ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Объединённый институт высоких температур
Российской Академии Наук
(ОИВТ РАН)

На правах рукописи

Доброклонская Марина Сергеевна

ДИНАМИЧПЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КУЛОНОВСКИХ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ В ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Специальность: 1.3.9 – Физика плазмы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Василяк Леонид Михайлович —
доктор физико-математических наук

Москва
2026

Содержание

Введение 3

Глава 1. Обзор литературы 10

1.1 Удержание и управление заряженными диэлектрическими частицами в электродинамических ловушках 10

1.2 Резонансное взаимодействие электромагнитного поля с субволновыми диэлектрическими элементами 18

1.3 Выводы по литературному обзору 24

Глава 2. Экспериментальные установки. Расчетные модели. 26

2.1 Установка для исследования динамики микрочастиц в ловушке 26

2.2 Экспериментальная установка для исследования рассеяния СВЧ волн диэлектрическими структурами 36

Глава 3. Траектории заряженных микрочастиц в воздухе 42

3.1 Динамика частиц с разными зарядами при синусоидальном напряжении . . . 43

3.2 Динамика частиц с разными зарядами при знакопеременном напряжении прямоугольной формы (меандр) 52

3.3 Динамика частиц при изменении амплитуды синусоидального и прямоугольного напряжения 56

3.4 Траектории при прямоугольных асимметричных импульсах 61

3.5 Траектории при различных знаках заряда микрочастицы 65

3.6 Влияние внешнего прямоугольного знакопеременного электрического поля на траектории микрочастиц в ловушке с синусоидальным удерживающем напряжением 68

3.7 Влияние внешнего постоянного электрического поля на траектории микрочастиц в ловушке при синусоидальном удерживающем напряжении 74

3.8 Траектории заряженных микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах 78

3.9 Выводы 93

Глава 4. Области удержания. 95

4.1 Исходные данные при расчёте областей удержания 95

4.2 Области удержания микрочастиц в вакууме и воздухе 104

4.3 Влияние размера микрочастиц на области удержания 106

4.4 Области удержания микрочастиц при синусоидальном и прямоугольном напряжении . . . 109
4.5 Области удержания при разных частотах знакопеременного прямоугольного удерживающего напряжения . . . 113
4.6 Области удержания при различных длительностях положительной полярности импульса знакопеременного прямоугольного напряжения . . . 116
4.6.1 Сопоставление с экспериментом при асимметричном прямоугольном напряжении . . . 118
4.7 Оценка заряда микрочастиц по областям удержания . . . 122
4.8 Экспериментальное подтверждение расчетных областей удержания . . . 133
Глава 5. Управление резонансными свойствами диэлектрических колец в СВЧ-диапазоне . . . 149
5.1 Резонансный спектр одиночного диэлектрического кольца . . . 149
5.2 Взаимодействия диэлектрического кольца с кольцевыми плазменными и проводящими элементами . . . 152
5.3 Взаимодействия диэлектрического кольца с линейными плазменными и проводящими элементами . . . 159
Заключение . . . 166
Список литературы . . . 168

Введение

Экспериментально и численными методами исследована динамика заряженных диэлектрических частиц микронных размеров (5–50 мкм) в линейной квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении с удерживающим потенциалом различных форм (синусоидальная, меандр, асимметричные знакопеременные прямоугольные импульсы), а также с коронным разрядом на электродах. Исследовано влияние плазмы электрического разряда низкого давления на спектр резонансного рассеяния субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной.

Актуальность темы исследования

Квадрупольные электродинамические ловушки являются универсальным инструментом для исследования заряженных частиц в широком диапазоне размеров: от ионов до микрочастиц размером 100 мкм [1]. Квадрупольные ионные ловушки изначально применялись в условиях вакуума для удержания и лазерного охлаждения частиц, прецизионной спектроскопии, в качестве ключевого элемента квантового компьютера. Затем они стали применяться и при атмосферном давлении газа. Впервые большие стабильные кулоновские структуры заряженных микрочастиц в линейных квадрупольных ловушках в воздухе при атмосферном давлении были получены и исследованы в ОИВТ РАН [1]. Были также продемонстрированы возможные их применения для измерения зарядов микрочастиц, очистки поверхностей и газовых потоков от микрочастиц. В квадрупольных ловушках в ИТМО исследуются нелинейная динамика переходов к хаотическому движению заряженных микронных частиц при атмосферных условиях и применение ловушек в воздухе для неразрушающего бесконтактного оперативного определения размеров и заряда микронных частиц по траекториям их движения в воздухе.

Исторически на электродах квадрупольных ловушек применяли синусоидальный потенциал, для которого движение частиц в поле ловушки и анализ стабильности траекторий описываются уравнениями Матье. В случае вакуума и отсутствия силы тяжести применим закон подобия по параметру отношения заряда к массе q/m. В воздухе при атмосферном давлении на микрочастицы действуют сила трения и сила гравитации, поэтому траектории движения частиц микронного размера и удержание в ловушке зависят от размера частиц и массы. В этом случае закон подобия q/m неприменим, возможен только численный расчёт и подтверждение численной модели экспериментом. До настоящего времени области удержания с учётом размеров частиц не исследованы. При использовании синусоидального потенциала на движение и области устойчивости частиц в ловушке можно влиять только двумя пара-

метрами: амплитудой и частотой. В настоящее время для квадрупольных фильтров ионов в вакууме (масс-спектрометров) теоретически рассмотрено применение знакопеременных прямоугольных импульсов напряжения, так как появляются дополнительные возможности влияния на области устойчивости, связанные с применением асимметричных по длительности или по амплитуде импульсов. Теоретические исследования новых возможностей асимметричного потенциала для ионов сегодня уже начинают подтверждаться экспериментами. Применение прямоугольного симметричного и асимметричного напряжения для удержания микрочастиц в воздухе ранее не проводилось.

Для создания систем фильтрации и перераспределения ЭМ-энергии, антенн, метаматериалов и метаповерхностей применяются резонансные элементы различных типов. Первые метаматериалы были созданы на основе металлического кольца с тонкой щелью. На их основе было создано достаточно много конструкций для микроволновой области, фильтров и антенной техники. Замена металлов диэлектриками позволяет существенно снизить диссипативные потери. В последнее время появились новые направления, ориентированные на полностью диэлектрическую нанофотонику, а также на ТГц- и СВЧ-диапазоны. В [2] показано, что кольцевой диэлектрический контур является магнитным диполем на токах смещения и обладает такими же свойствами, как магнитный диполь в виде металлического кольца с токами проводимости. Следовательно, диэлектрические кольца можно использовать в конструкциях и схемах, которые уже созданы на основе металлических колец, поэтому исследование их свойств важно для практических применений. Нерешённой проблемой в этой области является возможность включать и выключать резонансную частоту и изменять диаграмму рассеяния ЭМ-волны. В диссертационной работе в качестве такого ключа предложено использовать электрический разряд низкого давления, расположенный в заданных положениях около диэлектрического кольца.

Цель работы

1. Экспериментальные исследования и численные расчёты траекторий, областей удержания и способов управления динамикой заряженных микрочастиц в линейной горизонтальной квадрупольной ловушке в воздухе при атмосферном давлении с удерживающим напряжением синусоидальной и прямоугольной формы, а также с коронным разрядом на электродах.

2. Исследование влияния электрического разряда низкого давления на спектр резонансного рассеяния субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной.

Цели диссертации были достигнуты решением следующих **задач:**

1. Модификация экспериментальной установки и расчётной модели применительно к удерживающему потенциалу прямоугольной формы, как в форме меандра (знакопеременных прямоугольных импульсов одинаковой длительности), так и асимметричных импульсов, а также коронного разряда.

2. Экспериментальные исследования и численные расчёты траекторий заряженных микрочастиц и анализ состава полидисперсной смеси микрочастиц, удерживаемых ловушкой при различных формах напряжения на её электродах, разных размерах и зарядах частиц.

3. Расчёт областей удержания микрочастиц в воздухе при атмосферном давлении для разных форм и частот удерживающего напряжения (синусоидального, меандра, знакопеременных асимметричных прямоугольных импульсов) и разных размеров частиц и экспериментальная проверка результатов численного моделирования.

4. Экспериментальные исследования и численные расчёты траекторий заряженных микрочастиц в линейной ловушке при воздействии внешнего знакопеременного импульсно-периодического электрического поля при изменении его частоты.

5. Исследование влияния плазмы разряда низкого давления на резонансные характеристики и спектр рассеяния субволнового диэлектрического кольца.

Научная новизна работы

1. Впервые экспериментально и теоретически исследована динамика заряженных микрочастиц в линейной горизонтальной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении с удерживающим напряжением в виде симметричных и асимметричных прямоугольных импульсов в зависимости от их амплитуды и частоты, а также от зарядов и размеров частиц (5–50 мкм). Обнаружено движение частиц по диагональным траекториям при асимметричном напряжении.

2. Предложен метод диагностики знака заряда диэлектрических частиц путём изменения симметрии удерживающего напряжения прямоугольной формы.

3. Разработан способ расчётного определения областей устойчивого удержания заряженных микрочастиц размером 5–50 мкм в воздухе при атмосферном давлении в зависимости от амплитуды удерживающего напряжения и заряда частицы.

4. Рассчитаны и экспериментально подтверждены области удержания заряженных частиц размером 5–50 мкм в зависимости от заряда частицы и амплитуды напряжения для знакопеременных симметричных и асимметричных прямоугольных импульсов с учётом силы гравитации, силы трения, размера частиц и частоты следования импульсов.

5. Экспериментально обнаружено и численным расчётом подтверждено, что внешним знакопеременным импульсно-периодическим электрическим полем путём изменения его частоты можно как вызвать неустойчивость движения частицы с увеличением амплитуды колебаний, так и стабилизировать траекторию её движения.

6. Экспериментально получено удержание диэлектрических микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах при синусоидальной и прямоугольной формах удерживающего напряжения в зависимости от диаметра электродов, тока коронного разряда и размеров частиц.

7. Экспериментально обнаружен и численно подтверждён эффект подавления амплитуды резонанса и резонансного рассеяния или сдвига резонансной частоты диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной, при включении разряда низкого давления в форме полукольца или цилиндра.

Научная и практическая значимость

Установлены закономерности движения и получены области удержания заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе при атмосферном давлении с учётом действия потенциала прямоугольной формы, силы тяжести, вязкого сопротивления среды, внешних электрических полей и коронного разряда, что необходимо для развития моделей удержания в линейных ловушках и разработки новых устройств для бесконтактного удержания и сепарации частиц. Получены новые способы воздействия на одиночные частицы и кулоновские структуры, предложен метод диагностики заряда частиц.

Эффект подавления амплитуды резонанса и резонансного рассеяния или сдвига резонансной частоты субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской ЭМ-волной, электрическим разрядом низкого давления может быть использован для переключения резонансных электромагнитных полей диэлектрических элементов в фильтрах и резонаторах, антеннах, системах перераспределения энергии, перестраиваемых диэлектрических метаповерхностях, сенсорах и других элементах современной радиофотоники.

Положения, выносимые на защиту

1. Области удержания частиц 5-50 мкм при напряжении в форме знакопеременных симметричных прямоугольных импульсов смещены в сторону более низких амплитуд и меньших зарядов по сравнению с синусоидальным напряжением и не описываются законом подобия “отношение заряда к массе”, для асимметричных импульсов области удержания сужаются, а траектории частиц лежат на диагоналях квадрупольной линейной ловушки в воздухе, чего не наблюдается для синусоидального напряжения.

2. Внешнее знакопеременное электрическое поле прямоугольной формы с частотой ниже частоты удерживающего синусоидального напряжения ловушки вызывает параметрическую раскачку неустойчивости движения заряженных частиц, а при частотах выше частоты напряжения ловушки стабилизирует движение частиц, что позволяет управлять их устойчивостью без изменения параметров ловушки.

3. В ловушке с коронным разрядом на линейных электродах увеличение диаметра электродов от 63 до 200 мкм приводит к увеличению диапазона размеров удерживаемых частиц от 3-6 мкм до 3-25 мкм и его смещению в область больших размеров вследствие увеличения напряжения на коронном разряде.

4. Включение разряда низкого давления в виде полукольца над диэлектрическим кольцом приводит к подавлению резонанса магнитного диполя субволнового диэлектрического кольца, возбуждаемого плоской электромагнитной волной в СВЧ-диапазоне.

Степень достоверности результатов и апробация работы

Достоверность научных результатов и обоснованность научных положений базируются на использовании современных высокоточных средств измерений и диагностики, применении апробированных методик проведения исследований, на согласованности расчётных предсказаний с результатами экспериментов, на статистическом подтверждении экспериментально полученных результатов, а также на согласованности расчётов и экспериментов с ранее выполненными исследованиями в рамках их пересечений.

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- Международные научные семинары «Non-Ideal Plasma Physics» (г. Москва, Россия), 2022–2025 гг.;

- International Conferences on Equations of State for Matter (Эльбрус, Россия), 2022–2026 гг.;

- International Workshops «Complex Systems of Charged Particles and Their Interactions with Electromagnetic Radiation» (г. Москва, Россия), 2024–2026 гг.;
- Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Долгопрудный, Россия), 2023–2026 гг.;
- II Международная конференция «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (г. Казань, Россия), 2022 г.;
- XIII Всероссийская конференция ФЭ-2024 (г. Махачкала, Россия), 2024 г.;
- Международная конференция «Современные методы диагностики плазмы и их применение» (г. Москва, Россия), 2024 г.;
- Всероссийская молодёжная конференция по управляемому термоядерному синтезу, плазменным технологиям и высокотехнологичной медицине (ВМКТ-2025) (г. Троицк, Россия), 2025 г.;
- XII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии — ЛаПлаз-2026» (г. Москва, Россия), 2026 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 8 статей в рецензируемых изданиях из перечня ВАК.

Личный вклад автора

Автором работы модифицированы компьютерные программы и выполнены все расчёты. Основные результаты экспериментов и расчётов, представленные в диссертации, получены непосредственно автором или при его определяющем личном участии. Автором работы внесен основной вклад в подготовку и проведение экспериментов и в обработку полученных результатов, принимал участие в постановке задач, обсуждении результатов, подготовке рукописей статей. Все доклады на конференциях подготовлены и представлены лично автором.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 178 страниц текста, включая 27 таблиц и 143 рисунка. Список цитируемой литературы — 118 наименований.

Глава 1. Обзор литературы

В главе представлен обзор известных на сегодняшний день подходов к удержанию заряженных частиц и управлению их движением в электродинамических ловушках, а также к управлению электромагнитными полями с использованием диэлектрических резонансных структур. Рассмотрены основные этапы развития методов удержания заряженных частиц — от ионных ловушек в вакууме до систем для локализации микрочастиц в газовой среде при атмосферном давлении. Отдельное внимание уделено влиянию параметров и формы удерживающего напряжения на устойчивость движения частиц. Во второй части главы рассмотрены современные подходы к управлению локализацией, рассеянием и передачей электромагнитной энергии с помощью диэлектрических резонаторов, включая связанные резонансные системы и структуры на основе диэлектрических колец. Проведённый анализ позволяет определить недостаточно исследованные вопросы, составляющие основу задач настоящей работы.

1.1 Удержание и управление заряженными диэлектрическими частицами в электродинамических ловушках

Изобретение Хансом Демельтом и Вольфгангом Паулем метода удержания отдельных заряженных частиц в электромагнитных ловушках и присуждение им Нобелевской премии по физике в 1989 году, послужило мощным импульсом для дальнейшего развития исследований в области удержания заряженных частиц в различных модификациях электродинамических (ЭД) ловушек. Ловушки позволили исследовать изолированные частицы с размерами от ангстремов до 100 мкм в течении длительного времени и дали возможность измерить их свойства с предельно высокой точностью.

Принципы удержания заряженных частиц в таких ловушках в условиях вакуума для любой конструкции электродов аналогичны изначально описанным В. Паулем [3]. Принцип удержания заряженных частиц в электродинамической квадрупольной ловушке основан на методе, предложенном В. Паулем [17]. Наиболее распространённая конструкция линейной квадрупольной ловушки представляет собой четыре параллельных цилиндрических электрода, расположенных в вершинах квадрата (Рис. 1.1.1). На противоположные электроды подаются напряжения одинаковой фазы, а на соседние — противоположной. В результате в пространстве между электродами формируется переменное квадрупольное электрическое поле (Рис. 1.1.2).

Вблизи оси ловушки электрический потенциал квадратично зависит от координат и может быть представлен в виде:

$$\varphi(x,y,z,t) = \frac{U(t)}{2r_0^2}\left(\alpha x^2 + \beta y^2 + \gamma z^2\right), \tag{1.1.1}$$

где $U(t)$ — переменное напряжение, r_0 — характерный размер ловушки, α, β, γ — безразмерные коэффициенты, определяемые геометрией поля.

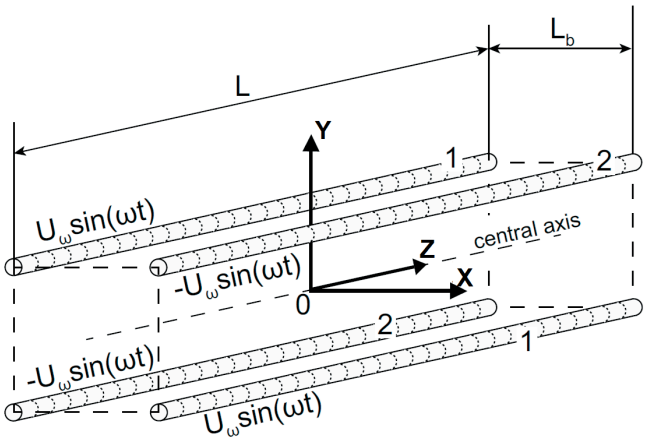
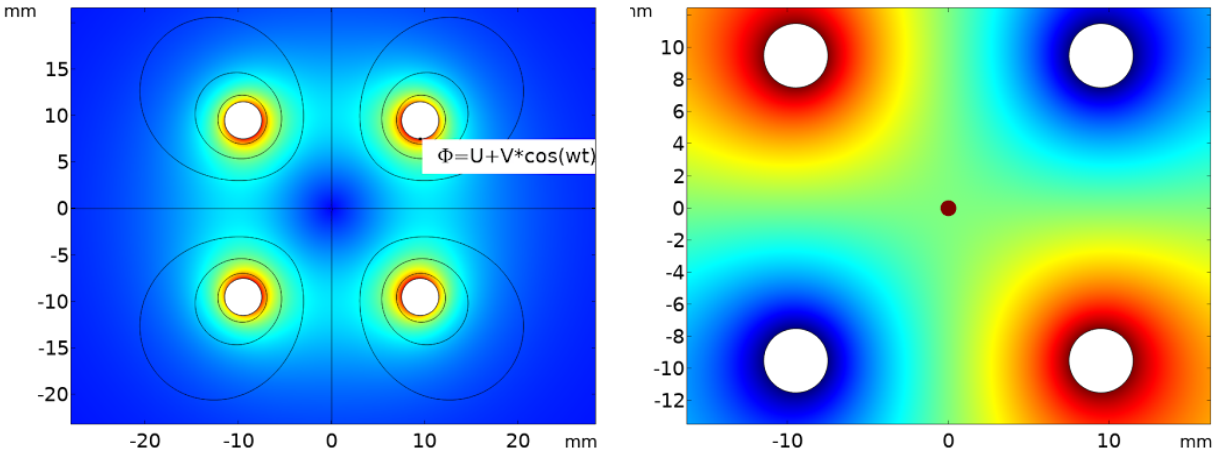


Рис. 1.1.1: Схема горизонтальной линейной квадрупольной ЭД-ловушки.



а б

Рис. 1.1.2: Распределение электрического поля (а) и потенциала (б) в поперечном сечении линейной квадрупольной ловушки, точка в центре обозначает начальное положение частицы

Распределение потенциала имеет седловую форму (Рис. 1.1.3). При одной полярности напряжения электрическая сила направляет заряженную частицу к оси ловушки по одной поперечной координате и удаляет от неё по другой. При смене полярности направления этих сил меняются местами.

Таким образом, устойчивое удержание обеспечивается периодическим изменением электрического поля. При определённом сочетании амплитуды и частоты напряжения, заряда и массы частицы её движение остаётся ограниченным: частица совершает колебания вблизи оси ловушки, не покидая области удержания.

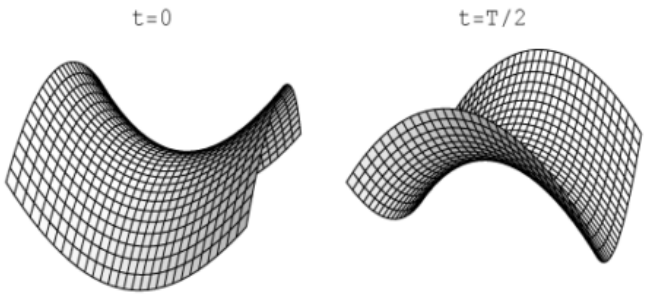


Рис. 1.1.3: Вид потенциальной поверхности, создаваемой в ионной ловушке Пауля, в два момента времени: $t = 0$ и $t = T/2$.

Ловушки изначально нашли применение для удержания элементарных заряженных частиц и исследований в вакууме, позволяющих пренебрегать вязкостью среды и гравитацией. В таких условиях движение элементарных частиц в ловушках можно описать системой уравнений Матье:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{d\tau^2} + (a_x + 2q_x \cos 2\tau)\, x = 0, \\ \frac{d^2y}{d\tau^2} + (a_y + 2q_y \cos 2\tau)\, y = 0, \end{aligned} \tag{1.1.2}$$

где

$$a_x = -a_y = \frac{4eU}{m\Omega^2 r_0^2}, \qquad q_x = -q_y = \frac{2eV}{m\Omega^2 r_0^2}, \qquad \tau = \frac{\Omega t}{2},$$

m — масса частицы.

Решения этой системы уравнений Матье описывают два режима движения заряженной частицы: устойчивый, при котором частица совершает ограниченные колебания вблизи положения равновесия, и неустойчивый, когда амплитуда колебаний возрастает во времени, что приводит к выходу частицы из области удержания. Характер движения зависит только от значений безразмерных параметров движения иона a и q и не зависит от начальных условий движения, например от скорости. Для частицы определяющим параметром является только отношение заряда к массе e/m.

На плоскости параметров a–q устойчивым и неустойчивым режимам соответствуют области устойчивости и неустойчивости, показанные на Рис. 1.1.4. Поскольку уравнения движения вдоль осей x и y решаются независимо, удержание частицы возможно только при одновременном выполнении условий устойчивости по обеим координатам. Рабочая область

ловушки соответствует зоне перекрытия областей устойчивости, которая на Рис. 1.1.4 выделена треугольником.

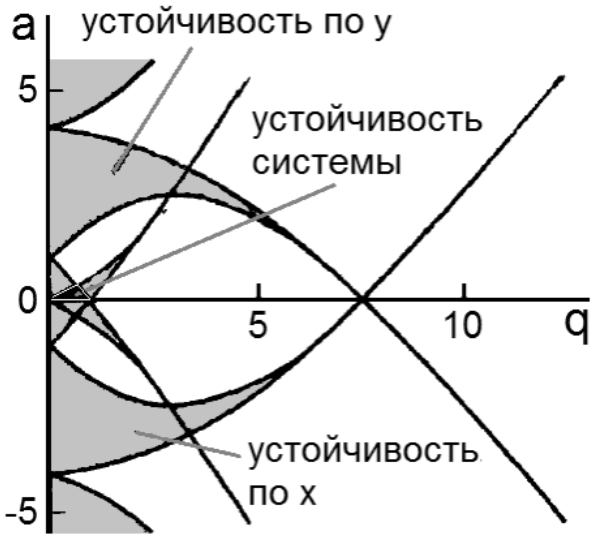


Рис. 1.1.4: Диаграмма устойчивости для двумерного квадрупольного поля.

Первыми применениями электродинамических линейных ловушек можно считать квадрупольный масс-спектрометр, масс-фильтр [4; 5], устройства для направления пучков элементарных заряженных частиц и устройства для формирования квазикристаллических структур [6].

Развитие с 1980-х годов физики пылевой плазмы расширило применение ловушек и на пылевые частицы. Прежде чем перейти к применению электродинамических ловушек для удержания частиц микронного размера, кратко обратимся к истории становления физики пылевой плазмы.

Впервые наблюдение пылевых частиц в плазме было зафиксировано И. Ленгмюром и его коллегами в 1924 году («A New Type of Electric Discharge: The Streamer Discharge»). В стримерном разряде в аргоне с парами вольфрама наблюдали образование пылевых частиц от микронных до миллиметровых размеров. С помощью магнитного поля они управляли движением и формированием этих частиц. Исследование пылевых частиц в разряде вызвало сдержанный интерес учёных, во многом по причине отсутствия областей применения. Наличие пыли в плазме считалось нежелательным.

Однако с развитием в промышленности плазменных технологий травления при производстве высокочувствительных элементов электроники исследования пыли приобрели актуальность. Особый интерес вызвал вывод о росте частиц в разряде от молекулярного уровня до микрометровых размеров [7; 8]. Сегодня эти исследования активно развиваются и направлены не только на изучение механизмов зарождения и роста частиц в плазме, но и на

управляемый синтез частиц с заданными размером и составом [9].

Окончательное признание значимость исследований заряженных пылевых частиц и систем из них получила благодаря космическим экспедициям. Особую роль сыграло наблюдение ансамблей мельчайших заряженных частиц в кольцах Сатурна, взаимодействующих с магнитным полем планеты [10—13].

Вопросы получения упорядоченных структур из элементарных частиц одного сорта (либо электронов, либо ионов) рассматривались научным сообществом, в частности нобелевскими лауреатами Л. Ландау [14; 15], Ю. Вигнером [16], Клаусом фон Клитцингом [17], а также Э. Теллером [18]. Предполагалось выделять и охлаждать один из компонентов плазмы до кристаллического состояния. В плазме же кристаллизация не рассматривалась в силу её электрической нейтральности и рекомбинации ионов и электронов при охлаждении.

Это причина, по которой краткая теоретическая работа Хиро Икези [19], содержавшая предположение о кулоновской кристаллизации микронных частиц в пылевой плазме при типичных для плазмы условиях, вдохновила сразу несколько исследовательских коллективов на работы по созданию плазменных кристаллов [20—22].

Институт теплофизики экстремальных состояний Объединённого института высоких температур РАН стал одним из пионеров изучения плазменных кристаллов и жидкостей в широком диапазоне температур и давлений [23—26].

В дальнейшем интерес распространился и на сильно связанные системы заряженных микрочастиц вне плазменной среды, где исключение плазменного экранирования и потоков заряженных компонентов позволяет непосредственно исследовать кулоновское взаимодействие и коллективную динамику частиц. Одним из способов формирования и длительного удержания таких систем стало применение электродинамических ловушек, в том числе в воздухе при атмосферном давлении.

Линейные квадрупольные ловушки стали активно использоваться для исследований одиночных пылевых частиц и кулоновских систем в различных средах. Группой ОИВТ РАН под руководством В. Е. Фортова и Л. М. Василяка впервые были представлены экспериментальные наблюдения упорядоченных кулоновских структур заряженных пылевых частиц, сформированных в квадрупольной ловушке в воздухе при атмосферном давлении [27]. Были определены области устойчивого удержания микрочастиц в зависимости от частоты и отношения заряда к массе и показано, что вязкое сопротивление воздуха способствует расширению области устойчивости и уменьшению амплитуды колебаний частиц.

Экспериментально продемонстрировано длительное удержание при атмосферном давлении упорядоченных кулоновских структур, содержащих до 50–100 микрочастиц, без ней-

трализующего плазменного фона, что создало возможность исследования сильно связанных систем независимо от процессов экранирования и потоков заряженных компонентов плазмы. Определены термодинамические характеристики таких систем: рассчитаны внутренняя энергия [28], давление и параметр связи, а также показано влияние размера и заряда частиц и среднего межчастичного расстояния на эти характеристики [29]. Установлена также связь этих характеристик со степенью пространственного упорядочения, что создало основу для дальнейшего изучения коллективных процессов и отклика кулоновских структур на внешние воздействия.

Экспериментально продемонстрирована коллективная динамика, в частности формирование уединённых волн плотности [30; 31] и волн в нитевидных частицах [32], что существенно расширило возможности динамических ловушек как модельных систем для исследования сильно связанных многочастичных сред.

Исследованы условия удержания и формирования устойчивых кулоновских структур в горизонтальной квадрупольной ловушке [33]. В работе методом численного расчёта получены области удержания в координатах «частота удерживающего напряжения — отношение заряда сферической частицы оксида алюминия к массе» и «амплитуда удерживающего напряжения — отношение заряда частицы к массе». Результаты расчётов подтверждались только визуальным наблюдением наличия или отсутствия удержания заряженных частиц при соответствующих расчётных параметрах.

Предложен способ бесконтактного определения заряда и массы одиночных частиц, удерживаемых в квадрупольной ловушке [34]. В вертикальной квадрупольной ловушке над сферическим электродом с постоянным напряжением достигалось удержание заряженной частицы, после чего напряжение на электродах ловушки снижалось до нуля. По скорости движения частицы к заряженному шару под действием силы тяжести и электростатического притяжения определялись искомые параметры.

В воздухе на пылевые частицы микронного размера существенное влияние оказывают гравитация и сила вязкого трения. В отличие от вакуума и лёгких частиц, отношение q/m различно для частиц, удерживаемых в вязкой среде, следовательно, возможна сепарация частиц по размерам [35].

Впервые исследовано параметрическое воздействие на пылевые частицы в плазме в линейных квадрупольных ловушках [36].

Для стабильного удержания ионов в вакууме широко используется ловушка с 22 линейными электродами [37]. Преимущества многоэлектродных ловушек для удержания аэрозолей и микрочастиц в вязкой воздушной среде подтверждены в работах [1; 38]: такие ловушки обла-

дают более высокой устойчивостью и меньшей чувствительностью к флуктуациям внешней среды, в частности к воздушным потокам.

Другое перспективное направление исследования частиц в вертикальных квадрупольных ловушках активно развивается в группе С. С. Рудого и Ю. В. Рождественского в ИТМО. Вертикальное положение ловушки и поддержка частицы торцевым электродом вдоль вертикальной оси позволяют пренебречь учётом гравитации и рассматривать динамику отдельных частиц микронных размеров в двумерной плоскости поперечного сечения.

В работе [39] предложено бесконтактное определение параметров пылевой частицы по траектории, зафиксированной в вертикальной ловушке в воздухе. Предложены численные метрики орбит, по которым движутся частицы, и установлена функциональная зависимость между характеристиками орбит и физическими параметрами удерживаемой частицы — размером, массой и зарядом.

Ещё одно перспективное применение квадрупольных ловушек группой С.С. Рудого связано с исследованием динамики заряженных микро- и наночастиц в нелинейных режимах движения [40]. Изучение переходов от устойчивых колебаний к хаотическому движению позволяет использовать особенности траекторий частиц для определения их физических параметров, а также для разработки методов их селекции и управляемого удержания.

Известны различные подходы к выбору режимов работы ловушек. Например, квадрупольная ловушка с синфазным напряжением на всех четырёх электродах показала наличие трёх точек устойчивости [41]. Также исследованы режимы с вариациями переменного и постоянного напряжений на диагональных электродах [42].

Однако все перечисленные ранее в этом разделе работы с квадрупольными ловушками выполнены для синусоидального удерживающего напряжения. Представляет интерес рассмотрение влияния других форм напряжения на устойчивость частиц микронного размера в ловушке в воздухе при атмосферном давлении.

Самая ранняя работа 1972 года [43] авторства Э.П.Шеретова и В.И. Терентьева о применении нового режима импульсного питания в квадрупольных масс-спектрометрах теоретически предсказывает повышение устойчивости ионов. Авторы предложили расчёт области удержания по аналогии с диаграммой Айнса–Стретта для асимметричных прямоугольных знакопеременных импульсов, где отношение длительности положительной полуволны к отрицательной $\lambda = 0{,}6$.

Результаты расчётов для ионов в вакууме показали наличие не одной, как в случае синусоидального напряжения, а трёх областей устойчивости и зависимость траекторий не только от параметров a и q, но и от λ. Работа в новых областях даёт выигрыш в чувствительно-

сти и разрешающей способности масс-спектрометра. Подчёркивается возможность подбора λ для получения необходимой разрешающей способности, в отличие от гармонического напряжения, у которого длительности полуволн равны. Именно на работы Э. П. Шеретова [44] ссылаются последующие и современные исследователи режимов работы ионной квадрупольной ловушки при прямоугольном напряжении.

В последующей работе Ричардса, Хьюи и Хиллера (1973) [53] подтверждено повышение устойчивости движения ионов при использовании симметричного и асимметричного знакопеременного прямоугольного напряжения в квадрупольном масс-фильтре. Экспериментально показано, что уменьшение коэффициента заполнения приводит к повышению разрешающей способности масс-фильтра. Аналогичный эффект наблюдался при уменьшении энергии ионов.

В более поздней работе 2002 года Динга и Судакова [45] введён термин «цифровая» для обозначения квадрупольной ионной ловушки с питанием прямоугольным напряжением. В отличие от предыдущих работ, ориентированных преимущественно на расчёт областей устойчивости при импульсном возбуждении, авторы теоретически исследовали возможность управления движением ионов посредством изменения частоты питающего напряжения. Численное моделирование показало, что изменение частоты прямоугольного сигнала позволяет последовательно изменять условия устойчивости для ионов с различным отношением массы к заряду и тем самым реализовать их масс-селективное удержание и выброс. Таким образом, частота возбуждения была предложена в качестве самостоятельного управляющего параметра цифровой ловушки. Сегодня эта группа продолжает исследования цифровой ловушки [45—50].

Несмотря на развитый теоретический аппарат, экспериментальное подтверждение результатов и развитие техники генерации прямоугольного импульсного напряжения и управления его параметрами, большинство масс-спектрометров и масс-фильтров до сих пор работают исключительно с синусоидальным напряжением. Продолжаются систематические исследования зон устойчивости при симметричном и асимметричном прямоугольном напряжении.

Применение коэффициента заполнения прямоугольного сигнала в качестве отдельного параметра управления устойчивостью ионов в вакууме в цифровых ловушках рассматривается и в более современной работе Рейли [51]. При переходе от классического знакопеременного меандра с равными длительностями полуволн к 12 соотношениям их длительностей от 61/39 до 90/10 % авторами рассчитаны параметры 12 отдельных областей устойчивости, предложенных для практического применения при достижении достаточной точности экспериментального оборудования.

Последние исследования цифровых ловушек, выполненных А. И. Ивановым с коллегами [52—54] подтверждают актуальность исследования асимметричных прямоугольных импульсов.

Таким образом, результаты, полученные для цифровых ионных ловушек, показывают значительный потенциал прямоугольной формы удерживающего напряжения для управления динамикой заряженных частиц. Однако рассмотренные выше исследования были выполнены преимущественно для ионов в вакууме и при сравнительно небольших амплитудах напряжения. Непосредственный перенос этих результатов на удержание заряженных частиц микронных размеров в воздухе при атмосферном давлении невозможен.

В последнем случае существенно изменяется характер движения частиц: наряду с электрической силой необходимо учитывать силу тяжести и вязкое сопротивление газа, а для формирования области устойчивого удержания требуются существенно более высокие амплитуды напряжения. Поэтому подобие по отношению заряда к массе, используемое при анализе ионных ловушек и масс-фильтров, само по себе не позволяет определить условия удержания микрочастиц; необходимо непосредственно исследовать их траектории и области устойчивости с учётом действующих в вязкой среде сил.

1.2 Резонансное взаимодействие электромагнитного поля с субволновыми диэлектрическими элементами

Возможность формирования выраженного электрического и магнитного отклика за счёт резонансного возбуждения отдельных структурных элементов лежит в основе концепции метаматериалов. Развитие этого направления прошло путь от металлических резонансных элементов к полностью диэлектрическим структурам, в которых аналогичные электромагнитные свойства формируются преимущественно токами смещения и могут быть реализованы при существенно меньших омических потерях.

В настоящее время резонансное возбуждение магнитных мод и формирование отрицательной магнитной индуктивности в субволновых плазмонных и полностью диэлектрических телах в поле монохроматической электромагнитной волны вызывают большой интерес. Однако в плазмонных системах основной резонанс и резонансы более высокого порядка ограничены большой диссипацией, связанной с металлами [55]. Проблема потерь энергии в металлах становится особенно значимой в видимом диапазоне. Замена металлов диэлектриками позволяет избежать больших диссипативных потерь, что было показано теоретически [56; 57] и экспериментально продемонстрировано [58; 59].

Диэлектрические тела субволновых размеров с высоким показателем преломления могут оказывать сильное магнитное воздействие на падающую электромагнитную волну. Исследование возможностей управления светом, в частности его амплитудой и фазой, в субволновых полностью диэлектрических структурах стало перспективным научным направлением. В последнее время появились новые направления, ориентированные на полностью диэлектрическую нанофотонику, а также на ТГц- и СВЧ-диапазоны, в рамках которых исследуются возможности управления электромагнитными резонансами диэлектрических частиц с высоким показателем преломления.

Наличие семейства магнитных и электрических резонансов и возможность управления их амплитудами и фазами придают этому типу частиц множество уникальных электромагнитных свойств, таких как огромная концентрация падающего электромагнитного поля внутри частиц и в их ближней зоне [57; 60—65], возникновение ярко выраженных эффектов направленности [66; 67], реализация безызлучательных анапольных режимов [67—75] и создание линий передачи с низкими потерями [68; 76].

Как следствие, полностью диэлектрические резонансные наноструктуры стали перспективной платформой для ряда приложений нанофотоники [77; 78], высокочувствительных и остронаправленных антенн [79—82], магнитных зеркал [83—85], резонаторов [86], поляризационно-зависимых пассивных переключателей [87], метаповерхностей [88; 89] и метаэлементов различной геометрии, которые позволяют проверять теоретические расчёты экспериментально в широком диапазоне частот [90—92].

Первые реализации метаматериалов основывались на металлических разрезных кольцевых резонаторах, электродинамические свойства которых могут быть описаны в рамках модели колебательного LC-контура. В такой модели геометрия проводящего элемента определяет его эффективные ёмкость и индуктивность и, следовательно, положение резонанса [93]. Однако с повышением рабочей частоты возрастают диссипативные потери в металлических элементах, что ограничивает возможности подобных структур [55]. Проблема потерь энергии в металлах становится особенно значимой в видимом диапазоне. Кроме того, размеры металлических резонансных элементов зачастую должны быть сопоставимы с рабочей длиной волны или составлять значительную её долю, чтобы обеспечить заметный магнитный отклик.

Замена металлов диэлектриками позволяет избежать больших диссипативных потерь. В работе [56] теоретически показано, что кремниевые наночастицы с высокой диэлектрической проницаемостью способны поддерживать электрические и магнитные дипольные резонансы Ми в видимом диапазоне при малом поглощении, причём оптический отклик определяется

преимущественно рассеянием. Для периодических массивов таких частиц продемонстрирована возможность управления электрическими и магнитными резонансами, включая формирование узких резонансов типа Фано и независимое усиление локальных электрического и магнитного полей.

Дальнейшее развитие этого подхода показало, что магнитный резонанс является свойством не только периодического массива, но и отдельной диэлектрической частицы. В работе [57] на основе теории Ми установлено, что субмикронные сферы кремния способны поддерживать выраженный магнитный дипольный резонанс в инфракрасном диапазоне, при этом вклад квадрупольных и более высоких мультипольных составляющих остаётся пренебрежимо малым. Это позволило рассматривать диэлектрические частицы с высоким показателем преломления как самостоятельные магнитные резонаторы оптического диапазона.

Экспериментальное подтверждение возможности замены металлических резонансных элементов диэлектрическими было получено в работе [94]. Авторы впервые показали, что отдельные сферические кремниевые наночастицы размером 100–200 нм способны поддерживать выраженный магнитный дипольный резонанс в видимом диапазоне. Изменение размера наночастицы в этих пределах позволяет непрерывно смещать спектральное положение резонанса практически во всём видимом спектре — от фиолетового до красного.

Экспериментальное развитие представлений о магнитном отклике диэлектрических частиц представлено в работе [58]. На примере отдельных сферических наночастиц кремния диаметром около 200 нм экспериментально зарегистрированы магнитный и электрический дипольные резонансы Ми в видимой области спектра. Существенным преимуществом таких диэлектрических резонаторов является возможность не только формирования магнитного отклика при малых диссипативных потерях, но и значительной локализации магнитной составляющей электромагнитного поля внутри частицы. Показано, что степень концентрации поля возрастает с увеличением диэлектрической проницаемости, а локализованное поле может быть выведено в окружающее пространство посредством формирования отверстия в центре частицы.

Последний результат чрезвычайно интересен. Получение сверхсильных магнитных полей традиционно основано на пропускании больших токов через проводники и сжатии магнитного потока. Так, стационарные поля величиной до 45 Тл были получены с использованием магнита Биттера, размещённого внутри сверхпроводящего магнита. Импульсные методы позволили существенно увеличить достигаемые значения: установка П. Л. Капицы обеспечивала поля порядка 100 Тл, а предложенные А. Д. Сахаровым магнитокумулятивные генераторы — до 3000 Тл.

Дальнейшее увеличение поля такими методами ограничивается прежде всего джоулевыми потерями в проводниках и механическими неустойчивостями, возникающими при сжатии проводника под действием магнитного давления. Альтернативный подход основан на использовании сверхинтенсивного лазерного излучения: генерация магнитного поля в лазерной плазме, в частности за счёт обратного эффекта Фарадея, теоретически позволяет достигать величин порядка 10^5 Тл, однако требует экстремальной интенсивности излучения выше 10^{23} Вт/см^2.

Согласно закону Био–Савара, магнитная индукция в центре металлического витка составляет

$$B = \frac{\mu I}{2R}, \tag{1.2.1}$$

поэтому увеличить поле можно не только повышением тока I, но и уменьшением радиуса R области, в которой циркулирует ток.

Для электромагнитного излучения концентрация поля посредством фокусировки ограничена дифракционным пределом: характерный размер области локализации не может быть существенно меньше длины волны λ. Однако это ограничение относится к распространяющейся волне. В ближней зоне рассеивающего объекта возникают пространственно затухающие компоненты поля, которые позволяют формировать субволновые вихревые распределения электромагнитной энергии и тем самым реализовать оптический аналог токового контура с характерным размером существенно меньше λ.

Именно этот подход был развит группой Объединённого института высоких температур совместно с коллегами из МГУ и других организаций [95]. Авторы вместо металлического токового витка использовали диэлектрическую частицу с высокой диэлектрической проницаемостью 140–150, в которой при возбуждении магнитных резонансов Ми возникают замкнутые вихревые токи смещения. Они играют роль токового контура и создают локализованное магнитное поле, причём энергия поля накапливается внутри частицы. Экспериментально было зарегистрировано усиление локального магнитного поля до 10^5 раз относительно поля падающей волны, тогда как расчёты показывают возможность достижения усиления порядка 10^6–10^{10} для высокодобротных резонансов.

Исследование возможностей управления светом, в частности амплитудой и фазой электромагнитного поля в субволновых полностью диэлектрических структурах, стало одним из перспективных направлений современной нанофотоники. Одним из важных проявлений управляемого резонансного отклика таких структур являются ярко выраженные эффекты направленности рассеяния.

В работе [66] впервые экспериментально продемонстрировано направленное рассеяние света сферическими кремниевыми наночастицами в видимом диапазоне спектра, вызванное одновременным возбуждением и взаимной интерференцией магнитного и электрического дипольных резонансов внутри отдельной наносферы. Показано, что соотношение интенсивностей прямого и обратного рассеяния существенно зависит от длины волны и размера частицы.

Большим преимуществом полностью диэлектрических резонансных частиц является возможность одновременного возбуждения электрических и магнитных резонансов. В зависимости от длины волны и размеров частицы изменяются амплитуды и фазы соответствующих полей, а их наложение определяет направление рассеянного излучения. При определённом соотношении электрического и магнитного дипольных откликов рассеяние в одном направлении усиливается, а в противоположном — ослабляется. Такое явление получило название эффекта Керкера. В частности, возможно значительное усиление рассеяния в направлении распространения падающей волны при одновременном ослаблении обратного рассеяния. Интерес к этому эффекту связан с возможностью управлять направлением рассеяния электромагнитного излучения с помощью отдельной субволновой диэлектрической частицы.

Новое развитие этой концепции предложено в работе [96] при исследовании диэлектрической сфероидальной частицы с высокой диэлектрической проницаемостью. В отличие от классического эффекта Керкера, основанного преимущественно на интерференции электрического и магнитного дипольных откликов, авторами рассмотрена интерференция полей электрического дипольного и магнитного квадрупольного моментов.

Впервые для такой системы теоретически сформулированы условия поперечного эффекта Керкера, при которых рассеяние одновременно подавляется в прямом и обратном направлениях и усиливается в двух поперечных направлениях, формируя гантелеобразную диаграмму направленности. Предсказанный эффект был экспериментально подтверждён в СВЧ-диапазоне на одиночном керамическом сфероидальном резонаторе, что продемонстрировало возможность формирования принципиально иной направленности рассеяния за счёт фазовой интерференции мультипольных мод различных порядков.

Перспективным направлением применения связанных диэлектрических резонаторов является создание субволновых линий передачи электромагнитной энергии. В работе [68] впервые экспериментально продемонстрировано распространение света в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах вдоль одномерной цепочки кремниевых наночастиц на расстояние более 500 мкм.

Дальнейшее развитие этого подхода связано с переходом от последовательной передачи энергии между соседними резонаторами к её избирательной передаче между простран-

ственно разделёнными метаструктурами. В работе [97] экспериментально продемонстрирована адресная беспроводная передача энергии между согласованными метаповерхностями, разнесёнными на расстояние порядка 70 см. Передача осуществлялась за счёт резонансного туннелирования электромагнитной волны в системе с экстремальными эффективными параметрами, при этом поле преимущественно локализовалось в области принимающей метаповерхности. Показано также, что присутствие посторонних объектов с обычными электромагнитными свойствами не приводит к существенному нарушению режима передачи. Таким образом, связанные диэлектрические и метаматериальные резонансные структуры позволяют реализовать не только направленное распространение, но и пространственно избирательную передачу электромагнитной энергии между заданными элементами.

Рассмотренные работы показывают, что связанные диэлектрические резонаторы позволяют управлять локализацией и переносом электромагнитной энергии, поэтому особый интерес представляет поиск резонансных элементов с хорошо определённым и управляемым электромагнитным откликом.

Исторически для создания метаматериалов и метаповерхностей в СВЧ-диапазоне широко применялись металлические кольцевые элементы. Замкнутый проводящий контур представляет собой простой магнитный диполь: его резонансные свойства могут быть описаны через эквивалентные индуктивность и ёмкость, а создаваемое током магнитное поле — на основе закона Био–Савара–Лапласа. Благодаря этому металлические кольцевые элементы получили широкое применение при создании различных резонансных структур для микроволнового диапазона.

Однако даже в простых диэлектрических телах, например в сфере, диске или цилиндре, электромагнитная волна возбуждает множество различных типов резонансов, частоты которых могут совпадать. Поэтому расчёты резонансных частот и полей рассеяния диэлектрических тел становятся сложной задачей.

В связи с этим важной становится задача создания диэлектрического магнитного диполя с основной резонансной частотой, которую можно рассчитать на основе понятий ёмкости и самоиндуктивности, и полями рассеяния, которые можно определить на основе закона Био–Савара–Лапласа. Такой элемент можно было бы использовать в конструкциях, уже созданных на основе металлического кольцевого диполя.

Поэтому существенным являлся вопрос о том, насколько далеко может быть проведена аналогия между этими двумя системами и, в частности, применимы ли к диэлектрическому кольцу представления об эквивалентной индуктивности и закон Био–Савара–Лапласа.

Теоретическое и экспериментальное исследование этого механизма проведено в рабо-

те [98]. Авторами предложена модель диэлектрического кольца как резонансного магнитного диполя, в которой изменение магнитного потока падающей электромагнитной волны возбуждает азимутальное электрическое поле и связанный с ним циркуляционный ток смещения. В рамках модели определена собственная резонансная частота и установлена её зависимость от диэлектрической проницаемости и геометрических параметров кольца. Экспериментально подтверждены основной магнитный резонанс и концентрация магнитного поля во внутренней области кольца, а также изменение магнитного отклика вблизи резонанса.

Физическая природа этого резонанса получила дальнейшее обоснование в работе [2]. На основе мультипольного анализа, численного моделирования и экспериментальных измерений показано, что на основном резонансе электрическое поле преимущественно сосредоточено в материале кольца и формирует замкнутый ток смещения, тогда как магнитное поле концентрируется в свободной области в его центре. Мультипольный анализ показал преобладание магнитной дипольной составляющей. Кроме того, была продемонстрирована применимость закона Био–Савара–Лапласа для расчёта магнитного поля, создаваемого током смещения в кольце. Таким образом, на основном резонансе диэлектрическое кольцо действительно может рассматриваться как аналог замкнутого проводящего контура, в котором роль тока проводимости выполняет циркуляционный ток смещения.

1.3 Выводы по литературному обзору

Проведённый анализ литературы показывает, что взаимодействие электромагнитного поля с диэлектрическими частицами развивается в нескольких взаимосвязанных направлениях, среди которых для настоящей работы основное значение имеют динамическое удержание заряженных микрочастиц в электродинамических ловушках и резонансное взаимодействие электромагнитного излучения с диэлектрическими элементами.

