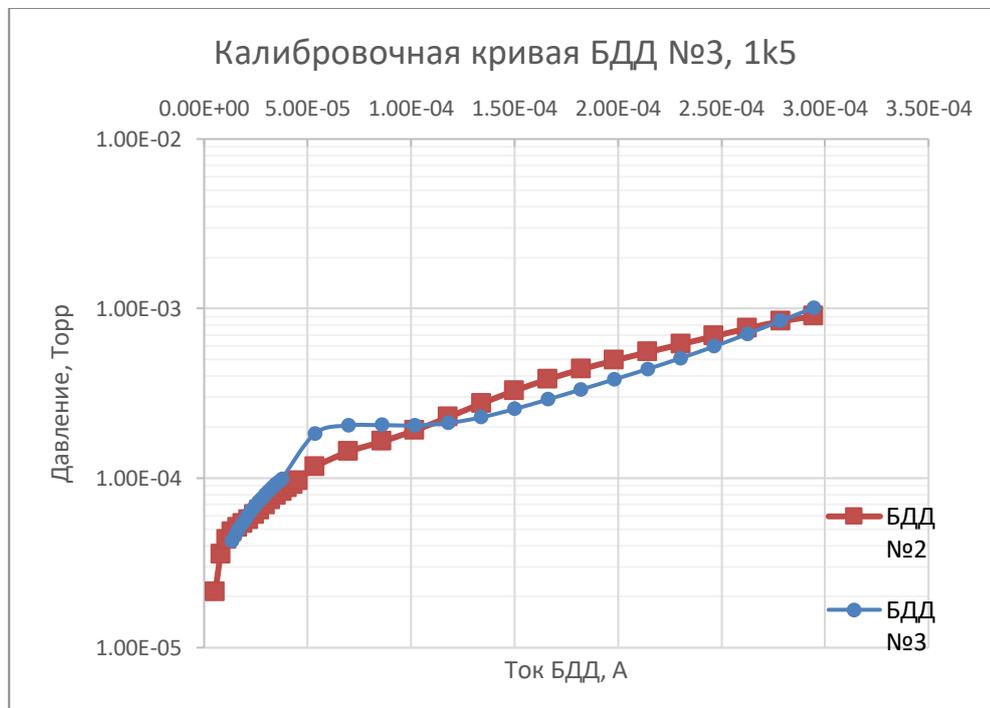


Рисунок 12. Калибровочные кривые БДД №2 и №3 в диапазоне $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-3}$

Теоретические результаты

Теоретическая зависимость ионного тока от давления описывается уравнением:

$$I = \frac{E - U_0}{R_b + \frac{k}{p^n}}$$

где I – ионный ток, E – анодное напряжение, U_0 – минимальное напряжение между электродами при наибольшем измеряемом давлении, R_b – внешнее балластное сопротивление, k – чувствительность датчика, n – степень (обычно $n = 0,9 \div 1,5$) [1].

Результат сопоставления полученных экспериментальных данных и теоретической зависимости для ПММ-32-1[4] представлена на рисунке 13:

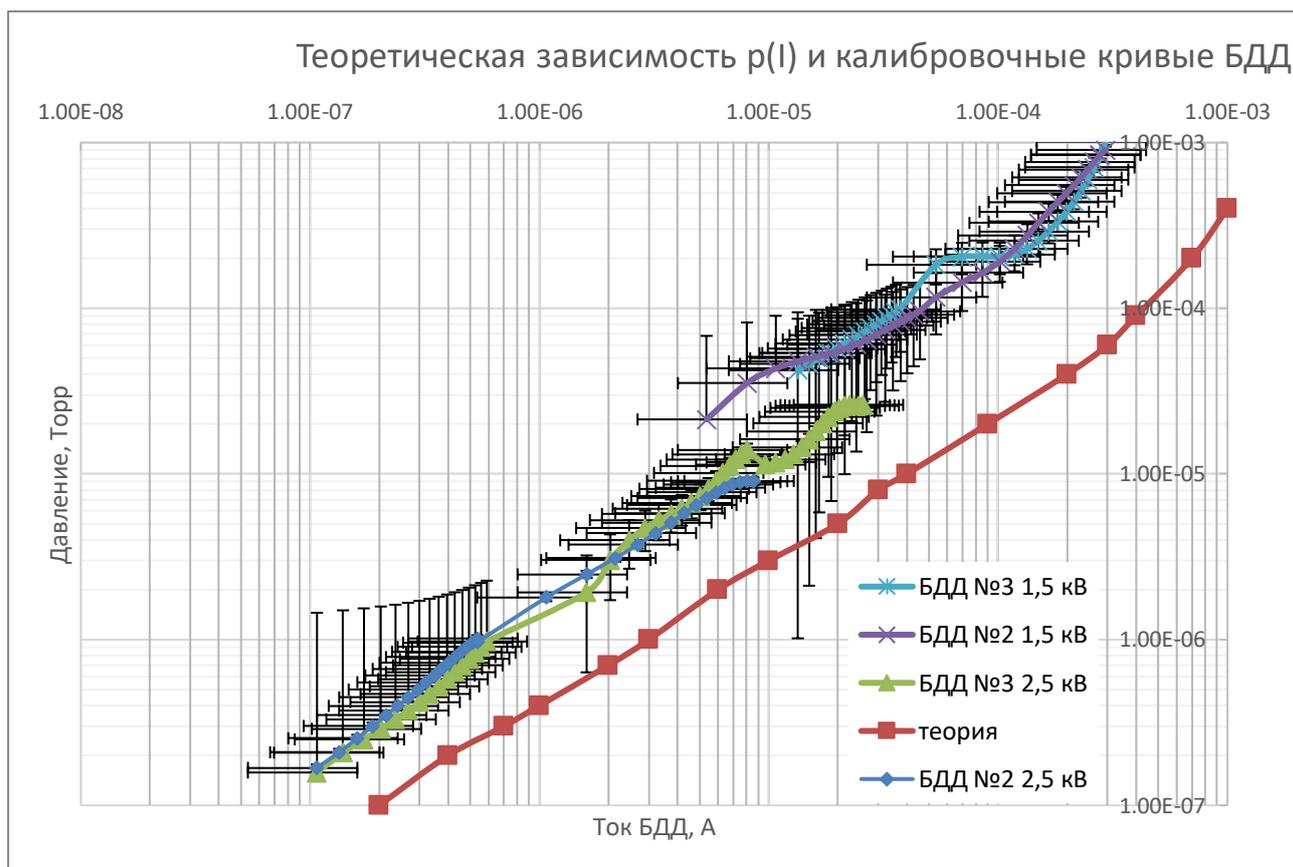


Рисунок 13. Сопоставление калибровочных кривых БДД №2 и №3 в режимах анодного напряжения 1,5 кВ и 2,5 кВ с теоретической зависимостью давления от тока ИМД при 2,5 кВ

Форма полученных калибровочных кривых хорошо согласуется с теоретической, но есть небольшие отклонения и сдвиг кривых. Отклонения, скорее всего связаны с особенностями аппроксимации экспериментальных данных, так как точки кривых обрабатывались в каждой декаде давлений отдельно – так были получены зависимости давления от тока по декадам давления. Сдвиг экспериментальных кривых относительно теоретической может быть связан с особенностями подключения ИМД к питанию и обработчику ионного тока ИМД.

Заключение

В результате курсовой работы проделаны следующие эксперименты:

- моделирование движения электронов в инверсно-магнетронном датчике при помощи средств языка программирования Python; получены качественные зависимости траектории движения электрона от величины магнитного и электрического полей;
- калибровка инверсно-магнетронного датчика в измеряемом диапазоне; полученные калибровочные кривые были сопоставлены с теоретической зависимостью.

Освоены следующие навыки:

- работа с вакуумным оборудованием;
- использование языка Python для моделирования физических процессов.

Создана физическая модель движения заряженных частиц в инверсно-магнетронном датчике, позволяющая качественно оценить зависимости параметров траектории от величин полей.

Для полного понимания процессов, происходящих в инверсно-магнетронном датчике, полученную модель можно улучшить, для этого необходимо учитывать влияние электрического поля, создаваемого самими заряженными частицами и магнитного поля, вызванного движением заряженных частиц.

Список литературы

1. <https://vacuumpro.ru/vakuummeter/ionizacionnyj-vakuummeter/magnitnye-ehlektrozryadnye-vakuummetry>
2. А.В. Пелемешко. Магистерская диссертация. Новосибирск: НГУ, 2017. – 7 с.
3. Техническое описание бортового диагностического комплекса 2 - модернизированного, ОАИ НГУ, 8-10 с.
4. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ПММ-32-1, 1981 г, 16 с.