Линейные квадрупольные ловушки, первоначально разработанные для удержания ионов в вакууме, получили дальнейшее развитие для исследования заряженных микрочастиц в газовой среде. Экспериментально показана возможность устойчивого удержания при атмосферном давлении как отдельных частиц, так и упорядоченных кулоновских систем без нейтрализующего плазменного фона, что позволяет исследовать их динамику, определять физические характеристики и осуществлять пространственную сепарацию. В отличие от ионов в вакууме, на движение микрочастиц в воздухе существенное влияние оказывают сила тяжести и вязкое сопротивление газа, что изменяет условия их устойчивого удержания. При этом большинство исследований выполнено для синусоидального удерживающего напряже-

ния, тогда как для ионных ловушек и квадрупольных масс-фильтров показано, что применение прямоугольного напряжения, в том числе с различной длительностью положительной и отрицательной полуволн, позволяет изменять области устойчивости и управлять движением частиц. Однако влияние формы удерживающего напряжения на траектории и области устойчивости заряженных микрочастиц в воздухе при атмосферном давлении остаётся недостаточно исследованным.

Другим рассмотренным направлением является резонансное взаимодействие электромагнитного излучения с субволновыми диэлектрическими элементами. Диэлектрические резонаторы позволяют формировать электрические и магнитные резонансы при малых диссипативных потерях, обеспечивая локализацию, направленное рассеяние и передачу электромагнитной энергии. Особый интерес представляет диэлектрическое кольцо, в котором на основном резонансе возникает циркуляционный ток смещения и преобладает магнитный дипольный отклик. Вместе с тем недостаточно исследовано влияние взаимного расположения связанных кольцевых резонаторов, а также проводящих и плазменных элементов на их резонансные характеристики и распределение электромагнитного поля.

Таким образом, проведённый обзор определяет два основных направления дальнейшего исследования: управление движением и устойчивым удержанием заряженных микрочастиц в квадрупольной ловушке путём изменения формы и параметров удерживающего напряжения и управление резонансными характеристиками диэлектрических кольцевых структур за счёт взаимодействия связанных резонаторов и введения проводящих или плазменных элементов. Эти направления составляют основу последующих экспериментальных и расчётных исследований настоящей работы.

Глава 2. Экспериментальные установки. Расчетные модели.

В главе представлено описание экспериментальных установок и расчётных моделей для изучения динамических процессов в кулоновских и диэлектрических структурах в переменных электромагнитных полях. Первая установка предназначена для исследования заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке в воздухе. Вторая установка — для исследования магнитных резонансных спектров рассеяния плоской электромагнитной СВЧ-волны на диэлектрических элементах и структурах.

2.1 Установка для исследования динамики микрочастиц в ловушке

Блок-схема экспериментальной установки для исследования динамики одиночных заряженных микрочастиц и кулоновских систем в линейной квадрупольной электродинамической ловушке представлена на Рис. 2.1.1. Фотография ловушки в защитном коробе представлена на Рис. 2.1.2.

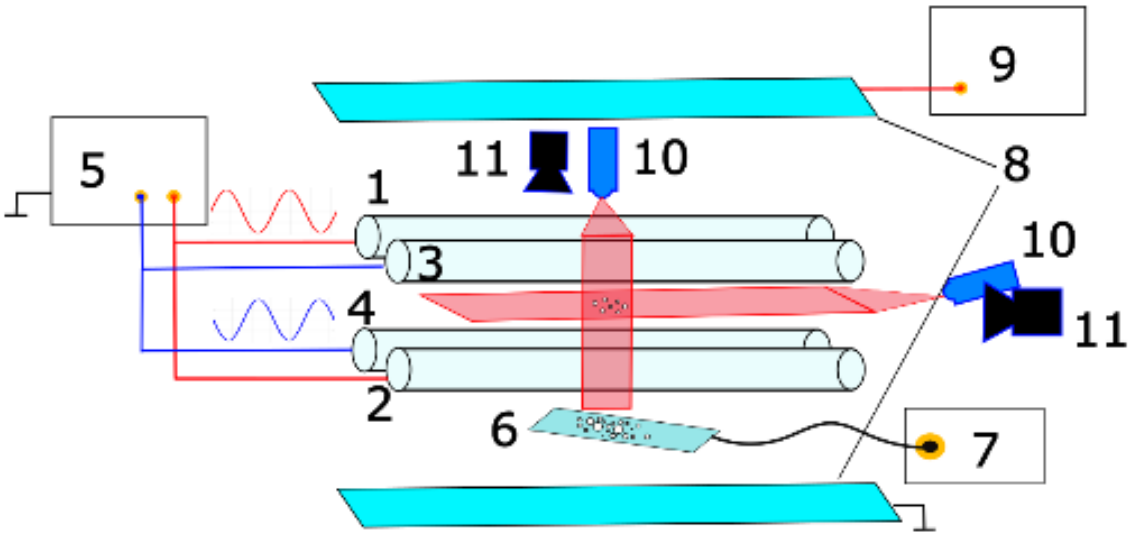


Рис. 2.1.1: Схема экспериментальной установки. 1–4 — линейные электроды квадрупольной ловушки, 5 — источник переменного напряжения, 6 — металлическая пластина для зарядки частиц с заряженными микрочастицами на ней, 7, 9 — источники постоянного напряжения, 8 — внешние металлические пластины для создания дополнительного электрического поля, 10 — лазер, 11 — видеокамера.

Установка состоит из линейной горизонтальной квадрупольной электродинамической ло-

вушки (1–4), помещённой в защитный короб из оргстекла, источника питания линейных электродов (5), торцевых электродов на оси ловушки, металлической пластины для зарядки микрочастиц (6), источника высоковольтного постоянного напряжения (7), внешних металлических пластин (8), источника напряжения для внешних пластин (9), лазера (10) и видеокамеры (11).

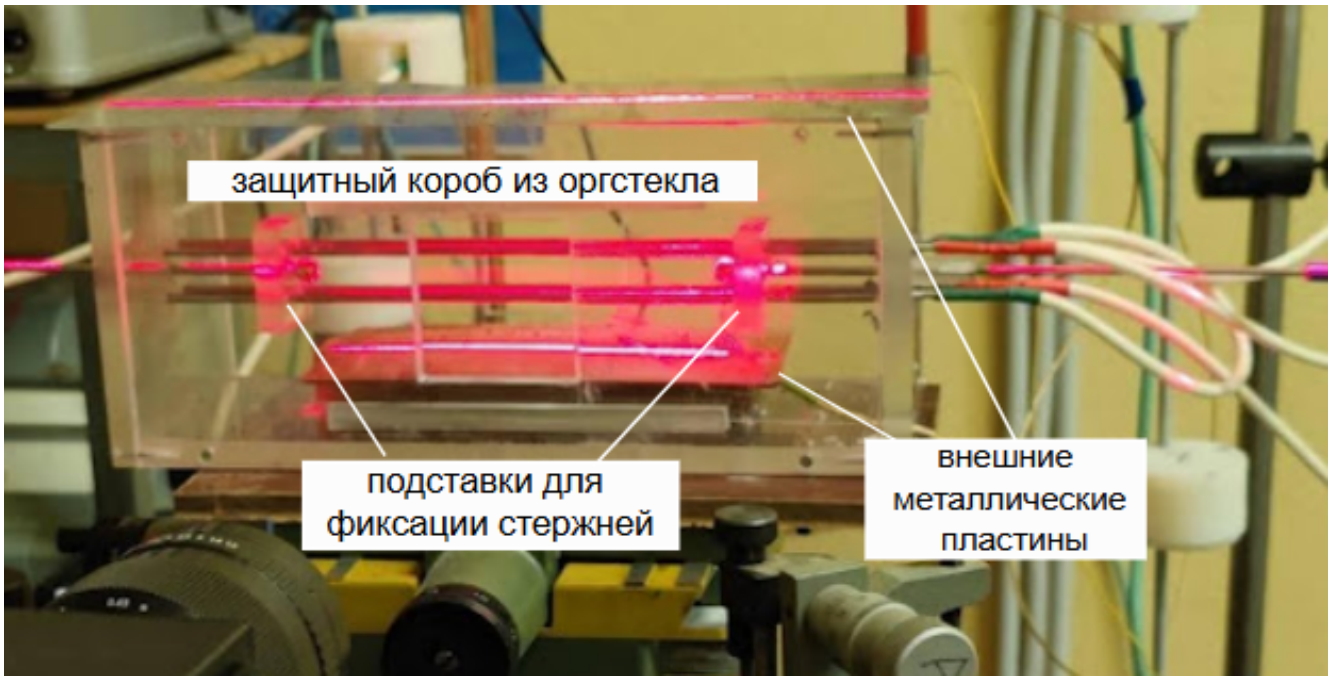


Рис. 2.1.2: Фотография электродинамической ловушки.

Ловушка

Линейная квадрупольная ловушка представляет собой четыре линейных электрода в виде четырёх стальных стержней диаметром 4 мм и длиной рабочей части 10 см (Рис. 2.1.1). Металлические стержни закреплены в диэлектрических пластинах из оргстекла в вершинах квадрата со стороной 2 см. Верхний правый и нижний левый электроды образуют первую диагональную пару (1–2 на Рис. 2.1.1). Верхний левый и нижний правый электроды составляют вторую диагональную пару (3–4). Подключение электродов к источнику переменного напряжения выполнено следующим образом. Когда на первой паре диагональных электродов (1–2) действует положительная полуволна напряжения, на второй диагональной паре (3–4) — отрицательная полуволна. В следующий полупериод полярность напряжения на диагональных электродах меняется. Параллельное расположение стержней обеспечивает удержание заряженных микрочастиц в поперечном направлении. Для ограничения их движения вдоль оси ловушки на торцевые электроды подаётся постоянное напряжение. Ловушка размещена в защитном коробе из плексигласа (оргстекла), чтобы избежать влияния воздушных потоков на траектории заряженных микрочастиц и динамику кулоновских систем (Рис. 2.1.2).

Источник напряжения переменного тока

На линейные электроды ловушки подавалось переменное напряжение двух видов:

1. Традиционное синусоидальное напряжение;

2. Прямоугольные импульсы напряжения, которые ранее не использовались.

Соответственно, использовались два отдельных источника высоковольтного напряжения переменного тока: один для подачи напряжения синусоидальной формы на электроды ловушки, а другой — для прямоугольной.

Источник синусоидального напряжения переменного токаа

Источник синусоидального напряжения состоит из 3-х основных блоков. Блок регулировки, повышающий блок и согласующий (Рис.2.1.3).

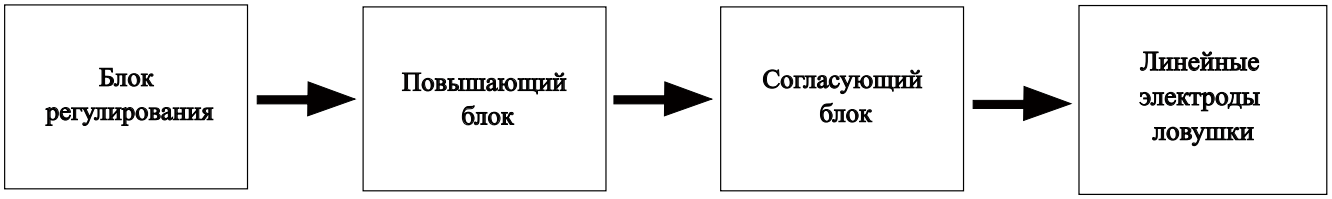


Рис. 2.1.3: Блок-схема блока синусоидального напряжения

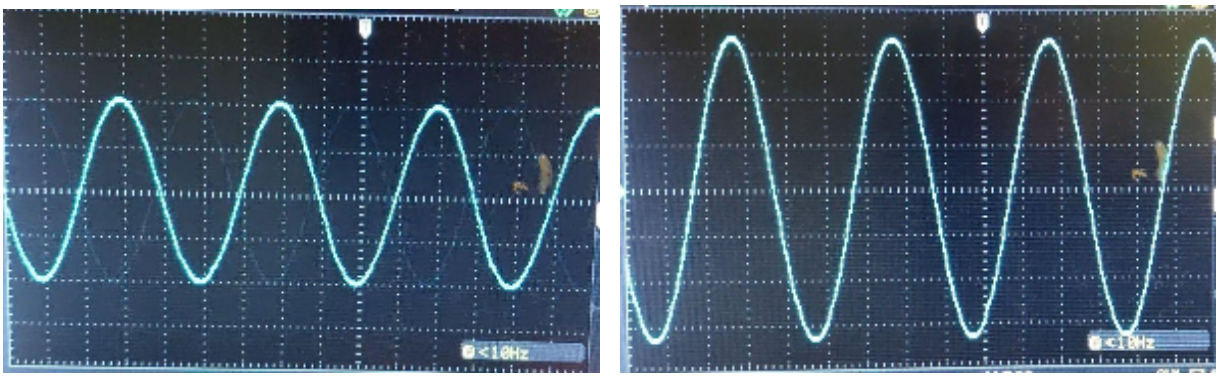
В блок регулирования входит лабораторный автотрансформатор (ЛАТР). Блок позволяет плавно бесступенчато менять амплитуду выходного синуса от 0 до 10 кВ.

Повышающий блок предназначен для повышения амплитуды сетевого напряжения до 10 кВ. В блок входит повышающий трансформатор с рабочей частотой 50 Гц.

Из условий эксперимента на диагональные пары электродов ловушки подается синхронизированное и противоположное по фазе напряжение. За формирование двухканальной синхронизированной системы питания отвечает блок согласования. Нагрузкой схемы являются линейные электроды ловушки.

Параметры выходного сигнала измерялись в блоке диагностики напряжения на цифровом 2-х канальном осциллографе LeCroy WaveAce WA 1012 с полосой пропускания 100 МГц и частотой дискретизации на канал 1 ГГц. Измерение проводилось высоковольтным зондом P6015A фирмы Tektronix. Осциллограммы синусоидального напряжения, полученные на выходе источника синусоидального напряжения, приведены на Рис.2.1.4.

Частота синусоидального напряжения на выходе данного источника 50 Гц. Амплитуда регулируется в пределах от 0 до 10 кВ.



а б

Рис. 2.1.4: Осциллограмма напряжения на выходе источника синусоидального напряжения переменного тока. Цена деления по оси ординат 1 кВ, развертка 5 мс/дел. Частота 50 Гц. Амплитуда (а) 4 кВ, (б) 6 кВ

Традиционная для квадрупольных ловушек форма удерживающего синусоидального напряжение переменного тока допускает изменение амплитуды и частоты, однако форма остается симметричной: верхняя и нижняя полуволны идентичны.

Источник прямоугольного напряжения переменного тока

Для исследований динамики заряженных микрочастиц был создан генератор высоковольтных прямоугольных импульсов с регулируемыми параметрами. Созданный источник прямоугольного напряжения состоит из 4-х основных блоков. Блок управления, согласующий блок, повышающий блок, коммутационный блок Рис.2.1.5.

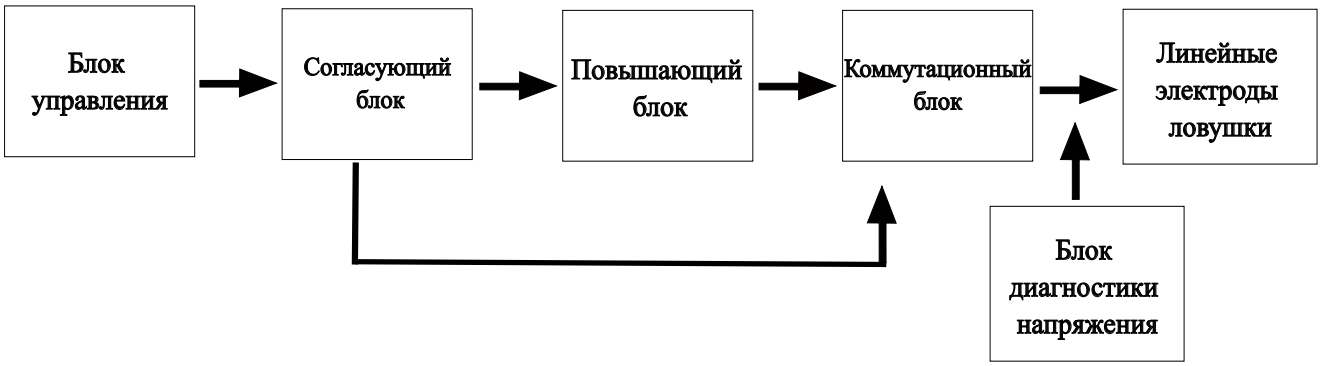


Рис. 2.1.5: Блок-схема блока прямоугольного напряжения.

Блок управления задает параметры выходного прямоугольного напряжения. Генератор сигналов специальной формы INSTEK AFG-72005 формирует напряжение прямоугольной формы амплитудой от 0 до 5 Вольт, задает частоту, и форму импульсов.

Назначение согласующего блока — создание двухканальной системы питания. В нем входной прямоугольный сигнал преобразуется в два синхронизированных противофазных кана-

ла.

Повышающий блок усиливает амплитуду и ток положительной и отрицательной полуволн для каждого канала от 0 до +10 и от 0 до -10 кВ соответственно.

Коммутационный блок включает два высоковольтных твердотельных коммутатора МАНТИГОРА серии HVS-F (ключи). На выходах двух ключей формируется результирующее знакопеременное высокое напряжение прямоугольной формы, сдвинутое на 180 градусов по фазе относительно друг друга. Частоту переключения ключей и длительность импульсов задают синхронизированные прямоугольные сигналы с согласующего блока.

На линейные электроды ловушки с выхода источника подается прямоугольное знакопеременное напряжение регулируемой частоты от 10 до 1000 Гц и амплитуды от 1 до 10 кВ.

Форма результирующих прямоугольных импульсов, помимо частоты и амплитуды, зависит от коэффициента заполнения положительной полярности, который далее обозначается K_p («заполнение»).

На Рис. 2.1.6 представлено сравнение форм прямоугольных сигналов частотой 50 Гц с длительностью периода 20 мс. Значение $K_p = 100\%$ соответствует постоянному напряжению положительной полярности, а $K_p = 0\%$ — постоянному напряжению отрицательной полярности. На рисунке они показаны верхней и нижней фиолетовыми линиями соответственно.

При $K_p = 50\%$ формируется симметричный знакопеременный меандр. На графике для $K_p = 20\%$ видно уменьшение длительности положительного импульса и увеличение длительности отрицательного по сравнению с $K_p = 50\%$ без изменения периода сигнала. График для $K_p = 70\%$ выделен зелёным цветом. В этом случае длительность положительного импульса увеличена.

Таким образом, коэффициент K_p определяет соотношение длительностей положительного и отрицательного импульсов, сумма которых всегда равна периоду сигнала.

Блок диагностики напряжения аналогичен блоку диагностики синусоидального источника. На Рис. 2.1.7а и Рис. 2.1.7б представлены осциллограммы результирующего сигнала при $K_p = 50\%$ и $K_p = 40\%$ соответственно. Время нарастания и спада положительного импульса составляет 1,5 и 0,1 мс соответственно, отрицательного импульса — 0,1 и 1,5 мс.

Коэффициент заполнения K_p в экспериментах изменялся от 20 до 80%. Изменение K_p позволяет изучать динамику микрочастиц при асимметричном прямоугольном напряжении. Для прямоугольного сигнала предусмотрена возможность изменения длительности положительного и отрицательного импульсов, исключения одного из них, а также изменения длительности фронтов.

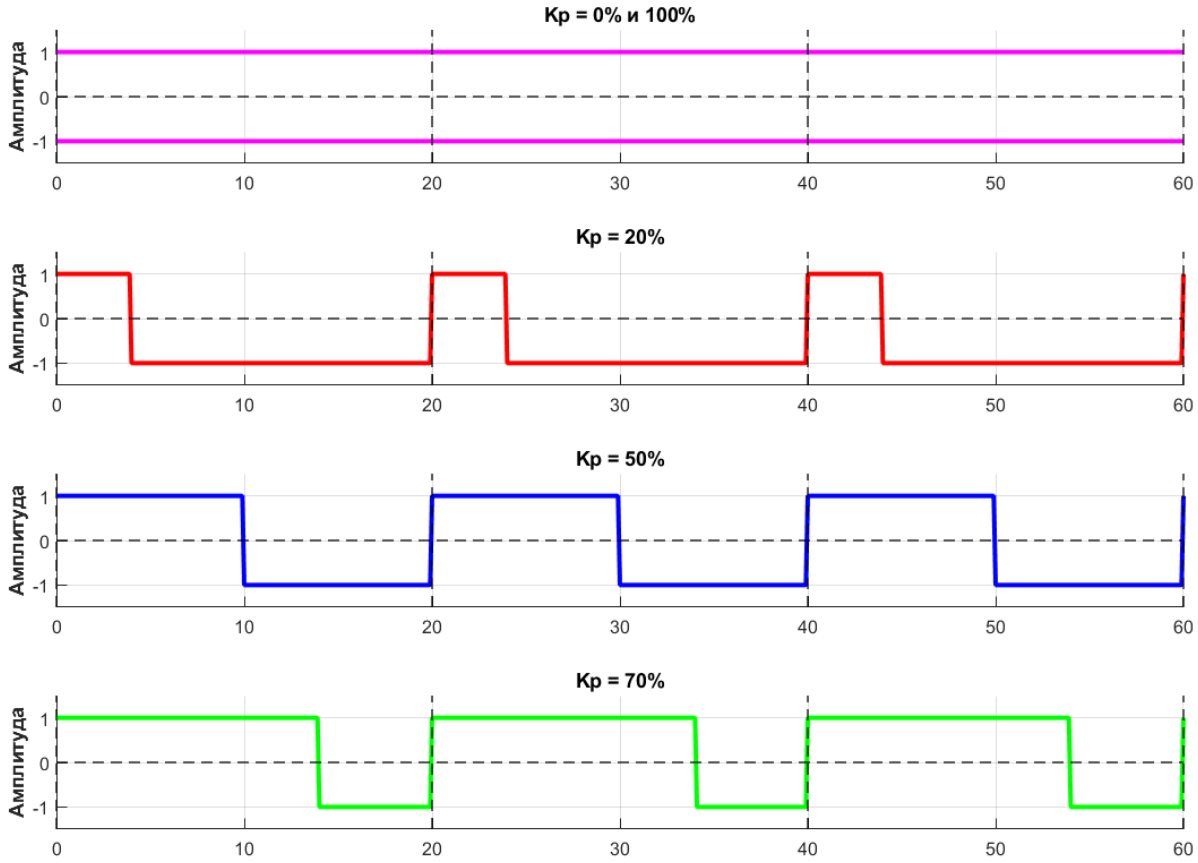
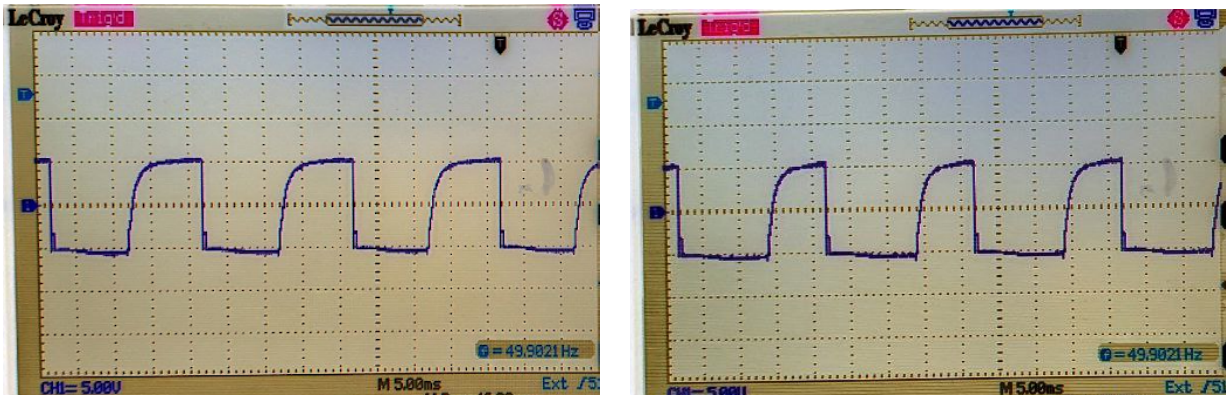


Рис. 2.1.6: Сравнение прямоугольных сигналов с коэффициентами заполнения Kp 0 и 100% (нижняя и верхняя прямые соответственно), 20%(красный), 50% (синий), 70% (зеленый)



а б

Рис. 2.1.7: Осциллограммы напряжения на выходе источника прямоугольного напряжения: (а) — $K_p = 50\%$; (б) — $K_p = 40\%$.

Внешние металлические пластины

Для создания дополнительного электрического поля линейная квадрупольная электродинамическая ловушка была помещена между пластинами плоского конденсатора с размерами

14x24 см, расстояние между пластинами равно 10.4 см. На Рис.2.1.1 отмечены номером 9. В зависимости от цели эксперимента, на пластины подавалось знакопеременное напряжение регулируемой частоты и амплитуды, либо постоянное напряжение с регулируемой амплитудой.

Зарядка микрочастиц

Зарядка микрочастиц производилась индукционным способом на металлической пластине (на Рис. 2.1.1 обозначена номером 6). Пластина выполнена из стали.

На пластину наносился тонкий слой микрочастиц и подавалось постоянное высокое напряжение 5–7 кВ положительной или отрицательной полярности от высоковольтного источника постоянного напряжения (7 на Рис. 2.1.1). Введение частиц в ловушку осуществлялось приближением металлической пластины (6) с заряженными частицами к нижним электродам (2 и 4) или засыпанием частиц с пластины между верхними электродами (1 и 3).

При размещении металлической пластины под нижними электродами ловушки микрочастицы попадали в сильно неоднородное электрическое поле, где на них действовали электрические силы, способствующие перемещению частиц к электродам ловушки. Если эти силы были достаточны для преодоления силы тяжести и электростатического притяжения микрочастиц к пластине, частицы могли захватываться полем ловушки.

При засыпании сверху микрочастицы приобретали начальную скорость, направленную вниз, в сторону области удержания. В этом случае захват происходил эффективнее, поскольку начальное движение частиц было сонаправлено с силой тяжести и способствовало их попаданию в область ловушки.

Регистрация и подсветка микрочастиц

Регистрация микрочастиц и траекторий их движения поперек ловушки производилась CCD камерой (11) с частотой 25 кадров в секунду с торца ловушки. Ось камеры располагалась вдоль оси ловушки. Подсветка частиц осуществлялась лазером (10) с мощностью излучения 300 мВт на длине волны 650 нм. Плоский лазерный луч толщиной 2 мм был направлен перпендикулярно оси ловушки (Рис.2.1.1). Для регистрации кулоновских структур и их движения вдоль оси ловушки, камера располагалась перпендикулярно оси ловушки, по центру электродов. Лазерный нож в этом случае размещался над ловушкой или с торца электродов.

Диэлектрические частицы

В экспериментах использовалась полидисперсная смесь микрочастиц оксида алюминия (Al_2O_3) размером от 2 до 100 мкм (Рис. 2.1.8). На Рис. 2.1.9 представлены два экспериментальных распределения частиц исходного порошка по размерам, построенные по выборкам из 300 и 500 частиц соответственно, отобранных из двух разных ёмкостей с порошком Al_2O_3.

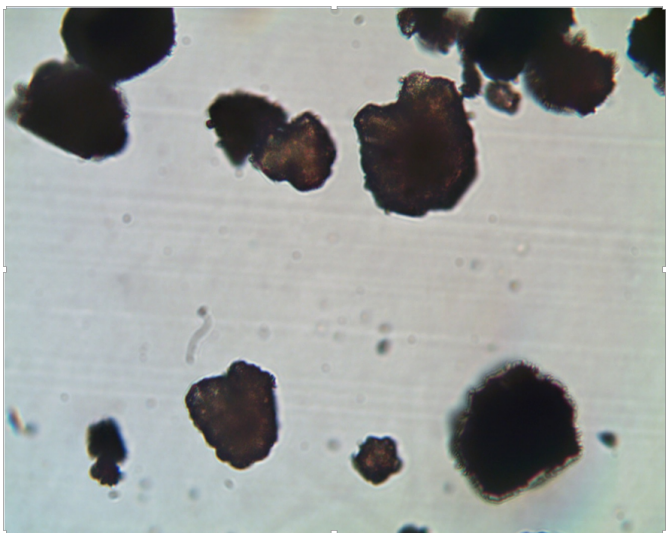
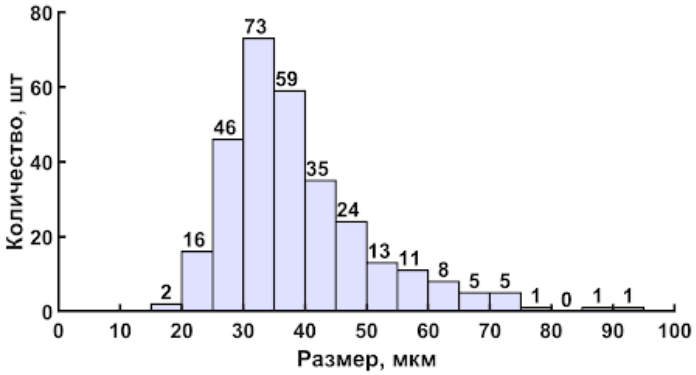
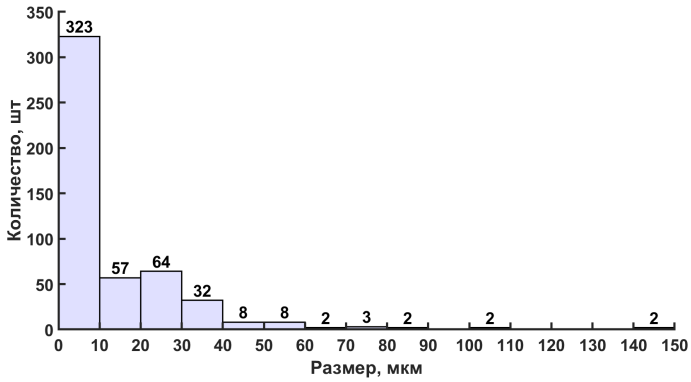


Рис. 2.1.8: Фотография полидисперсного порошка Al_2O_3.



а



б

Рис. 2.1.9: Экспериментальные распределения частиц исходного порошка Al_2O_3 по размерам: (а) — первая выборка, 300 частиц; (б) — вторая выборка, 300 частиц.

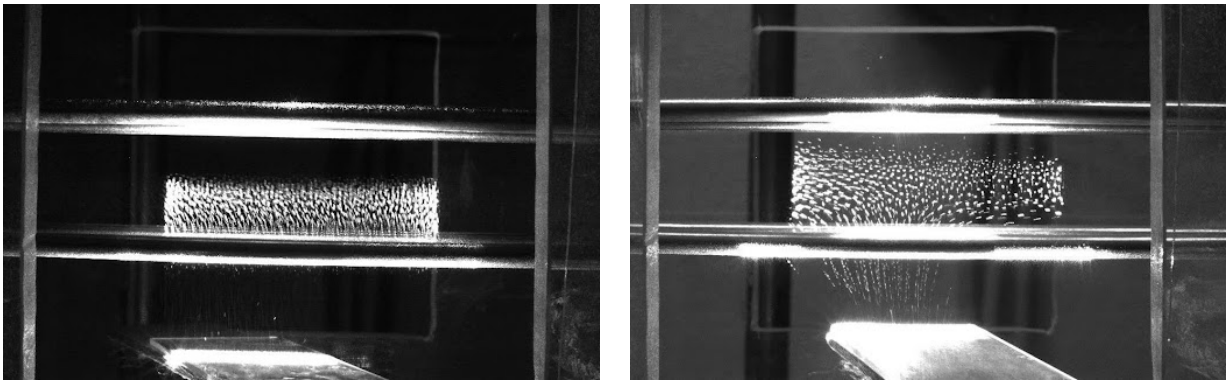
Методика эксперимента

Устанавливались начальные параметры напряжения на линейных электродах ловушки и внешних пластинах. На металлическую пластину с тонким слоем микрочастиц подавалось

постоянное отрицательное напряжение 5–7 кВ. Зарядную пластину подводили к нижним электродам ловушки на расстояние 1–2,5 см. В результате частицы приобретали заряд, отрывались от поверхности пластины и захватывались электродинамической ловушкой.

Методика количественного определения заряда частиц представлена в работе [99]. После захвата количества частиц, достаточного для диагностики, напряжение на пластине снижалось до нуля, после чего пластина извлекалась из зоны ловушки.

Обнаружено, что при использовании незаряженного стекла (Рис. 2.1.10а) на его поверхности осаждалось небольшое количество частиц. Для повышения эффективности сбора частиц стекло положительно заряжали трением (трибоэлектрическая зарядка). Положительно заряженное стекло притягивало отрицательно заряженные микрочастицы, находившиеся в ловушке (Рис. 2.1.10б). Таким образом, предварительная электризация стекла обеспечивала более эффективный сбор частиц для последующего анализа их размеров.



а б

Рис. 2.1.10: Осаждение отрицательно заряженных микрочастиц из ловушки на стекло: (а) — незаряженное стекло; (б) — положительно заряженное стекло.

После осаждения частиц ловушка очищалась, а параметры напряжения на линейных электродах устанавливались заново. Эксперимент при одинаковых параметрах напряжения повторялся 2–3 раза.

Оценка заряда на частицах при индукционном способе зарядки

Для сопоставления рассчитанных областей устойчивого удержания с физически достижимыми значениями заряда микрочастиц проводилась оценка заряда, приобретаемого частицей при индукционной зарядке во внешнем постоянном электрическом поле. В расчёте частица оксида алюминия рассматривалась как однородная диэлектрическая сфера радиуса a с относительной диэлектрической проницаемостью ε.

Оценка заряда проводилась на основе модели поляризации диэлектрической сферы в

однородном электрическом поле. Величина заряда определялась выражением

$$q = \frac{3}{4} \cdot \frac{\varepsilon + 2}{\varepsilon - 1} \cdot E \cdot a^2, \tag{2.1.1}$$

где q — заряд частицы, ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала частицы, E — напряжённость внешнего электрического поля, a — радиус частицы. Для частиц оксида алюминия в расчётах принималось значение $\varepsilon = 10$. Радиус частицы a задавался в сантиметрах, а напряжённость электрического поля E — в единицах СГСЭ. Полученное значение заряда далее переводилось в число элементарных зарядов e.

Напряжённость электрического поля в области зарядки оценивалась в приближении плоского конденсатора. При таком приближении поле между электродами определяется разностью их потенциалов и расстоянием между ними. В экспериментальной системе учитывались как приложенное напряжение зарядки $U_{\text{заряд}}$, так и потенциал электрода ловушки $U_{\text{эл}}$. Максимальная напряжённость поля оценивалась как

$$E_{\max} = \frac{|U_{\text{заряд}} - U_{\text{эл}}|}{d}, \tag{2.1.2}$$

где d — расстояние между заряжающим электродом и электродом ловушки. При задании напряжений в киловольтах и расстояния в сантиметрах напряжённость первоначально получается в кВ/см с последующим переводом в единицы СГСЭ, используемые при расчёте заряда.

В условиях эксперимента расстояние между зарядной пластиной и электродами в момент зарядки не являлось фиксированным. Поэтому для оценки возможного диапазона зарядов расстояние d варьировалось от 2 мм до 2 см. Для каждого размера частицы и заданного напряжения зарядки 2,5, 5 и 7 кВ определялись минимальное и максимальное значения напряжённости электрического поля, а затем соответствующий диапазон возможных зарядов. Такой подход позволил оценить не единственное значение заряда частицы, а физически достижимый диапазон зарядов в условиях используемой экспериментальной схемы.

Расчетная модель

Для моделирования движения частиц в электродинамической ловушке физические параметры модели выбирались в соответствии с параметрами экспериментальной установки. Траектории движения частиц рассчитывались путём численного решения уравнения Ланжевена:

$$m_i \frac{d^2\mathbf{r}_i}{dt^2} = \mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i, t) - 6\pi\eta \frac{d_i}{2} \frac{d\mathbf{r}_i}{dt} + m_i\mathbf{g} + \mathbf{F}_{b,i}(t). \tag{2.1.3}$$

где m_i — масса i-й частицы; $\mathbf{r}_i$ — радиус-вектор i-й частицы; $\mathbf{F}_{\text{trap}}(\mathbf{r}_i, t)$ — сила, действующая на частицу со стороны электрического поля ловушки; η — динамическая вязкость

воздуха; d_i — диаметр i-й частицы; $\mathbf{g}$ — ускорение свободного падения; $\mathbf{F}_{b,i}(t)$ — дельта-коррелированная случайная сила, возникающая вследствие соударений частицы с молекулами газа.

Для моделирования силы, действующей на микрочастицу со стороны электрического поля ловушки, использовалось распределение напряжённости электрического поля, предварительно рассчитанное в программе COMSOL. Данные были представлены в матричном виде, что позволяло вычислять силу $\mathbf{F}_{\text{trap}}$ в любой точке расчётной области путём интерполяции с учётом изменения приложенного напряжения во времени.

Частица в ловушке моделировалась в виде сферы заданного диаметра. Плотность материала частиц соответствовала плотности оксида алюминия и составляла 3,99 г/см^3.

2.2 Экспериментальная установка для исследования рассеяния СВЧ волн диэлектрическими структурами

Для исследования изменения магнитного поля и резонансного рассеяния от диэлектрических образцов собрана экспериментальная установка (Рис.2.2.1). Установка состоит из: анализатора спектра (1), усилителя (2), рупорной антенны (3), датчика регистрации магнитного поля (4). Для поглощения шумовых сигналов и повышения точности измерений установка помещена в безэховую камеру.

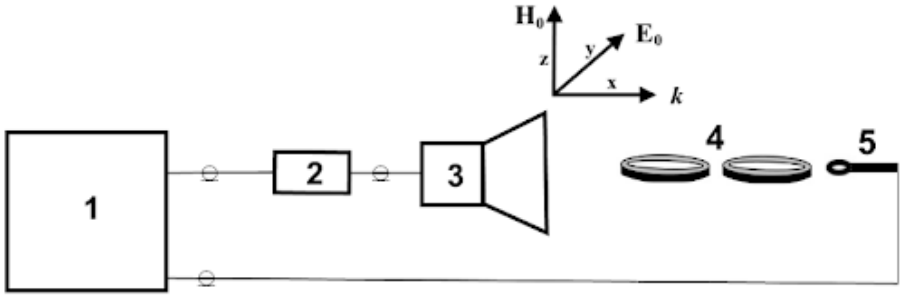


Рис. 2.2.1: Схема установки для измерения резонансного рассеяния. 1 –анализатор спектров, 2 – усилитель, 3 - рупорная антенна, 4 - диэлектрические элементы(кольца), 5 - зонд магнитного поля.

Рупорная антенна

Широкополосная двухгребневая рупорная антенна LINDGREN 3115 с рабочим диапазоном частот 0,75 – 18 ГГц, показана на Рис. 2.2.2. Антенна преобразует сигнал, поступающий от генератора, в плоскую линейно поляризованную волну.

Анализатор спектра

В качестве генератора и приемника сигналов в экспериментальной установке использовал-

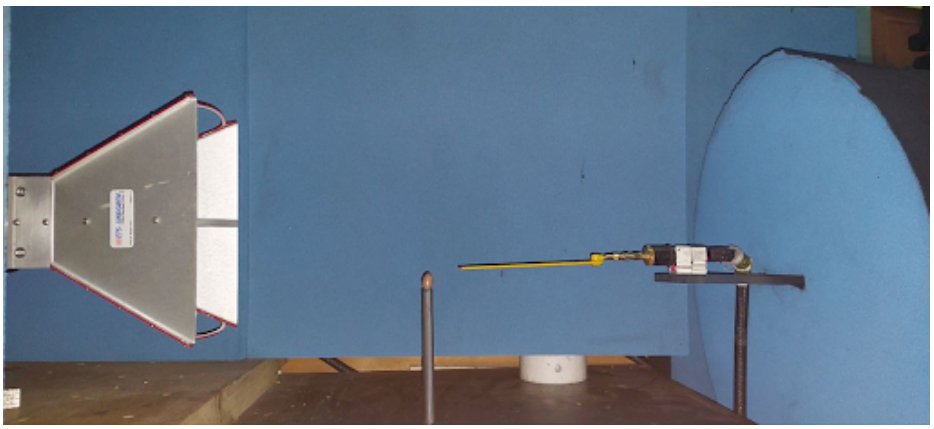


Рис. 2.2.2: Фотография установки.

ся векторный анализатор цепей Agilent E5071C ENA с рабочим диапазоном частот от 300 кГц до 20 ГГц. Анализатор выполнял две ключевые функции: его первый канал генерировал синусоидальное высокочастотное напряжение, подаваемое на рупорную антенну для создания электромагнитной волны, а второй канал использовался для приема и детального анализа сигнала, поступающего с магнитного зонда. Таким образом, анализатор обеспечивал синхронное управление излучением и измерения отклика.

Усилитель

СВЧ сигнал от спектроанализатора поступал на дополнительный усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ для увеличения соотношения сигнал - шум и уменьшения влияния эфирных радиопомех в полосе частот 0,75-6 ГГц.

Зонд магнитного поля

Магнитные поля измерялись с помощью зонда магнитного поля Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром чувствительно элемента равным 3,7 мм. Для измерения в ближней зоне датчик размещался на расстоянии меньшем длины волны падающего излучения, в нашем случае под ближней зоны мы будем понимать расстояние зонда в 1-2 см от диэлектрического образца, дальняя зона равна одной и более длин волн падающего излучения от края исследуемого образца.

Плоскость кольца магнитного зонда ориентирована перпендикулярно вектору магнитного поля H и параллельно волновому вектору k и вектору электрического поля E падающей волны. Данная ориентация обеспечивала регистрацию суммарной напряженности магнитного поля, создаваемого как падающей, так и рассеянной волнами. Чтобы выделить вклад рассеяния, перед испытаниями регистрировали фоновый сигнал при наличии падающей волны, но без тестовых объектов. Затем полученный фон вычитали из сигнала, измеренного с объектами.

Система шумопадавления

Для минимизации паразитных отражений и электромагнитных помех был разработан экранирующий короб, собранный из радиопоглощающих материалов. В конструкции использованы элементы трех типов: пирамидальные поглотители (Рис.2.2.5), бабины из окрашенного картона (Рис.2.2.3) и плоские однослойные блоки (Рис.2.2.4), что обеспечивает эффективное подавление шумов в рабочем диапазоне частот 2,5–3,5 ГГц.



Рис. 2.2.3: Закрепление поглощающего материала типа бабины.

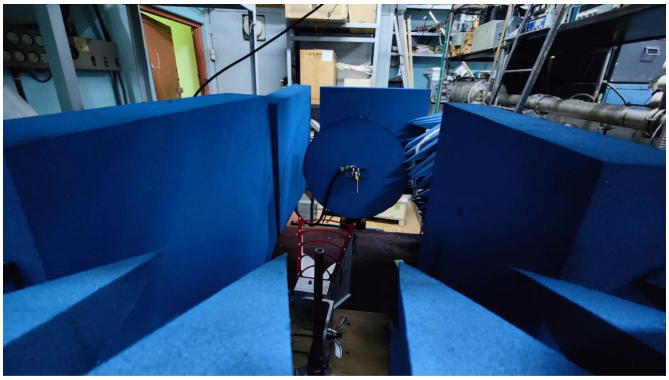


Рис. 2.2.4: Закрепление поглощающего материала типа плоских блоков.

Система позиционирования

Управление положением образца и измерительного датчика осуществляется с помощью пятиосевого поворотного столика (Рис.2.2.6). Столик подключен к компьютеру, что позволяет оператору дистанционно задавать сложные траектории перемещения и автоматически сохранять результаты измерений.

На сам осевой столик также приклеен радиопоглощающий блок,чтобы избежать лишних переотражений электромагнитных волн. Конструкция основного стенда выполнена разбор-

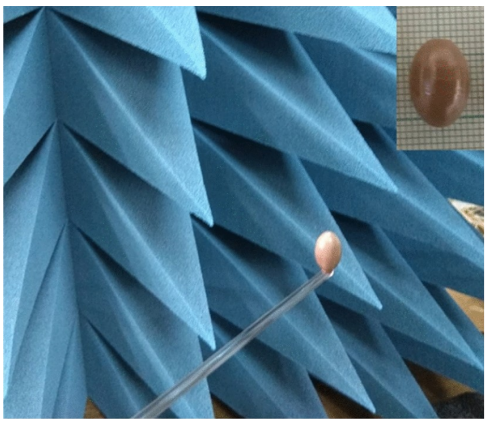


Рис. 2.2.5: Поглощающий материал типа пирамидальные поглотители.

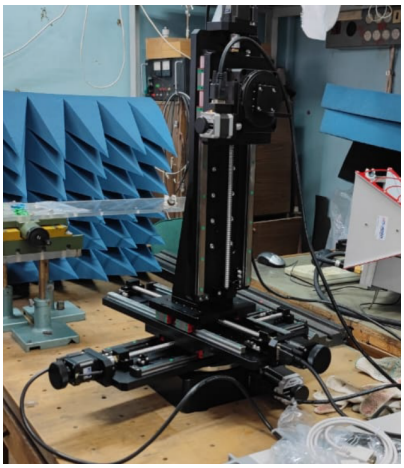


Рис. 2.2.6: Пятиосевой поворотный столик.

ной — все панели могут быть временно демонтированы или перемещены, что обеспечивает удобный доступ для размещения и замены исследуемых образцов.

Диэлектрические элементы

В экспериментах использовался набор тестовых объектов, изготовленных из высокочастотной конденсаторной керамики. Материалом послужила керамика из конденсаторов марки K15V-2 на основе титаната (TiO_2, $CaTiO_3$, $SrTiO_3$), с малыми диэлектрическими потерями. С помощью измерителя емкости и индуктивности E7-8 были определены относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon \approx 1503$ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta \approx 3 \cdot 10^{-4}$. Исследовались структуры из объектов и одиночные объекты со следующих геометрий:

1. Кольца с внешний диаметром 16 мм, внутренним диаметром 10 мм и квадратным поперечным сечением со стороной 3 мм.

2. Кольца с внешним диаметром 38 мм, внутренним диаметром 28 мм и поперечным квадратным сечением со стороной 5 мм.

Плазменный элемент

Для исследований использовались:

- Газоразрядная лампа спиральной формы, выступающая в качестве управляемого плазменного элемента. Диаметр спирали — 16 мм (согласован с диаметром диэлектрического кольца).
- Линейные лампы низкого давления мощностью 12 и 15 Вт, диаметром 12,5 и 26 мм, длиной 370 и 430 мм соответственно.

Расчетная модель

Рассматривается рассеяние плоской монохроматической электромагнитной волны на субволновом диэлектрическом элементе. Электрическое и магнитное поля падающей волны в комплексном представлении описываются выражениями:

$$\mathbf{E}_{\text{inc}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp\left[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)\right], \tag{2.2.1a}$$

$$\mathbf{H}_{\text{inc}}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_0 \exp\left[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)\right]. \tag{2.2.1b}$$

Здесь $\mathbf{E}_0$ и $\mathbf{H}_0$ — амплитуды электрического и магнитного полей, $\mathbf{k}$ — волновой вектор, ω — угловая частота. Физические значения полей определяются действительными частями приведённых выражений.

Распределение электромагнитного поля описывается уравнениями Максвелла:

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu_0\mathbf{H}, \tag{2.2.2a}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega\varepsilon_0\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E} + \mathbf{J}. \tag{2.2.2b}$$

где $\varepsilon(\mathbf{r})$ — комплексная относительная диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 — электрическая постоянная, μ_0 — магнитная постоянная, $\mathbf{J}$ — плотность стороннего электрического тока. При отсутствии сторонних токов $\mathbf{J} = 0$.

В однородной внешней среде поле, рассеянное диэлектрическим элементом, может быть представлено в виде мультипольного разложения по исходящим векторным сферическим волнам:

$$\mathbf{E}_{\text{scat}}(\mathbf{r}) = \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} \left[a_{lm}\mathbf{N}_{lm}^{(3)}(\mathbf{r}) + b_{lm}\mathbf{M}_{lm}^{(3)}(\mathbf{r})\right], \tag{2.2.3a}$$

$$\mathbf{H}_{\text{scat}}(\mathbf{r}) = \frac{k_0}{i\omega\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} \left[a_{lm}\mathbf{M}_{lm}^{(3)}(\mathbf{r}) + b_{lm}\mathbf{N}_{lm}^{(3)}(\mathbf{r})\right]. \tag{2.2.3b}$$

где l — порядок мультиполя, m — азимутальный индекс, a_{lm} и b_{lm} — коэффициенты электрических и магнитных мультипольных составляющих соответственно, $\mathbf{M}_{lm}^{(3)}$ и $\mathbf{N}_{lm}^{(3)}$ — векторные сферические волновые функции магнитного и электрического типов, k_0 — волновое число во внешней среде, которой в данном случае является воздух.

Основное внимание уделялось магнитной дипольной моде, поскольку она вносила наибольший вклад в резонансное рассеяние диэлектрического элемента в области основного резонанса.

Численное моделирование электромагнитного поля проводилось в программном комплексе CST Studio Suite с использованием временного решателя (Time Domain Solver). Частотные характеристики рассеяния определялись на основе преобразования Фурье рассчитанных временных зависимостей электромагнитного поля. Для уменьшения отражений от границ расчётной области использовались поглощающие граничные условия. Применялась адаптивная расчётная сетка с повышенной пространственной детализацией в области диэлектрического элемента.

Глава 3. Траектории заряженных микрочастиц в воздухе

В главе представлены результаты экспериментальных исследований и численных расчётов траекторий движения заряженных микрочастиц оксида алюминия в воздухе в линейной квадрупольной электродинамической ловушке при синусоидальном и знакопеременном прямоугольном напряжении, а также траектории при наложении внешнего прямоугольного электрического поля на ловушку с синусоидальным удерживающим потенциалом.

Расчёт движения заряженных частиц в квадрупольной электродинамической ловушке в вакууме в классическом случае [4] учитывает только две компоненты электрического напряжения на удерживающих электродах — постоянную и переменную. В результате движение зависит только от одного параметра — отношения заряда частицы к её массе — и хорошо описывается уравнениями Матье. В нашем случае существенную роль играют размер частицы и пропорционально зависящая от него сила Стокса.

В воздухе или буферном газе аналитическое решение уравнения Матье с одновременным учётом гравитации и вязкости среды возможно только при уравновешивании силы тяжести постоянной компонентой напряжения [39; 100].

Мы исследуем частицы диаметром 5–100 мкм в квадрупольном переменном поле в воздухе без постоянной электрической компоненты, учитывая и силу тяжести, и силу трения частиц о воздух. В сравнении с ионами и наночастицами масса и размер таких микрочастиц существенно влияют на их траектории в ловушке. В этом случае неприменимы законы подобия, возможен только численный расчёт траекторий [40] и подтверждение численной модели экспериментом.

Помещённые в ловушку заряженные микрочастицы могут длительное время удерживаться в квадрупольном потенциале ловушки, выпадать под нескомпенсированным действием силы тяжести и вылетать или выталкиваться сильным электрическим полем.

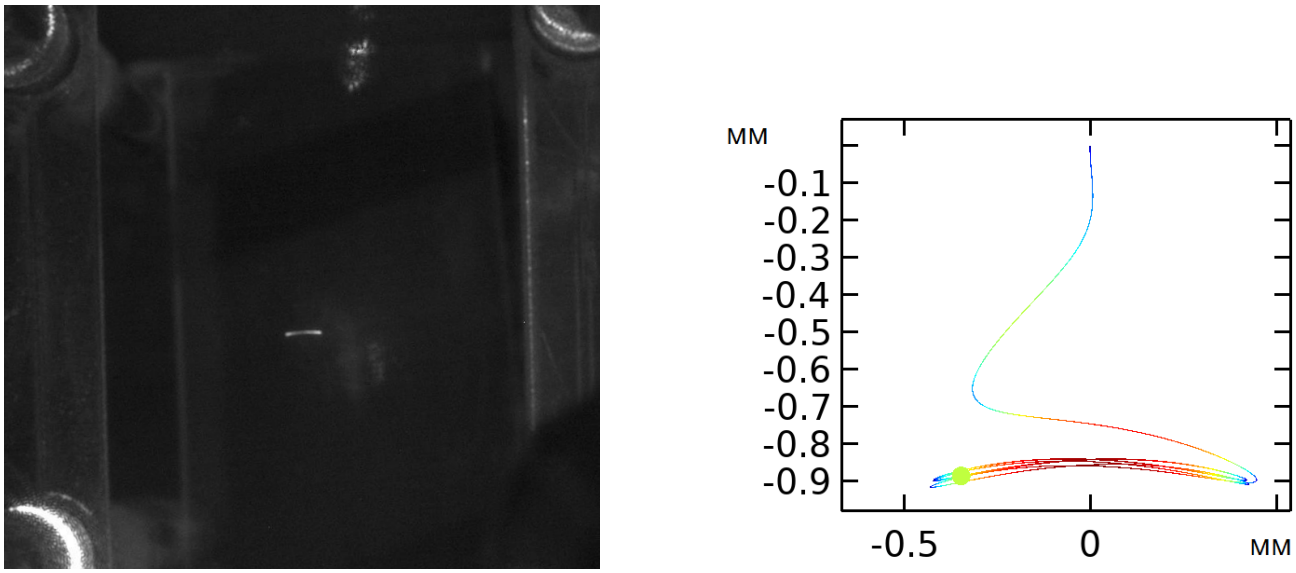
Для всех результатов, приведённых в этой главе, амплитуда удерживающего напряжения на линейных электродах ловушки принималась 5 кВ, частота 50 Гц.

При расчётах в этой главе размер частицы выбран 20 мкм, если не указан иной. В начальный момент времени заряженная частица помещалась в центре ловушки, в точке с координатами $(0, 0)$. Начальная скорость частицы принималась равной нулю. Параметры напряжения на ловушке для расчёта соответствуют схеме эксперимента.

3.1 Динамика частиц с разными зарядами при синусоидальном напряжении

На Рис. 3.1.1а представлена фотография траектории микрочастицы, полученная в эксперименте при тех же значениях амплитуды и частоты синусоидального напряжения, что и в расчёте на Рис. 3.1.1б. В эксперименте одиночная частица, двигавшаяся по такой траектории, оставалась в ловушке в течение нескольких часов. Средняя длина траектории за период составляла около 1 мм, что качественно согласуется с результатами расчёта.

На Рис. 3.1.1б представлена рассчитанная устойчивая траектория частицы с зарядом 98 000 e. Микрочастица быстро, за 3–4 периода, переходит к движению в ограниченной области пространства ловушки. Уже через 1,5 периода её траектория приобретает повторяющийся характер, а среднее положение частицы находится вблизи оси ловушки. Размах колебаний составляет около 1 мм, что значительно меньше расстояния между электродами, поэтому частица остаётся в рабочей области ловушки.



а б

Рис. 3.1.1: Устойчивая траектория заряженной частицы. (а) Эксперимент, средняя длина траектории за период 1 мм; (б) расчет для частицы с зарядом 98 000e. Максимальная скорость (красные участки траектории) 0.2 м/с. Средняя длина траектории за период траектории 1 мм

Цвет расчётной траектории соответствует скорости движения частицы. Синим цветом обозначены участки с минимальной скоростью, красным — с максимальной. Наибольшая скорость частицы достигается при пересечении оси ординат ($x = 0$) и составляет 0,2 м/с (Рис. 3.1.1б).

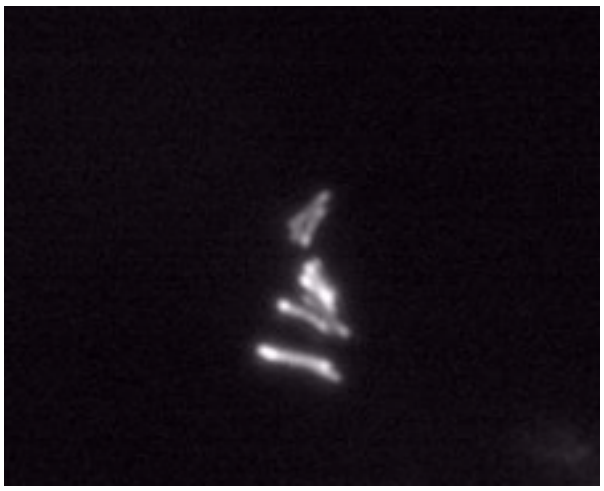
При увеличении заряда на частице — увеличивается её кинетическая энергия, и траектория меняется. Прежде чем достигнуть ограниченной области удержания, частица теряет часть энергии, двигаясь по сужающейся траектории. Траектория постепенно усредняется, переходя из области сильного электрического поля в область слабого.

На Рис. 3.1.2(б) приведён пример расчёта такой траектории для частицы с увеличенным до $135\,000\,e$ зарядом. Под действием силы тяжести в первые 2 периода частица разгоняется и влетает в область, где действие электрического поля сильнее, чем вблизи центра потенциальной ямы. Амплитуда колебаний в эти периоды максимальна. Следующие 10 периодов частица движется по траектории «восьмёрка». Верхний виток — в области слабого поля, скорость на этом участке минимальна, и амплитуда траектории почти в 4 раза меньше амплитуды нижнего витка. Нижний виток — в области сильного электрического поля. На его горизонтальном участке частица достигает максимальной скорости до 0.2 м/с. Амплитуда верхнего витка с каждым полупериодом расширяется, а нижнего сужается. Каждый следующий верхний и нижний виток траектории — ближе к центру восьмёрки, где и находится конечная область устойчивого движения по линейной горизонтальной траектории, как на предыдущем Рис. 3.1.1б.

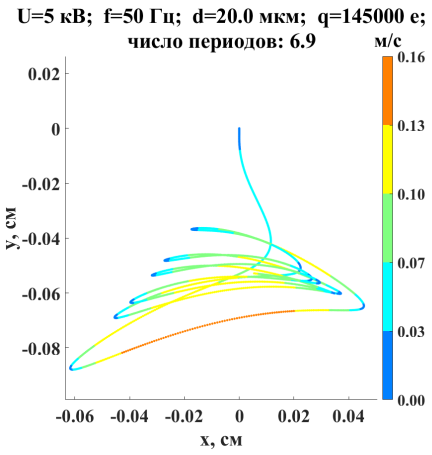
На фото эксперимента Рис. 3.1.2а зафиксированы четыре траектории. Две верхние — соответствуют описанному переходному процессу. Две нижние — уже устойчивые колебания, аналогичные Рис. 3.1.1б. Фиксирование таких траекторий и учёт времени их стабилизации важно для формирования устойчивых кулоновских структур.

Продолжая увеличивать заряд частицы или её кинетическую энергию, наблюдаем всё ещё устойчивую траекторию, развивающуюся в виде четырёхугольной кривой (Рис. 3.1.3).

На Рис. 3.1.3(б) приведена расчётная траектория удержания частицы с зарядом $145\,000\,e$. Характер её развития принципиально отличен от Рис. 3.1.2. Уже в первый полупериод траектория отклоняется от вертикального направления, заданного гравитацией. Разгоняясь в области слабого поля по спиральной четырёхугольной траектории, за 6 периодов частица достигает максимальной амплитуды, каждые полпериода меняя направление движения. В отличие от Рис. 3.1.2(б), до выхода на устойчивую четырёхугольную орбиту каждый следующий виток лежит дальше предыдущего от центра ловушки. Достигнув максимального размаха, частица движется в окрестности четырёхугольной кривой с максимальной амплитудой. Геометрический центр четырёхугольника расположен ниже центра ловушки, это объясняется действием силы тяжести. Стороны четырёхугольной траектории несимметричны, нижняя шире верхней, как и в случае «восьмёрки» на Рис. 3.1.2(б). Такая траектория находится на границе устойчивости, незначительное увеличение амплитуды напряжения или



а



б

Рис. 3.1.2: Пример сужающихся траекторий частиц в ловушке. (а) Эксперимент. Сверху вниз: первая и вторая сужающиеся траектории соответствует расчетной справа, третья - четвертая — устойчивое движение по линии аналогично Рис.3.1.1б; (б) расчет для частицы с зарядом 135 000 e. Средняя длина траектории за период вдоль оси x до 1.2 мм, вдоль оси y — до 0,6 мм; Время расчета 15 периодов. Максимальная скорость 0.2 м/с.

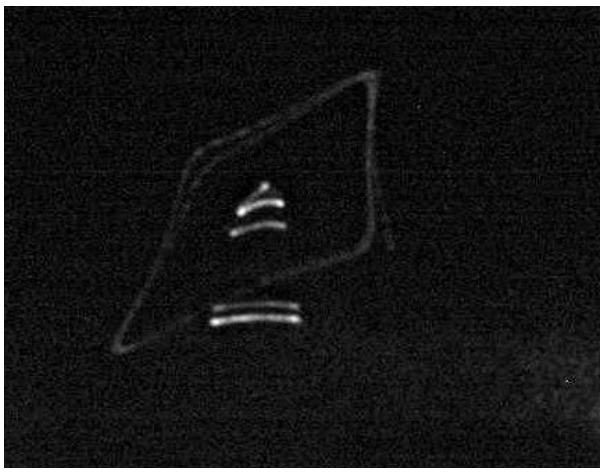
заряда приводит к вылету.

На Рис. 3.1.3(а) приведена фотография эксперимента с новой четырёхугольной устойчивой траекторией и одновременно траекториями, развивающимися аналогично Рис. 3.1.1(а) — Рис. 3.1.2(а). Одновременное развитие различных траекторий удержания возможно в силу полидисперсности частиц. У всех частиц на Рис. 3.1.3(а) разное отношение заряда к массе. Подобные четырёхугольные траектории характерны для движения частиц в вакууме и, как мы показали, могут быть достигнуты и в воздухе при атмосферном давлении.

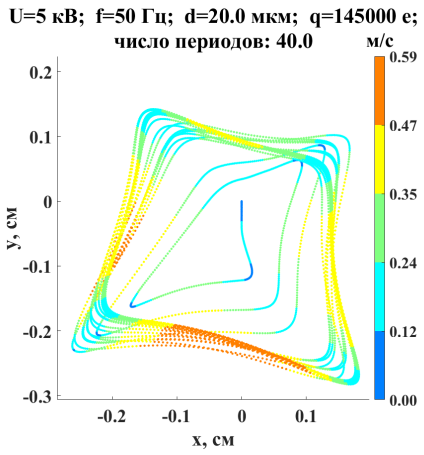
На Рис. 3.1.4 показаны неустойчивые траектории движения микрочастиц, завершающиеся вылетом из ловушки (Рис. 3.1.4б) или столкновением с электродом (Рис. 3.1.4в).

На Рис. 3.1.4б и Рис. 3.1.4в показаны расчётные траектории частиц с зарядами 149 000 e и 155 500 e соответственно. Аналогичное развитие неустойчивых траекторий может наблюдаться при увеличении напряжения на электродах ловушки, что подробно рассмотрено в разделе 3.3.

Под действием электрического поля частицы удаляются от центра ловушки по расширяющимся прямоугольным спиралеобразным траекториям, аналогичным представленной на Рис. 3.1.3б. При этом размах колебаний постепенно увеличивается, что приводит к вылету частицы из ловушки или её столкновению с электродом. Направление движения изменяется каждые полпериода, а каждый последующий виток траектории располагается дальше от



а



б

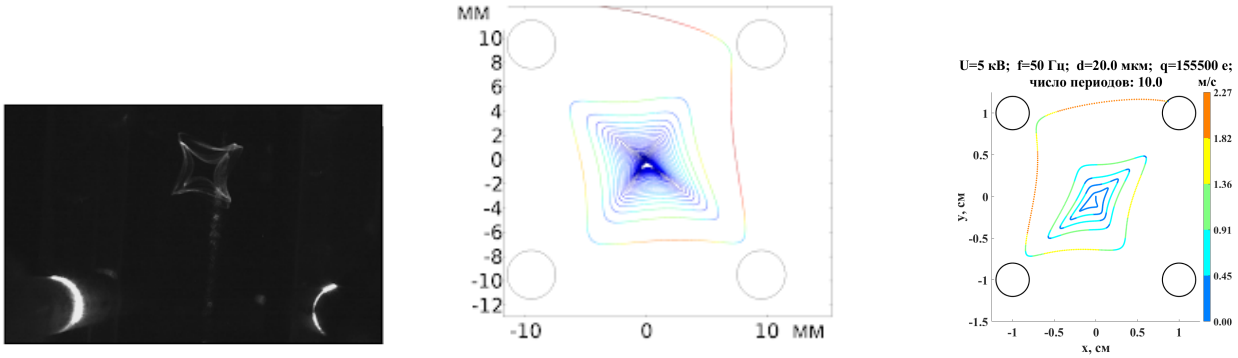
Рис. 3.1.3: Пример четырехугольной траектории. (а) Эксперимент. В центре — треугольная траектория, аналогичная Рис. 3.1.2б; ниже — три линейные горизонтальные траектории, аналогичные Рис. 3.1.1; четырехугольная траектория соответствует расчету справа; (б) Расчет для частицы с зарядом 145 000 e. Средняя длина траектории за период вдоль оси x — около 4,3 мм, вдоль оси y — около 4 мм. Максимальная скорость 0,6 м/с.

центра ловушки и характеризуется большей амплитудой колебаний. По мере приближения к электродам частица может либо выйти за пределы области удержания, либо столкнуться с электродом. В последнем случае контакт с электродом может привести к изменению заряда частицы и её последующему вылету из ловушки.

Анализ расчётных траекторий на Рис. 3.1.4б и Рис. 3.1.4в показывает, что с увеличением заряда частицы относительно значений, соответствующих устойчивому удержанию, неустойчивость развивается быстрее, а расстояние между последовательными витками траектории возрастает. Это связано с увеличением электрической силы, действующей на частицу при неизменных параметрах поля.

На экспериментальной фотографии Рис. 3.1.4а зафиксирован процесс развития неустойчивой траектории. Различимы два последовательных витка, причём второй расположен значительно выше первого и имеет больший размах. Углы четырёхугольной траектории отчётливо выражены, поскольку, как и в расчёте, вблизи крайних точек движения скорость частицы уменьшается.

При уменьшении заряда частицы относительно значения, при котором наблюдается устойчивая линейная траектория, удержание нарушается и частица выпадает из ловушки под действием силы тяжести (Рис. 3.1.5). Это происходит, когда электрических сил ловушки недостаточно для компенсации влияния силы тяжести и обеспечения устойчивого движения



а б в

Рис. 3.1.4: Пример неустойчивых траекторий: (а) эксперимент; (б) расчет для частицы с зарядом 149 000 e. Вылет из ловушки за 25 периодов. Максимальная скорость 2,2 м/с; (в) расчет для частицы с зарядом 155 500 e. Столкновение с электродом за 10 периодов. Максимальная скорость 2,3 м/с.

частицы при данном соотношении её заряда и массы.

На Рис. 3.1.5б представлен пример расчётной траектории падения частицы с зарядом 40 000 e. Под действием силы тяжести частица выходит из области удержания, первоначально двигаясь практически вертикально вниз. По мере удаления от центра ловушки на траектории возникают горизонтальные колебания с увеличивающейся амплитудой. При этом сохраняется направленная вниз вертикальная составляющая скорости.

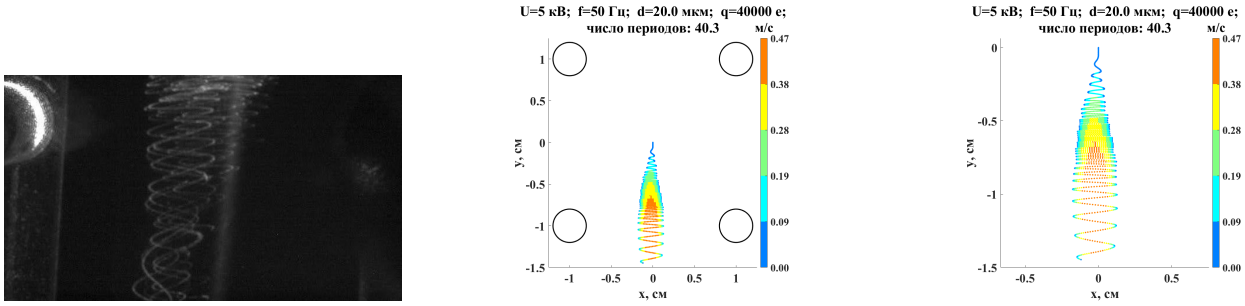
В течение первых 15 периодов движение частицы характеризуется преобладающим вертикальным смещением, что свидетельствует о недостаточном влиянии электрического поля для её удержания. Это проявляется в значительном расстоянии между соседними витками траектории по вертикали. По мере приближения к области более сильного электрического поля вблизи электродов вертикальная составляющая скорости уменьшается, а горизонтальные колебания становятся более выраженными. В результате соседние витки траектории располагаются ближе друг к другу. На этом участке амплитуда горизонтальных колебаний увеличивается медленно.

На Рис. 3.1.5в в пределах каждого витка траектории выделяются три области, различающиеся скоростью движения частицы. На двух крайних участках частица замедляется, тогда как на среднем участке её скорость достигает значений 0,38–0,47 м/с, близких к максимальной скорости за время расчёта. При этом амплитуда горизонтальных колебаний на данном участке траектории изменяется незначительно.

При дальнейшем приближении к уровню нижних электродов амплитуда горизонтальных колебаний уменьшается, а вертикальная составляющая скорости, направленная вниз, вновь возрастает. Несмотря на периодическое изменение скорости под действием переменного элек-

трического поля, частица продолжает опускаться и в итоге покидает ловушку.

Таким образом, при недостаточном заряде частицы электрическое поле не обеспечивает её устойчивого удержания. Падение сопровождается сложной траекторией, на которой участки преимущественно вертикального движения чередуются с участками выраженных горизонтальных колебаний, обусловленных неоднородностью переменного электрического поля ловушки.



а б в

Рис. 3.1.5: Пример траектории падения частиц из ловушки под действием силы тяжести. (а) Эксперимент. (б)–(в) Расчет для частицы с зарядом 40 000 e в разном масштабе. Максимальная скорость 0,47 м/с.

На фото эксперимента Рис. 3.1.5а траектории падения частиц наблюдаются в первые несколько секунд после заполнения ловушки полидисперсной смесью заряженных микрочастиц. В области выше нижних электродов амплитуда траекторий растёт, и горизонтальные участки траекторий расположены близко друг к другу. Это подтверждает расчётные данные, где в предэлектродной области вертикальная компонента скорости уменьшается, а горизонтальная увеличивается. С приближением к уровню нижних электродов амплитуда траектории уменьшается, а вертикальная компонента скорости увеличивается, и витки расположены более свободно. Частицы с недостаточным зарядом покидают ловушку. Рассмотренных траекторий можно достичь и уменьшением амплитуды удерживающего напряжения.

Мы рассмотрели и подтвердили совпадение траекторий, рассчитанных численным моделированием, и фиксируемых при эксперименте с классическим синусоидальным напряжением на электродах.

Влияние размера частицы на ее движение в линейной электродинамической ловушке при постоянном отношении заряда к массе

Влияние размера частицы на её движение в линейной электродинамической ловушке при постоянном отношении заряда к массе

Рассмотрим влияние радиуса частицы при одинаковом отношении заряда к массе. Для

исследования влияния размера частицы на характер движения рассчитаны траектории для частиц с одинаковым отношением заряда к массе. За исходный случай принята частица оксида алюминия диаметром 20 мкм, массой 1.65×10^{-8} г и зарядом $98\,000\,e$, для которой уже рассчитана устойчивая траектория (Рис. 3.1.1б). Масса и заряд частицы изменялись в N раз так, чтобы отношение

$$\frac{N \cdot q}{N \cdot m} = const$$

оставалось постоянным. Поскольку масса сферической частицы связана с её размером кубической степенью, сила трения менялась пропорционально.

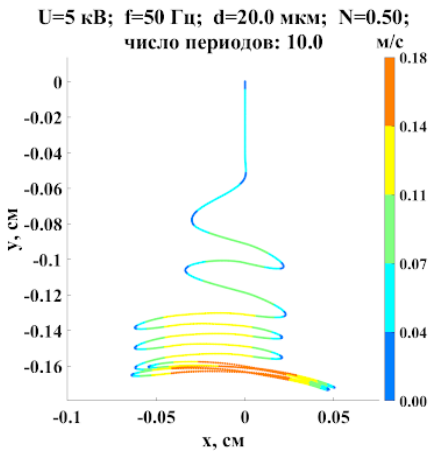
Множитель N изменялся в диапазоне от 0.5 до 5 с шагом 0.25. Расчёт показал, что с ростом массы частицы меняется и форма траектории. При N от 0.5 до 1.75 (Рис. 3.1.6а — Рис. 3.1.6в) электродинамические силы ловушки превышают гравитационные, и через определённое число периодов колебательное движение частицы устанавливается.

При дальнейшем повышении N частица не приходит в состояние равновесия, и развивается неустойчивость, в результате чего размах траектории возрастает, скорость превышает 2 м/с, и частица после достижения электродов либо прилипает к ним, либо вылетает из ловушки, как на Рис. 3.1.6г ($N = 2.75$).

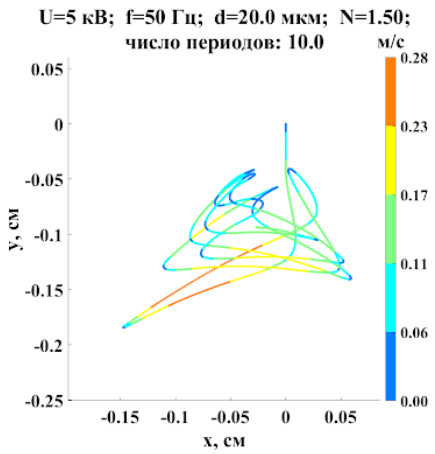
Для сравнения с удержанием частиц в вакууме, в отсутствие силы трения, построены траектории для частицы размером 20 мкм. Изменение множителя для массы и заряда никак не меняет динамики частицы.

На Рис. 3.1.7 показаны примеры рассчитанных траекторий для заряда $98\,000\,e$ и заряда $55\,000\,e$ соответственно. В отсутствие силы трения устойчивая траектория развивается как неустойчивая траектория вылета. При уменьшении заряда до $55\,000\,e$ частица двигается по несимметричной восьмёрке на протяжении нескольких сотен периодов.

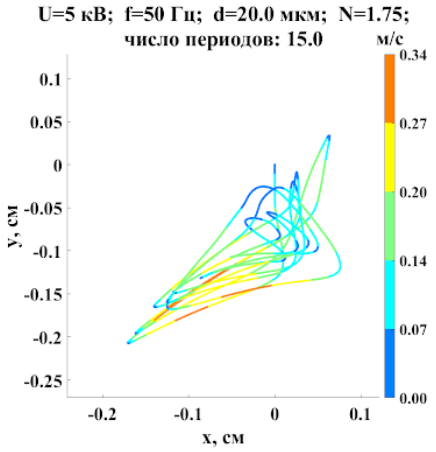
Рассчитаны траектории для постоянного отношения $q/m = 5 \times 10^{15}$ e/кг и разных размеров частиц. Для размера 5 мкм такое отношение достигается при $1\,305\,e$, для размера 20 мкм — при $83\,565\,e$, для 35 мкм — $447\,870\,e$, для 50 мкм — $1\,305\,700\,e$.



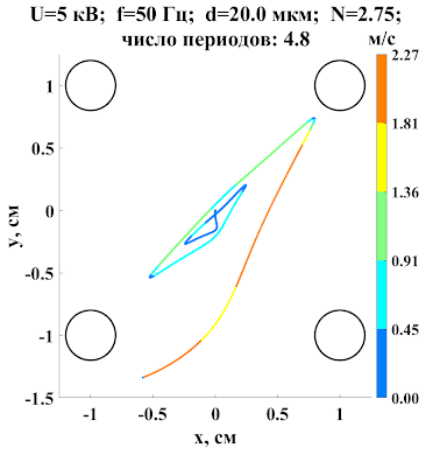
а



б

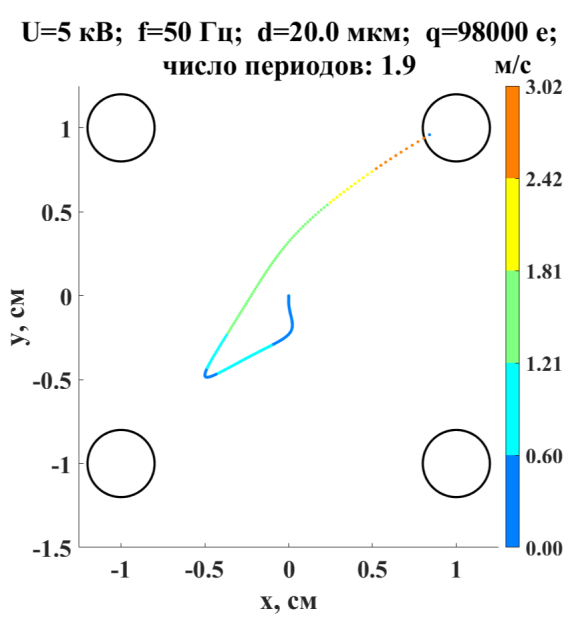


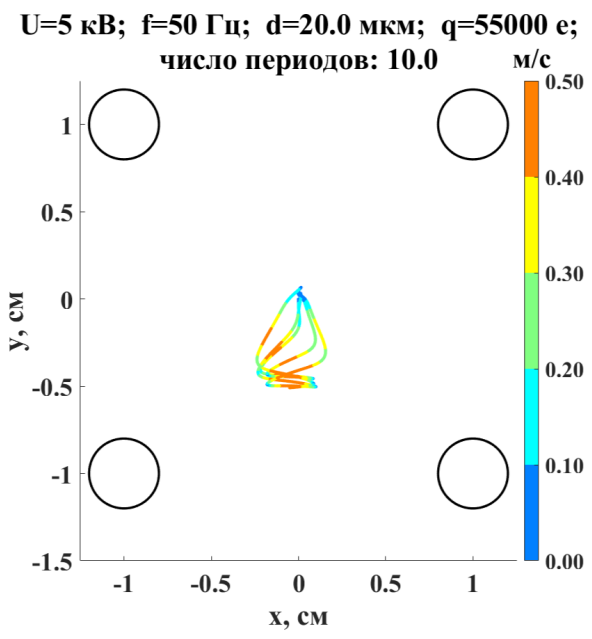
в



г

Рис. 3.1.6: Траектории частицы диаметром 20 мкм при увеличении её заряда и массы в N раз, где N равно: (а) 0.5. Средняя длина траектории за период вдоль оси x — 7 мм; (б) 1.5. Средняя длина траектории за период вдоль оси x — 16 мм, вдоль оси y — 8 мм; (в) 1.75. Средняя длина траектории за период вдоль оси x — 17 мм, вдоль оси y — 15 мм; (г) 2.75. Средняя длина траектории за период вдоль оси x — 9 мм, вдоль оси y — 13 мм.





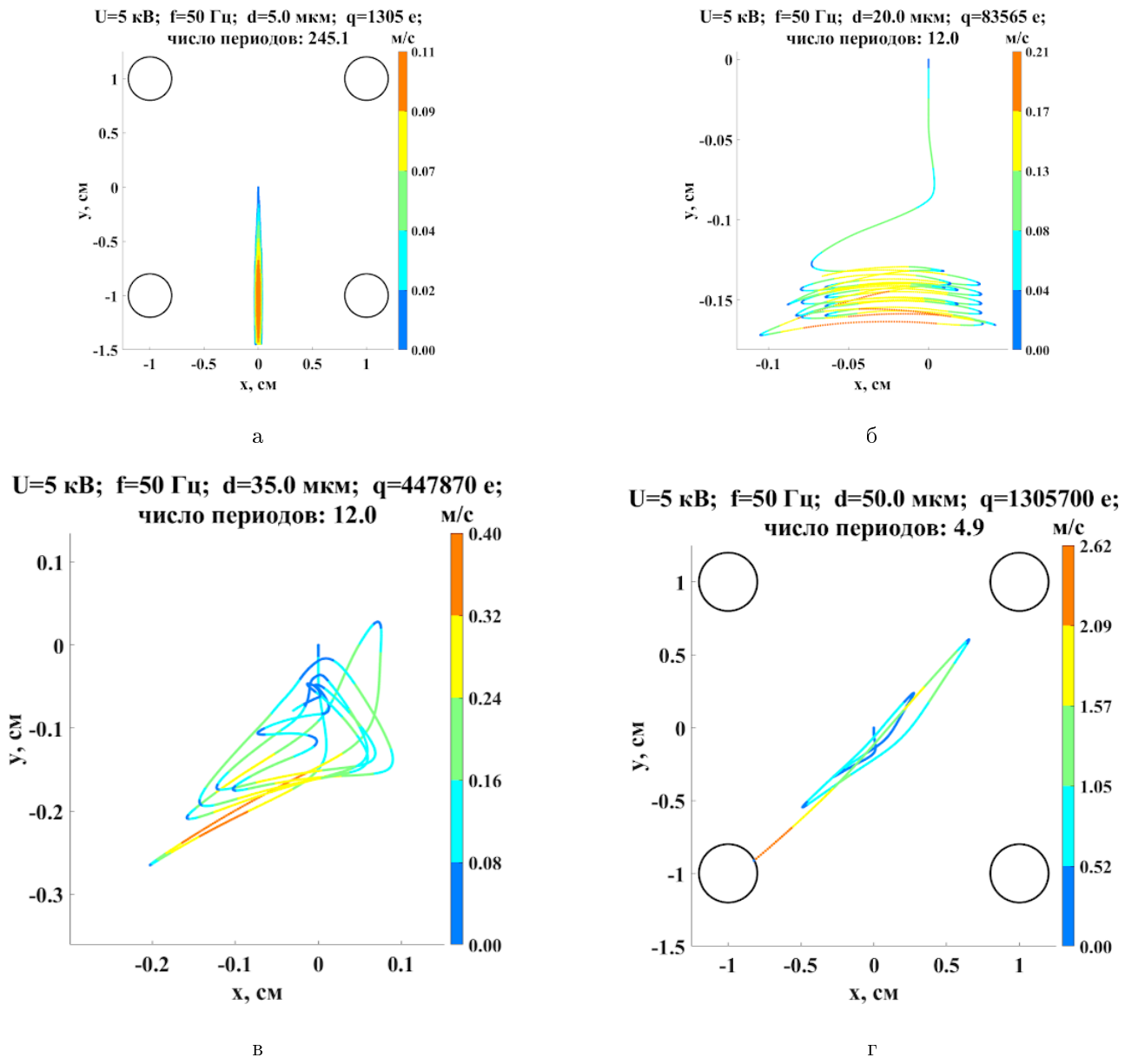


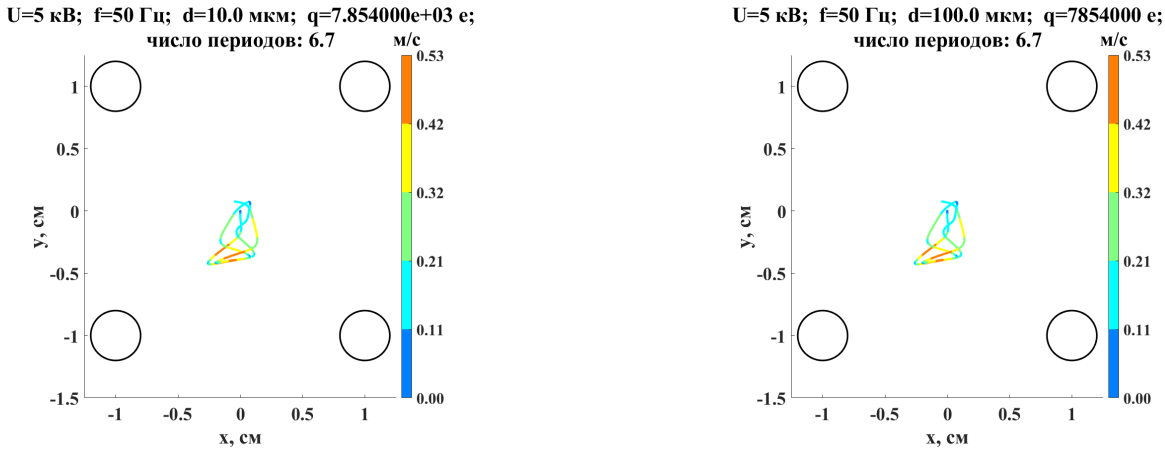
Рис. 3.1.8: Траектории частиц в воздухе при постоянном отношении $q/m = 5{\times}10^{15}$ e/кг и размерах: (а) 5 мкм; (б) 20 мкм; (в) 35 мкм; (г) 50 мкм.

На Рис. 3.1.8 показаны траектории в воздухе для разных размеров. При 5 мкм (Рис. 3.1.8а) получаем траекторию падения из ловушки. При 20 мкм (Рис. 3.1.8б) — траектория устойчивого движения в ограниченной области пространства ловушки. Траектория постепенного сужения при размере 35 мкм (Рис. 3.1.8в). Для размера 50 мкм — траектория неустойчивая (Рис. 3.1.8г).

На Рис. 3.1.9 показаны траектории в вакууме при том же отношении $q/m = 10^{16}$ e/кг для размеров 10 и 100 мкм. Траектории в вакууме одинаковы.

Таким образом, можно заключить, что границы устойчивости для заряженных частиц в электродинамических ловушках в воздухе при атмосферном давлении зависят не только

от отношения q/m, но и от размеров микрочастиц. Области удержания уже не могут быть описаны диаграммами Айнса — Стретта и требуют индивидуального расчёта для каждого размера.



а б

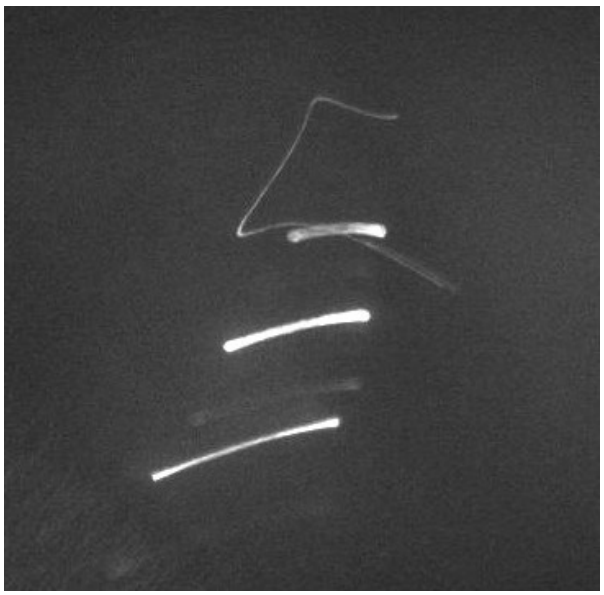
Рис. 3.1.9: Траектории частиц в вакууме при постоянном отношении $q/m = 10^{16}$ e/кг и размерах: (а) 10 мкм; (б) 100 мкм.

3.2 Динамика частиц с разными зарядами при знакопеременном напряжении прямоугольной формы (меандр)

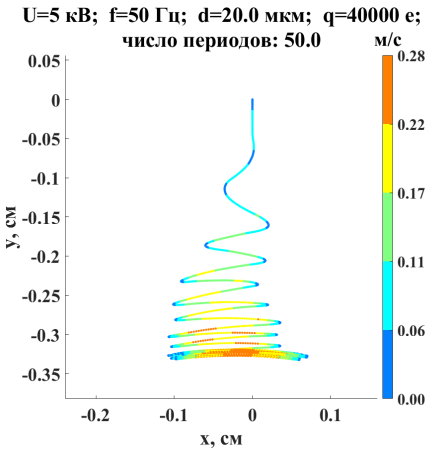
При прямоугольном знакопеременном удерживающем напряжении на электродах квадрупольной ловушки в воздухе частицы могут вылетать, удерживаться или под действием силы тяжести достигать уровня нижних электродов и покидать ловушку. В отличие от синусоидального напряжения, где максимальная амплитуда достигается на короткое время от всего периода, напряжение прямоугольной формы действует с почти одинаковой амплитудой на протяжении каждого полупериода. Можно предположить, что вылетать и удерживаться в ловушке частицы будут за меньшее число периодов и при меньших значениях напряжения или заряда.

Это предположение подтверждает расчёт для частицы со значением заряда 40 000 e, при котором в предыдущем разделе реализовывалась траектория падения под действием силы тяжести (Рис. 3.1.5б).

Рис. 3.2.1 Пример устойчивой траектории. (а) Эксперимент. В верхней части снимка траектория вылета; три линии — траектории удержания, соответствуют расчёту. (б) Расчёт для частицы с зарядом 40 000 e. Средняя длина траектории за период 2 мм. Максимальная скорость 0.28 м/с.



а



б

Рис. 3.2.1: Пример устойчивой траектории. (а) Эксперимент. В верхней части снимка траектория вылета; три линии — траектории удержания, соответствуют расчёту. (б) Расчёт для частицы с зарядом 40 000 e. Средняя длина траектории за период 2 мм. Максимальная скорость 0.28 м/с.

На расчётной траектории Рис. 3.2.1б под действием силы тяжести микрочастица опускается в область слабого электрического поля и выходит на режим ограниченных колебаний на уровне 350 мкм ниже центра ловушки. Максимальная скорость частицы 0.28 м/с. Изначально преобладающая вертикальная компонента скорости уменьшается, на это указывают увеличение амплитуды и рост скорости на горизонтальных линейных участках траектории.

На фотографии эксперимента Рис. 3.2.1а зафиксированы три устойчивые линейные траектории для полидисперсных частиц с разным уровнем энергии. Чем больше масса частицы и меньше заряд, тем большее значение электрического поля требуется для её устойчивого удержания. Аналогичный снимок эксперимента с несколькими устойчивыми линейными траекториями, смещёнными по вертикали ниже центра ловушки, мы видели на Рис. 3.1.3а. И теперь рассмотрели динамику более детально.

При дальнейшем увеличении заряда частицы в ловушке с прямоугольным удерживающим напряжением наблюдаются изменения траекторий, связанные с более продолжительным воздействием электрического поля максимальной амплитуды.

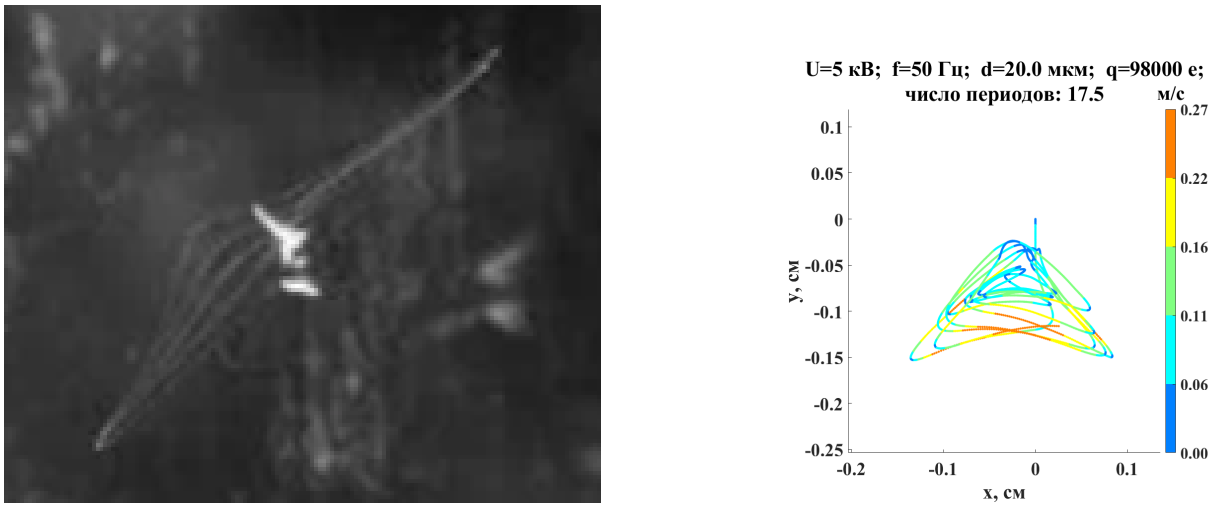
На Рис. 3.2.2б ппоказана траектория частицы с зарядом 98 000 e, при котором в случае синусоидального напряжения частица за 3 периода достигала устойчивой линейной траектории (Рис. 3.1.1б). В случае прямоугольного напряжения частица развивает постепенно сужающуюся к области удержания траекторию «восьмёрки», схожую с Рис. 3.1.2б, когда

при синусоидальном напряжении заряд частицы увеличен до 135 000 e.

Влияние импульсного прямоугольного напряжения с резкой сменой полярности отражается и на внешнем виде траектории. Смены направления движения более резкие, и результирующая траектория напоминает два совмещённых прямоугольных треугольника, гипотенузы которых направлены от центра ловушки к нижним электродам.

На фото эксперимента Рис. 3.2.2а в верхней части снимка яркое треугольное пятно с острыми краями соответствует рассчитанной траектории, и размах в 2 мм качественно его подтверждает.

Неустойчивые траектории вылета и столкновения с электродом при прямоугольном напряжении также достигаются при меньших значениях заряда на частице.

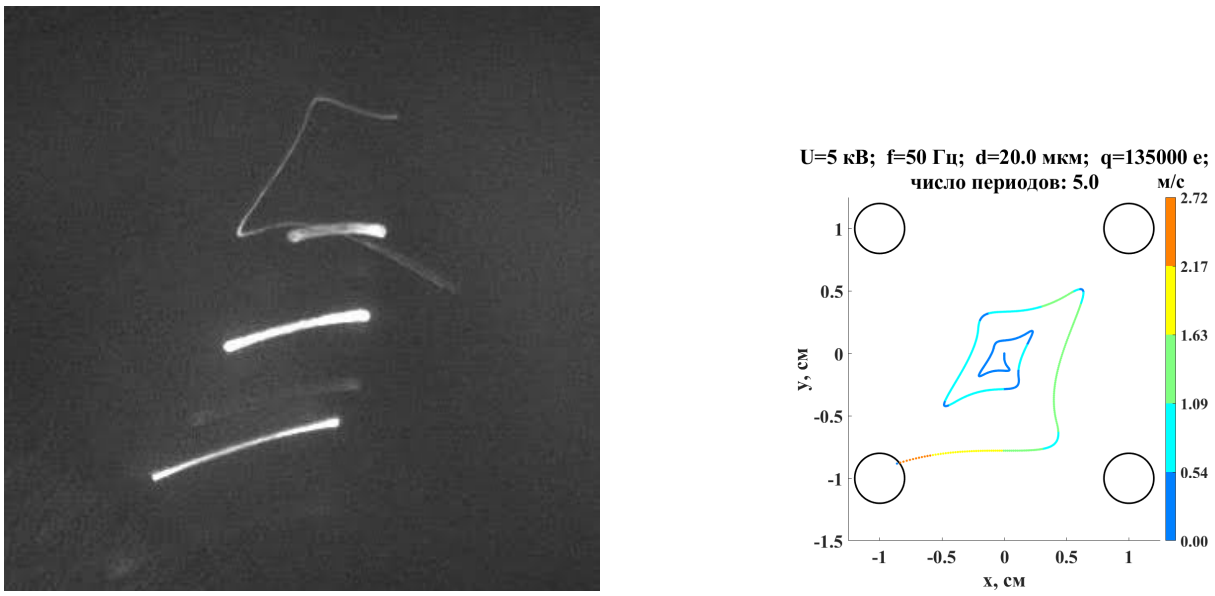


а б

Рис. 3.2.2: Пример сужающейся траектории. (а) Эксперимент. Средняя длина траектории за период 2 мм. (б) Расчёт для частицы размером 20 мкм, заряд 98 000 e. Максимальная скорость (красные участки траектории) 0.27 м/с.

На Рис. 3.2.3б показана неустойчивая траектория частицы с зарядом 135 000 e. Для синусоидального напряжения при таком заряде развивается сужающаяся устойчивая траектория (Рис. 3.1.2б). При прямоугольном напряжении частица за 5 периодов достигает межэлектродной области и покидает ловушку. Максимальная скорость частицы достигает 2.72 м/с и наблюдается непосредственно перед вылетом. Для сравнения, при синусоидальном напряжении подобная траектория вылета реализуется при большем заряде 155 500 e (Рис. 3.1.4в), а вылет происходит примерно за 10 периодов.

Траектории падения при прямоугольном напряжении под действием силы тяжести развиваются при меньших значениях заряда по сравнению с синусоидальным напряжением.



а б

Рис. 3.2.3: Динамика вылета. Прямоугольное напряжение. Амплитуда 5 кВ, частота 50 Гц. (а) Эксперимент: в верхней части снимка траектория вылета; три линии — траектории удержания, соответствующие расчёту (Рис. 3.2.1б); (б) Расчёт для частицы размером 20 мкм, заряд 135 000 e. Вылет за 5 периодов. Максимальная скорость (красные участки траектории) 2.72 м/с.

На Рис. 3.2.4 приведён пример расчётной траектории частицы с зарядом 30 000 e. Основные этапы развития траектории схожи с рассмотренной ранее для синусоидального напряжения (Рис. 3.1.5).

В течение первых 10 периодов частица разгоняется с большей вертикальной составляющей скорости и увеличением амплитуды траектории. Замедляясь в вертикальном направлении, частица отклоняется в сторону левого электрода. На участке ниже 0.5 см от центра ловушки отмечено нетипичное для выпадения при синусоидальном напряжении ускорение на краях горизонтальных участков траектории, вызванное большей длительностью действия напряжения максимальной амплитуды. Далее до достижения уровня электродов участки с высокой скоростью 0.4–0.5 м/с объединяются. На уровне нижних электродов электрическое поле слабеет, и гравитация вновь ускоряет частицу до полного падения из ловушки.

Основное отличие при переходе от синусоидального напряжения к прямоугольному заключается в том, что для достижения одинакового характера движения при прямоугольном напряжении требуется меньший заряд, чем при синусоидальном напряжении. Подробнее границы удержания будут рассмотрены в Главе 4.

Дополнительно рассмотрим движение фрагмента кулоновской системы в квадрупольной ловушке на Рис. 3.2.5. На снимках видно, что, смещаясь относительно центра ловушки,

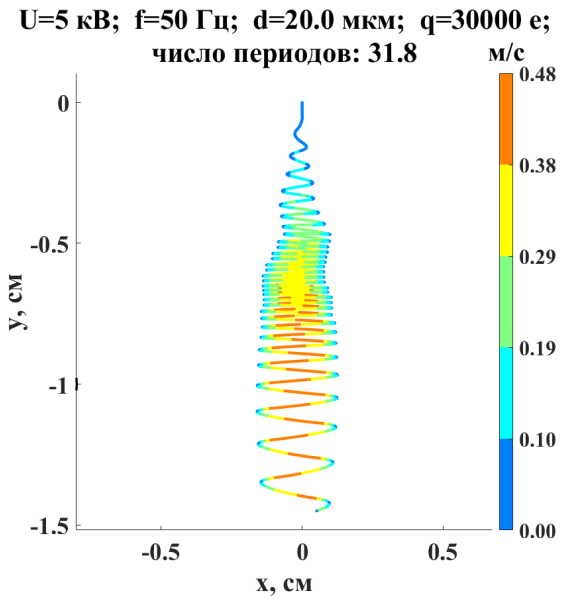
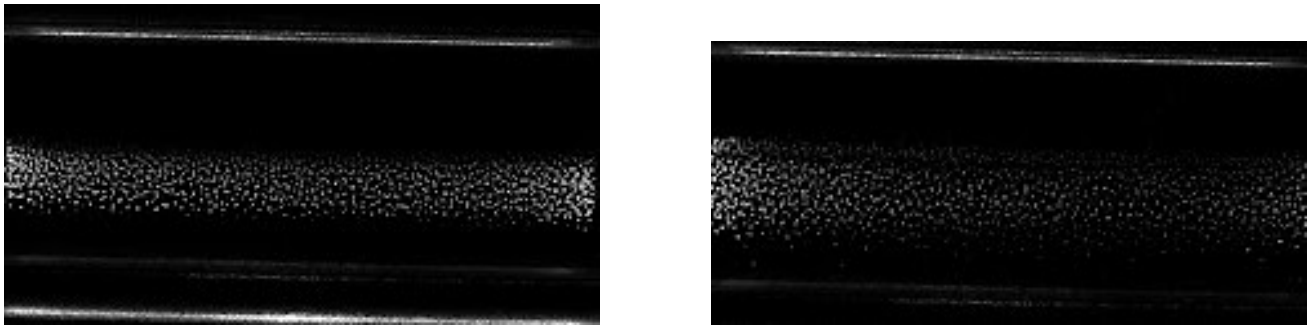


Рис. 3.2.4: Расчёт траектории падения частицы с зарядом 30 000 e. Максимальная скорость 0.48 м/с.

система ведёт себя как единое целое, и частицы удерживаются сильным кулоновским взаимодействием.



а б

Рис. 3.2.5: Снимки фрагмента кулоновской системы с разницей в 0.5 с.

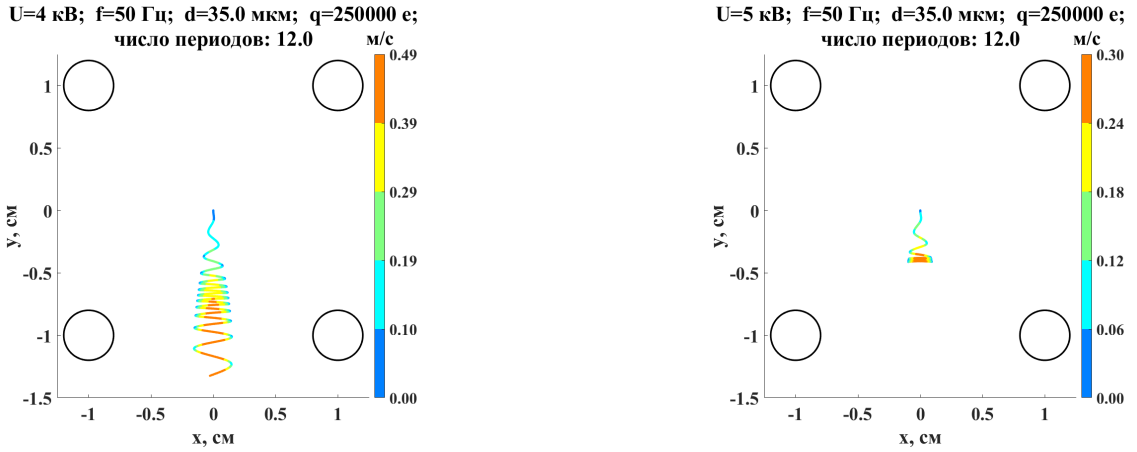
3.3 Динамика частиц при изменении амплитуды синусоидального и прямоугольного напряжения

Управлять динамикой частиц в ловушке возможно не только изменением заряда самих частиц, что практически трудноосуществимо для полидисперсной смеси, но и меняя параметры удерживающего напряжения на электродах.

При одинаковых значениях заряда на частице с уменьшением амплитуды синусоидального и прямоугольного напряжения наблюдаем разную динамику. При прямоугольном напряжении частица сохраняет устойчивость при меньших амплитудах, чем при синусоидальном.

На Рис. 3.3.1 и Рис. 3.3.2 приведены примеры траекторий частицы диаметром 35 мкм и зарядом 250 000 e при синусоидальном и прямоугольном напряжении частотой 50 Гц.

На Рис. 3.3.1а при синусоидальном напряжении амплитудой 4 кВ развивается траектория падения частицы из ловушки под действием силы тяжести, тогда как при амплитуде 5 кВ (Рис. 3.3.1б) частица переходит к устойчивому движению в ограниченной области ловушки. В этом случае электрическое поле обеспечивает более эффективную компенсацию силы тяжести, вследствие чего частица за 4 периода достигает области своего удержания в ловушке и далее колеблется в ограниченной области.



а б

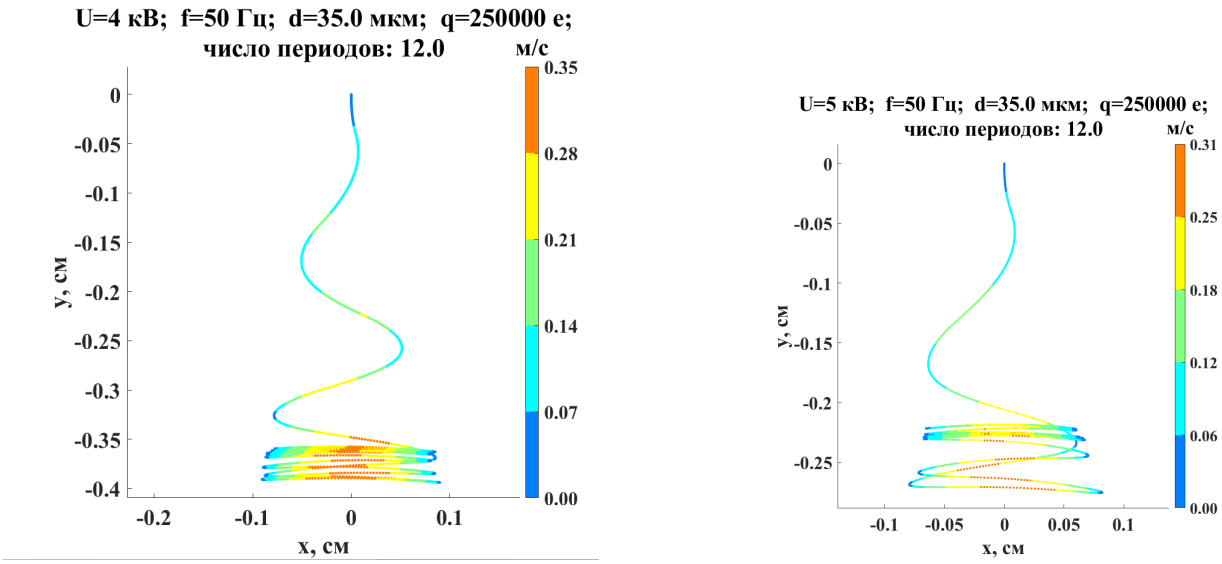
Рис. 3.3.1: Расчёт траектории частицы при амплитуде синусоидального напряжения: (а) 4 кВ — выпадание частицы за 12 периодов, максимальная скорость 0.49 м/с; (б) 5 кВ — удержание частицы в ограниченной области ловушки, время расчёта 12 периодов, максимальная скорость 0.30 м/с.

Для той же частицы при прямоугольном напряжении на Рис. 3.3.2 удержание наблюдается и при амплитуде 5 кВ, и при амплитуде 4 кВ.

Сопоставление рисунков показывает, что прямоугольное напряжение обеспечивает удержание частицы при меньших амплитудах по сравнению с синусоидальным. На основе полученных результатов смоделирована возможность стабилизации частицы сменой формы напряжения с синусоидальной на прямоугольную.

На Рис. 3.3.3 красным цветом показан участок траектории при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц и амплитудой 4 кВ. За четыре периода частица постепенно смещается вниз относительно центра ловушки и достигает положения около 0.5 см ниже оси электродной системы. Такое движение соответствует развитию неустойчивости, приводящей к последующему выпаданию частицы.

После этого форма напряжения изменялась с синусоидальной на прямоугольную при тех



а б

Рис. 3.3.2: Расчёт траектории частицы при амплитуде прямоугольного напряжения: (а) 4 кВ — удержание частицы в ограниченной области ловушки. Максимальная скорость 0.35 м/с; (б) 5 кВ — удержание частицы в ограниченной области ловушки, максимальная скорость 0.31 м/с.

же параметрах напряжения. Соответствующий участок траектории показан синим цветом. Характер движения частицы существенно изменяется. Вместо дальнейшего смещения вниз частица начинает перемещаться в сторону центра ловушки и за последующие четыре периода поднимается до уровня около 0.3 см ниже оси электродов.

Таким образом, расчёт демонстрирует возможность стабилизации движения частицы путём замены синусоидального удерживающего напряжения на прямоугольное при сохранении той же амплитуды и частоты.

Полученные результаты численного моделирования показывают, что при одинаковых параметрах частицы прямоугольное напряжение обеспечивает удержание при меньших амплитудах по сравнению с синусоидальным. Для проверки этого вывода были выполнены дополнительные расчёты и проведено сопоставление с экспериментальными данными. Рассмотрим динамику частиц при последовательном уменьшении напряжения от 5 кВ до покидания ловушки под действием силы тяжести.

Для численного моделирования была выбрана частица диаметром 9 мкм. Заряд частицы принимался равным $47\,000\,e$. Начальное положение частицы задавалось в центре ловушки, а начальная скорость принималась равной нулю.

Результаты расчётов для синусоидального напряжения представлены на Рис. 3.3.4. Показаны участки траектории микрочастицы (а не вся траектория целиком) после уменьшения

амплитуды синусоидального удерживающего напряжения. Это сделано для более удобного рассмотрения динамики частицы после каждого изменения траектории в подходящем масштабе.

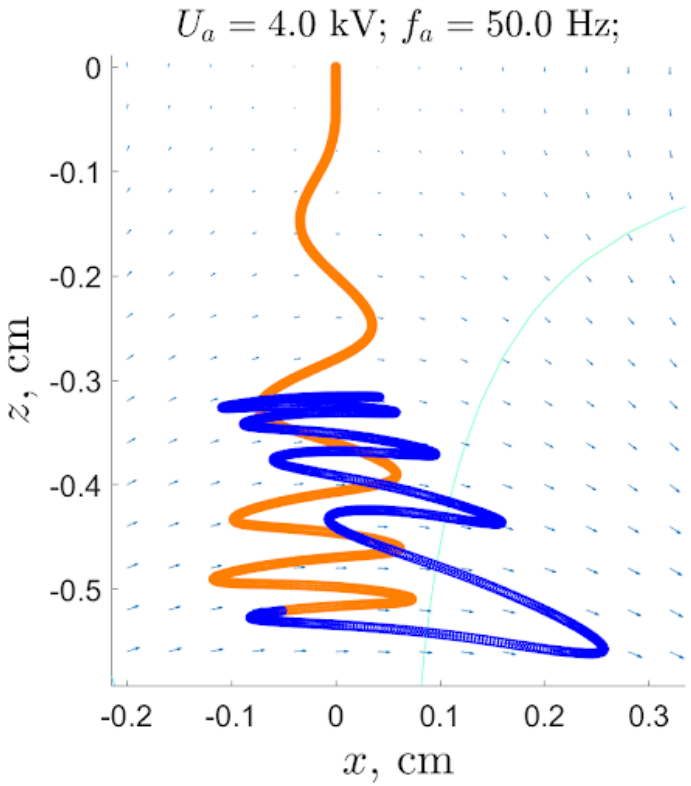


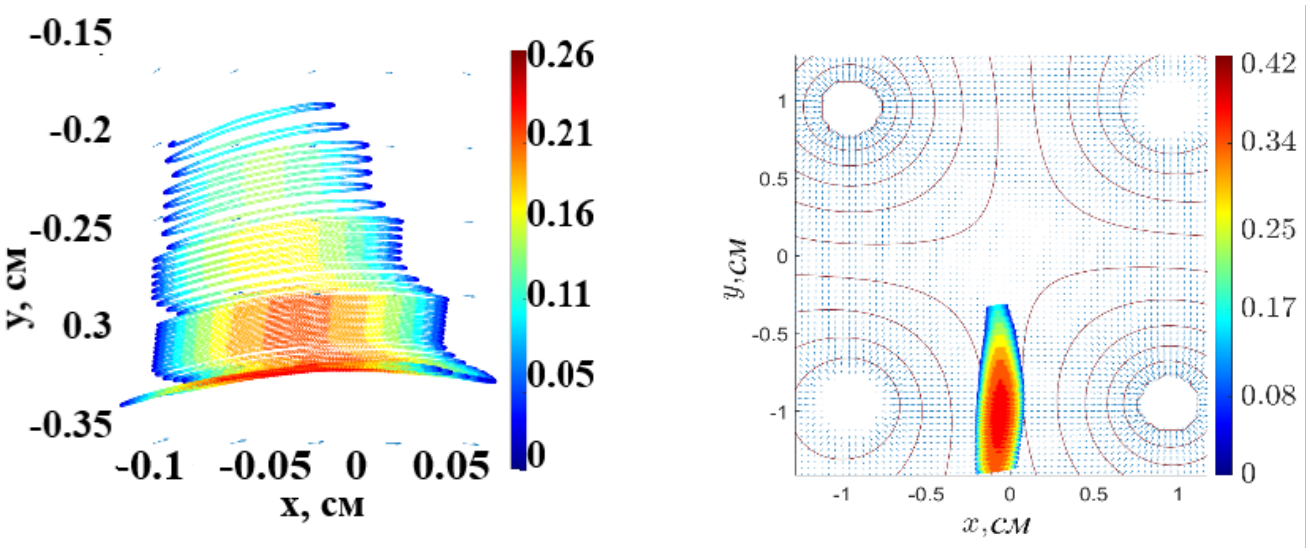
Рис. 3.3.3: Расчёт. Траектория частицы размером 35 мкм, заряд 250 000 e, при смене формы напряжения амплитудой 4 кВ с синуса (красный участок траектории) на прямоугольник (синий участок).

На Рис. 3.3.4а приведён участок траектории после уменьшения амплитуды синусоидального напряжения с 4 до 3 кВ. Несмотря на увеличение размаха колебаний по сравнению с предыдущим режимом, частица остаётся внутри ловушки и после переходного процесса выходит на новую устойчивую траекторию. Одновременно наблюдается уменьшение скорости движения частицы, что соответствует формированию нового положения динамического равновесия.

На Рис. 3.3.4б приведён участок траектории после уменьшения амплитуды с 3 до 2 кВ. Устойчивое движение нарушается, и частица постепенно смещается вниз относительно центра ловушки, а её колебания перестают быть ограниченными по оси ординат. В результате частица покидает область удержания.

В расчёте при прямоугольном напряжении на Рис. 3.3.5 отмечено выпадение частицы при меньших значениях амплитуды.

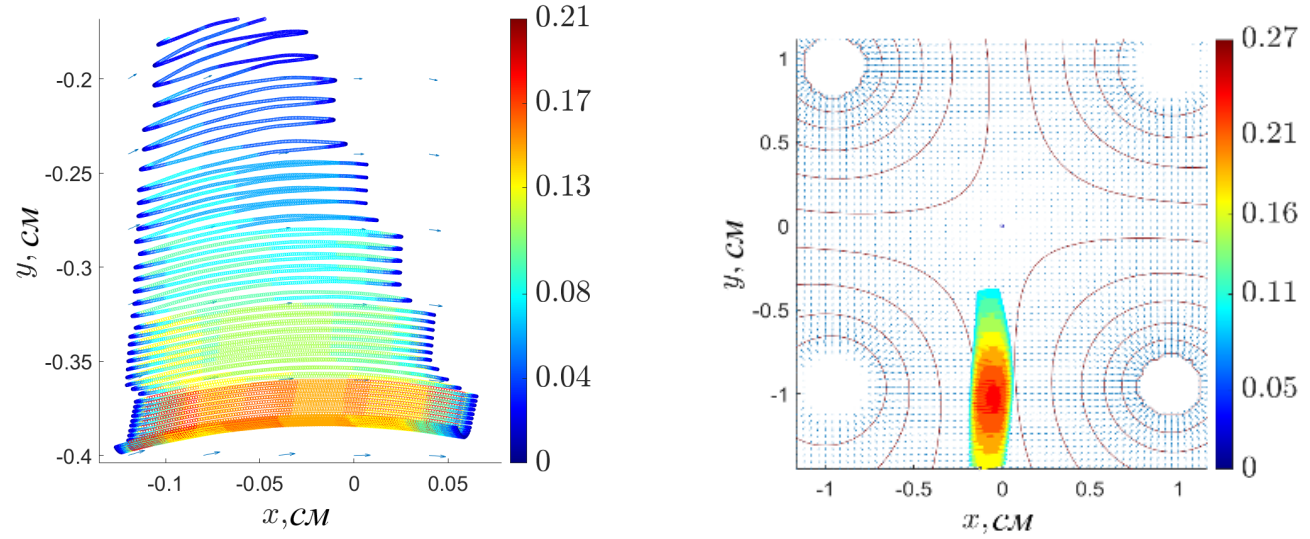
На Рис. 3.3.5а показан участок траектории после уменьшения амплитуды прямоугольного напряжения с 3 до 2 кВ. Частица сохраняет устойчивое движение внутри ловушки. Размах



а б

Рис. 3.3.4: Рассчитанные участки траектории частицы при уменьшении амплитуды синусоидального напряжения: (а) с 4 до 3 кВ; (б) с 3 до 2 кВ.

колебаний увеличился, но траектория остаётся ограниченной, и частица удерживается.



а б

Рис. 3.3.5: Расчёт. Траектории частицы размером 9 мкм, заряд 47 000 e, в поперечном сечении ловушки, при постепенном уменьшении амплитуды прямоугольного напряжения: (а) с 3 до 2 кВ; (б) с 2 до 1.2 кВ

На Рис. 3.3.5б участок траектории при дальнейшем уменьшении амплитуды напряжения с 2 до 1.2 кВ: удержание нарушается. Частица теряет устойчивость и покидает ловушку. Таким образом, нижняя граница удержания для прямоугольного напряжения оказывается

существенно ниже, чем для синусоидального режима.

Для проверки результатов численного моделирования были проведены эксперименты при синусоидальном и прямоугольном напряжении частотой 50 Гц. При выбранной форме удерживающего напряжения, амплитуде 5 кВ и частоте 50 Гц ловушка заполнялась частицами, как описано в Главе 2. Затем амплитуда последовательно снижалась до осаждения всех частиц из ловушки. Напряжение, при котором все частицы покидали ловушку, фиксировалось.

При синусоидальном напряжении амплитуда последовательно уменьшалась с 5 до 4, затем до 3 и 2 кВ. При амплитуде 2 кВ частицы полностью покинули ловушку.

Для прямоугольного знакопеременного напряжения проведён аналогичный эксперимент. В отличие от синусоидального режима, удержание частиц сохраняется при амплитуде 2 кВ. Полное осаждение частиц в ловушке наблюдается только при дальнейшем уменьшении амплитуды до 1.2 кВ.

Сопоставление расчётных траекторий с экспериментальными результатами показывает качественное совпадение наблюдаемой нижней границы удержания для обеих форм напряжения. Полученный результат подтверждает, что знакопеременное прямоугольное напряжение обеспечивает более эффективное удержание заряженных микрочастиц в воздухе по сравнению с синусоидальным напряжением при меньших значениях амплитуды удерживающего напряжения.

3.4 Траектории при прямоугольных асимметричных импульсах

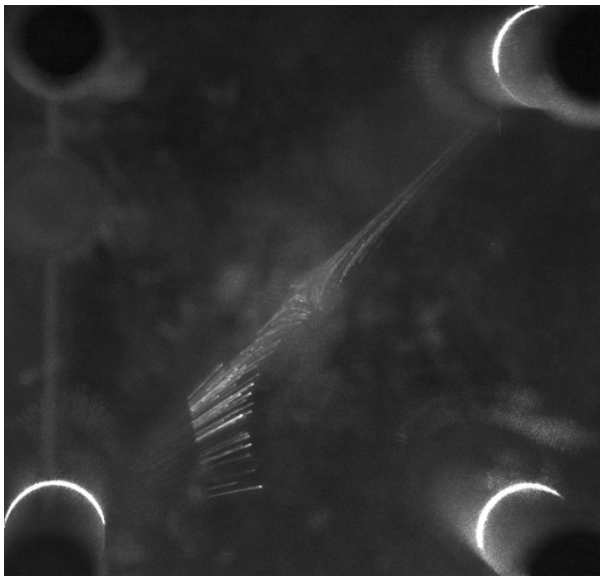
Асимметричный импульс — это прямоугольный знакопеременный импульс с различной длительностью положительной и отрицательной полуволн. Ранее в Главе 2 мы ввели коэффициент длительности положительной полярности K_p, равный отношению длительности положительной полуволны прямоугольного напряжения к длительности периода, выраженному в процентах.

При симметричном прямоугольном напряжении траектории частиц по форме близки к траекториям при синусоидальном напряжении. При асимметричном напряжении характер движения существенно изменяется: траектории приобретают диагональную направленность.

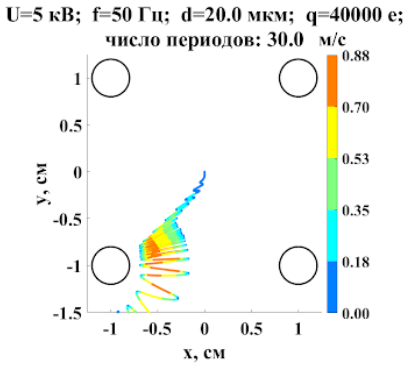
На Рис. 3.4.1 показаны траектории заряженных частиц в асимметричном поле прямоугольного знакопеременного напряжения с $K_p = 40\,\%$, амплитудой 5 кВ и частотой 50 Гц.

На Рис. 3.4.1а приведено фото частиц в ловушке во время эксперимента с указанными параметрами напряжения на электродах. На Рис. 3.4.1б — Рис. 3.4.1г примеры расчётной траектории для частицы размером 20 мкм и зарядом $40\,000\,e$, $50\,000\,e$ и $145\,000\,e$ соответ-

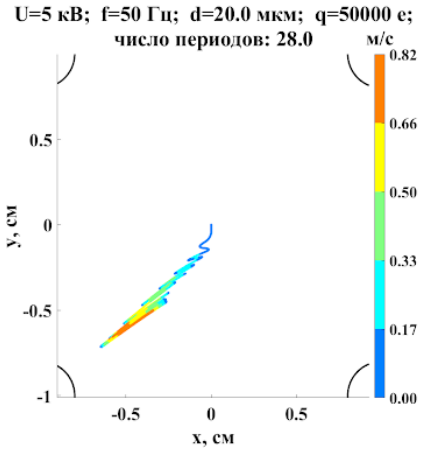
ственно.



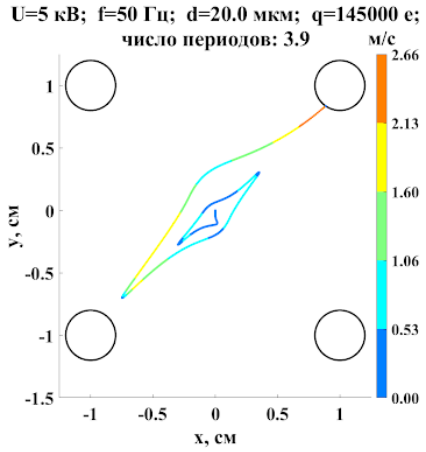
а



б



в



г

Рис. 3.4.1: Траектории частиц при $K_p = 40\,\%$. (а) Эксперимент. (б) Расчёт для частицы с зарядом $40\,000\,e$, максимальная скорость 0.88 м/с; (в) с зарядом $50\,000\,e$. Максимальная скорость 0.82 м/с; (г) с зарядом $145\,000\,e$, максимальная скорость 2.66 м/с.

На Рис. 3.4.1б частица с зарядом $40\,000\,e$, при котором ранее достигалась устойчивая траектория на Рис. 3.2.1б. Частица за 10 периодов достигает пространства у нижнего левого электрода, двигаясь по зигзагообразной траектории влево и вниз с возрастающей амплитудой колебания. Смещение к нижнему электроду можно объяснить преобладающим влиянием силы тяжести. Вблизи электрода частица совершает диагональные колебания, продолжает смещаться вниз, огибая электрод, пока сила тяжести не превысит действие электрической силы, и частица выйдет из расчётной области. Как и в случае траекторий падения частиц из ловушки в симметричном поле на Рис. 3.1.5б, на Рис. 3.2.4, достигая смещения по оси

ординат на уровне центра электрода, электрическое поле слабеет по сравнению с непрерывно действующей гравитацией, и амплитуда колебаний уменьшается.

На Рис. 3.4.1в пример устойчивой траектории при увеличенном заряде до $50\,000\,e$. Частица за 7 периодов под действием силы тяжести смещается к нижнему электроду по зигзагообразной траектории. Амплитуда траектории на каждом участке движения от центра ловушки к нижнему электроду возрастает. Достигнув устойчивого положения, частица длительное время колеблется по диагонали в ограниченной области, амплитуда траектории практически не меняется.

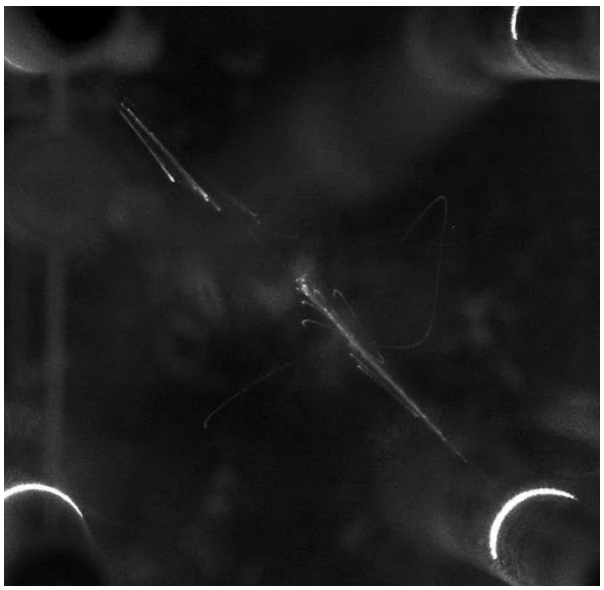
На Рис. 3.4.1г пример траектории с большим зарядом $145\,000\,e$. Как и в случае для $K_p = 50\,\%$ на Рис. 3.2.3б, такого заряда достаточно для вылета из ловушки. Частица за 3 периода раскручивается по спирали между диагональными электродами, разгоняется до 2.6 м/с и сталкивается с электродом. Энергии частицы достаточно, чтобы преодолеть потенциальную яму и вылететь.

С учётом полидисперсности смеси частиц в эксперименте совмещение расчётных траекторий качественно совпадает с фотографией эксперимента (Рис. 3.4.1а). Можно заключить, что для частиц, параметры которых соответствуют области удержания, сохраняется общий характер ограниченного движения.

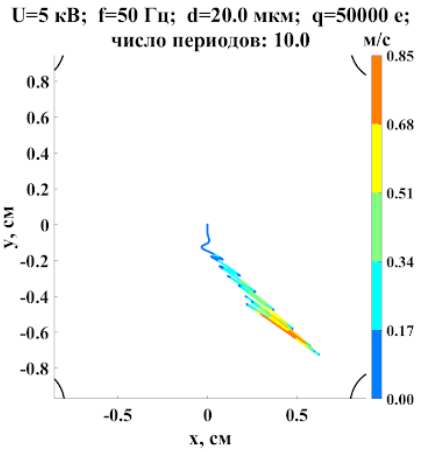
Движение по диагональной траектории объясняется тем, что частица движется между электродами, на которых максимальна длительность полуволны с полярностью, противоположной знаку заряда на самой частице. В данном случае $K_p = 40\,\%$, следовательно, на одной паре диагональных электродов длительность отрицательной полуволны составляет 60 % от длительности периода. На электродах перпендикулярной диагонали — напряжение противоположной фазы, и 40 % периода длится уже отрицательная полуволна, а положительная — 60 %. Если заряд частицы положительный, она движется между электродами с длительностью отрицательной полуволны 60 %. Иначе — по перпендикулярной диагонали. Подробнее влияние заряда при асимметричном напряжении рассмотрено в разделе 3.5.

При K_p больше 50 % асимметрия поля ловушки меняется на противоположную. В результате направление траектории меняется на перпендикулярное.

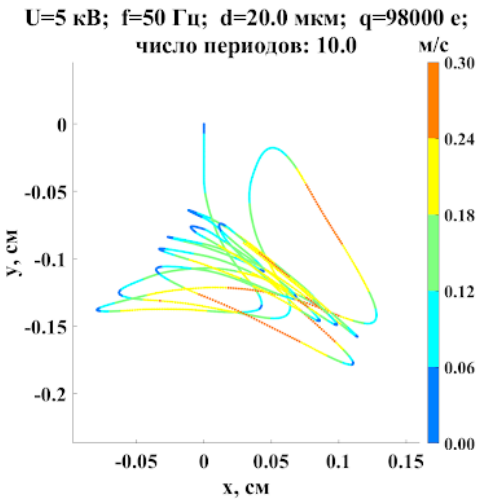
На Рис. 3.4.2а приведено фото эксперимента при прямоугольном напряжении с $K_p = 60\,\%$, амплитудой 5 кВ и частотой 50 Гц. На фото видны более вытянутые к нижним электродам траектории, и развивающиеся в ограниченной области у центра ловушки.



а



б



в

Рис. 3.4.2: Траектории частиц при $K_p = 60\,\%$. (а) Эксперимент. (б) Расчёт для частицы с зарядом $50\,000\,e$. Максимальная скорость 0.88 м/с; (в) с зарядом $98\,000\,e$. Максимальная скорость 0.3 м/с.

На Рис. 3.4.2б — Рис. 3.4.2в показаны расчётные траектории для частицы размером 20 мкм и зарядами $50\,000\,e$ и $98\,000\,e$ соответственно. Траектория на Рис. 3.4.2б абсолютно симметрична траектории Рис. 3.4.1в, построенной при тех же параметрах частицы. Траектория на Рис. 3.4.2в устойчивая, и ограничивающая её область расположена ближе к центру ловушки. В случае симметричного прямоугольного напряжения на Рис. 3.2.2б при указанном заряде $98\,000\,e$ частица также удерживается.

Полученные результаты показывают, что коэффициент длительности положительной полярности является дополнительным параметром управления траекториями заряженных микрочастиц. Его изменение позволяет задавать диагональное направление движения частицы

в поперечном сечении ловушки и переводить траекторию с одной диагонали на другую. Это отличие прямоугольного напряжения от синусоидального существенно расширяет возможности управления одиночными частицами и кулоновскими системами без изменения геометрии электродов ловушки.

3.5 Траектории при различных знаках заряда микрочастицы

Знак заряда микрочастицы определяет направление электрической силы, действующей на неё в поле ловушки. При симметричном синусоидальном и прямоугольном напряжении это влияние не приводит к разделению траекторий по направлению движения. При асимметричных знакопеременных прямоугольных импульсах траектории развиваются вдоль диагонали с более длительным действием одной из полярностей, противоположной знаку заряда частицы. Так знак заряда непосредственно проявляется в геометрии траектории частицы.

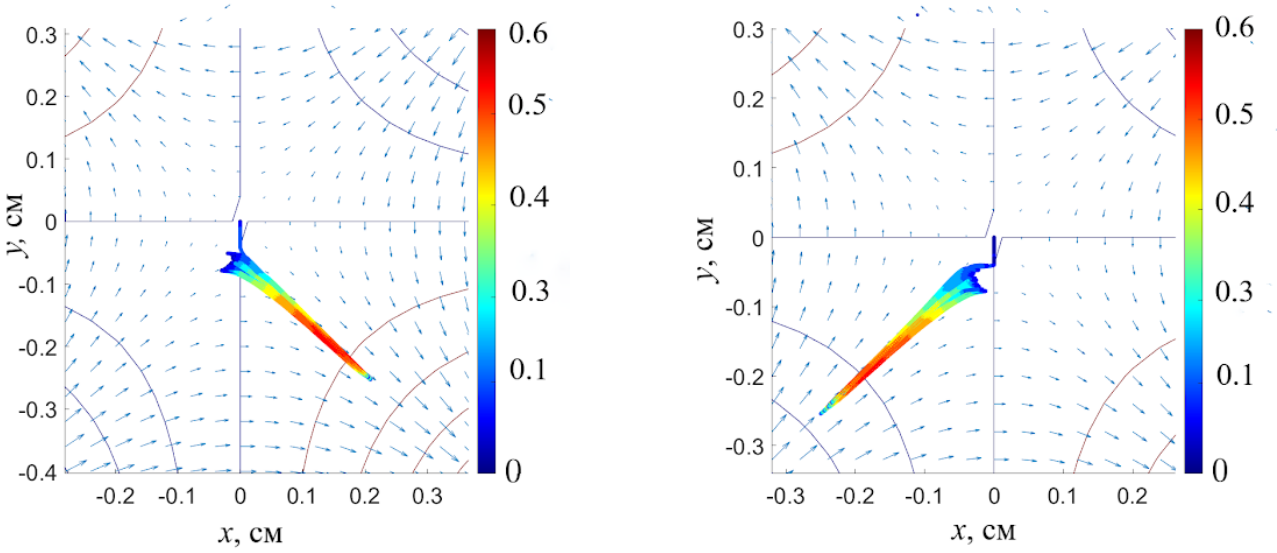
При $K_p = 40\,\%$ расчётные траектории для положительно и отрицательно заряженных частиц приведены на Рис. 3.5.1, а экспериментальные — на Рис. 3.5.2. Для положительно заряженной частицы траектория развивается вдоль одной диагонали, тогда как для отрицательно заряженной частицы движение происходит вдоль другой диагонали, перпендикулярной первой.

На рисунках с расчётами синие стрелки показывают направление электрического поля на момент окончания расчёта, красные и синие линии — силовые линии поля.

При увеличении коэффициента заполнения до $K_p = 60\,\%$ ориентация траекторий изменяется. Для частиц каждого знака траектория переходит на диагональ, перпендикулярную наблюдаемой при $K_p = 40\,\%$. Расчётные траектории приведены на Рис. 3.5.3, а экспериментальные результаты — на Рис. 3.5.4.

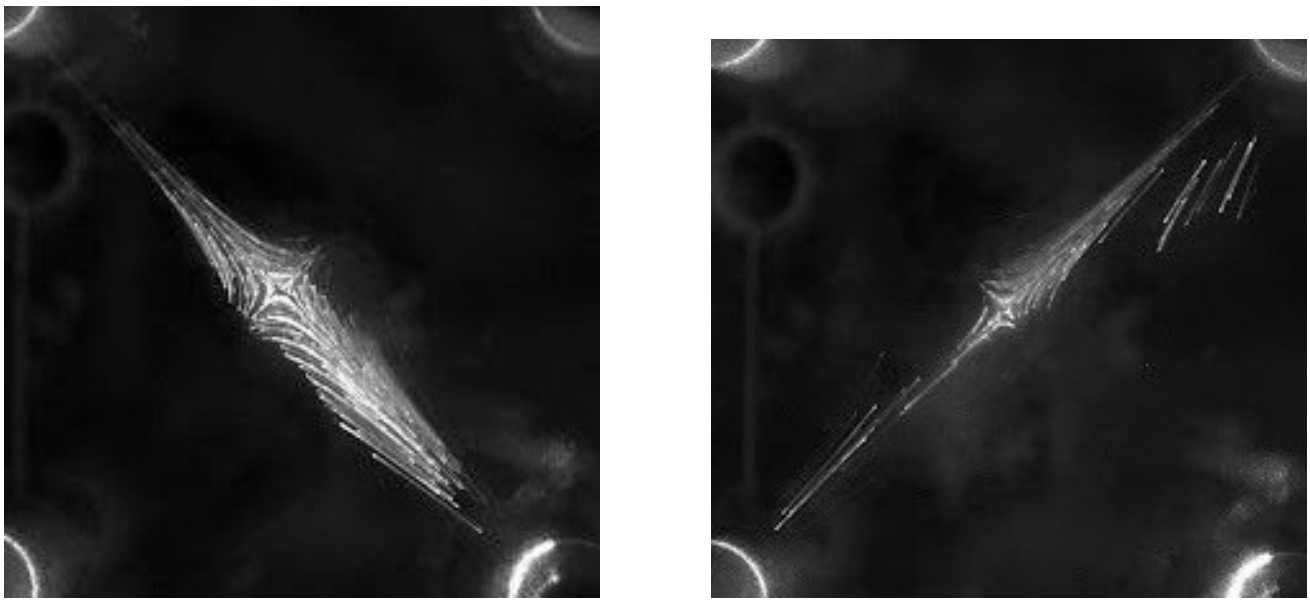
Таким образом, при асимметричном прямоугольном знакопеременном напряжении ориентация траектории определяется совместным влиянием коэффициента длительности положительной полярности и знака заряда частицы. При фиксированном значении K_p, отличном от $50\,\%$, частицы с противоположными знаками заряда движутся вдоль взаимно перпендикулярных диагоналей.

Полученные результаты показывают возможность использования траекторий частиц для определения знака заряда и управления движением заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке без изменения геометрии электродной системы.



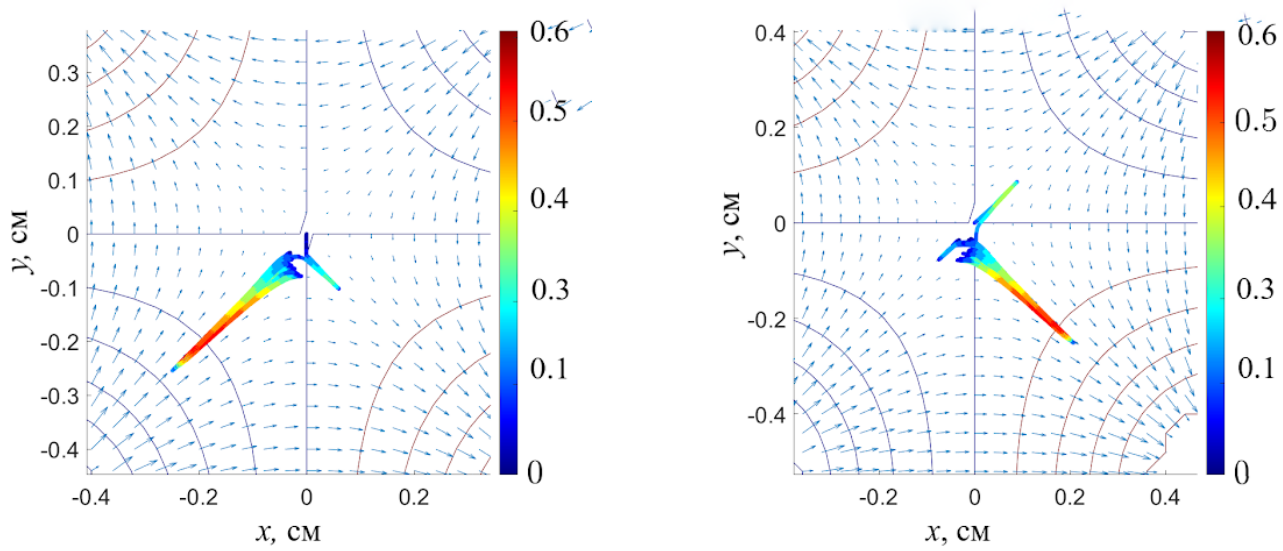
а б

Рис. 3.5.1: Рассчитанные траектории микрочастиц при $K_p = 40\,\%$ и зарядом на частице: (а) положительным; (б) отрицательным.



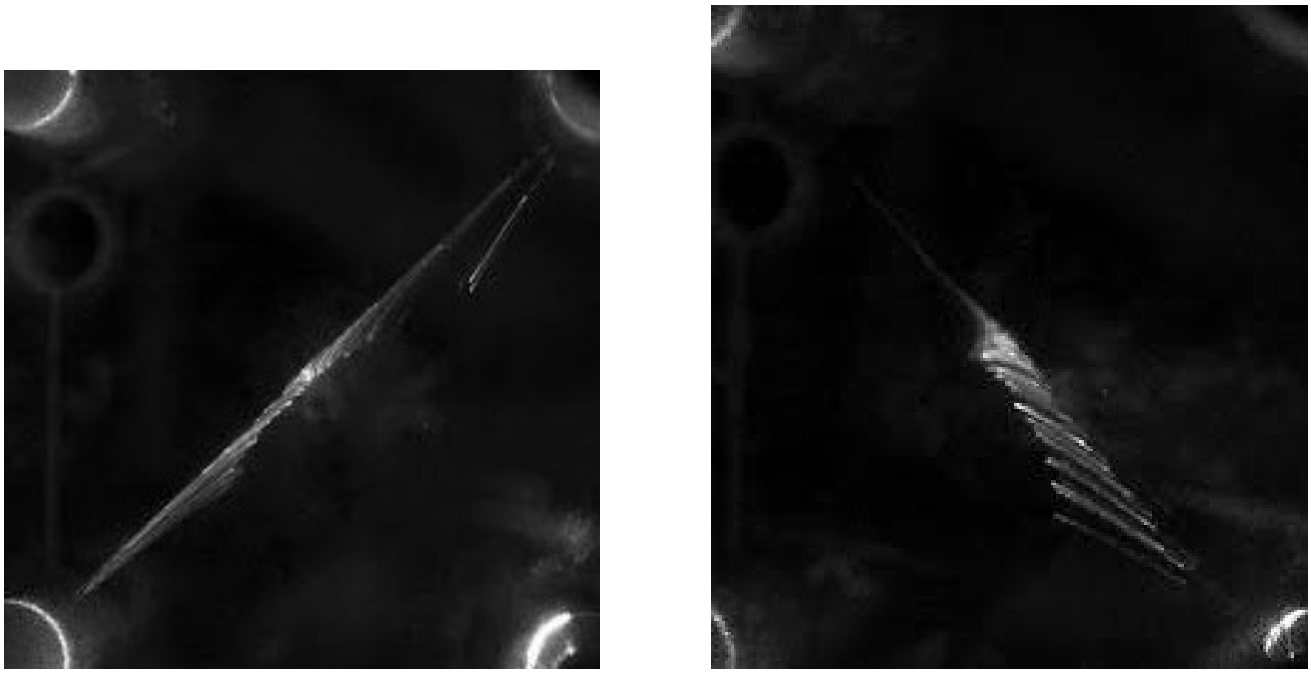
а б

Рис. 3.5.2: Фото траекторий при $K_p = 40\,\%$ и зарядом на частице: (а) положительным; (б) отрицательным.



а б

Рис. 3.5.3: Рассчитанные траектории микрочастиц при $K_p = 60\,\%$: (а) положительный заряд частицы; (б) отрицательный заряд частицы.



а б

Рис. 3.5.4: Фото траекторий при $K_p = 60\,\%$ и зарядом на частице: (а) положительным; (б) отрицательным.

3.6 Влияние внешнего прямоугольного знакопеременного электрического поля на траектории микрочастиц в ловушке с синусоидальным удерживающем напряжением

В предыдущих разделах рассматривалось влияние формы удерживающего напряжения. Рассмотрим теперь внешнее воздействие прямоугольного поля (когда $K_p = 50\,\%$) при синусоидальном удерживающем напряжении как дополнительный способ управления динамикой заряженных микрочастиц в горизонтальной квадрупольной ловушке.

Эксперимент и численный расчёт показали, что, меняя частоту внешнего поля, можно стабилизировать неустойчивую траекторию частицы или, наоборот, раскачать неустойчивость из изначально устойчивой траектории.

Для эксперимента ловушка размещалась между металлическими пластинами, на каждую из которых подавалось прямоугольное напряжение в противофазе. Амплитуда внешнего прямоугольного напряжения принималась 3 кВ и далее не меняется. Диапазон частот внешнего электрического поля выбран 27–227 Гц с шагом 10 Гц.

Удерживающее синусоидальное напряжение выбрано с амплитудой 5 кВ, частотой — 50 Гц, и далее не меняется.

На Рис. 3.6.1 — Рис. 3.6.3 показаны фото эксперимента по уменьшению частоты внешнего электрического поля от 50 до 27 Гц при одной серии (одна засыпка частиц). На Рис. 3.6.4 и Рис. 3.6.5 показаны фото эксперимента по увеличению частоты внешнего электрического поля для другой серии. Вид траекторий отличается от траекторий в предыдущих разделах этой главы и напоминает фигуры Лиссажу.

На Рис. 3.6.1 и Рис. 3.6.4 видно, что устойчивые траектории при частоте внешнего поля 50 Гц развиваются по эллипсоиду в центре ловушки и по прямоугольной кривой. Разнообразие траекторий при одинаковых условиях объясняется полидисперсностью смеси частиц, засыпанных в ловушку.

На Рис. 3.6.4 зафиксировано несколько расположенных друг под другом эллипсов. Это объясняется разной кинетической энергией частиц. На Рис. 3.6.1 видно устойчивую траекторию, развивающуюся по прямоугольной кривой. При дальнейшем изменении частоты внешнего поля эта частица вылетела из ловушки. Аналогичная траектория была получена на Рис. 3.1.3 при синусоидальном удерживающем напряжении.

На Рис. 3.6.2 приведено фото эксперимента после уменьшения частоты внешнего поля до 40 Гц. Частица, движущаяся по четырёхугольной траектории на Рис. 3.6.1, вылетела, а

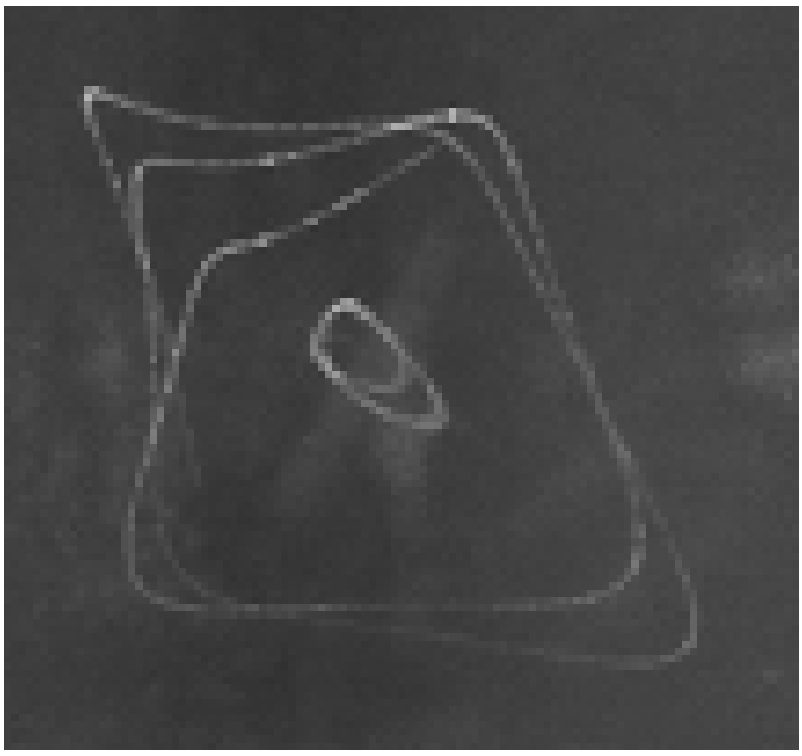


Рис. 3.6.1: Траектории частиц при частоте внешнего электрического поля 50 Гц.

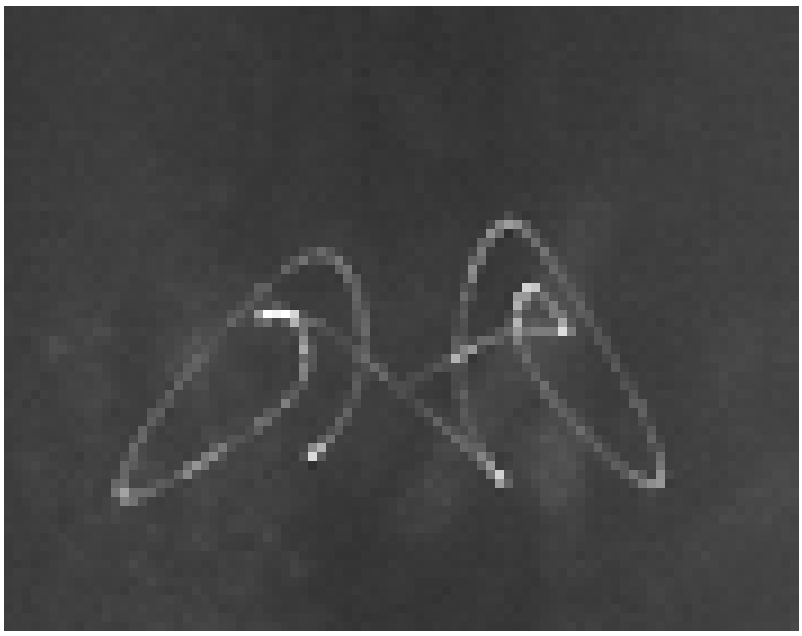


Рис. 3.6.2: Устойчивые траектории частиц при частоте внешнего электрического поля 40 Гц.

траектория в виде эллипса перешла в фигуру Лиссажу. Снизив частоту внешнего поля, мы повысили кинетическую энергию частиц.

На Рис. 3.6.3 приведено фото экспериментального результата раскачки неустойчивой траектории после снижения частоты внешнего поля до 27 Гц. Амплитуда траектории с каждым полупериодом увеличивается, и частица в итоге покидает ловушку.

Рис. 3.6.4 и Рис. 3.6.5 демонстрируют противоположный экспериментальный результат

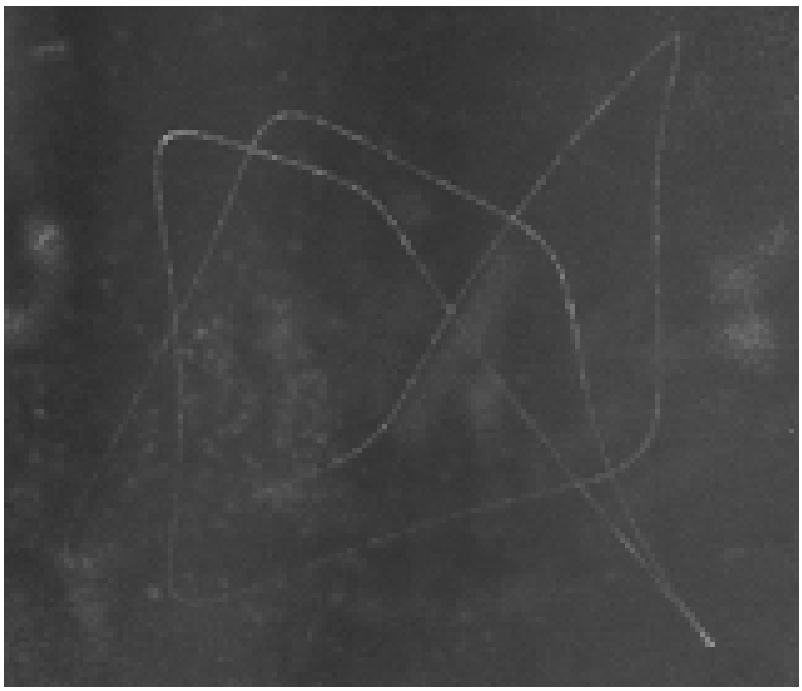


Рис. 3.6.3: Раскачка неустойчивости при частоте внешнего электрического поля 27 Гц.

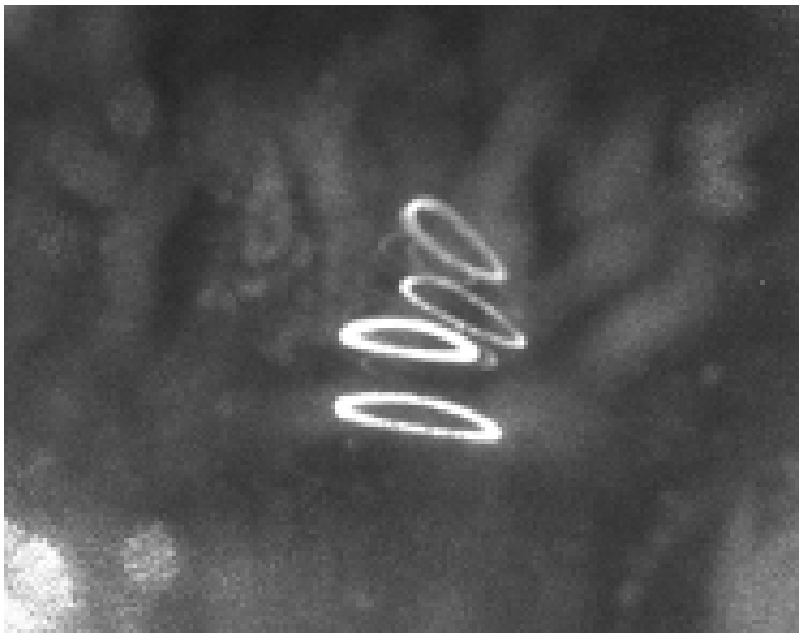


Рис. 3.6.4: Устойчивые траектории частиц при частоте внешнего электрического поля 50 Гц.

стабилизации частицы повышением частоты внешнего напряжения. Траектории в виде эллипсоидов уплощаются до линий и плоских восьмёрок.

Таким образом, экспериментально обнаружено, что при понижении частоты внешнего воздействия размах колебаний частиц увеличивается, и при частоте ниже 20 Гц они вылетают из ловушки. При повышении частоты внешнего электрического поля до 125 Гц происходит стабилизация траекторий частиц, а также уменьшается расстояние между траекториями, что свидетельствует об увеличении силы, направленной к области стабильного удержания

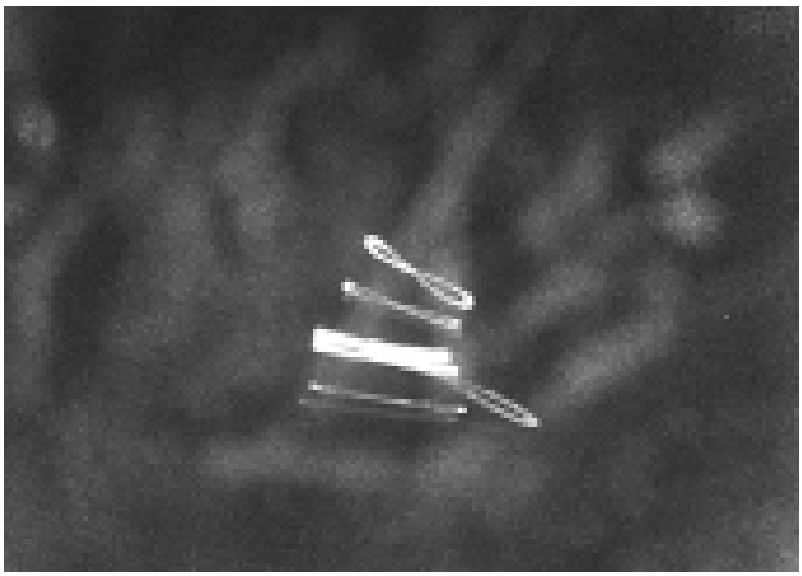


Рис. 3.6.5: Устойчивые траектории частиц при частоте внешнего электрического поля 170 Гц.

частиц.

Для расчёта влияния внешнего электрического поля выбраны частицы размером 20 мкм и два значения заряда. Параметры напряжения аналогичны экспериментальным.

Амплитуда синусоидального напряжения на электродах равна 5 кВ, частота — 50 Гц. Это поле обусловлено заключением ловушки между двумя плоскими электродами — верхним и нижним. На верхний электрод подано переменное напряжение амплитудой 3 кВ. Нижний электрод заземлён. Диапазон частот внешнего электрического поля при расчёте 27–227 Гц с шагом 10 Гц.

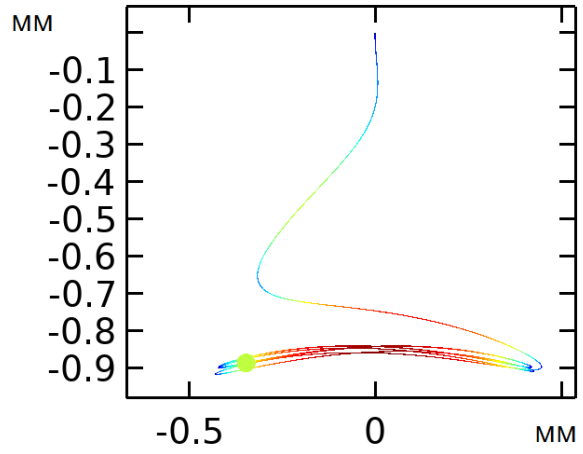
Первое значение — $98\,000\,e$: при нём частица в ловушке с синусоидальным напряжением устойчива (Рис. 3.1.1). Второй заряд — $145\,000\,e$, при котором частица готова вылететь из ловушки (Рис. 3.1.4).

Изменение частоты внешнего воздействия привело к изменению устойчивости движения частиц и формы траекторий.

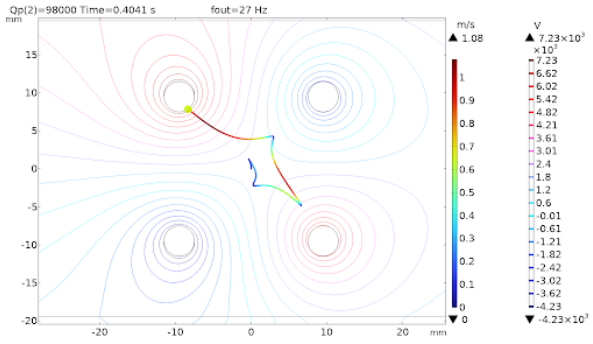
На Рис. 3.6.6 приведён пример раскачки изначально устойчивой частицы с зарядом $98\,000\,e$ в ловушке и затем её стабилизация. При отсутствии внешнего поля частица совершает устойчивые колебания в ограниченной области ловушки. Пример такой расчётной траектории приведён на Рис. 3.6.6а. Размах колебаний остаётся ограниченным, а движение происходит вблизи центральной области ловушки.

Воздействие малой частоты 27 Гц на Рис. 3.6.6б выводит частицу из устойчивого состояния, и развивается траектория вылета из ловушки. Последовательно увеличивается амплитуда движения, и частица удаляется от первоначальной области движения с большой ско-

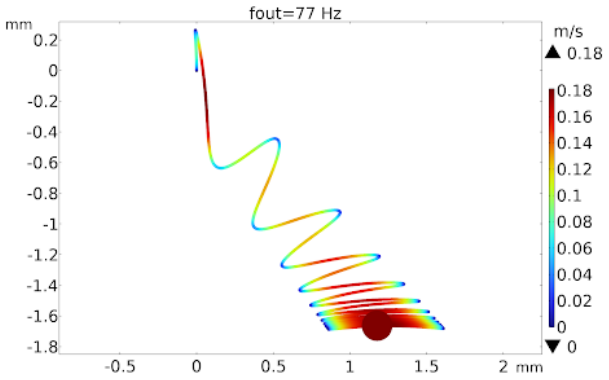
ростью вплоть до вылета или сталкивания с электродом. Повышение частоты возвращает частицу в устойчивое состояние (Рис. 3.6.6в).



а



б

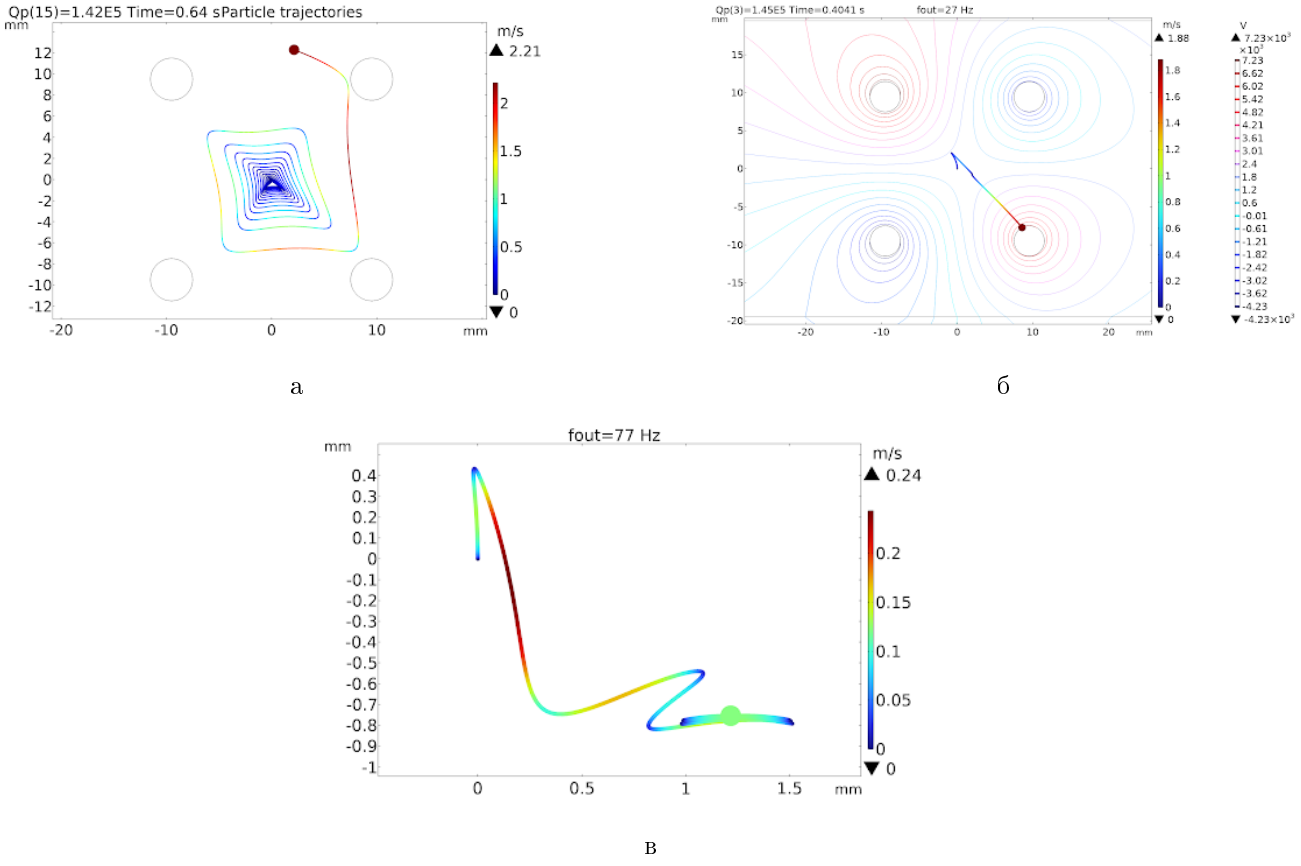


в

Рис. 3.6.6: Траектории частицы размером 20 мкм, зарядом 98 000 e при внешнем воздействии: (а) в отсутствие внешнего электрического поля; (б) при частоте внешнего электрического поля 27 Гц — вылет из ловушки; (в) при частоте внешнего электрического поля 77 Гц — стабилизация. Максимальная ширина размаха 0,8 см.

На Рис. 3.6.7в показан наиболее интересный эффект влияния переменного внешнего воздействия, когда в его отсутствие частица вылетает под действием сил ловушки при заряде 145 000 e. При малой частоте воздействия прекращается закономерное развитие траектории по четырёхугольным траекториям (Рис. 3.6.7б). При повышении частоты частица достигает устойчивых колебаний внутри ловушки, как на Рис. 3.6.7в. Как и в случае первого состояния, с ростом частоты уменьшается размах колебания траектории и её скорость.

Наблюдаемая стабилизация траекторий при определённых частотах внешнего воздействия качественно аналогична эффекту динамической стабилизации, известному для маятника Капицы. В этой задаче высокочастотное внешнее воздействие может приводить к



а б

в

Рис. 3.6.7: Траектории частицы диаметром 20 мкм с зарядом 145 000 e при различных условиях воздействия внешнего электрического поля: (а) — в отсутствие внешнего поля, выпадение из ловушки под действием силы тяжести; (б) — при частоте внешнего поля 27 Гц; (в) — при частоте внешнего поля 77 Гц, стабилизация движения частицы. Максимальный размах колебаний составляет 0,5 мм.

устойчивости положений, которые без дополнительного возбуждения являются неустойчивыми. Аналогично, в линейной квадрупольной ловушке внешнее импульсно-периодическое поле при определённых частотах уменьшает размах колебаний частицы и способствует стабилизации её движения в области удержания.

Полученные результаты показывают, что внешнее импульсно-периодическое поле может как возбуждать неустойчивости движения, так и стабилизировать траектории частиц. Таким образом, частота внешнего воздействия является дополнительным параметром управления устойчивостью удержания микрочастиц в линейной квадрупольной ловушке.

3.7 Влияние внешнего постоянного электрического поля на траектории микрочастиц в ловушке при синусоидальном удерживающем напряжении

Чтобы описать динамику частиц, удерживаемых в горизонтальных квадрупольных ЭД-ловушках, хорошо изученными уравнениями Матье, для компенсации силы тяжести к переменной составляющей удерживающего напряжения на электродах добавляют постоянную компоненту V_0. Аналогичный подход с использованием дополнительного электрического поля применяется для управления положением и динамикой кулоновских структур [24; 36; 99; 101].

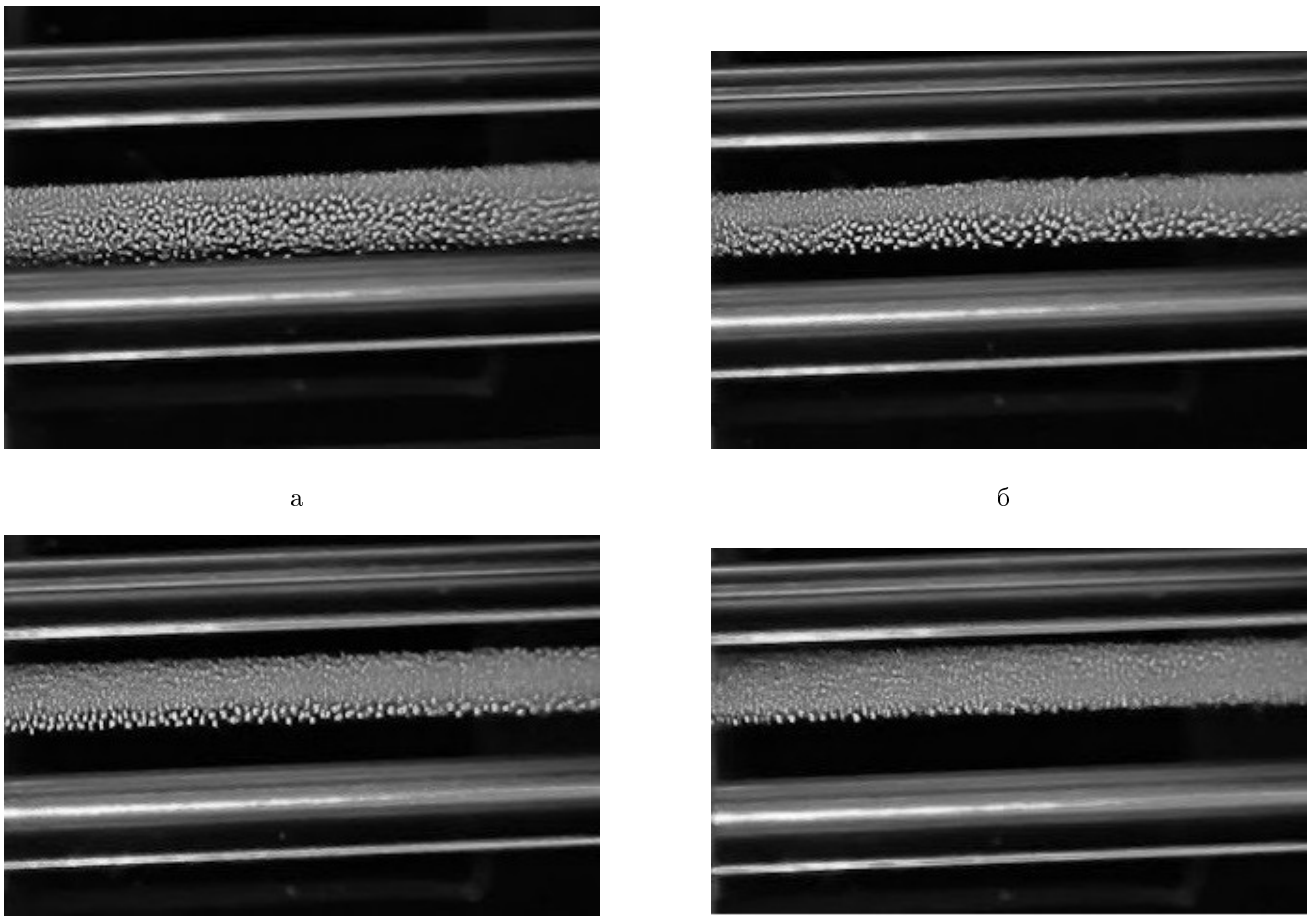
Мы рассмотрим влияние постоянного внешнего поля на динамику частиц и компенсацию им силы тяжести.

Как и в предыдущем параграфе, ловушка размещалась между пластинами конденсатора. Нижняя пластина заземлена, на верхнюю подавалось постоянное положительное или отрицательное напряжение. В ловушке сначала была создана кулоновская структура, после чего напряжение на пластинах конденсатора начинали изменять.

Положительное внешнее напряжение менялось в диапазоне 1–6 кВ с шагом 1 кВ. Фотографии фрагментов структур при разных величинах напряжения приведены на Рис. 3.7.1а — Рис. 3.7.1г. Структура сдвигается вверх с увеличением внешнего напряжения. При снятии постоянного напряжения структура возвращается в исходное положение.

На Рис. 3.7.1а в отсутствие внешнего поля частицы в структуре визуально различимы и находятся в устойчивых состояниях. С последовательным повышением напряжения на Рис. 3.7.1б — Рис. 3.7.1г в верхней части структуры контуры частиц становятся нечёткими и размытыми, сливаясь в общий серый фон. Это значит, что скорость их движения значительно превышает частоту съёмки, и они переходят в состояние, близкое к неустойчивости, но не покидают ловушку. Чем больше амплитуда внешнего напряжения, тем большая часть частиц в структуре размывается.

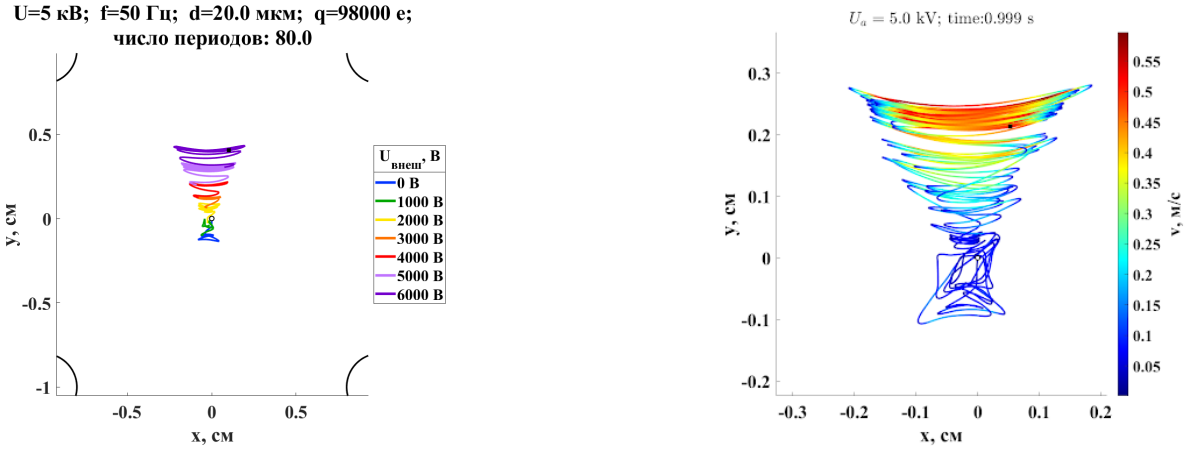
На Рис. 3.7.2а — Рис. 3.7.2б показан результат расчёта для частицы размером 20 мкм и зарядом $98\,000\,e$. На Рис. 3.7.2а разным цветом выделены участки траектории после каждой смены внешнего постоянного напряжения. Видно, что с увеличением внешнего напряжения частица смещается к верхним электродам. На Рис. 3.7.2б видно, что скорость частицы растёт со смещением к верхним электродам, но частица остаётся в ловушке. Результат хорошо согласуется с фотографиями эксперимента.



а б

в г

Рис. 3.7.1: Фрагмент кулоновской системы при воздействии внешним постоянным полем амплитудой: (а) 0 кВ; (б) 2 кВ; (в) 4 кВ; (г) 6 кВ.



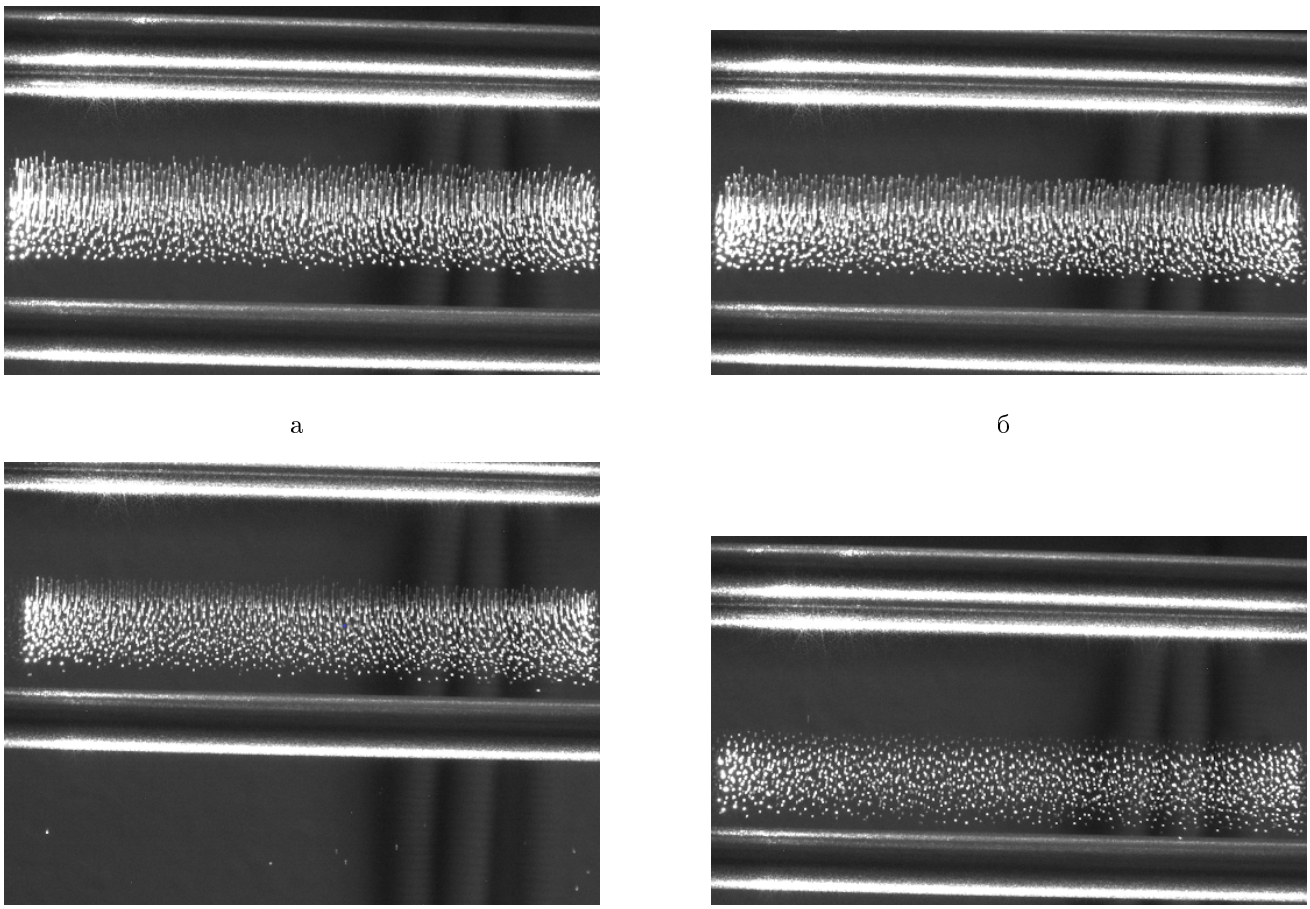
а б

Рис. 3.7.2: Траектория при изменении величины постоянного внешнего поля. (а) Цветом отмечены участки траектории с разным внешним напряжением. (б) Зависимость от скорости.

При сохранении конфигурации внешних электродов выполнены эксперимент и расчёт для отрицательного внешнего напряжения, приложенного к кулоновской системе частиц. На Рис. 3.7.3а — Рис. 3.7.3г показаны фрагменты структур при воздействии постоянного напряжения величиной -2, -5 и -10 кВ. Структура смещается вниз с увеличением абсолютной величины внешнего напряжения. В отличие от случая смещения структуры вверх, при приближении к нижним электродам наблюдается стабилизация движения частиц. Часть частиц в процессе смещения покидает область удержания, однако оставшаяся структура приобретает более устойчивое состояние. В исходной структуре изображения отдельных частиц имеют вид протяжённых линий, что свидетельствует о заметной амплитуде их колебательного движения за время экспозиции кадра. После смещения структуры к нижним электродам частицы визуализируются преимущественно в виде чётких точек, что соответствует уменьшению амплитуды колебаний относительно положений равновесия. Таким образом, перемещение частиц в область более сильного электрического поля вблизи нижних электродов приводит к более жёсткой их локализации. При снятии постоянного напряжения структура возвращается в исходное положение.

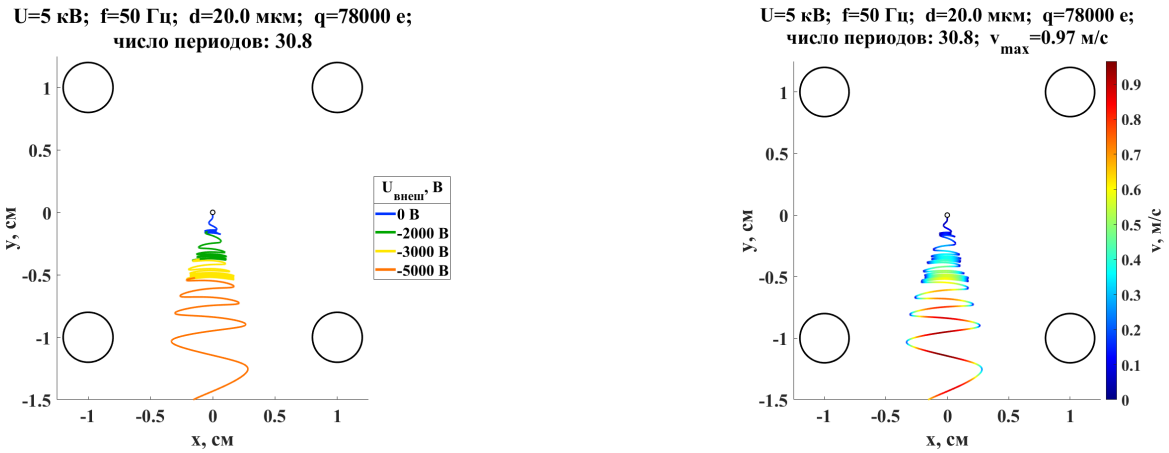
На Рис. 3.7.4 представлены результаты численного моделирования движения частицы при последовательном увеличении абсолютной величины отрицательного внешнего напряжения. На Рис. 3.7.4а цветом выделены участки траектории, соответствующие различным значениям напряжения. Синий участок соответствует исходному устойчивому режиму с наименьшей амплитудой колебаний. При напряжении -2 кВ (зелёный участок) положение равновесия частицы смещается вниз, а амплитуда её колебаний возрастает, однако траектория остаётся устойчивой. Дальнейшее увеличение напряжения до -3 кВ (жёлтый участок) приводит к дополнительному смещению и увеличению амплитуды колебаний при сохранении устойчивого движения. При -5 кВ (оранжевый участок) происходит потеря устойчивости: амплитуда колебаний быстро возрастает, и частица покидает область удержания. Как видно из зависимости скорости на Рис. 3.7.4б, в процессе выпадения скорость частицы достигает 0,9 м/с. Расчёт подтверждает полученные в эксперименте дополнительные области устойчивости ниже центра ловушки.

Повышение устойчивости в нижней области ловушки можно объяснить смещением под совместным действием силы тяжести и внешнего постоянного поля положения равновесия частиц в область большего градиента переменного электрического поля. В этой области увеличение возвращающей электрической силы при отклонении частицы обеспечивает более жёсткую локализацию относительно положения равновесия. При дальнейшем смещении к электродам, однако, рост неоднородности поля и амплитуды колебательного движения при-



а б в г

Рис. 3.7.3: Фрагмент кулоновской системы при воздействии внешним постоянным полем амплитудой: (а) 0 кВ; (б) −2 кВ; (в) −5 кВ; (г) −10 кВ.



а б

Рис. 3.7.4: Траектория при изменении величины постоянного внешнего поля. (а) Цветом отмечены участки траектории с разным внешним напряжением. (б) Зависимость скорости.

водит к нарушению устойчивости и выпадению частицы из ловушки.

Полученный результат показывает, что внешнее постоянное электрическое поле может использоваться не только для управляемого пространственного смещения и осаждения части частиц из кулоновской структуры, но и для стабилизации оставшейся системы. При этом эффект существенно зависит от направления смещения: приближение структуры к нижним электродам сопровождается уменьшением амплитуды колебаний, тогда как смещение к верхним электродам, напротив, приводит к росту скорости и амплитуды движения частиц и постепенной дестабилизации структуры.

3.8 Траектории заряженных микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах

Исследование удержания заряженных микрочастиц в плазме коронного разряда при атмосферном давлении представляет собой актуальную задачу физики низкотемпературной плазмы. В предыдущей главе рассматривалось удержание частиц и структур в ловушке в воздухе без плазменного фона. В этом разделе рассматриваем удержание предварительно незаряженных частиц и однозарядных структур в воздухе с плазменным фоном коронного разряда.

Экспериментально была зафиксирована возможность удержания диэлектрических частиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах с переменным напряжением в воздухе. На Рис. 3.8.1 показан пример удержания в ловушке заряженных диэлектрических частиц.

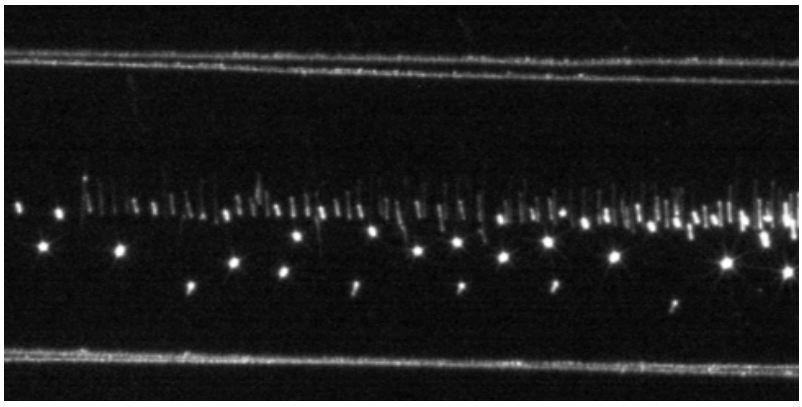


Рис. 3.8.1: Фрагмент кулоновской структуры в квадрупольной ловушке с плазмой коронного разряда. Диаметр электродов 63 мкм. Амплитуда напряжения на электродах 3.2 кВ, ток коронного разряда 30 мА.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на Рис. 3.8.2. Электроды ловушки (2) крепились на изолирующих стойках из полиметилметакрилата. В качестве электродов использовались металлические проволоки трёх диаметров: 63, 120 и 200 мкм. Они располагались по углам квадрата со стороной $L = 10$ мм; длина каждого электрода составляла 110 мм.

Электроды подключались к трансформатору НОМ-10УХЛ2 с коэффициентом трансформации, равным 0.01; два электрода подключались через балластное сопротивление 9.68 МОм, два других заземлялись. Напряжение частотой 50 Гц на первичную обмотку трансформатора подавалось с ЛАТРа. Такая схема питания ловушки позволяла регулировать напряжение на электродах до значения 10 кВ.

Переменное напряжение измеряли пробником P6015A. Измерение тока проводилось по разности потенциалов на балластном сопротивлении. При проведении отладочных измерений электроды ловушки подключались к высоковольтному источнику постоянного напряжения «Плазон ИВНР-10/20» с регулируемым напряжением до 10 кВ. Как и в случае питания переменным напряжением, два электрода подключались через балластное сопротивление 9.68 МОм, два других заземлялись. Измерения напряжения проводились по индикатору источника питания и киловольтметром С196. Для определения тока коронного разряда измерялось падение напряжения на балластном резисторе. Измерения проводились с использованием пробника Tektronix P6015A с диапазонами 0–10 мкА и 0–100 мкА и осциллографа Lecroy WaveAce 1012. В полученные результаты вводилась поправка на ток, протекающий через пробник.

Ловушка помещалась в короб 4 (Рис. 3.8.2) из оргстекла для исключения воздействий воздушных потоков на левитирующие пылевые частицы. Незаряженные частицы инжектировались в ловушку через окно в верхней части короба 5, заряжались в поле коронного разряда электродов и захватывались ловушкой. Для удержания частиц в аксиальном направлении использовались торцевые электроды 3, на которые подавался постоянный электрический потенциал, как правило, от 4.0 до 6.0 кВ.

Опыты проводились в воздухе при атмосферном давлении. В опытах использовался полидисперсный порошок Al_2O_3.

На Рис. 3.8.3 представлена фотография свечения коронного разряда на электродах диаметром 200 мкм при действующем значении напряжения $U = 4.76$ кВ и действующем токе коронного разряда $I_c = 30$ мкА. Свечение коронного разряда в левой части ловушки несколько интенсивнее, чем в правой части, однако в целом достаточно однородно. Потенциал на соседних электродах менялся в противофазе.

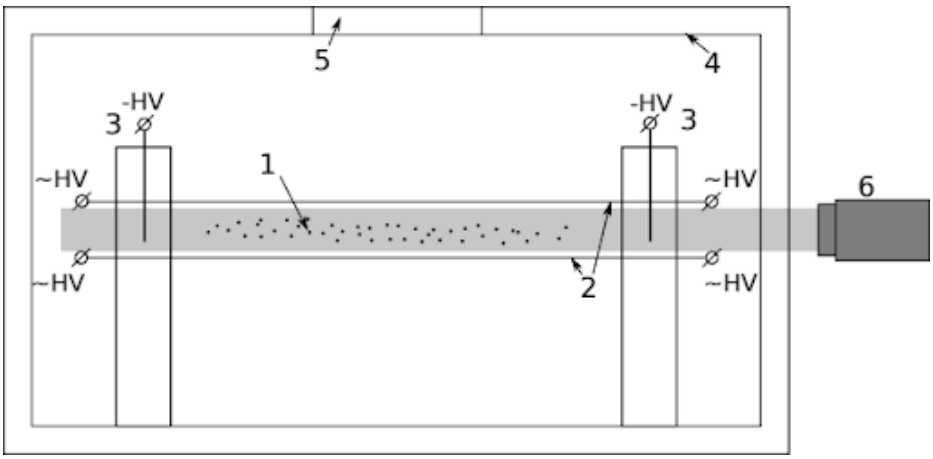


Рис. 3.8.2: Схема электродинамической ловушки с коронирующими электродами: 1 — левитирующие пылевые частицы; 2 — электроды ловушки; 3 — запирающие торцевые электроды; 4 — защитный короб из органического стекла; 5 — отверстие для инжекции пылевых частиц; 6 — подсвечивающий лазер.

Подсветка частиц осуществлялась лазером с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью 200 мВт, что позволяло регистрировать частицы диаметром более 1 микрона. Подсветка осуществлялась как широким лучом, так и узким плоским (лазерный нож) в зависимости от целей наблюдения. Визуализация частиц обеспечивалась камерой Hi Spec Imaging с максимальным разрешением 1280×1024 пикселей. Камера позволяла нам записывать видеокадры с максимальным разрешением со скоростью до 506 кадров в секунду. Чтобы избежать засветки матрицы видеокамеры, угол между лазерным лучом и осью камеры составлял около 90°.

Предварительно незаряженные частицы засыпались с диэлектрической поверхности сверху в ловушку и заряжались полем коронного разряда. Эксперименты проводились при различных токах коронного разряда при частоте переменного напряжения 50 Гц.

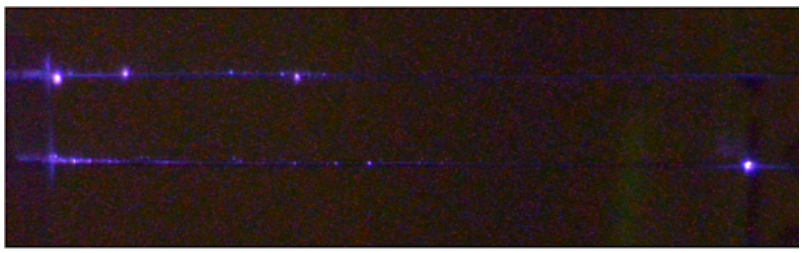


Рис. 3.8.3: Свечение коронного разряда переменного тока.

Измерение тока коронного разряда

На Рис. 3.8.4 пороговое напряжение (напряжение зажигания коронного разряда) для четырёхэлектродной ловушки при диаметрах электродов 63 мкм и 120 мкм равнялось $\approx 2{,}6$ кВ, при электродах диаметром 200 мкм — $\approx 4{,}0$ кВ.

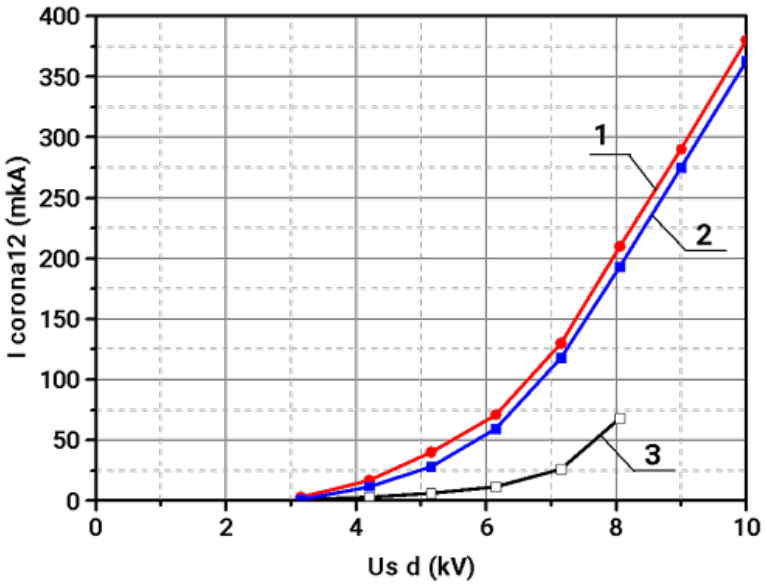


Рис. 3.8.4: Зависимость тока коронного разряда от напряжения источника питания. Диаметр электродов ловушки: 1 — 63 мкм; 2 — 120 мкм; 3 — 200 мкм. $R_b = 9.67$ МОм.

При переменном напряжении коронный разряд возникает после того, как напряжение на электроде достигает порогового значения (Uз). Вблизи поверхности электрода появляется область ионизации газа, в которой образуются заряженные частицы. Под действием электрического поля ионы выходят из этой области и перемещаются в межэлектродное пространство, формируя объёмный заряд. Его знак определяется полярностью напряжения на электроде. У соседнего заземлённого электрода формируется объёмный заряд противоположного знака.

При уменьшении напряжения снижается и напряжённость электрического поля у поверхности электрода. Когда она становится недостаточной для поддержания ионизации, коронный разряд прекращается. При этом ранее образовавшиеся ионы ещё некоторое время сохраняются в межэлектродном пространстве.

После смены полярности напряжения знак потенциала на электродах изменяется. При достижении порогового значения (Uз) коронный разряд возникает снова, но уже при противоположной полярности. Таким образом, в каждом периоде переменного напряжения повторяются процессы возникновения и прекращения коронного разряда, образования объёмного заряда и переноса ионов между электродами.

Положительные и отрицательные ионы, образующиеся в разные полупериоды, движутся навстречу друг другу между соседними электродами. Наибольшая концентрация ионов наблюдается в области между заземлённым электродом и электродом, находящимся под переменным потенциалом. В этой области происходит рекомбинация ионов противоположных знаков. В центральной части ловушки концентрация ионов ниже.

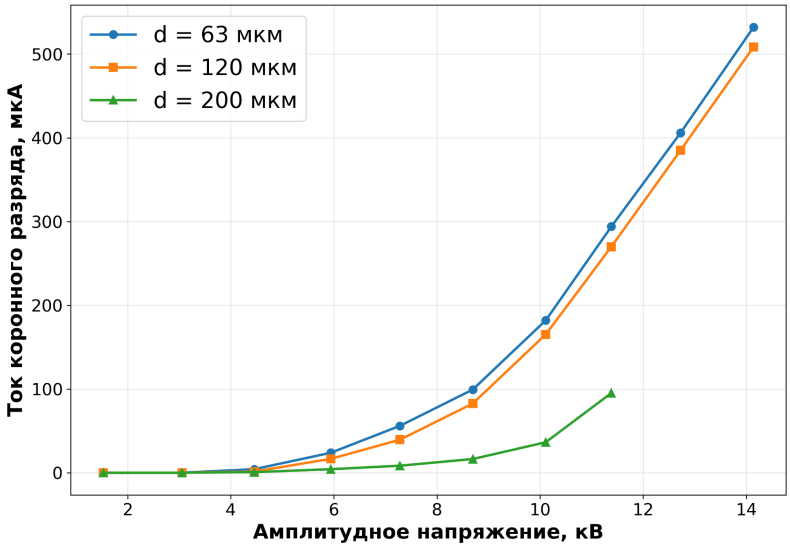


Рис. 3.8.5: Ток коронного разряда при различных диаметрах электродов.

Для определения электрических характеристик коронного разряда были экспериментально измерены зависимости тока короны от напряжения на электродах ловушки при синусоидальном напряжении частотой 50 Гц. Исследования проводились для электродов диаметром 63, 120 и 200 мкм. Для каждого режима определялись действующие и амплитудные значения напряжения и тока коронного разряда. При напряжении 3.15 кВ получен ток 3 мкА для электродов диаметром 63 мкм, 1 мкА для 120 мкм и 0,5 мкА для 200 мкм. На Рис. 3.8.5 показаны результаты измерений. С увеличением напряжения ток коронного разряда возрастал нелинейно. При одинаковом напряжении наибольшие значения тока наблюдались для электродов диаметром 63 мкм, а наименьшие — для электродов диаметром 200 мкм.

Для электродов диаметром 63 и 120 мкм наиболее резкий рост тока наблюдался при действующих напряжениях выше 5–6 кВ. Для электродов диаметром 200 мкм рост тока происходил значительно медленнее: при 8 кВ его значение составляло 68 мкА.

Экспериментально полученные значения тока коронного разряда для исследованных диаметров электродов приведены в таблице 3.8.1. Ток и напряжение измерялись на выходе источника питания, до балластного сопротивления и ловушки.

Результаты эксперимента при синусоидальном напряжении

Частицы засыпались в ловушку с диэлектрической поверхности. На торцевые запира-

Таблица 3.8.1: Ток при различных диаметрах электродов.

действующее $U_{\text{пит}}$, кВ	амплитудное $U_{\text{пит}}$, кВ	$I_{\text{амп}}$ / $I_{\text{д}}$, мкА, 63 мкм	$I_{\text{амп}}$ / $I_{\text{д}}$, мкА, 120 мкм	$I_{\text{амп}}$ / $I_{\text{д}}$, мкА, 200 мкм
1,08	1,53	0	0	0
2,16	3,05	0	0	0
3,15	4,45	4,2 / 3,0	1,4 / 1,0	0,7 / 0,5
4,20	5,94	23,8 / 17,0	16,5 / 11,8	4,2 / 3,0
5,15	7,28	56 / 40,0	39,5 / 28,2	8,4 / 6,0
6,15	8,70	99,4 / 71,0	83 / 59,1	16,4 / 11,7
7,15	10,11	182 / 130	165 / 118	36,4 / 26
8,05	11,38	294 / 210	270 / 192,8	95,2 / 68
9,00	12,73	406 / 290	385 / 275,2	—
10,00	14,14	532 / 380	508 / 363,1	—

ющие электроды подавался потенциал +5.1 кВ. Ток, при котором удерживались частицы, измерялся на ловушке.

Ловушка с электродами 63 мкм. Захват частиц происходил при напряжениях на электродах ловушки от 2 кВ до 4.5 кВ. На Рис. 3.8.6 представлена фотография захваченных частиц при действующем напряжении на электродах $U_{\text{ловушки}} = 3.2$ кВ и токе коронного разряда 30 мкА. Для определения размеров удержанных частиц было отобрано 48 частиц от 2 мкм до 8 мкм, со средним размером 6.5 мкм.

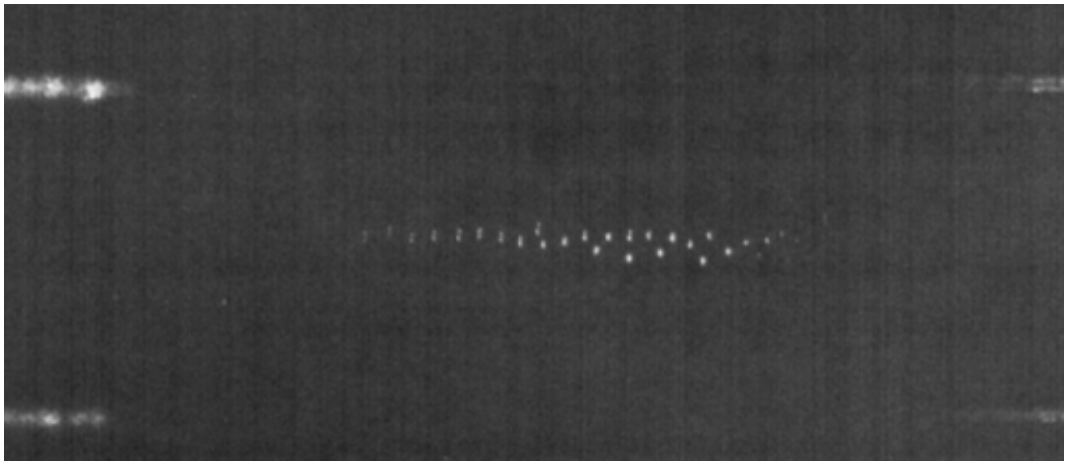


Рис. 3.8.6: Фото захваченных микрочастиц линейной электродинамической ловушкой с синусоидальным напряжением коронного разряда при диаметре электродов 63 мкм. Ток коронного разряда — 30 мкА. Действующее напряжение на электродах ловушки 3.2 кВ.

Ловушка с электродами 120 мкм. Захват частиц происходил при напряжениях на электродах ловушки от 1.5 кВ до 4.5 кВ. На Рис. 3.8.7 представлена фотография захваченных частиц при действующем напряжении на электродах 4.2 кВ и токе коронного разряда 40 мкА. Как и ранее, проводился отбор захваченных частиц. Было отобрано 22 частицы от 3 мкм до 8 мкм, со средним размером 4.68 мкм.

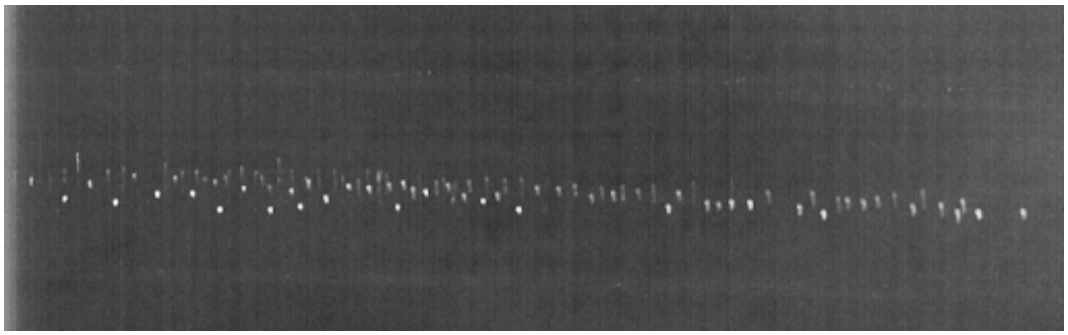


Рис. 3.8.7: Фото захваченных микрочастиц линейной электродинамической ловушкой с синусоидальным напряжением коронного разряда при диаметре электродов 120 мкм. Ток коронного разряда — 40 мкА. Действующее напряжение на электродах ловушки 4.2 кВ.

Ловушка с электродами 200 мкм. На Рис. 3.8.8 представлена фотография захваченных частиц при действующем напряжении на электродах 4.2 кВ, токе коронного разряда 28 мкА. Захват частиц происходил при напряжениях на электродах ловушки от 2.5 кВ до 5 кВ. Отобрано 8 частиц размером от 40 до 60 мкм.

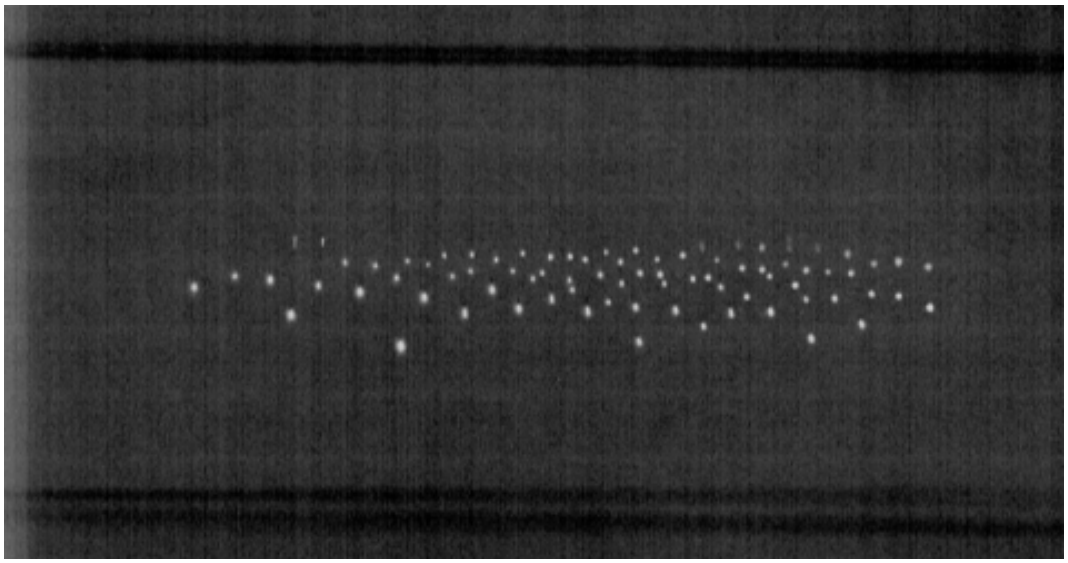


Рис. 3.8.8: Фото захваченных микрочастиц линейной электродинамической ловушкой с синусоидальным напряжением коронного разряда при диаметре электродов 200 мкм. Ток коронного разряда — 28 мкА. Действующее напряжение на электродах ловушки 4.2 кВ.

Экспериментально установлено, что характер удержания частиц зависит от тока корон-

ного разряда. При $I_c < 15$ мкА устойчивого удержания не наблюдалось: частицы проходили через область ловушки под действием силы тяжести. В диапазоне $15 < I_c < 70$ мкА наблюдался устойчивый захват и удержание частиц. При $I_c > 70$ мкА частицы захватывались на несколько секунд, после чего покидали область удержания в различных направлениях. Таким образом, для исследуемой конфигурации диапазон токов приблизительно 15–70 мкА соответствовал устойчивому режиму удержания.

Результаты эксперимента при прямоугольном напряжении

Для различных значений амплитуды симметричного прямоугольного напряжения частотой 50 Гц на коронирующих электродах различного диаметра получены распределения удержанных частиц по размеру, измеренные при микроскопическом анализе.

Ловушка с электродами 63 мкм. На Рис. 3.8.9 показано распределение по размеру захваченных частиц при напряжении на электродах 2.9 кВ. Для определения размеров удержанных частиц было отобрано 98 частиц; ширина размерного диапазона 3–6 мкм, со средним размером 4 мкм.

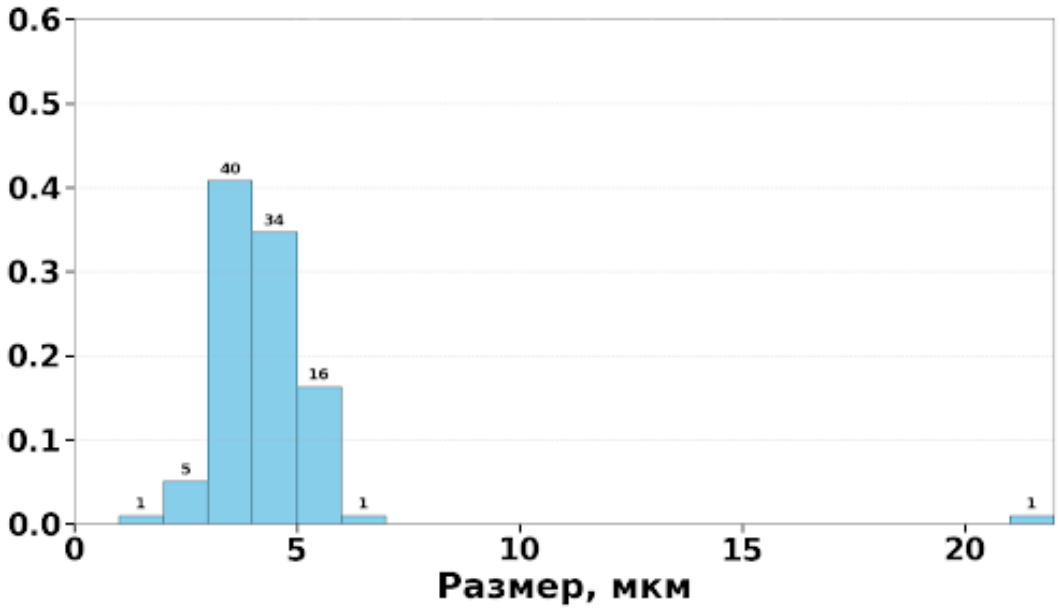


Рис. 3.8.9: Распределение по размерам частиц, удержанных в ловушке с прямоугольным напряжением на электродах диаметром 63 мкм. Напряжение на электродах ловушки 2.9 кВ.

Ловушка с электродами 120 мкм. На Рис. 3.8.10 представлена фотография захваченных частиц при напряжении на электродах 2 кВ. Как и ранее, проводился отбор захваченных частиц. Было отобрано 263 частицы; ширина распределения на половине максимума 3–10 мкм, со средним размером 8.5 мкм. В распределении появляются и частицы больших размеров 15–60 мкм. Распределение размеров для диаметра 120 мкм показано на Рис. 3.8.11.

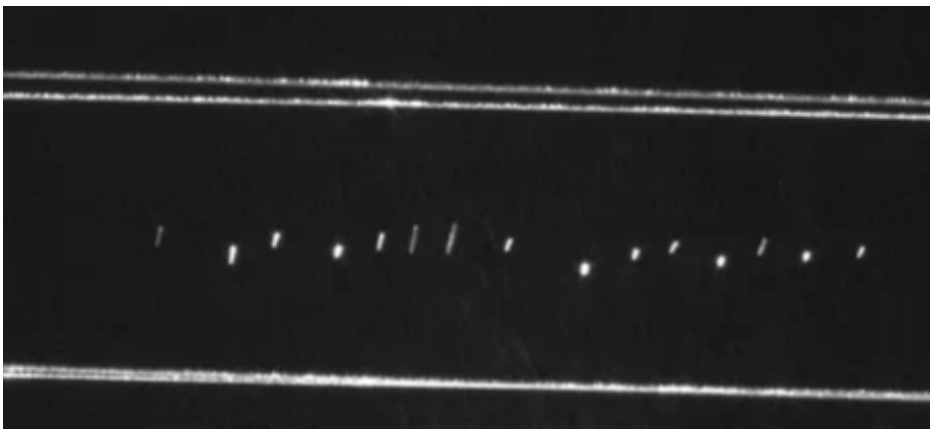


Рис. 3.8.10: Фото захваченных микрочастиц в линейной электродинамической ловушке с плазмой коронного разряда. Диаметр электродов — 120 мкм. Напряжение на электродах ловушки 2 кВ.

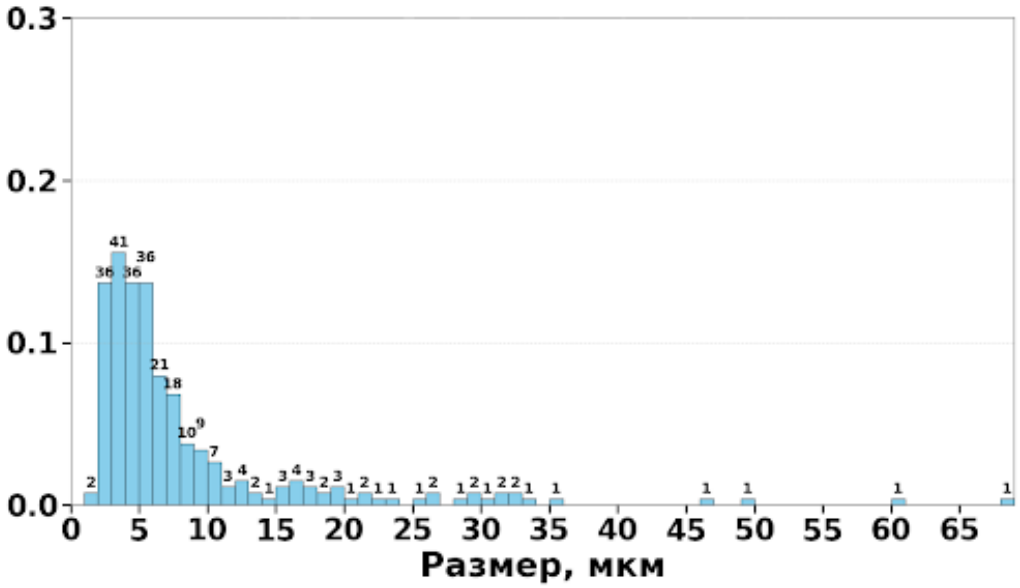


Рис. 3.8.11: Распределение по размерам частиц, удержанных в ловушке с прямоугольным напряжением на электродах диаметром 120 мкм. Напряжение на электродах ловушки 2 кВ.

Ловушка с электродами 200 мкм. На Рис. 3.8.12 показано распределение по размеру захваченных частиц при напряжении на электродах 4.2 кВ. Как и ранее, проводился отбор захваченных частиц. Было отобрано 92 частицы; полная ширина распределения на половине максимума 3.80–6.28 мкм, со средним размером 4.93 мкм; появилось больше крупных частиц размерами 35–60 мкм.

При напряжении 4.5 кВ на ловушке с диаметром 200 мкм зафиксирован искровой пробой (Рис. 3.8.13).

На Рис. 3.8.14 показаны траектории частиц, сфотографированные с торца ловушки в момент засыпки. Внутрь ловушки попадает ограниченная часть частиц, причём их траектории развиваются по спирали. Зарядка частиц в поле коронирующих электродов подробно

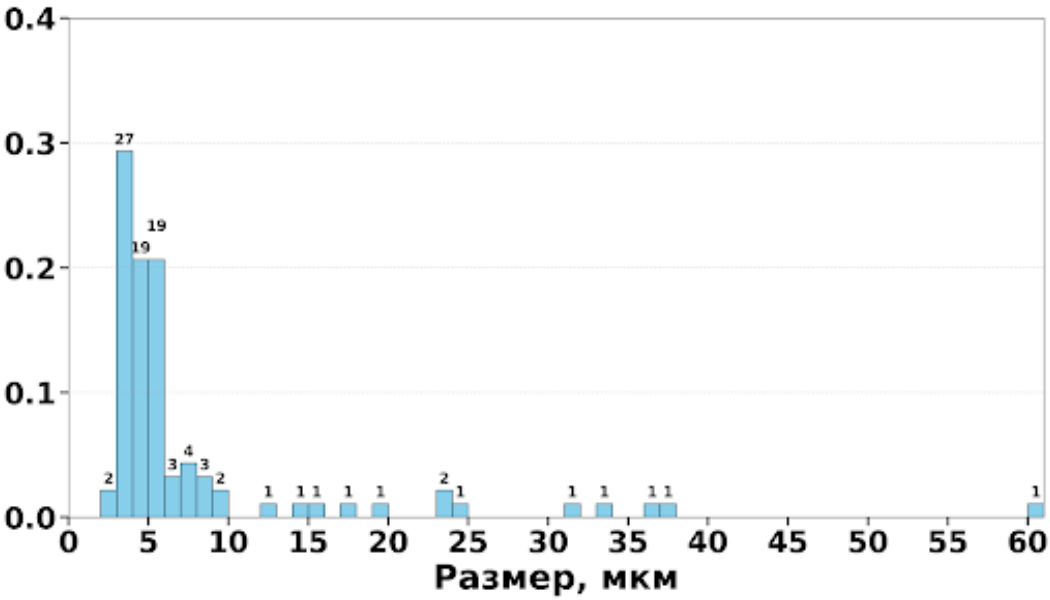


Рис. 3.8.12: Распределение по размерам частиц, удержанных в ловушке с прямоугольным напряжением на электродах диаметром 200 мкм, амплитуда напряжения 4.2 кВ.

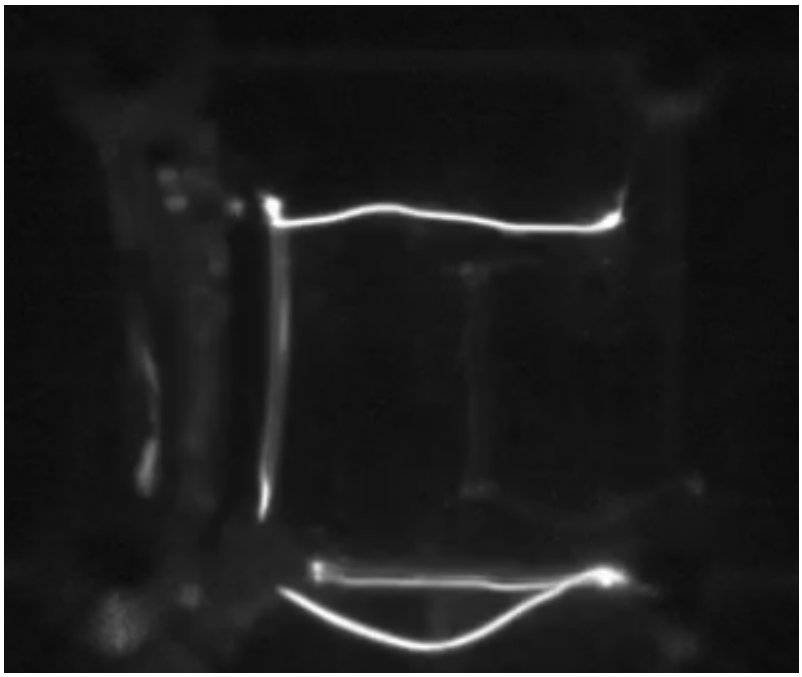


Рис. 3.8.13: Искровой пробой на электродах ловушки с коронным разрядом на электродах диаметром 200 мкм. Напряжение на электродах 4.5 кВ.

описана в [71].

На Рис. 3.8.15 показаны устойчивые траектории в ловушке. Визуально они схожи с полученными в предыдущих разделах траекториями в кулоновской ловушке. Несколько горизонтальных устойчивых траекторий в нижней части ловушки и стремящаяся к устойчивости частица развивает верхнюю траекторию.

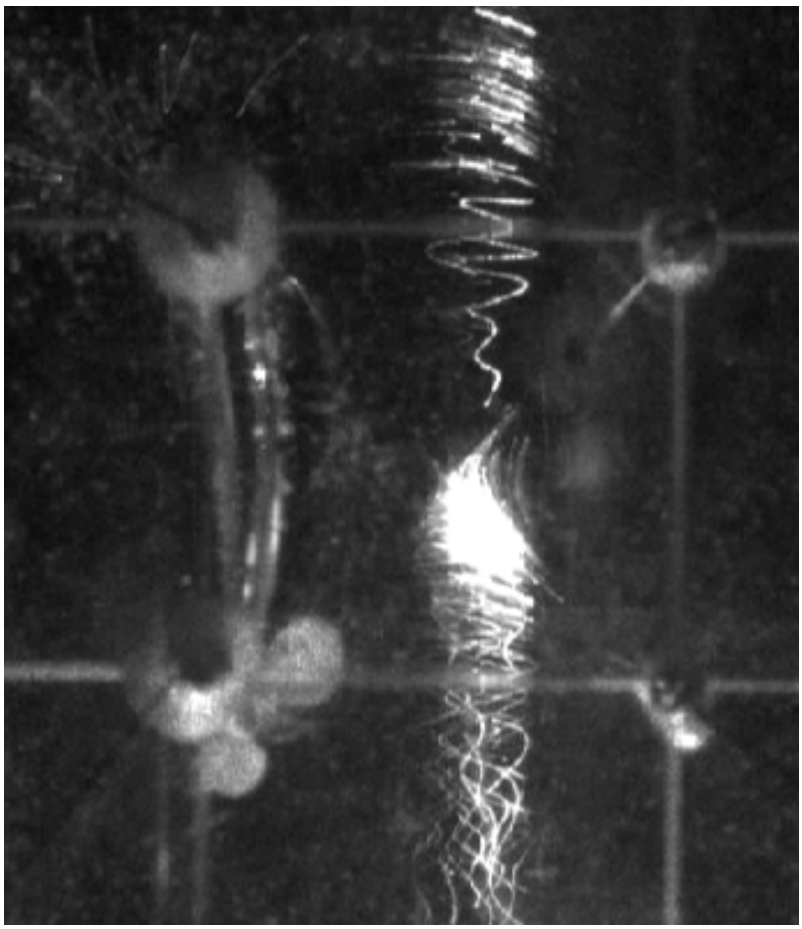


Рис. 3.8.14: Траектории частиц при засыпке над верхними электродами. Диаметр электродов 120 мкм. Напряжение на электродах ловушки 2 кВ.

Расчетная модель

В экспериментальной установке четыре проволочных электрода расположены в вершинах квадрата со стороной 1 см. Вблизи каждого тонкого электрода напряжённость определяется преимущественно его собственным полем. В расчётной модели каждый провод можно рассматривать отдельно, и вместо соседнего электрода вводится виртуальная плоскость, расположенная посередине между электродами.

По методу Дейча — Попкова распределение напряжённости вдоль оси системы «провод — плоскость» имеет вид

$$E_k(y) = \frac{2hr_0}{h^2 - y^2}\left[\frac{J_0}{r_0\varepsilon_0 h}\left(\frac{2}{3}h^3 + \frac{1}{3}y^3 - h^2 y\right) + E_0^2\right]^{1/2}, \qquad (3.8.1)$$

где r_0 — радиус провода, h — расстояние от оси провода до плоскости, y — координата, отсчитываемая от плоскости, J_0 — плотность тока коронного разряда, E_0 — начальная напряжённость на поверхности коронирующего электрода.

Расстояние от оси провода обозначим через r. Тогда $y = h - r$. Для области вблизи провода, для которой выполняется условие $r/h \ll 1$, знаменатель множителя формулы (3.8.1)

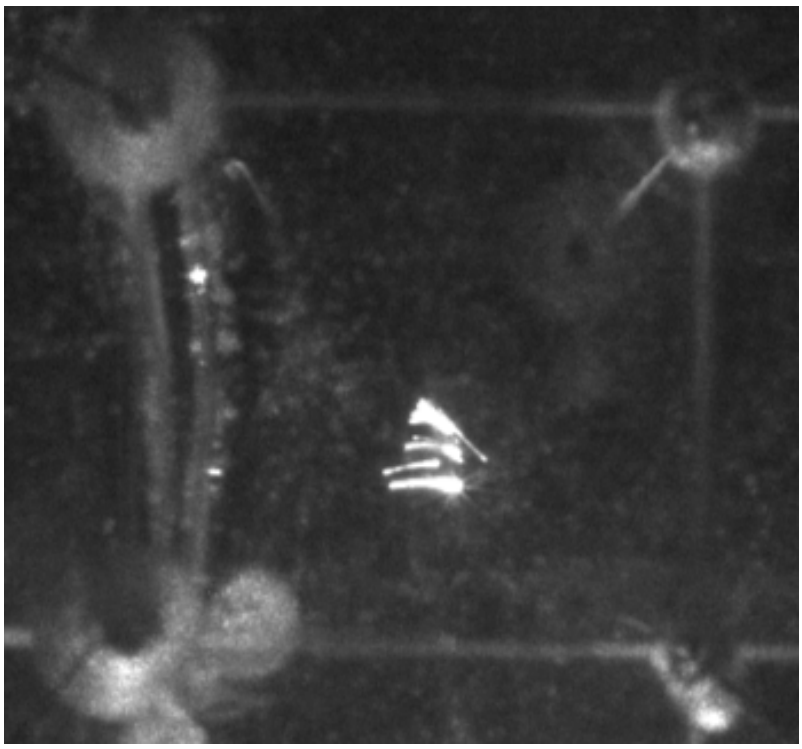


Рис. 3.8.15: Траектории частиц в ловушке с коронирующими электродами. Диаметр электрода 120 мкм, амплитуда синусоидального напряжения 2 кВ.

преобразуется следующим образом:

$$h^2 - y^2 = h^2 - (h - r)^2, \tag{3.8.2}$$

$$h^2 - y^2 = h^2 \left[1 - \left(1 - \frac{r}{h}\right)^2\right]. \tag{3.8.3}$$

Раскрывая скобки, получаем

$$h^2 - y^2 = 2hr - r^2. \tag{3.8.4}$$

При $r/h \ll 1$ членом r^2 по сравнению с $2hr$ можно пренебречь:

$$h^2 - y^2 \approx 2hr.$$

Для выражения, входящего в формулу (3.8.1), выполняется преобразование

$$\frac{2}{3}h^3 + \frac{1}{3}y^3 - h^2 y = \frac{2}{3}h^3 + \frac{1}{3}(h - r)^3 - h^2(h - r). \tag{3.8.5}$$

После раскрытия скобок:

$$\begin{aligned}\frac{2}{3}h^3 + \frac{1}{3}(h - r)^3 - h^2(h - r) = \frac{2}{3}h^3 + \frac{1}{3}\left(h^3 - 3h^2 r + 3hr^2 - r^3\right) \\ - h^3 + h^2 r.\end{aligned} \tag{3.8.6}$$

Члены нулевого и первого порядков взаимно сокращаются, поэтому

$$\frac{2}{3}h^3 + \frac{1}{3}y^3 - h^2 y = hr^2 - \frac{r^3}{3}. \tag{3.8.7}$$

При $r/h \ll 1$:

$$hr^2 - \frac{r^3}{3} \approx hr^2. \tag{3.8.8}$$

Таким образом, при приближении к поверхности провода вклад члена, содержащего плотность тока J_0, уменьшается пропорционально r^2. Если в рассматриваемой области он мал по сравнению с E_0^2, выражение под корнем можно приближённо заменить величиной E_0^2. Тогда формула (3.8.1) принимает вид

$$E_k(r) \approx \frac{2r_0E_0}{h\left[1 - \left(1 - \frac{r}{h}\right)^2\right]}. \tag{3.8.9}$$

При $r/h \ll 1$

$$1 - \left(1 - \frac{r}{h}\right)^2 \approx \frac{2r}{h}.$$

Получаем приближение для напряжённости электрического поля

$$E_k(r) \approx \frac{r_0}{r}E_0.$$

Приближение показывает, что напряжённость максимальна у поверхности провода и быстро уменьшается при удалении от него. Распределение напряжённости для системы «провод — плоскость» представлено на Рис. 3.8.16.

Из рисунка следует, что вблизи коронирующего провода поле быстро уменьшается, а в основной части межэлектродного промежутка изменяется значительно слабее. Начальное значение напряжённости принимается равным

$$E_0 \approx 10^6 \text{ В/м}.$$

На расстоянии, составляющем приблизительно $l = 0.2h$, напряжённость в рамках первого приближения принимается равной

$$E_1 = 0{,}5E_0 = 5 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

Приближение показывает, что напряжённость максимальна у поверхности провода и быстро уменьшается при удалении от него. Распределение напряжённости для системы «провод — плоскость» представлено на Рис. 3.8.16.

Из рисунка следует, что вблизи коронирующего провода поле быстро уменьшается, а в основной части межэлектродного промежутка изменяется значительно слабее. Начальное значение напряжённости принимается равным

$$E_0 \approx 10^6 \text{ В/м}.$$

На расстоянии, составляющем приблизительно $l = 0.2h$, напряжённость в рамках первого приближения принимается равной

$$E_1 = 0{,}5E_0 = 5 \cdot 10^5 \text{ В/м}.$$

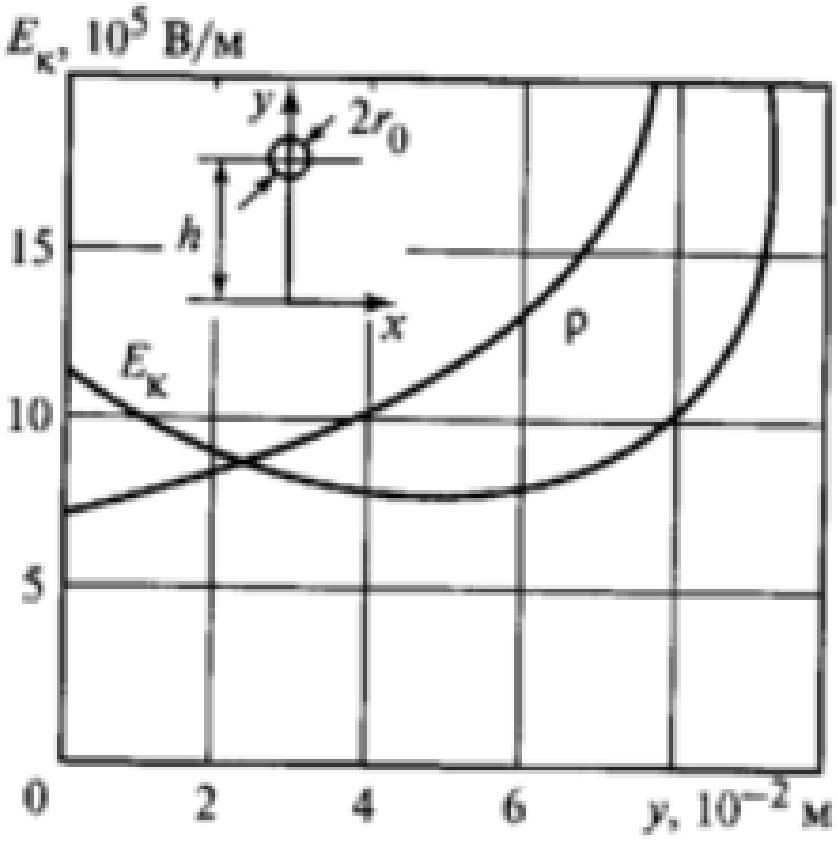


Рис. 3.8.16: Распределение напряжённости и плотности объёмного заряда вдоль оси y в системе электродов «провод — плоскость» ($U = 100$ кВ, $r_0 = 2.5 \cdot 10^{-3}$ м; $h = 0.1$ м). (1 дел. шкалы для $\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Кл/м^3). Рисунок взят и адаптирован из работы [102].

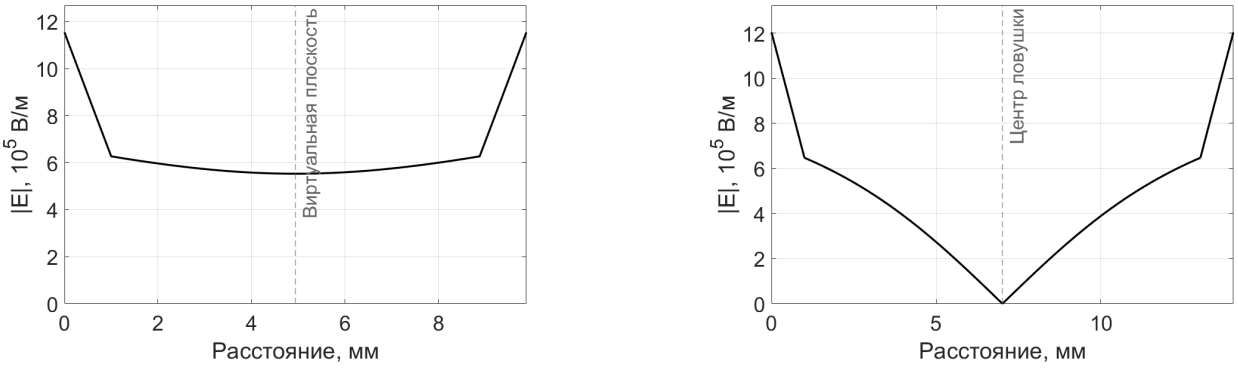
На участке от поверхности электрода до расстояния $l = 0.2h$ напряжённость аппроксимируется линейной зависимостью, а далее принимается постоянной:

$$E(s) = \begin{cases} E_0 - \dfrac{E_0 - E_1}{l}\, s, & 0 \le s \le l, \\ E_1, & l < s \le h - r_0, \end{cases} \tag{3.8.10}$$

где s — расстояние от поверхности провода, r_0 — радиус электрода. С учётом $E_1 = 0{,}5E_0$:

$$E(s) = \begin{cases} E_0 \left(1 - \dfrac{s}{2l}\right), & 0 \le s \le l, \\ 0{,}5E_0, & l < s \le h - r_0. \end{cases} \tag{3.8.11}$$

На Рис. 3.8.17 построено распределение электрической напряжённости между соседними электродами ловушки в зависимости от расстояния до поверхности коронирующего электрода для диаметров 120 мкм и напряжения на электродах 2.5 кВ. На графиках отображается суммарное поле четырёх проводов.



а б

Рис. 3.8.17: Распределение напряжённости электрического поля между (а) соседними электродами; (б) диагональными электродами.

Выполнен численный расчёт удержания заряженной микрочастицы в переменном поле коронирующих электродов.

На Рис. 3.8.18 показаны траектории частицы диаметром 5 мкм при диаметре электродов 120 мкм, прямоугольном напряжении на электродах амплитудой 2.5 кВ. Движение частицы рассчитывается из уравнения Ланжевена так же, как в предыдущих разделах.

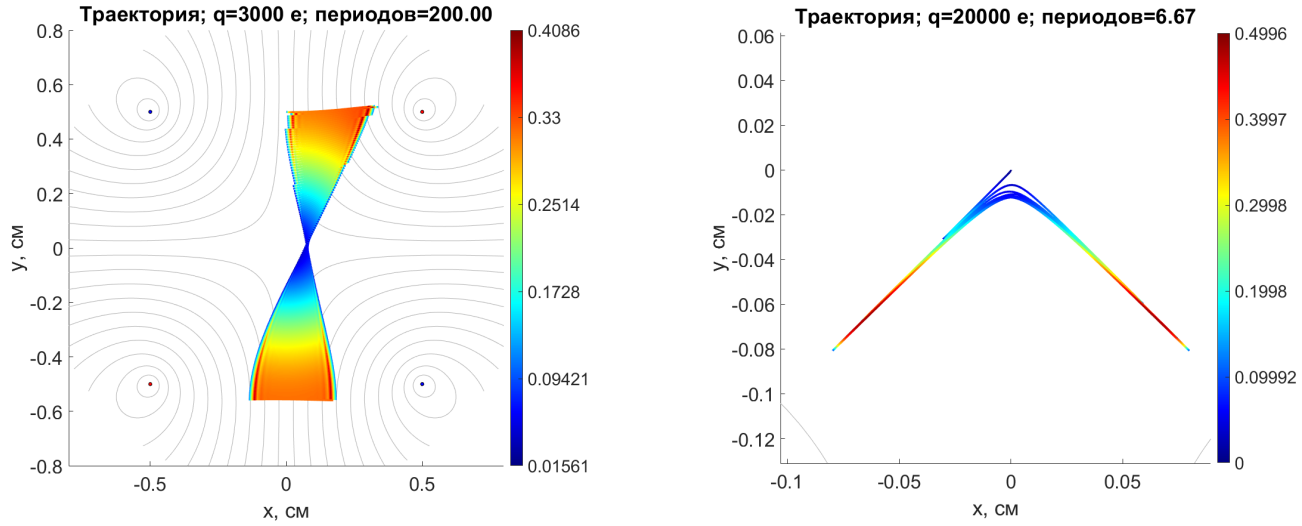
Спиральная траектория влёта и вылета из ловушки на Рис. 3.8.18а получена при заряде на частице $3000\,e$ и аналогична экспериментально полученным траекториям на Рис. 3.8.15. Повторяющаяся траектория, при которой частица длительное время остаётся в ловушке, показана на Рис. 3.8.18б при заряде $20\,000\,e$.

Таким образом, численное моделирование удержания микрочастиц в переменном поле коронного разряда подтвердило возможность устойчивого удержания частиц 5 мкм из полученного экспериментально диапазона.

Экспериментально показано удержание предварительно заряженных диэлектрических микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронирующими электродами при синусоидальном и прямоугольном напряжении частотой 50 Гц.

Показано, что ток коронного разряда нелинейно возрастает с напряжением и при одинаковом напряжении уменьшается с увеличением диаметра электродов.

При увеличении диаметра электродов наблюдалось расширение размерного распределе-



а б

Рис. 3.8.18: Траектории частицы 5 мкм: (а) влёт в ловушку со скоростью 0.1 м/с; (б) удержание в ловушке

ния удерживаемых частиц и появление более крупных фракций. Для электродов диаметром 63 мкм распределение удерживаемых частиц было близким к монодисперсному: основная фракция находилась в диапазоне 3–6 мкм, а ширина распределения на половине максимума соответствовала интервалу 3,39–4,61 мкм. При увеличении диаметра электродов до 120 и 200 мкм основной диапазон размеров расширялся до 3–10 мкм, появлялись удерживаемые частицы размером 15–60 мкм и увеличивался средний размер частиц.

3.9 Выводы

В главе численным расчётом и экспериментально исследованы траектории заряженных диэлектрических микрочастиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке в воздухе при синусоидальной и прямоугольной формах удерживающего напряжения.

Показано, что в воздухе при атмосферном давлении характер движения частицы определяется соотношением электрических сил и силы вязкого сопротивления. Установлено, что в воздухе при одинаковом отношении заряда к массе их увеличение приводит к изменению формы траектории движения. В отличие от движения в вакууме, где динамика частиц не менялась. Таким образом, описание динамики микрочастиц в воздухе законами подобия, справедливыми для условий вакуума, не выполняется.

Для синусоидального и прямоугольного напряжений реализуются сходные режимы движения частиц: устойчивое удержание в ограниченной области ловушки, потеря удержания

под действием силы тяжести и вылет частицы к электродам или из ловушки под действием электрических сил. Расчётные траектории качественно согласуются с экспериментальными.

Показано, что использование знакопеременного прямоугольного напряжения обеспечивает удержание частиц при меньших значениях заряда и меньших амплитудах напряжения по сравнению с синусоидальным режимом.

Установлено, что асимметрия прямоугольного импульса приводит к развитию траектории вдоль одной из диагоналей ловушки. Диагональ определяется полярностью напряжения, преобладающей в течение периода.

Показана возможность управления динамикой частиц с помощью внешних электрических полей. Внешнее знакопеременное прямоугольное поле позволяет изменять устойчивость движения частиц, переводя их из устойчивого состояния в неустойчивое и наоборот. Внешнее постоянное электрическое поле вызывает смещение кулоновской системы с увеличением его амплитуды и приводит к пространственному разделению частиц по размерам.

Экспериментально показано и подтверждено расчётом удержание микрочастиц узкого размерного диапазона в квадрупольной ловушке с коронным разрядом на электродах при переменном прямоугольном напряжении. Показано изменение размерного состава удерживаемых частиц с изменением диаметра электродов.

Глава 4. Области удержания.

В главе представлены результаты численных расчётов границ областей удержания заряженных микрочастиц оксида алюминия в воздухе в линейной квадрупольной электродинамической ловушке при синусоидальном и знакопеременном прямоугольном напряжении. Расчётные области удержания сопоставлены с экспериментальными данными, полученными при различных амплитудах удерживающего напряжения и различных условиях зарядки частиц.

Для прямоугольного напряжения теоретические исследования областей устойчивости фильтров и ловушек ионов выполнены для вакуумных условий, где динамика частиц зависит только от отношения заряда частицы к её массе Q/m, выполняется закон подобия и области удержания соответствуют диаграммам Айнса–Стретта, построенным на основе уравнений Матье. В воздухе действуют силы вязкого трения и гравитации, поэтому расчёт с параметрами подобия невозможен и области удержания будут отличаться. Для корректного определения границ удержания частиц в воздухе требуется численный расчёт для каждого размера и заряда из исследуемых диапазонов и подтверждение экспериментом.

4.1 Исходные данные при расчёте областей удержания

В этом разделе показан расчёт областей удержания на примере удержания частиц при синусоидальном напряжении. Расчёт при прямоугольном напряжении и сопоставление областей будут подробно описаны в разделе 4.4.

Области удержания для фиксированного размера частицы построены в координатах «амплитуда удерживающего напряжения — заряд частицы» при фиксированной частоте напряжения и диаметре частицы.

Диапазон напряжения в расчётах выбран в соответствии с экспериментальной установкой — от 1 до 10 кВ с шагом 1 кВ. Диапазон зарядов в расчёте для всех частиц — от 100 до 1 500 000 зарядов электрона e с шагом $100\,e$. Частота удерживающего синусоидального напряжения принималась равной 50 Гц. Влияние частоты при прямоугольном напряжении отдельно показано в разделе 4.5. Размеры частиц, для которых выполнен расчёт, соответствуют размерам исходной смеси частиц: 5–50 мкм. Для каждой пары параметров «размер частицы — заряд» из выбранных диапазонов вычислялась динамика частицы в ловушке с одной из амплитуд удерживающего напряжения из диапазона и фиксированной частотой. Расчётная схема подробно описана в главе 2 и заключалась в решении уравнения Ланжевена

с учётом силы гравитации и силы трения по формуле Стокса.

В отличие от главы 3, траектории движения частиц не визуализировались. Фиксировался только конечный результат — частица оставалась в ловушке или покидала её.

Критерий удержания — временной. Если частица находилась в ловушке в течение заданного числа периодов переменного удерживающего напряжения, она считалась удерживаемой, и параметры её удержания включались в итоговые области. Визуализация траекторий подтверждала корректность расчёта областей.

На Рис. 4.1.1 показана область удержания для частицы размером 20 мкм при синусоидальном напряжении. Границы области выделены синим маркером. Пространство между границами, включая значения на границах, считаем областью удержания, где для частицы размером 20 мкм и с зарядом из диапазона, ограниченного границами, для каждой амплитуды напряжения может быть рассчитана устойчивая траектория.

В предыдущей главе 3, в разделе 3.1, мы рассмотрели траектории частицы размером 20 мкм при амплитуде синусоидального напряжения 5 кВ. На Рис. 4.1.1 указано расположение этих траекторий. Видно, что устойчивая траектория, развивающаяся по горизонтальной линии для частицы с зарядом 98 000 e, находится внутри области (в левом верхнем углу рисунка). Траектории выпадения и вылета — за границами области.

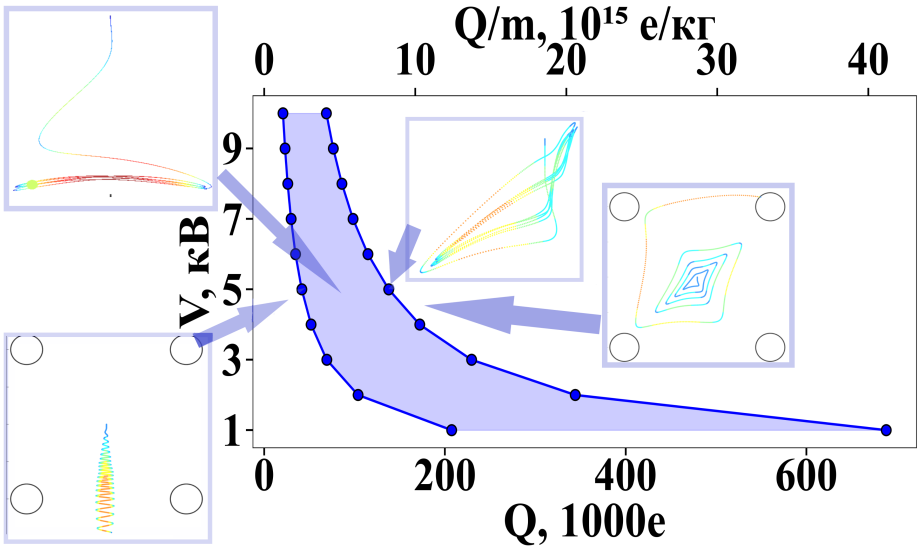


Рис. 4.1.1: Область удержания микрочастицы диаметром 20 мкм при синусоидальном напряжении. Диапазон зарядов при амплитуде напряжения 5 кВ — от 41 494 e до 137 614 e.

Можем выделить закономерности, характерные для областей удержания при различных параметрах. Область удержания сужается и смещается в область меньших зарядов с увеличением амплитуды удерживающего напряжения. Наибольшая ширина области достигается

при амплитуде 1–2 кВ. Диапазон зарядов, при которых частица удерживается при малых амплитудах 1–3 кВ, может практически не пересекаться с диапазонами для напряжения большей амплитуды. Ширина области практически не меняется для значений напряжения 7–10 кВ.

Алгоритм бинарного поиска

Расчёт всех точек области удержания прямым перебором очень долгий, и для отдельных граничных точек время расчёта занимает до сотен периодов. Разработан алгоритм бинарного поиска границ области удержания.

Алгоритм расчёта следующий. Для каждого значения напряжения задаётся начальный диапазон поиска по заряду в элементарных зарядах e: от 100 до 1 500 000 e. Область сканируется грубой сеткой из 80 равноотстоящих точек. Для каждой точки запускается моделирование траектории: методом Верле интегрируются уравнения движения с учётом силы Стокса, силы тяжести и переменной электрической силы, вычисляемой по заранее рассчитанной карте потенциала.

Если частица не покидает область ловушки за заданное число шагов по времени, то она считается удерживаемой, иначе — вылетевшей. Когда на грубой сетке найден непрерывный блок устойчивых точек, алгоритм переходит к бинарному поиску для точного определения границ с заданной точностью 10 элементарных зарядов e.

Бинарный поиск работает следующим образом: имея две соседние точки на грубой сетке, одна из которых устойчива, а другая нет, алгоритм итеративно сужает интервал, вычисляя состояние в средней точке, и заменяет одну из границ в зависимости от результата. Так продолжается до тех пор, пока ширина интервала не станет меньше 10 e. Если при сканировании грубой сеткой левая граница не была заключена между устойчивой и неустойчивой точками (то есть самая левая точка сетки уже устойчива), то алгоритм расширяет диапазон влево, уменьшая нижнюю границу вдвое. Аналогично, если не заключена правая граница (самая правая точка всё ещё устойчива), диапазон расширяется вправо, увеличивая верхнюю границу вдвое. Процесс расширения повторяется до тех пор, пока обе границы не окажутся внутри диапазона или не будет достигнут предел.

Максимальное число итераций расширения — 14, а верхний предел поиска ограничен значением 10^8 e, что гарантирует нахождение границ для всех рассматриваемых частиц. При переходе к следующему напряжению диапазон поиска сужается на основе предыдущих границ с запасом 75 % в обе стороны, что позволяет существенно ускорить расчёт, не теряя точности.

Влияние времени расчёта на границы областей удержания

Для выбора временного критерия удержания было проведено несколько серий расчётов с различным числом периодов расчёта. Обнаружено, что для частиц диаметром 5 мкм время расчёта значительно влияет на положение левой границы области удержания.

На Рис. 4.1.2–4.1.4 показаны три области удержания частиц диаметром 5, 20 и 50 мкм соответственно в синусоидальном поле ловушки при времени расчёта 40 периодов (красная область, граница выделена квадратом), 250 периодов (синяя область, граница выделена кругом) и 480 периодов (зелёная область, граница выделена треугольником). Начальное положение частицы соответствует центру ловушки, начальная скорость равна нулю.

На Рис. 4.1.2 при расчёте динамики частицы диаметром 5 мкм за 40 периодов левая граница области удержания соответствовала значению заряда 1 e (минимальному из расчетного диапазона зарядов) для всех амплитуд удерживающего напряжения. Такое поведение отличается от областей удержания для частиц диаметром 20 мкм (Рис. 4.1.3) и 50 мкм (Рис. 4.1.4), где левая граница заметно изменялась при изменении амплитуды напряжения.

Визуализация траекторий, соответствующих левой границе области удержания на Рис. 4.1.2, показала, что лёгкая частица при малых зарядах движется вертикально из центра потенциальной ямы с очень малой скоростью в течение десятков или сотен периодов под действием силы тяжести. Достигая области действия электрических сил в ловушке, частица уменьшает вертикальную компоненту скорости, тогда как горизонтальная компонента продолжает возрастать. Например, траектория падения частицы из ловушки, представленная на Рис. 4.1.2 слева, развивается в течение 240 периодов. Расчёт траектории столкновения с электродом на правой границе синей области при заряде 573 700 e занимает 400 периодов.

Диапазон зарядов при времени расчёта 480 периодов составляет: при $V = 1$ кВ — от 4 500 e до 155 000 e; при $V = 5$ кВ — от 9 900 e до 43 300 e; при $V = 7$ кВ — от 7 000 e до 29 000 e.

С увеличением времени расчёта от 40 до 480 периодов для частицы диаметром 5 мкм левая граница области удержания сместилась максимально на 53 000 e, правая — на 47 000 e при $V = 1$ кВ. Суммарное изменение составило более 90 % итоговой ширины области удержания, построенной за 480 периодов. При $V = 4$ кВ смещение составило 12 300 e и 12 600 e для левой и правой границ соответственно, что соответствует примерно 35 % ширины области. С повышением напряжения смещение результирующих границ области составило 5 000 e и 6 000 e для левой и правой границ соответственно, не превышая 20 % ширины области удержания.

На Рис. 4.1.3 показана область удержания частицы диаметром 20 мкм. Визуально области, построенные при времени расчёта 40, 250 и 480 периодов, практически совпадают. Диапазон

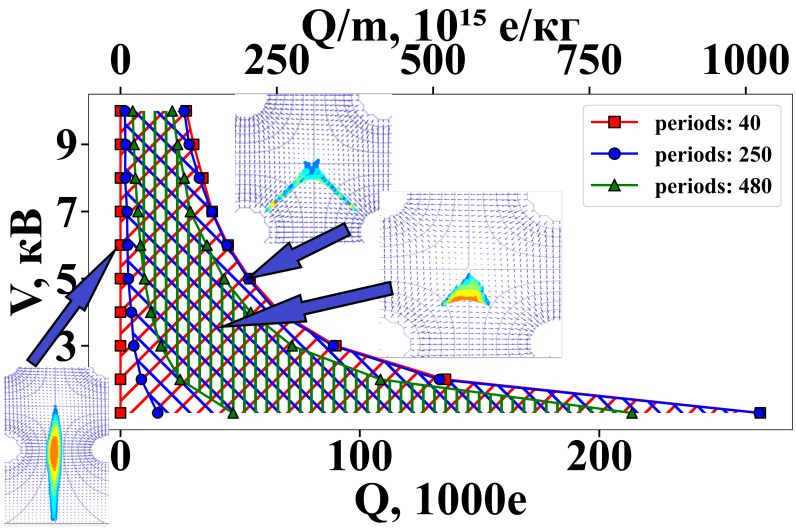


Рис. 4.1.2: Области удержания микрочастицы диаметром 5 мкм при различном времени расчёта: красная область — 40 периодов; синяя — 250 периодов; зелёная — 480 периодов.

зарядов при времени расчёта 480 периодов составляет: при $V = 1$ кВ — от 207 463 e до 687 733 e; при $V = 5$ кВ — от 41 400 e до 138 000 e; при $V = 7$ кВ — от 29 637 e до 98 200 e.

Максимальное смещение зафиксировано также, как и в случае частицы диаметром 5 мкм, при $V = 1$ кВ и составляет 9 500 e для левой границы и 12 500 e для правой, что не превышает 2 % ширины области удержания (около 480 000 e). Уже при $V = 4$ кВ смещение уменьшается до 2 400 e и 3 750 e для правой и левой границ соответственно (менее 1 % ширины области). При дальнейшем повышении напряжения смещение составляет 1 000–2 300 e, что соответствует долям процента от общей ширины области удержания.

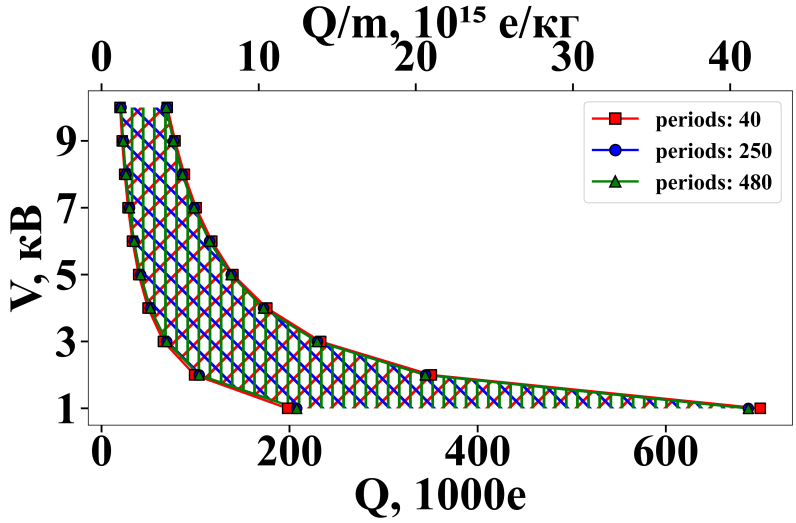


Рис. 4.1.3: Области удержания микрочастицы диаметром 20 мкм при различном времени расчёта.

На Рис. 4.1.4 показана область удержания частицы диаметром 50 мкм. Границы областей практически сливаются на общем масштабе графика. Диапазон зарядов при времени расчёта

480 периодов составляет: при $V = 1$ кВ — от 3 006 885 e до 6 175 500 e; при $V = 5$ кВ — от 601 383 e до 1 236 066 e; при $V = 7$ кВ — от 429 560 e до 882 367 e.

Максимальное смещение при $V = 1$ кВ составляет 127 870 e для левой границы и 21 500 e для правой, что соответствует примерно 4 % ширины области удержания (3,2 млн e). При $V = 4$ кВ смещение составляет 32 000 e для левой границы и 4 585 e для правой, что соответствует менее 1 % ширины области. При дальнейшем повышении напряжения смещение левой границы уменьшается до 12 000 e, а правой — до 1 400 e, что составляет десятые доли процента от ширины области удержания.

Для всех рассмотренных размеров частиц увеличение напряжения приводит к значительному сужению области удержания. При повышении напряжения от 1 до 5 кВ ширина области уменьшается на 78–80 %. При дальнейшем увеличении напряжения до 7 кВ суммарное уменьшение относительно 1 кВ достигает 85–86 %.

Таким образом, установлено, что длительность моделирования существенно влияет на определение области удержания лёгких частиц малого диаметра (5 мкм): недостаточное время расчёта приводит к значительному смещению границ области удержания. Для частиц большего диаметра (20–50 мкм) влияние времени расчёта на положение границ области удержания значительно меньше и в рассмотренном диапазоне параметров не оказывает существенного влияния на результаты.

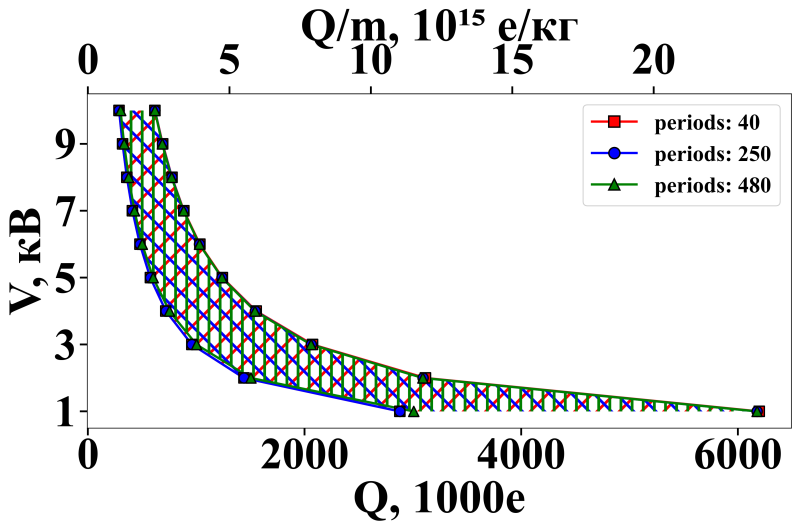


Рис. 4.1.4: Области удержания микрочастицы диаметром 50 мкм при различном времени расчёта.

Влияние начального положения на удержание

Можно отметить, что при увеличении времени расчёта на Рис. 4.1.2–4.1.4 смещение левой границы превышает смещение правой. Как показано на Рис. 4.1.2, частицы с недостаточным для удержания зарядом при данной массе опускаются из центра потенциальной ямы ловушки

к нижним электродам под действием силы тяжести при слабом влиянии электрического поля в течение значительной части расчётного времени.

Для исключения из расчётного времени наиболее длительного этапа движения в потенциальной яме области удержания были построены при начальном положении частицы в ловушке уже в области действия электрического поля, вне потенциальной ямы.

На Рис. 4.1.5–4.1.7 показаны результаты расчёта областей удержания при начальном положении частицы в центре ловушки и при смещении на 350 мкм ниже центра, в область слабого электрического поля ловушки, при нулевой начальной скорости.

При смещении начального положения в область действия электрических сил левая граница незначительно сдвинулась в область больших зарядов, преимущественно для частиц диаметром 5 мкм. В большей степени изменение начального положения частицы повлияло на правую границу, приведя к расширению области удержания.

На Рис. 4.1.5 показано сравнение двух областей удержания для частицы диаметром 5 мкм. Левая граница практически не изменилась, сместившись максимально на 2 500 e при $V = 3$ кВ. Правая граница расширилась на 53 000 e (32 %) при $V = 1$ кВ при ширине области с нулевым начальным положением 167 000 e; на 9 500 e (около 28 %) при $V = 5$ кВ при ширине красной области 33 300 e; на 8 200 e (37 %) при $V = 7$ кВ при ширине области 22 000 e.

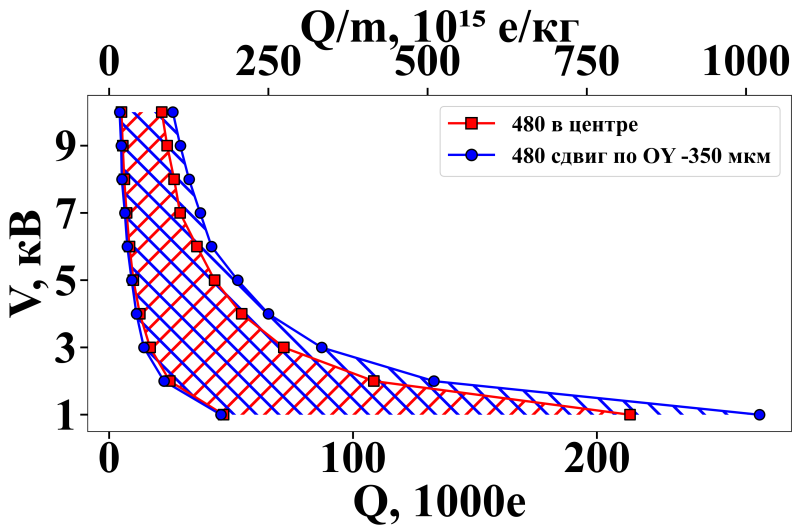


Рис. 4.1.5: Области удержания микрочастицы диаметром 5 мкм при различном начальном положении.

Для частиц диаметром 20 и 50 мкм на Рис. 4.1.6–4.1.7 видно, что области практически сливаются, а их смещение составляет единицы процентов.

Таким образом, начальное положение существенно влияет главным образом на положение правой границы области удержания частиц малого диаметра. Для частиц диаметром

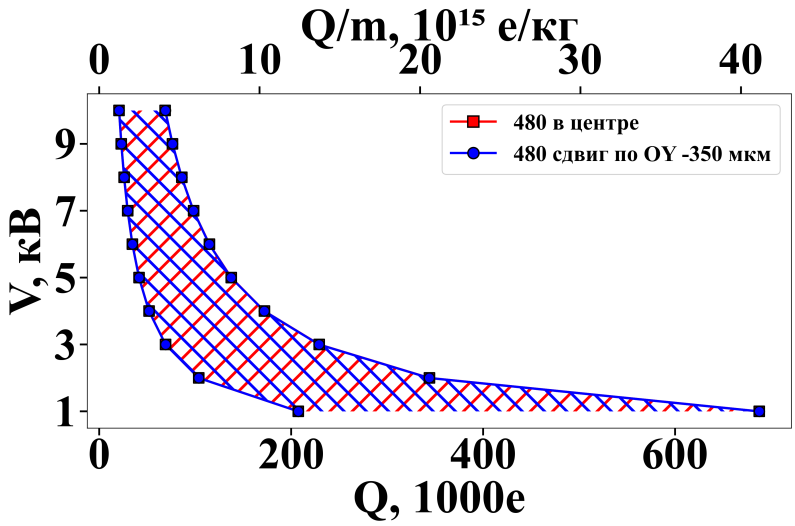


Рис. 4.1.6: Области удержания микрочастицы диаметром 20 мкм при различном начальном положении.

20–50 мкм изменение начального положения практически не изменяет общий вид области удержания, что позволяет использовать меньшее число периодов расчёта и снизить вычислительные затраты.

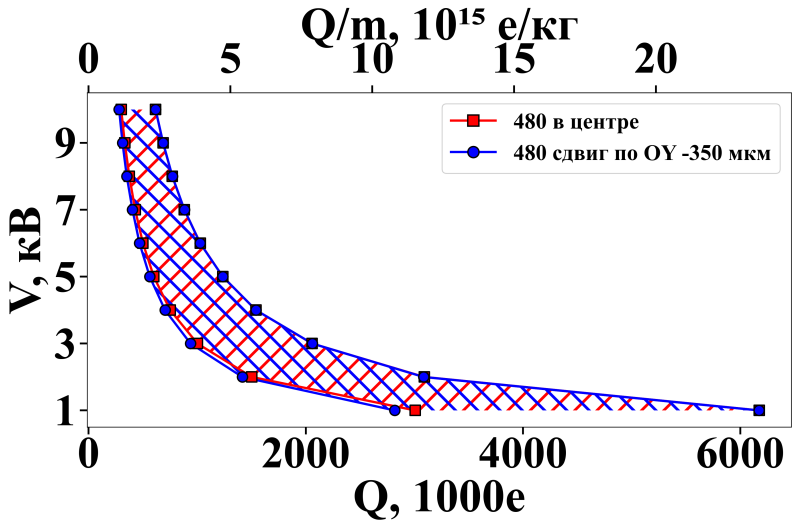


Рис. 4.1.7: Области удержания микрочастицы диаметром 50 мкм при различном начальном положении.

Влияние начальной скорости на удержание

В эксперименте частицы засыпаются в ловушку сверху или втягиваются с металлической пластины снизу и уже обладают некоторой начальной скоростью при развитии траекторий в поле ловушки. Проанализировано влияние начальной скорости на границы областей удержания. Установлено, что начальная скорость не изменяет качественно характер областей удержания, однако для частиц диаметром 5 мкм может приводить к заметному смещению

правой границы.

Рассчитаны области удержания для трёх вариантов начальных условий: нулевая скорость, скорость 0,1 м/с, направленная вертикально вниз, вдоль направления действия силы тяжести, и скорость 0,1 м/с, направленная горизонтально вправо. Вертикальная начальная скорость могла ускорять выпадение частицы из ловушки, тогда как горизонтальная скорость в основном изменяла начальный участок траектории. На Рис. 4.1.8–4.1.10 показаны результаты для частиц диаметром 5, 20 и 50 мкм соответственно.

На Рис. 4.1.8 показаны области удержания для частицы диаметром 5 мкм. Ненулевая вертикальная начальная скорость расширила правую границу на 13 % при $V = 4$ кВ и на 8,8 % при $V = 7$ кВ. Для остальных значений амплитуды напряжения смещение не превышает 3 %. При горизонтальной начальной скорости правая граница максимально расширилась на 8,2 % при $V = 7$ кВ. Для остальных значений напряжения смещение не превышает 2,5 %. Смещение левой границы не превышает 2,8 %.

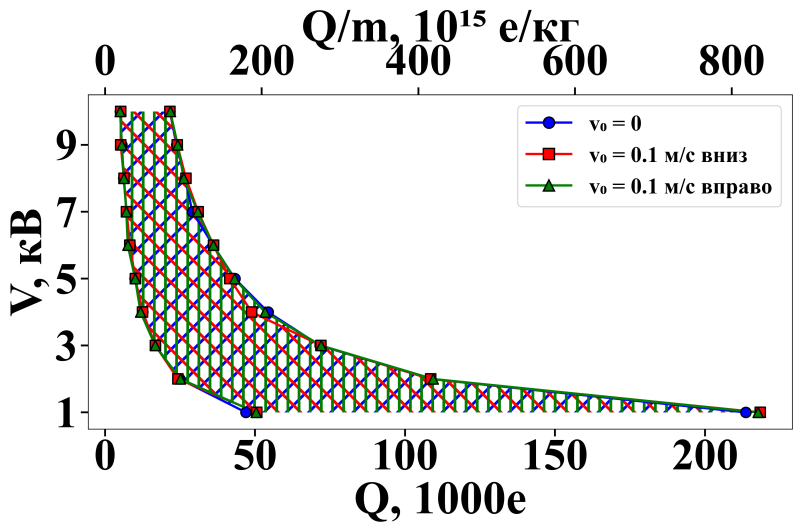


Рис. 4.1.8: Области удержания микрочастицы диаметром 5 мкм при различной начальной скорости: синяя область — нулевая скорость; красная — 0,1 м/с, направленная вертикально вниз; зелёная — 0,1 м/с, направленная горизонтально.

Для частиц диаметром 20 мкм (Рис. 4.1.9) и 50 мкм (Рис. 4.1.10) смещение границ не превышает 0,5 %.

Таким образом, для частиц диаметром 20–50 мкм влияние начальной скорости на границы области удержания пренебрежимо мало. Для частиц диаметром 5 мкм начальная скорость не изменяет общего характера области удержания, однако может приводить к заметному изменению положения её правой границы.

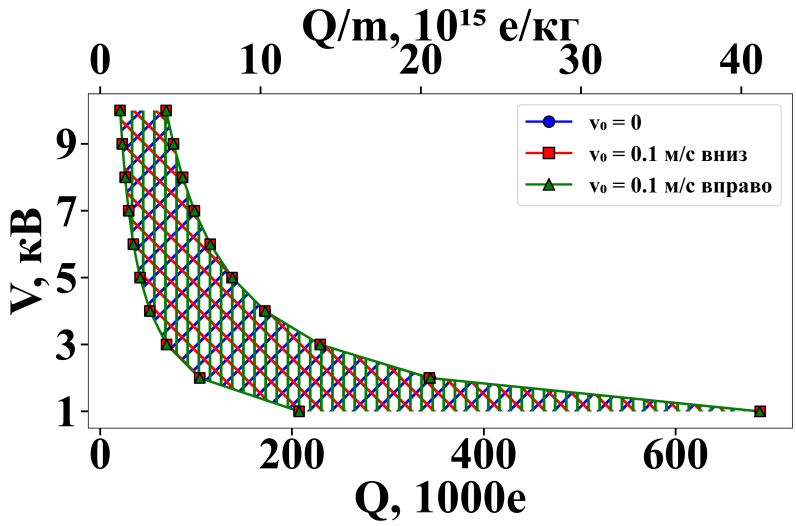


Рис. 4.1.9: Области удержания микрочастицы диаметром 20 мкм при различной начальной скорости.

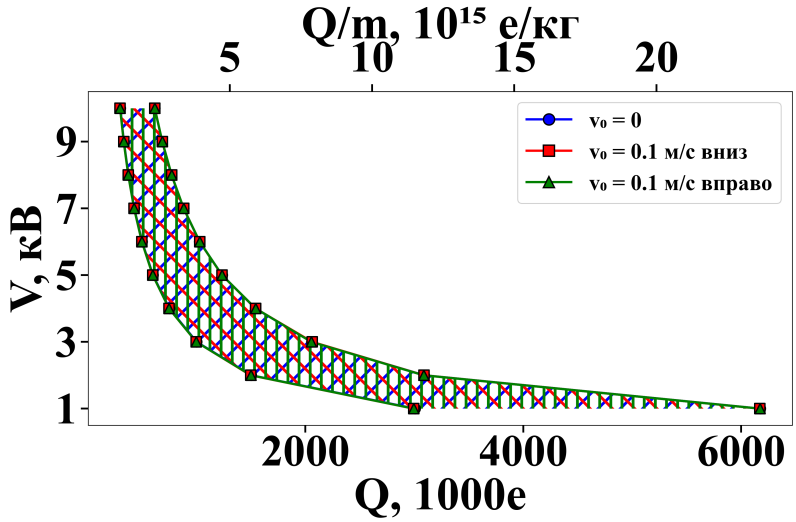


Рис. 4.1.10: Области удержания микрочастицы диаметром 50 мкм при различной начальной скорости.

4.2 Области удержания микрочастиц в вакууме и воздухе

Расчёт областей удержания в вакууме показал отсутствие устойчивого удержания для частиц всех размеров из исследуемого диапазона.

На Рис. 4.2.1 показана область удержания для частицы диаметром 20 мкм. Синей областью выделены результаты расчёта в воздухе с учётом силы Стокса. Время расчёта составляет 400 периодов. Красным цветом выделены точки, соответствующие формальному удержанию в вакууме при аналогичных параметрах расчёта, но без учёта силы Стокса.

Значения заряда, при которых частица диаметром 20 мкм формально удерживается в вакууме при напряжении 5 кВ, находятся в диапазоне от 59 730 e до 60 025 e. Точки располо-

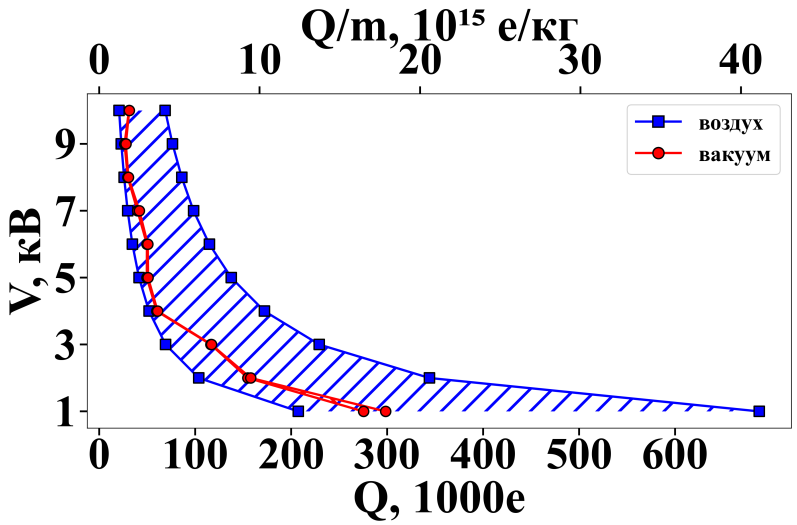


Рис. 4.2.1: Области удержания микрочастицы диаметром 20 мкм в воздухе и вакууме.

жены близко друг к другу относительно общего масштаба графика и практически сливаются в одну. На Рис. 4.2.2 показана траектория, построенная для значения заряда, соответствующего левой границе этого диапазона. Траектория при этих параметрах неустойчива, однако её развитие по расширяющейся траектории занимает длительное время. За 458 периодов частица достигает электрода.

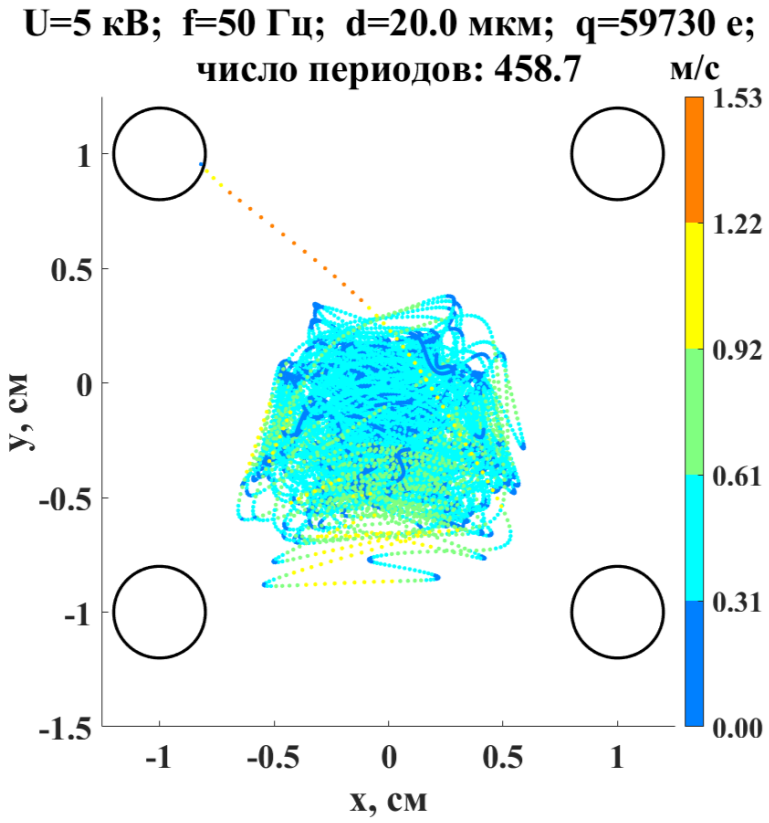


Рис. 4.2.2: Траектория частицы в вакууме.

Подобные траектории получены и в остальных точках для всех рассмотренных размеров

частиц. Для частиц диаметром 5 мкм в область формального удержания не попала ни одна точка. Это свидетельствует о том, что частицы малого размера в горизонтальной ловушке в условиях вакуума не обладают устойчивостью.

4.3 Влияние размера микрочастиц на области удержания

В вакууме области устойчивости частиц разных размеров и масс совпадают при одинаковом отношении заряда к массе q/m. В воздухе одинаковое значение q/m не гарантирует удержания частиц разных размеров, поскольку на их движение дополнительно влияют сила тяжести и вязкое сопротивление воздуха, как показано в разделе 3.1 главы 3. Поэтому области удержания рассчитываются отдельно для каждого размера частиц.

Для подтверждения этого утверждения на Рис. 4.3.1–4.3.4 показаны рассчитанные области удержания для частиц диаметром от 5 до 50 мкм в координатах «напряжение — отношение заряда к массе» при синусоидальном и прямоугольном напряжении соответственно. Видно, что при одинаковом значении q/m может удерживаться только ограниченный диапазон размеров частиц.

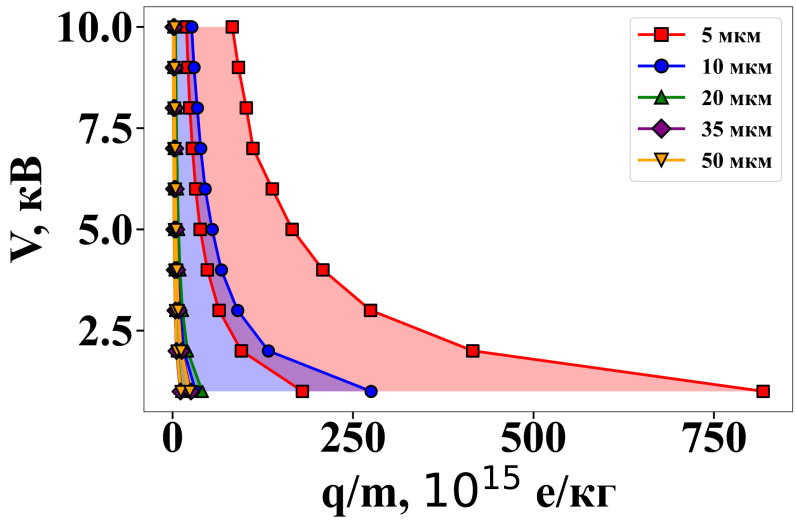


Рис. 4.3.1: Области удержания микрочастиц диаметром 5–50 мкм в координатах «напряжение — отношение заряда к массе» при синусоидальном напряжении.

На Рис. 4.3.2 представлены области удержания в координатах «амплитуда напряжения — заряд частицы» для частиц диаметром 5, 20, 35 и 50 мкм при синусоидальном удерживающем напряжении частотой 50 Гц. На Рис. 4.3.3 и Рис. 4.3.4 отдельно показаны области удержания для частиц диаметром 5, 10 и 20 мкм, а также 20, 35 и 50 мкм соответственно.

На рисунках видно, что с увеличением размера частиц расширяется диапазон зарядов, при которых возможно удержание, и увеличиваются значения зарядов, соответствующих

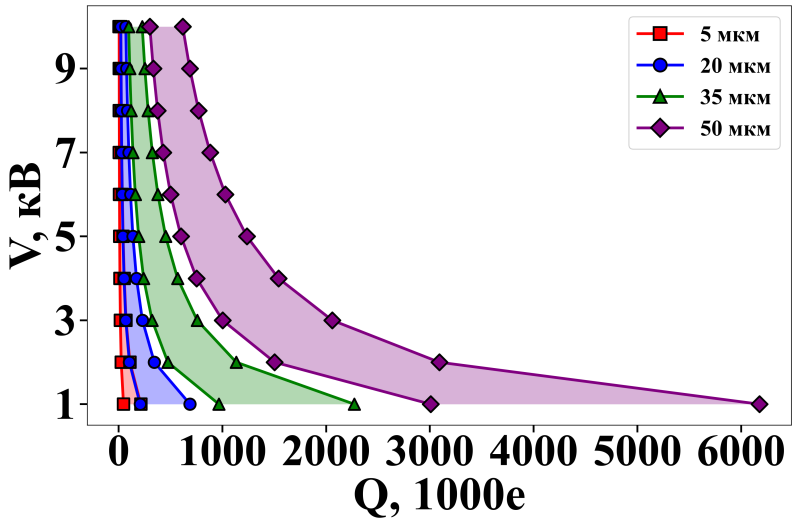


Рис. 4.3.2: Области удержания микрочастиц диаметром 5–50 мкм в координатах «амплитуда напряжения — заряд частицы» при синусоидальном удерживающем напряжении частотой 50 Гц.

границам областей. Левые границы областей смещаются в сторону увеличения заряда. Так, при $V = 5$ кВ для частицы диаметром 5 мкм левая граница принимает значение 10 000 e; для частицы диаметром 10 мкм это значение увеличивается в 1,3 раза — до 13 140 e; для 20 мкм — примерно в 3 раза, до 41 500 e, и т. д.

На Рис. 4.3.3 видно, что область удержания для частиц диаметром 10 мкм практически полностью включает в себя области для частиц диаметром 5 и 20 мкм. На Рис. 4.3.4 диапазон зарядов, в котором области удержания для частиц диаметром 20 и 35 мкм не перекрываются, составляет от 100 000 e до 1 000 000 e, а для частиц диаметром 35 и 50 мкм — от 300 000 e до 3 000 000 e. Это означает, что наиболее качественная сепарация частиц по размерам может быть достигнута для крупных частиц диаметром 20–50 мкм.

Для области удержания каждого размера частиц характерны сужение и смещение диапазона зарядов с увеличением напряжения V. Чем выше амплитуда удерживающего напряжения, тем уже диапазон зарядов, при которых частица удерживается, и тем меньше значения зарядов в этом диапазоне. Это объясняется изменением баланса сил, действующих на частицу.

Самый широкий диапазон зарядов, включающий наибольшие значения зарядов, достигается при $V = 1$ кВ для всех размеров частиц. Диапазон при $V = 1$ кВ смещён относительно диапазонов при других значениях напряжения. Для частицы диаметром 5 мкм значение заряда левой границы при $V = 1$ кВ находится на уровне значения заряда правой границы при $V = 4$ кВ. Для частицы диаметром 20 мкм левая граница при $V = 1$ кВ почти совмещена со значением правой границы при $V = 3$ кВ. Для частиц диаметром 35 и 50 мкм левая граница

при $V = 1$ кВ находится на уровне правой гра

На Рис. 4.3.3 показаны области удержания для частиц диаметром 5–50 мкм, рассчитанные при прямоугольном напряжении. Внешний вид и расположение областей схожи с областями, рассчитанными при синусоидальном напряжении и представленными на Рис. 4.3.2. Однако значения диапазонов зарядов, при которых возможно удержание частиц, заметно уменьшились.

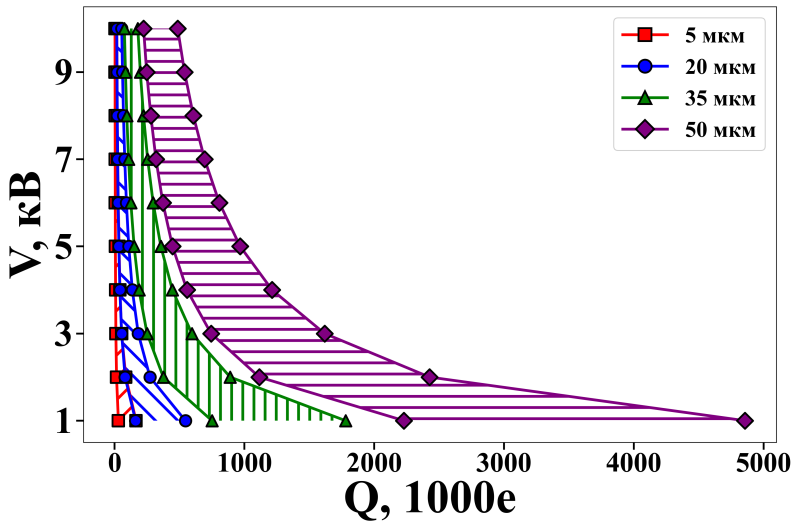


Рис. 4.3.3: Области удержания микрочастиц диаметром 5–50 мкм при прямоугольном напряжении.

В главе 3 было показано, что для получения одинаковых траекторий при прямоугольном напряжении требуется меньший заряд частицы, чем при синусоидальном напряжении. Сравнение областей на Рис. 4.3.3 и Рис. 4.3.2 качественно подтверждает этот результат. Например, значение заряда на правой границе области удержания для частицы диаметром 50 мкм при $V = 1$ кВ составляет около 6 000 000 e при синусоидальном напряжении и 4 800 000 e при прямоугольном.

Сужение диапазонов зарядов и их смещение в сторону меньших значений характерны для областей удержания при V от 1 до 7 кВ. Начиная с амплитуды 7 кВ и до 10 кВ ширина области удержания практически не изменяется. Как показано на Рис. 4.3.4, особенно важен этот эффект для частиц диаметром 5–20 мкм. При увеличении напряжения от 7 до 10 кВ пересечение областей достигает максимума. Это означает, что для удержания полидисперсной смеси частиц диаметром до 20 мкм наиболее подходящими являются высокие напряжения при малых зарядах частиц.

Для частиц диаметром 20–50 мкм области удержания не пересекаются, и с увеличением размера частицы устойчивое удержание достигается при больших значениях напряжения и заряда по сравнению с частицами меньшего размера.

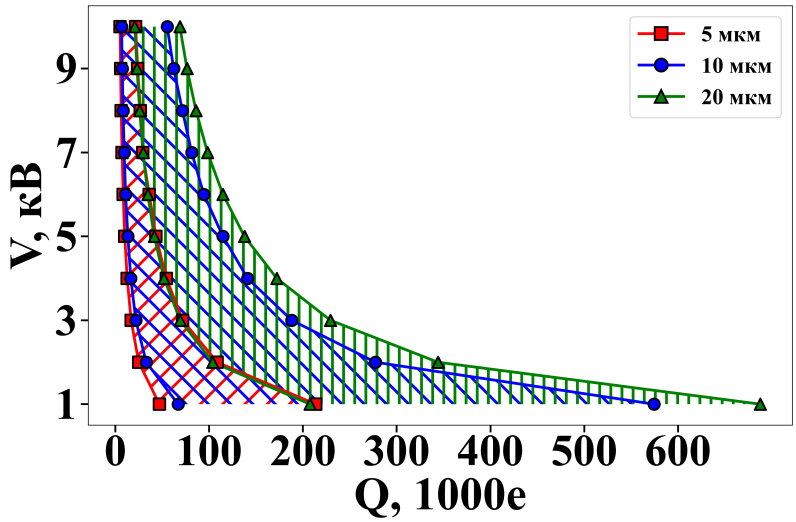


Рис. 4.3.4: Области удержания микрочастиц диаметром 5–20 мкм.

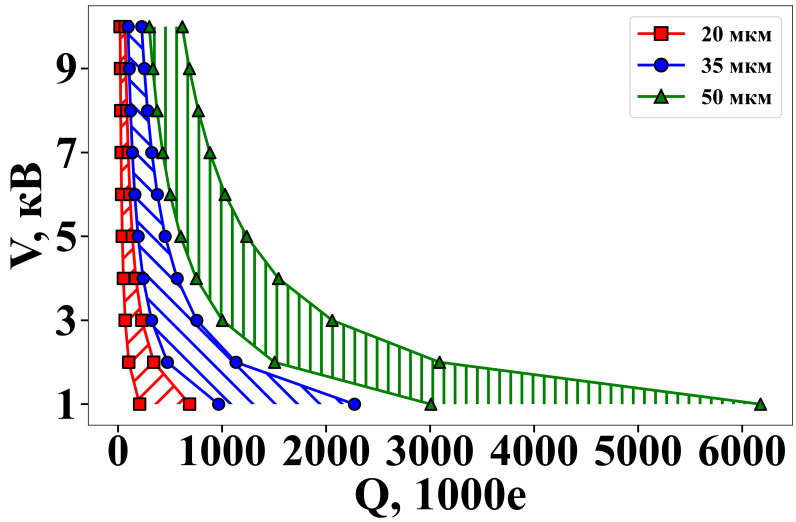


Рис. 4.3.5: Области удержания микрочастиц диаметром 20–50 мкм.

Размер частицы является одним из параметров, определяющих положение области удержания. Частичное пересечение областей удержания для частиц различного размера создаёт возможность селективного удержания частиц в полидисперсной смеси путём выбора амплитуды удерживающего напряжения и диапазона зарядов частиц.

4.4 Области удержания микрочастиц при синусоидальном и прямоугольном напряжении

В предыдущих разделах были рассмотрены особенности областей удержания заряженных микрочастиц в горизонтальной ловушке в воздухе при традиционном синусоидальном удерживающем напряжении на электродах, а также проведено сравнение с удержанием частиц в вакууме. Настоящий раздел посвящён анализу влияния новой формы прямоугольного

знакопеременного напряжения на удержание частиц при тех же условиях и сравнению полученных результатов с результатами для синусоидального напряжения. В данном разделе расчёты при прямоугольном напряжении выполнены для частоты 50 Гц.

На Рис. 4.4.1 показаны области удержания частицы диаметром 5 мкм при прямоугольном напряжении для различных начальных положений частицы в ловушке при нулевой начальной скорости. Красная область рассчитана при начальном положении частицы в центре ловушки, синяя — при смещении начального положения на 350 мкм ниже центра. Ранее на Рис. 4.1.5 для синусоидального напряжения было отмечено значительное влияние начального положения на правую границу области удержания частицы диаметром 5 мкм. В случае прямоугольного напряжения при изменении начального положения заметного изменения области удержания не наблюдается.

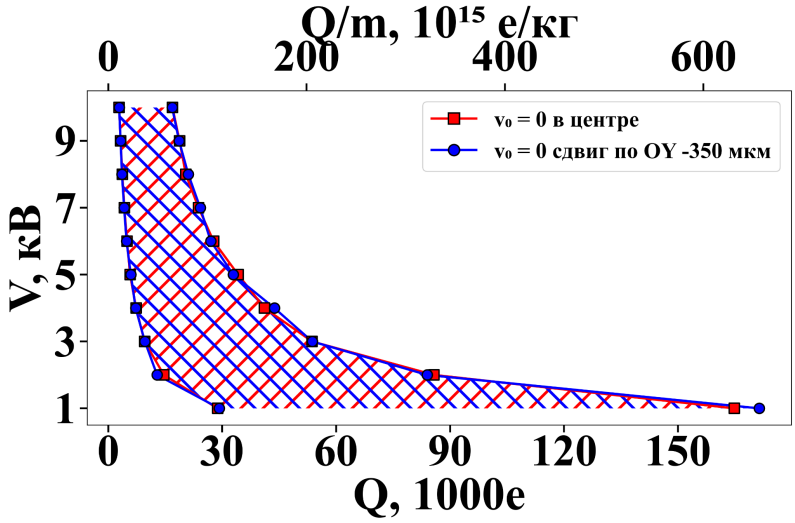


Рис. 4.4.1: Области удержания микрочастицы диаметром 5 мкм при различном начальном положении и прямоугольном напряжении.

На Рис. 4.4.2–Рис. 4.4.4 пизображены по две области удержания, рассчитанные при синусоидальном и прямоугольном напряжениях, для частиц диаметром 5, 20 и 50 мкм соответственно.

Для всех рассмотренных размеров частиц характерны сужение ширины диапазона зарядов на 15–20 % и его смещение в сторону меньших зарядов. Прямоугольная форма напряжения позволяет удерживать частицы при меньших значениях заряда, а также формирует более узкие диапазоны удержания.

Для частиц диаметром 5 мкм на Рис. 4.4.2 диапазон зарядов при прямоугольном напряжении на 11–18 % меньше, чем при синусоидальном.

При $V = 1$ кВ границы области при прямоугольном напряжении изменяются от 29 000 e до

165 000 e. По сравнению с синусоидальным напряжением левая граница сдвинута в сторону меньших зарядов на 18 000 e, правая — на 48 750 e. Ширина области уменьшилась на 18 %.

При $V = 5$ кВ диапазон при прямоугольном напряжении составляет от 5 800 e до 34 200 e, что на 15 % меньше диапазона при синусоидальном напряжении. Левая граница сместилась на 4 000 e в сторону меньших зарядов, правая — на 10 000 e.

При $V = 7$ кВ границы находятся в диапазоне от 4 250 e до 24 000 e, что на 11 % меньше диапазона при синусоидальном напряжении. Левая граница сдвинута на 3 000 e, правая — на 5 300 e. При $V = 8$–10 кВ сужение ширины области составило 14–18 %.

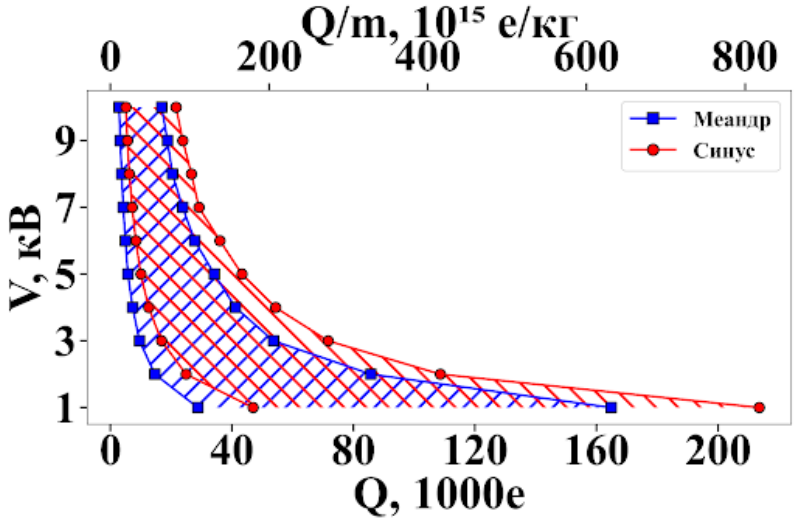


Рис. 4.4.2: Области удержания микрочастицы диаметром 5 мкм при синусоидальном и прямоугольном напряжениях.

На Рис. 4.4.3 показаны области удержания для частиц диаметром 20 мкм. Ширина области при прямоугольном напряжении на 20 % меньше, чем при синусоидальном, во всём диапазоне напряжений V. Это может быть связано с увеличением массы частицы и силы тяжести, вследствие чего влияние различий в форме электрического поля на динамику частицы становится менее выраженным.

При амплитуде удерживающего напряжения $V = 1$ кВ область удержания при прямоугольном напряжении соответствует диапазону зарядов от 161 500 e до 545 000 e. По сравнению с синусоидальным напряжением левая граница области смещена в сторону меньших зарядов на 46 000 e, а правая — на 142 800 e.

При $V = 5$ кВ область удержания при прямоугольном напряжении соответствует диапазону зарядов от 32 320 e до 109 000 e. По сравнению с синусоидальным напряжением левая граница области смещена в сторону меньших зарядов на 9 000 e, а правая — на 28 000 e.

При $V = 7$ кВ диапазон зарядов составляет от 23 108 e до 77 900 e. Левая граница области

смещена в сторону меньших зарядов на 6 500 e, а правая — на 20 300 e.

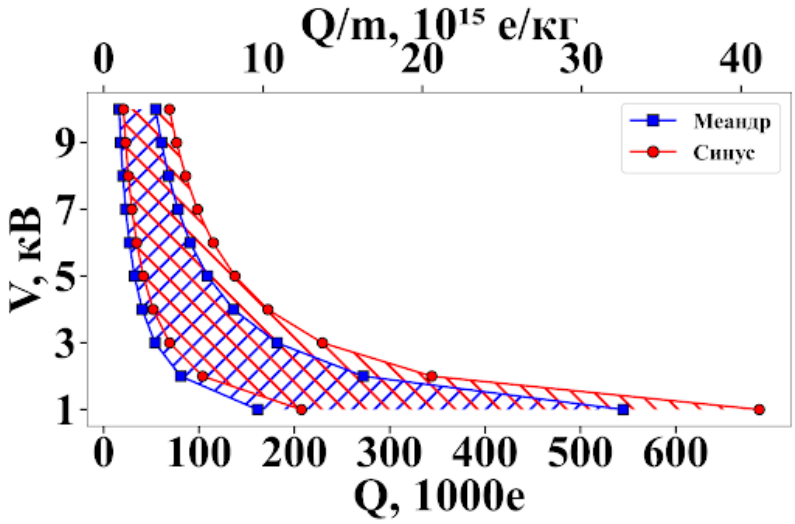


Рис. 4.4.3: Области удержания микрочастицы диаметром 20 мкм при синусоидальном и прямоугольном напряжениях.

На Рис. 4.4.4 показаны области удержания, рассчитанные для частицы диаметром 50 мкм. Уменьшение ширины области при прямоугольном напряжении по сравнению с синусоидальным составляет 17 % во всём рассмотренном диапазоне напряжений.

При $V = 1$ кВ диапазон составляет от 2 239 000 e до 4 856 000 e; левая граница находится на 780 000 e ниже, правая — на 1 320 000 e ниже соответствующих границ при синусоидальном напряжении.

При $V = 5$ кВ диапазон составляет от 445 801 e до 966 934 e; смещение левой границы составляет 156 000 e, правой — 270 000 e.

При $V = 7$ кВ диапазон составляет от 318 437 e до 693 098 e; смещение левой границы составляет 111 000 e, правой — 190 000 e.

Аналогично областям удержания при синусоидальном напряжении, при прямоугольном напряжении сохраняется закономерность изменения зарядных диапазонов с ростом напряжения V. При увеличении V от 1 до 5 кВ ширина области удержания уменьшается на 80 % для всех рассмотренных размеров частиц. При дальнейшем увеличении напряжения от 5 до 7 кВ область уменьшается примерно на 30 %. В целом при росте напряжения от 1 до 7 кВ ширина области удержания сокращается примерно на 85–86 % независимо от размера частицы.

Таким образом, для всех рассмотренных размеров частиц области удержания при синусоидальном и прямоугольном напряжениях имеют сходную форму. Ширина зарядного диапазона при прямоугольном напряжении в среднем на 20 % меньше. Главное отличие состоит в

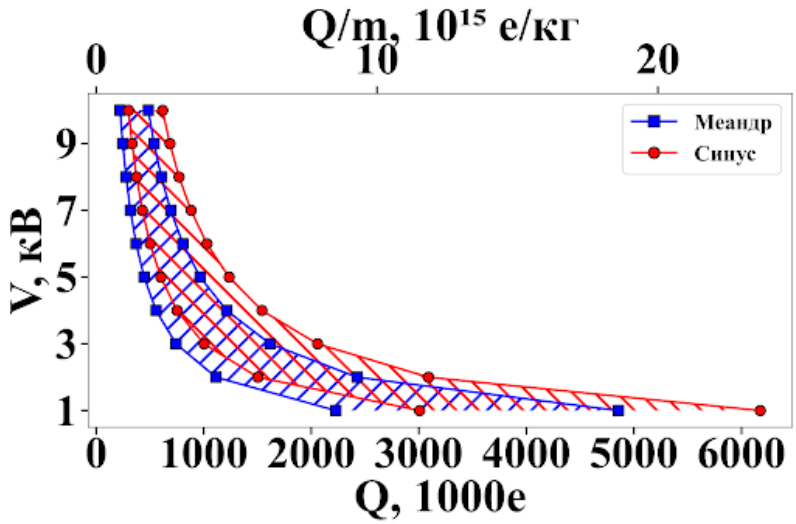


Рис. 4.4.4: Области удержания микрочастицы диаметром 50 мкм при синусоидальном и прямоугольном напряжениях.

их взаимном положении: область удержания при прямоугольном знакопеременном напряжении расположена левее области удержания при синусоидальном напряжении. Следовательно, при одинаковых частоте и размере частицы прямоугольное напряжение обеспечивает удержание при меньших значениях заряда.

4.5 Области удержания при разных частотах знакопеременного прямоугольного удерживающего напряжения

Расчётно и экспериментально исследовано влияние частоты прямоугольного знакопеременного напряжения на удержание заряженных частиц в горизонтальной ловушке.

Расчёты показали, что с увеличением частоты для всех рассмотренных размеров частиц область удержания расширяется и смещается в сторону больших значений заряда.

На Рис. 4.5.1–Рис. 4.5.3 показаны области удержания при частотах 50, 100 и 25 Гц для частиц диаметром 10, 20 и 50 мкм соответственно. Красная область соответствует частоте 50 Гц, синяя — 100 Гц, зелёная — 25 Гц.

На Рис. 4.5.1 для частицы диаметром 10 мкм левые границы практически совпадают (разница менее 3 %), тогда как правая граница при частоте 100 Гц сдвинута в сторону больших значений заряда. При частоте 25 Гц, напротив, область удержания сужается. Ширина диапазона зарядов при частоте 100 Гц на 30–40 % больше, чем при 50 Гц. Ширина области при 25 Гц составляет 30–36 % от ширины области при 50 Гц.

На Рис. 4.5.2 показаны области удержания для частиц диаметром 20 мкм. Ширина области при частоте 25 Гц на 50 % меньше ширины области при 50 Гц, а область при 100 Гц в 3

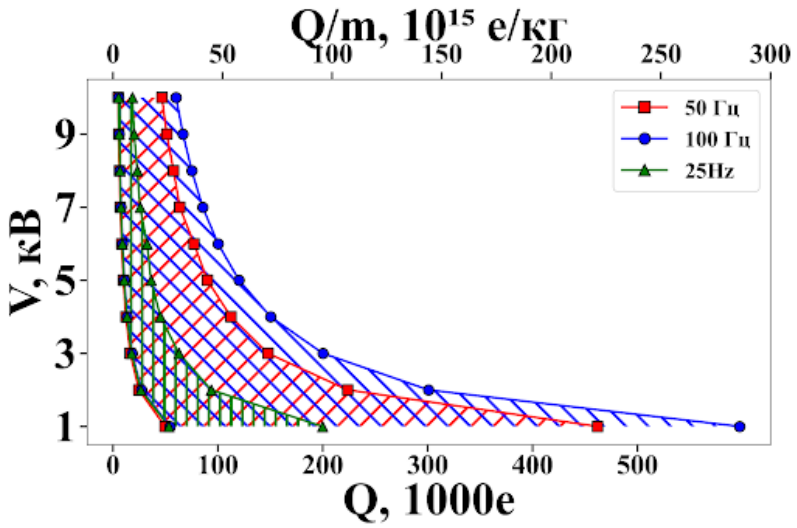


Рис. 4.5.1: Области удержания частицы диаметром 10 мкм при различных частотах прямоугольного напряжения: красная область — 50 Гц; синяя — 100 Гц; зелёная — 25 Гц.

раза шире области при 50 Гц для каждого значения V.

Левые границы областей значительно смещены относительно друг друга по сравнению с результатами для частиц меньшего диаметра. Область при 25 Гц смещена в сторону меньших зарядов, а область при 100 Гц — в сторону больших. При этом области при 25 и 100 Гц практически не пересекаются. Этот результат указывает на возможность отделения частиц с избыточным зарядом путём изменения частоты удерживающего напряжения.

На Рис. 4.5.3 показаны области удержания для частиц диаметром 50 мкм. Особенно интересна зелёная область, соответствующая частоте 25 Гц, которая ограничивает очень узкий диапазон зарядов. Визуализация траекторий показала, что частицы действительно удерживаются, а диапазон зарядов, например при $V = 7$ кВ, от 160 000 e до 180 000 e не пересекается с диапазонами для частиц диаметром 5–35 мкм. Это означает, что уменьшение частоты позволяет добиться удержания крупных частиц.

Ширина зелёной области для 25 Гц на Рис. 4.5.3 составляет 6 % от ширины красной области для 50 Гц.

Синяя область удержания для частицы диаметром 50 мкм при частоте 100 Гц также практически не пересекается с областью при 50 Гц, но смещена в сторону больших зарядов. Ширина синей области в 5 раз больше ширины красной.

Такое характерное разделение областей подтвердилось экспериментально. Как было показано на Рис. 4.4.4, при сравнении областей удержания для частиц разных размеров область для частицы диаметром 50 мкм имеет наибольшую ширину, включает наиболее широкий диапазон зарядов и не пересекается с областями для частиц других размеров.

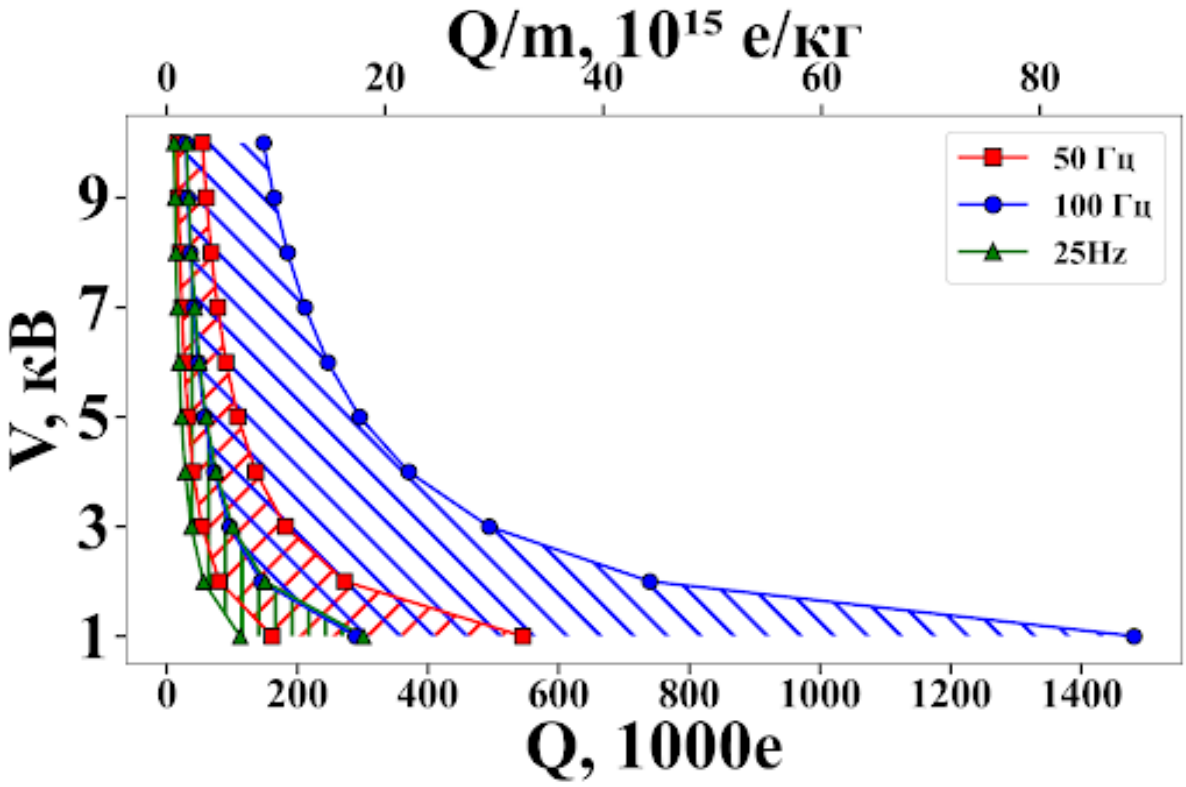


Рис. 4.5.2: Области удержания частицы диаметром 20 мкм при различных частотах прямоугольного напряжения.

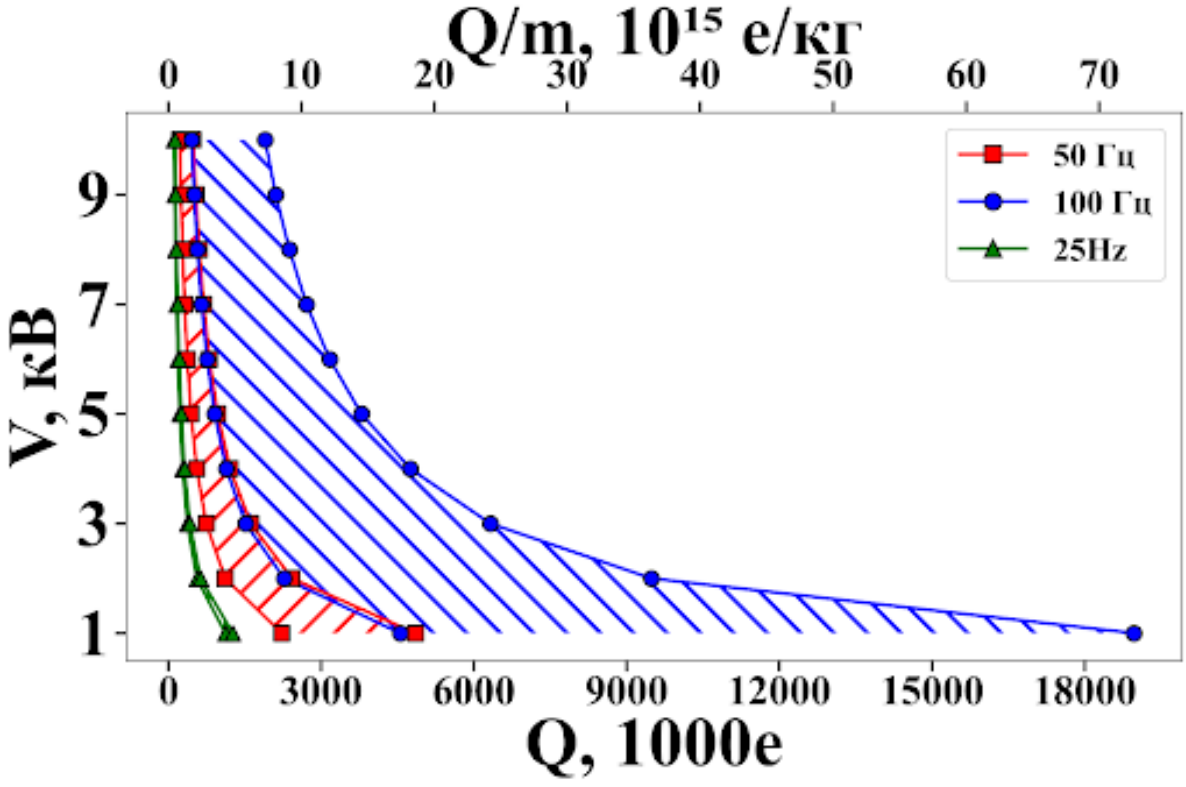
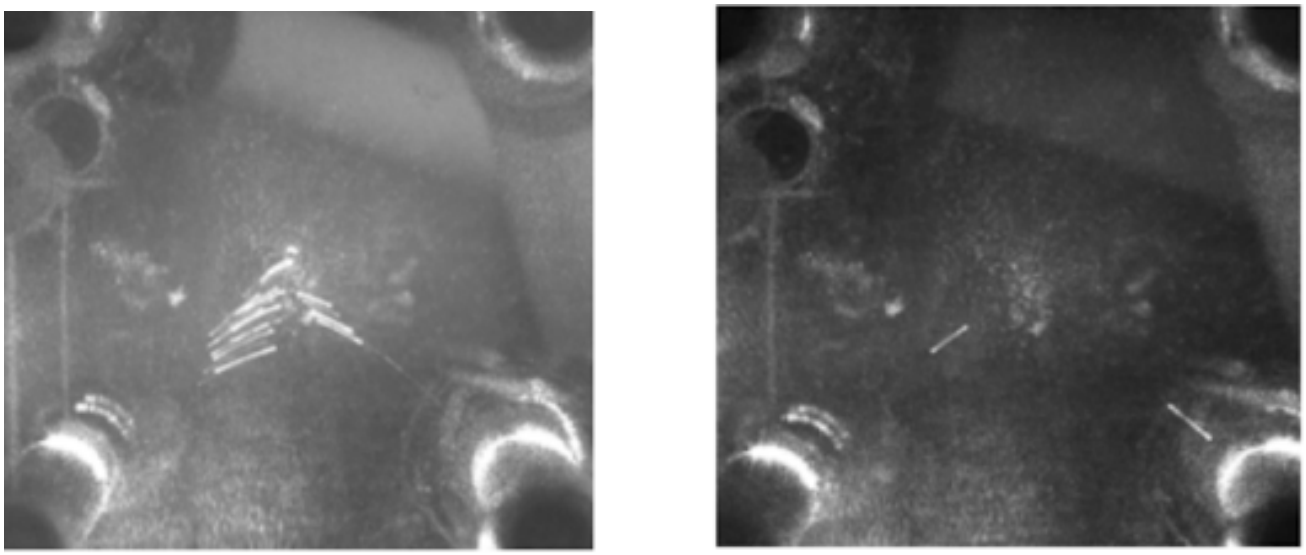


Рис. 4.5.3: Области удержания частицы диаметром 50 мкм при различных частотах прямоугольного знакопеременного напряжения.

Исходя из этого, проведён эксперимент: ловушка при прямоугольном удерживающем напряжении частотой 50 Гц и амплитудой 4 кВ заполнялась полидисперсной смесью частиц, заряженных индукционным способом при постоянном напряжении 7,5 кВ, как описано в главе 2. Затем частота удерживающего напряжения увеличивалась с шагом 10 Гц до тех пор, пока частицы полностью не покинули ловушку.



а б

Рис. 4.5.4: Вид ловушки с торца при прямоугольном удерживающем напряжении амплитудой 4 кВ: (а) частота 50 Гц; (б) частота 100 Гц.

На Рис. 4.5.4 слева показана фотография, полученная с торца ловушки после заполнения при частоте 50 Гц. На ней наблюдаются устойчивые траектории частиц. Различная амплитуда колебаний подтверждает полидисперсность смеси и различие зарядов частиц. Справа показана фотография после изменения частоты до 100 Гц. Все частицы, засыпанные при частоте 50 Гц, покинули ловушку. Несколько оставшихся траекторий предположительно соответствуют мелким частицам диаметром 5 мкм.

4.6 Области удержания при различных длительностях положительной полярности импульса знакопеременного прямоугольного напряжения

Исследовано удержание частиц в асимметричном поле горизонтальной квадрупольной ловушки в воздухе. Рассчитаны области удержания при частоте 50 Гц для различных коэффициентов заполнения положительной полярности прямоугольного знакопеременного импульса

K_p. Показаны результаты расчётов для $K_p < 50$ %; при $K_p > 50$ % результаты расчётов симметричны относительно случая $K_p = 50$ %.

На Рис. 4.6.1–Рис. 4.6.4 показаны области удержания для частиц диаметром 10–50 мкм. Обнаружено, что частицы диаметром 5 мкм не удерживаются при асимметричном напряжении. С увеличением асимметрии области удержания сужаются, а левая граница области удержания смещается в сторону больших зарядов.

На Рис. 4.6.1 показаны области удержания для частицы диаметром 10 мкм. Расчёт показал, что частица удерживается при $K_p = 40$ % и 35 %. Эти области находятся внутри области для симметричного поля при $K_p = 50$ %. С увеличением асимметрии ширина области уменьшается: ширина диапазона зарядов при $K_p = 40$ % составляет 50 % от ширины области при симметричном напряжении, а при $K_p = 35$ % — 12 %.

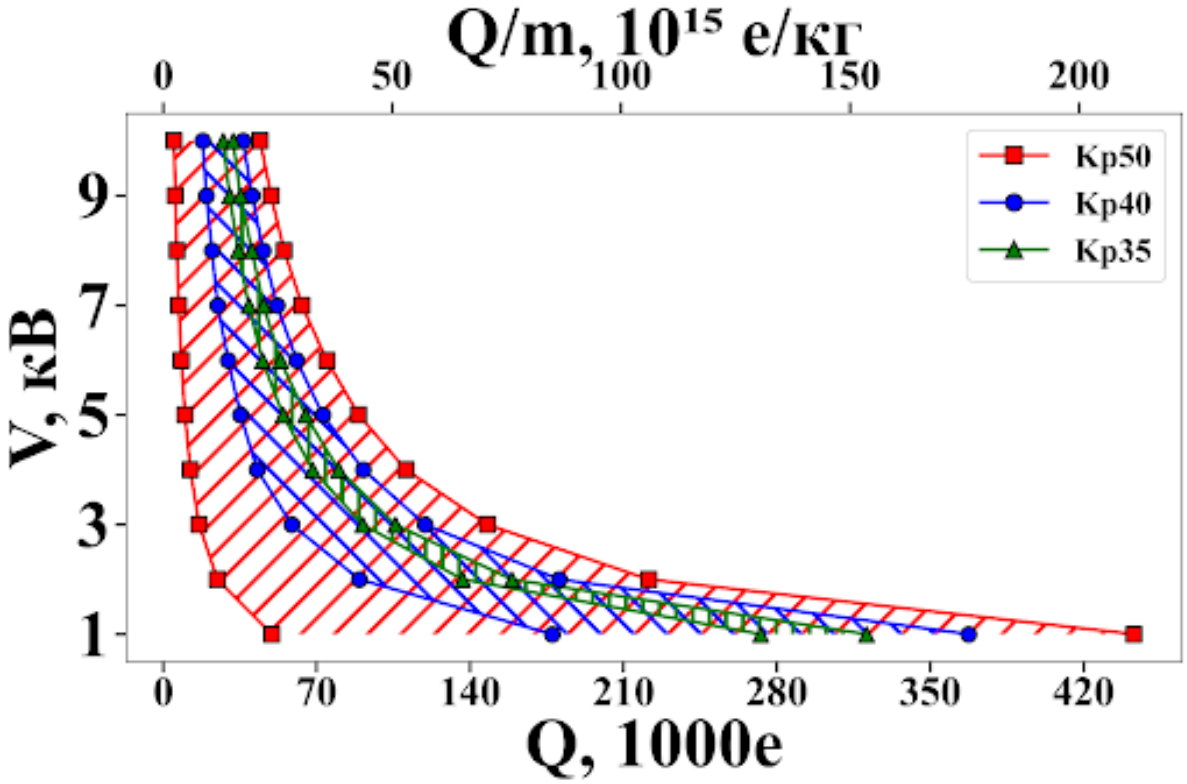


Рис. 4.6.1: Области удержания микрочастицы диаметром 10 мкм при различных значениях K_p.

На Рис. 4.6.2 показаны области удержания для частицы диаметром 20 мкм при $K_p = 50$, 40, 35 и 30 %. Частицы диаметром 20 мкм наиболее устойчивы к асимметрии напряжения среди рассмотренных размеров. При $K_p = 30$ % область удержания не пересекается с областями при других значениях K_p. Ширина её зарядового диапазона составляет 7–11 % от ширины диапазона при симметричном напряжении.

При $K_p = 35$ % ширина области удержания составляет около 70 % от ширины области при $K_p = 50$ %, при этом область смещена в сторону больших зарядов и включает правые

границы областей удержания при $K_p = 40$ % и $K_p = 50$ %.

При $K_p = 40$ % область практически полностью совпадает с областью для $K_p = 50$ % и составляет 96 % от её ширины.

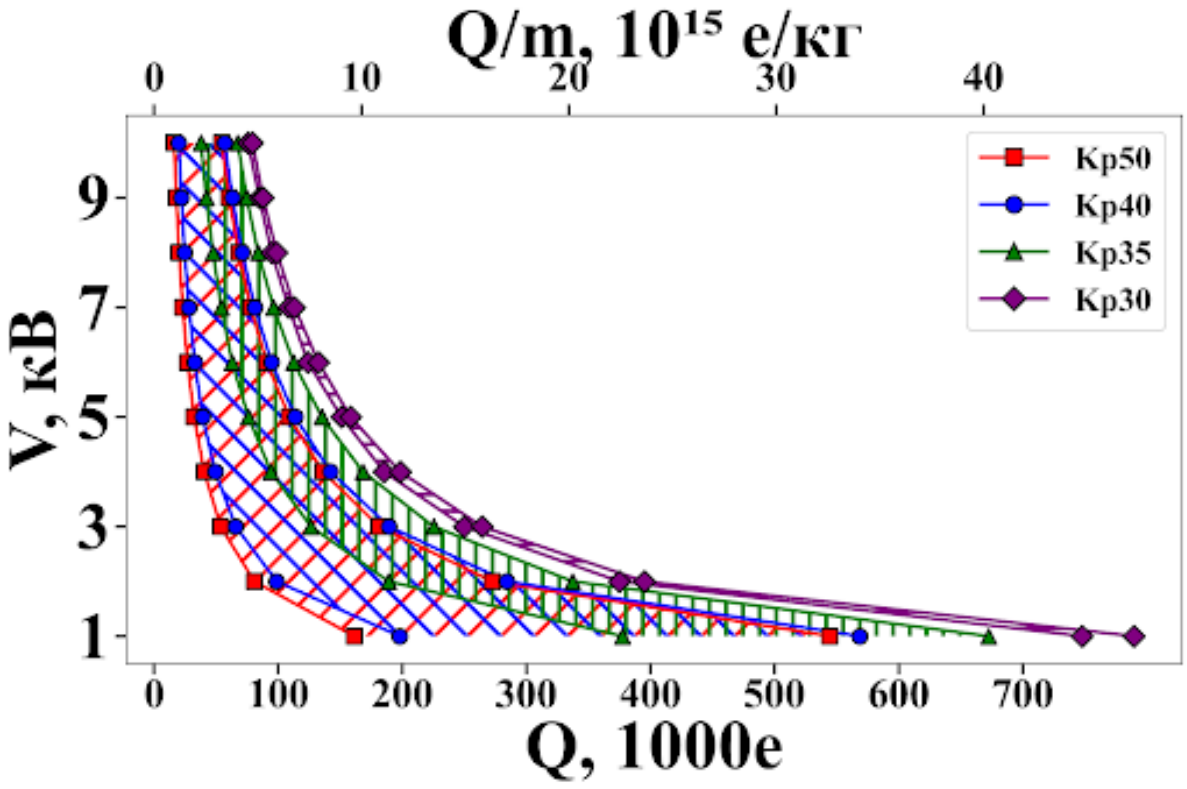


Рис. 4.6.2: Области удержания микрочастицы диаметром 20 мкм при различных значениях K_p.

На Рис. 4.6.3 показаны области удержания для частицы диаметром 35 мкм при $K_p = 50$ и 40 %. Дальнейшее увеличение асимметрии напряжения не приводит к удержанию частиц диаметром более 20 мкм. Область при $K_p = 40$ % полностью находится внутри области для $K_p = 50$ % и составляет 70 % её ширины.

На Рис. 4.6.4 показаны области удержания для частицы диаметром 50 мкм при $K_p = 50$ и 40 %. Крупные частицы при $K_p = 40$ % имеют диапазон удерживающих зарядов, однако его ширина составляет всего 15 % от ширины диапазона при $K_p = 50$ %.

Для подтверждения полученных результатов выполнен эксперимент.

4.6.1 Сопоставление с экспериментом при асимметричном прямоугольном напряжении

Выполнена серия экспериментов по осаждению частиц на стекло при последовательном изменении коэффициента заполнения K_p от 50 % до полного выпадения частиц из ловушки. Полученные экспериментальные результаты согласуются с результатами расчётов.

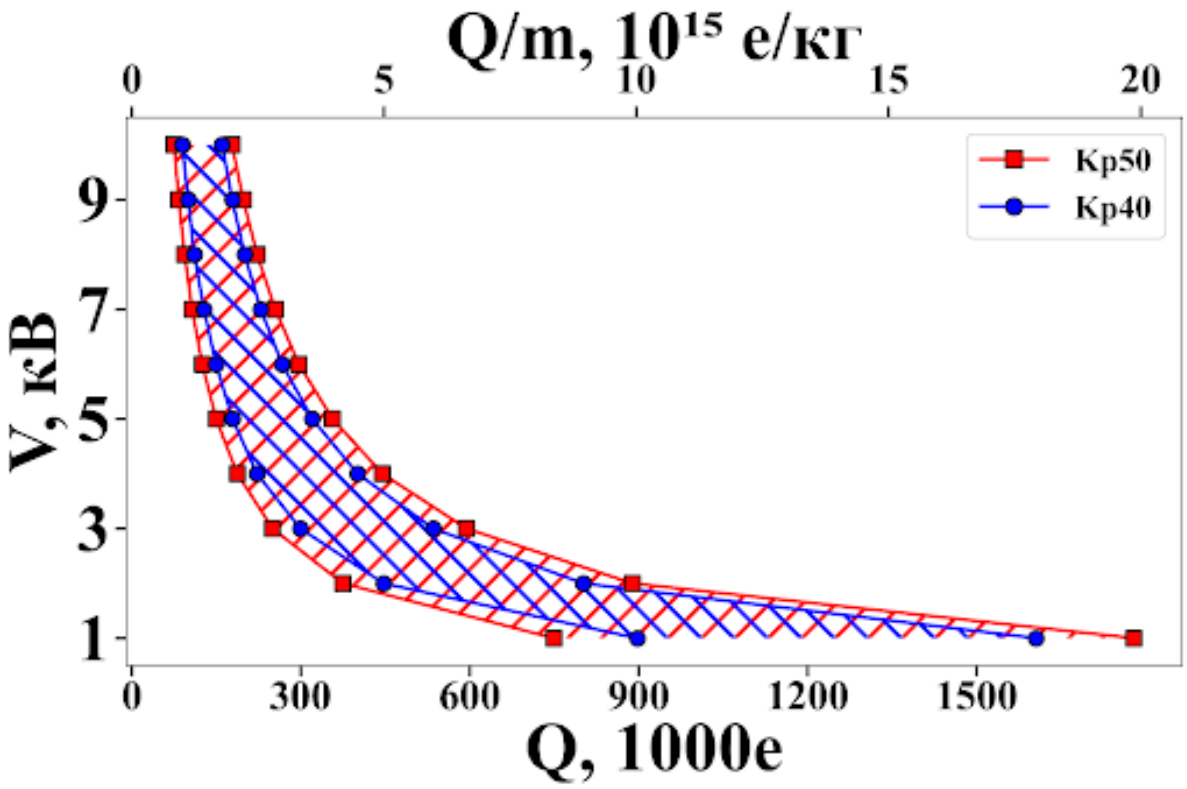


Рис. 4.6.3: Области удержания микрочастицы диаметром 35 мкм при различных значениях K_p.

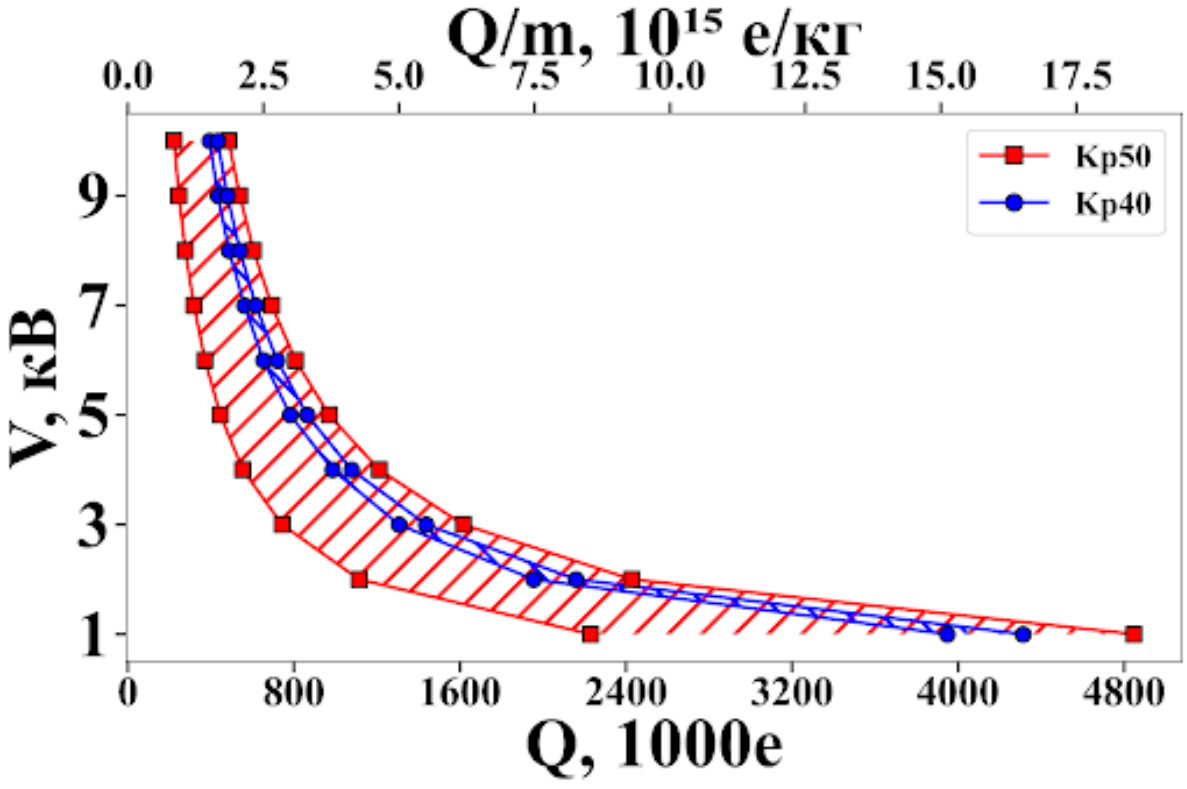


Рис. 4.6.4: Области удержания микрочастицы диаметром 50 мкм при различных значениях K_p.

При симметричном напряжении ($K_p = 50$ %) ловушку заполняли заряженными частицами. Амплитуда напряжения на линейных электродах составляла 5 кВ, частота — 50 Гц,

постоянное напряжение зарядки частиц — 5 кВ. При последовательном изменении K_p выпадающие из ловушки частицы осаждались на стекло для последующего анализа под микроскопом. Методика осаждения описана в главе 2.

Для сравнения размерных диапазонов частиц, выпадающих при изменении K_p, предварительно было получено распределение по размерам частиц, удерживаемых при $K_p = 50$ %, представленное на Рис. 4.6.5. Размеры удерживаемых частиц находятся в диапазоне от 1 до 85 мкм.

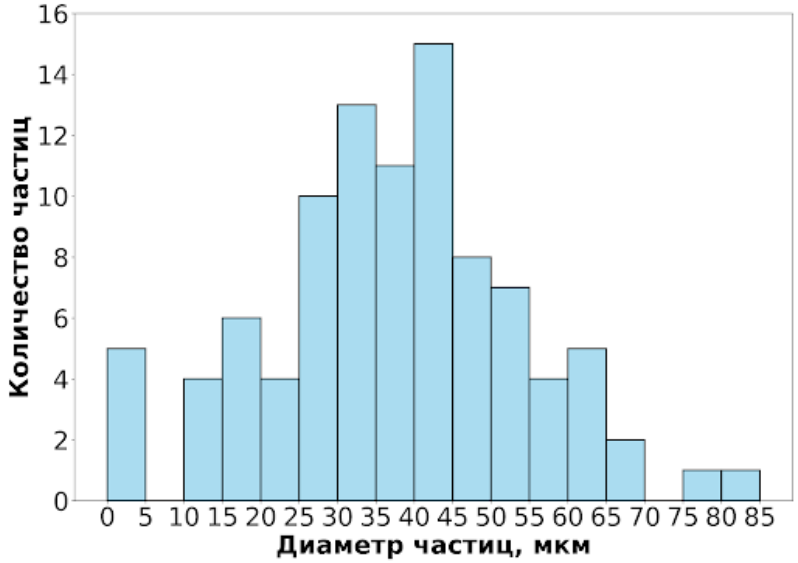


Рис. 4.6.5: Распределение по размерам частиц, удерживаемых при $K_p = 50$ %. Выборка из 96 частиц.

На Рис. 4.6.6 показано распределение по размерам частиц, осаждённых при уменьшении коэффициента заполнения K_p с 50 до 45 %. Размеры осаждённых частиц находятся в диапазоне от 2 до 19 мкм, при этом основная доля частиц приходится на диапазон 2–10 мкм. Полученный результат согласуется с результатами расчётов, согласно которым частицы диаметром 5 мкм не удерживаются при асимметричном удерживающем напряжении.

На Рис. 4.6.7 показано распределение по размерам частиц, осаждённых при изменении K_p с 40 до 35 %. Диаметры осаждённых частиц находятся в диапазоне от 0,3 до 62 мкм. В диапазоне от 1 до 45 мкм вклад частиц различных размеров в распределение приблизительно одинаковый.

Полученный результат согласуется с расчётным сужением областей удержания частиц диаметром 10–20 мкм при увеличении асимметрии напряжения. Наличие в осаждённой фракции крупных частиц также согласуется с высокой чувствительностью частиц диаметром 35–50 мкм к увеличению асимметрии: расчётные области их удержания получены только при $K_p = 50$ и 40 %.

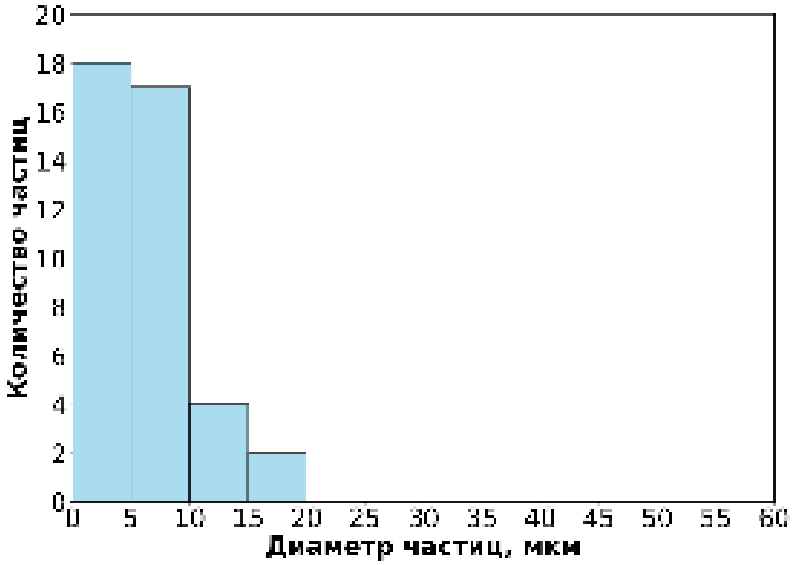


Рис. 4.6.6: Распределение по размерам частиц, осаждённых при изменении K_p с 50 до 45 %. Выборка из 41 частицы.

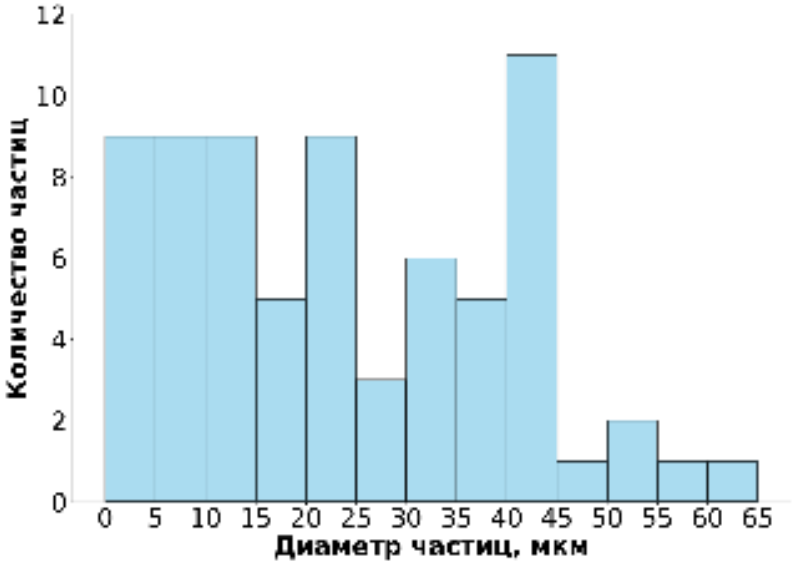


Рис. 4.6.7: Распределение по размерам частиц, осаждённых при изменении K_p с 40 до 35 %. Выборка из 71 частиицы.

На Рис. 4.6.8 показано распределение по размерам частиц, оставшихся в ловушке при $K_p = 30$ % и осаждённых на стекло после отключения удерживающего напряжения. Размеры частиц находятся в диапазоне от 1 до 21 мкм. Наличие в этой выборке мелкой фракции частиц диаметром 5–10 мкм может быть связано с неоднородностью полидисперсной смеси и коллективными процессами, в том числе перезарядкой частиц, которые в расчёте не учитывались. Наличие в конечной выборке частиц диаметром около 20 мкм согласуется с результатами расчётов, согласно которым частицы этого размера наиболее устойчивы к асимметрии удерживающего напряжения.

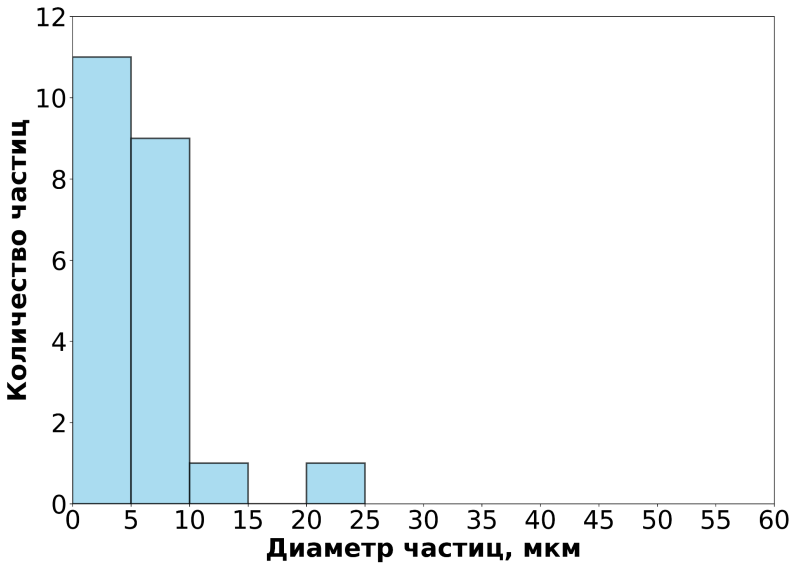


Рис. 4.6.8: Распределение по размерам частиц, оставшихся в ловушке при $K_p = 30\ \%$ и осаждённых после отключения удерживающего напряжения. Выборка из 22 частиц.

Таким образом, показано, что асимметрия удерживающего напряжения является дополнительным параметром управления удержанием частиц различных размеров. Обнаружено, что частицы диаметром 5 мкм не удерживаются при асимметричном напряжении. Следовательно, изменением K_p можно добиться преимущественного выпадения из ловушки мелкой фракции частиц. Показано, что частицы диаметром 20 мкм наиболее устойчивы к асимметрии удерживающего напряжения среди рассмотренных размеров. Для более крупных частиц области удержания в асимметричном поле сужаются относительно областей при симметричном напряжении и смещаются в сторону больших зарядов.

В следующих разделах будет проведена оценка физически достижимых диапазонов удержания и выполнена экспериментальная проверка рассчитанных областей.

4.7 Оценка заряда микрочастиц по областям удержания

Выполнен оценочный расчёт заряда, который может получить частица заданного размера при индукционной зарядке в условиях эксперимента. Построены графики сопоставления рассчитанных областей удержания в координатах «амплитуда удерживающего напряжения — заряд частицы» с физически достижимыми оценочными диапазонами зарядов. Формулы для оценки заряда приведены в главе 2.

На Рис. 4.7.1–Рис. 4.7.5 показано сопоставление областей удержания для прямоугольной и синусоидальной форм напряжения с диапазонами зарядов, оценёнными для различных напряжений зарядки: 2,5, 5 и 7 кВ. На всех рисунках синяя область с маркером «квадрат»

соответствует прямоугольному удерживающему напряжению, лиловая область с маркером «круг» — синусоидальному. Эти области аналогичны рассмотренным ранее в разделе 4.4.

На области удержания нанесены отрезки, соответствующие оценочным диапазонам зарядов частиц. Зелёный цвет соответствует оценке при напряжении зарядки 2,5 кВ, жёлтый — при 5 кВ, красный — при 7 кВ. С увеличением амплитуды удерживающего напряжения оценочный диапазон зарядов расширяется и смещается в сторону больших значений заряда.

В табл. 4.7.1 – 4.7.15 приведена доля оценочного диапазона зарядов, попадающая в соответствующую область удержания.

На Рис. 4.7.1 показано сопоставление областей удержания и оценочных диапазонов заряда для частицы диаметром 5 мкм. Видно, что при амплитудах удерживающего напряжения 1–3 кВ часть оценочных диапазонов зарядов находится за пределами областей удержания. Сопоставление диапазонов показывает, что для частиц диаметром 5 мкм значительное пересечение с областью удержания при прямоугольном напряжении начинается при $V = 2$–3 кВ, а при синусоидальном — при $V = 3$–4 кВ.

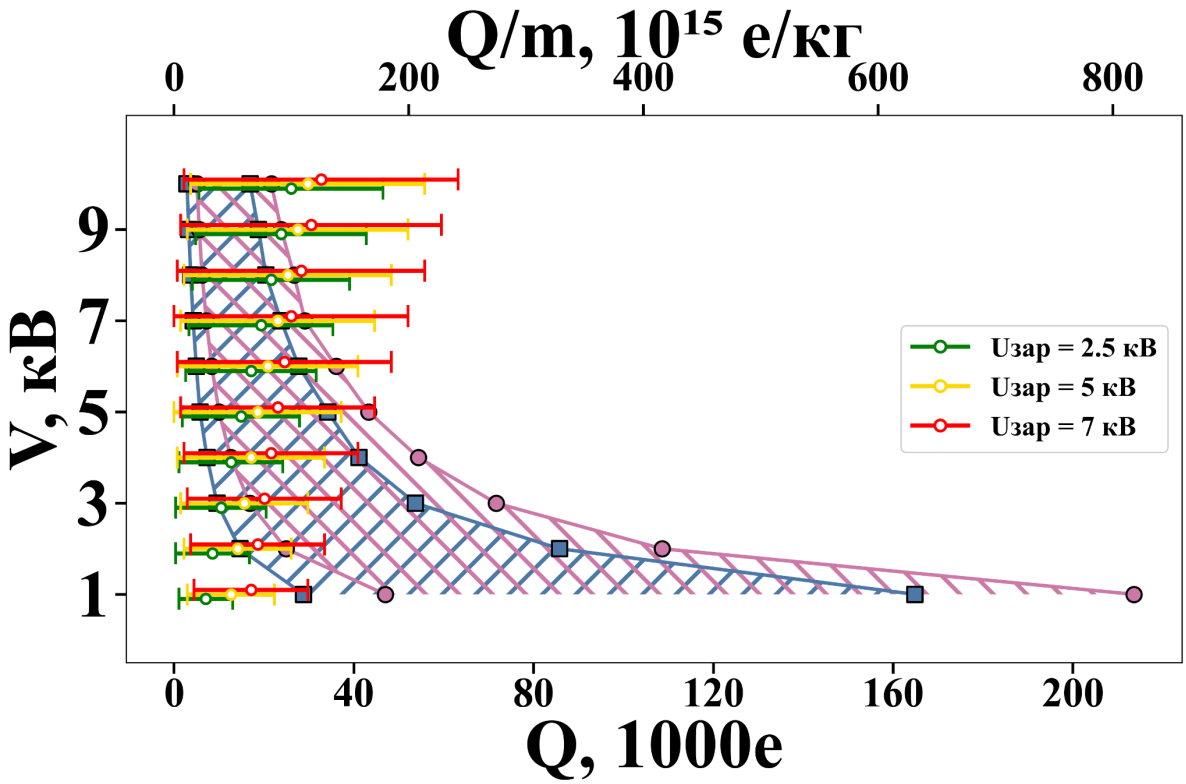


Рис. 4.7.1: Сопоставление оценочных диапазонов заряда и областей удержания микрочастицы диаметром 5 мкм.

В табл. 4.7.1 приведена доля оценочного диапазона заряда при напряжении зарядки 2,5 кВ, попадающая в область удержания.

С увеличением амплитуды удерживающего напряжения до 4–5 кВ степень пересечения

диапазонов для частиц диаметром 5 мкм увеличивается, а при дальнейшем повышении V уменьшается. При напряжении зарядки 2,5 кВ максимальное пересечение для прямоугольного напряжения составляет 85 % при $V = 5$ кВ, а для синусоидального — 80 % при $V = 4$ кВ.

Таблица 4.7.1: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 5 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 2{,}5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	13 %	—
5	85 %	69 %
7	61 %	69 %

При напряжении зарядки 5 кВ (табл. 4.7.2) и амплитуде удерживающего напряжения $V =$ 2 кВ доля пересечения оценочного диапазона зарядов с областью удержания составляет 48 % для прямоугольного напряжения и только 5 % для синусоидального. При синусоидальном напряжении сопоставимая степень пересечения, равная 45 %, достигается при $V = 3$ кВ. Максимальное пересечение для прямоугольного напряжения составляет 80 % при $V = 4$ кВ, а для синусоидального — 73 % при $V = 5$ кВ.

Таблица 4.7.2: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 5 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	48 %	5 %
5	77 %	73 %
7	45 %	50 %

При напряжении зарядки 7 кВ (табл. 4.7.3) и амплитуде удерживающего напряжения $V =$ 2 кВ пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания составляет 63 % для прямоугольного напряжения, что более чем в два раза превышает соответствующее значение для синусоидального напряжения — 29 %. Максимальное пересечение для прямоугольного напряжения составляет 86 % при $V = 4$ кВ, а для синусоидального — 77 % при $V = 5$ кВ.

Таким образом, оценочные расчёты показали, что для частиц диаметром 5 мкм при прямоугольном удерживающем напряжении достигается большее пересечение оценочных диапазонов зарядов с областью удержания, особенно при небольших амплитудах удерживающего напряжения. При напряжении зарядки 7 кВ максимальное пересечение составляет 86 % и достигается при $V = 4$ кВ.

Таблица 4.7.3: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 5 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 7$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	63 %	29 %
5	66 %	77 %
7	38 %	42 %

На Рис. 4.7.2 показано сопоставление областей удержания с оценочными диапазонами зарядов для частицы диаметром 10 мкм.

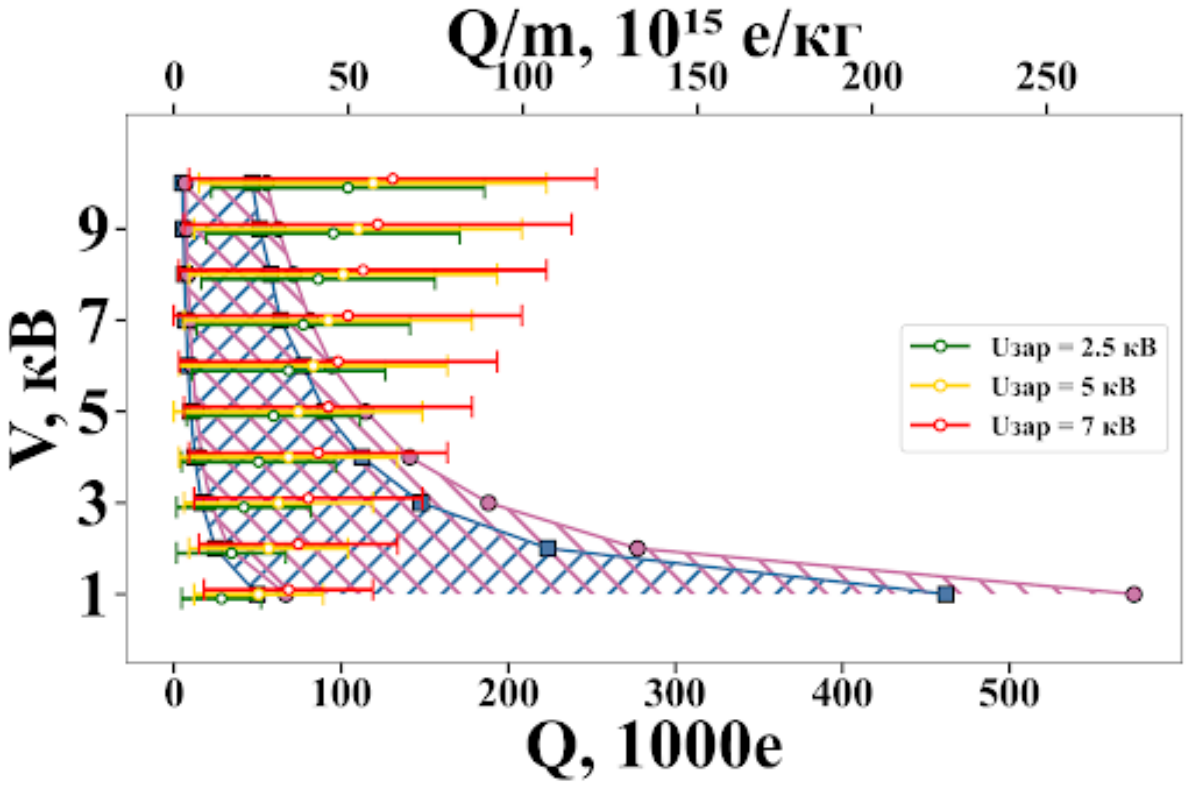


Рис. 4.7.2: Сопоставление оценочных диапазонов заряда и областей удержания микрочастицы диаметром 10 мкм

Левые границы областей удержания для синусоидального и прямоугольного напряжения различаются незначительно, при этом область удержания для синусоидального напряжения шире на 15–20 %. Пересечение областей удержания с оценочными диапазонами зарядов для двух форм напряжения отличается незначительно.

При напряжении зарядки 2,5 кВ максимальное пересечение для прямоугольного напряжения составляет 92 % и достигается при $V = 4$ кВ, а для синусоидального — 94 % при $V = 5$ кВ.

Таблица 4.7.4: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 10 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 2{,}5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	64 %	52 %
5	77 %	94 %
7	39 %	53 %

При напряжении зарядки 5 кВ максимальное пересечение для прямоугольного напряжения составляет 90 % и достигается при $V = 3$ кВ, а для синусоидального — 90 % при $V = 4$ кВ.

Таблица 4.7.5: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 10 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	83 %	75 %
5	54 %	68 %
7	33 %	42 %

При напряжении зарядки 7 кВ для обеих форм удерживающего напряжения максимальное пересечение достигается при $V = 3$ кВ. Для прямоугольного напряжения оно составляет 96 %, а для синусоидального — 92 %.

Таблица 4.7.6: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 10 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 7$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	92 %	85 %
5	46 %	59 %
7	27 %	35 %

Таким образом, при увеличении диаметра частиц с 5 до 10 мкм максимум пересечения оценочного диапазона зарядов с областью удержания смещается в сторону меньших значений амплитуды удерживающего напряжения V. Для частиц диаметром 10 мкм положение максимума зависит от напряжения зарядки и формы удерживающего напряжения. Наибольшее из рассмотренных значений пересечения составляет 96 % и достигается для прямоугольного напряжения при $U_{\text{зар}} = 7$ кВ и $V = 3$ кВ.

На Рис. 4.7.3 показано сопоставление областей удержания и оценочных диапазонов заряда для частицы диаметром 20 мкм. При увеличении амплитуды удерживающего напряжения диапазоны зарядов, которые может получить частица данного размера, смещаются в сторону больших значений заряда. Визуально наибольшее пересечение оценочных диапазонов заряда с областями удержания наблюдается при амплитуде удерживающего напряжения 2–3 кВ и напряжении зарядки 5–7 кВ.

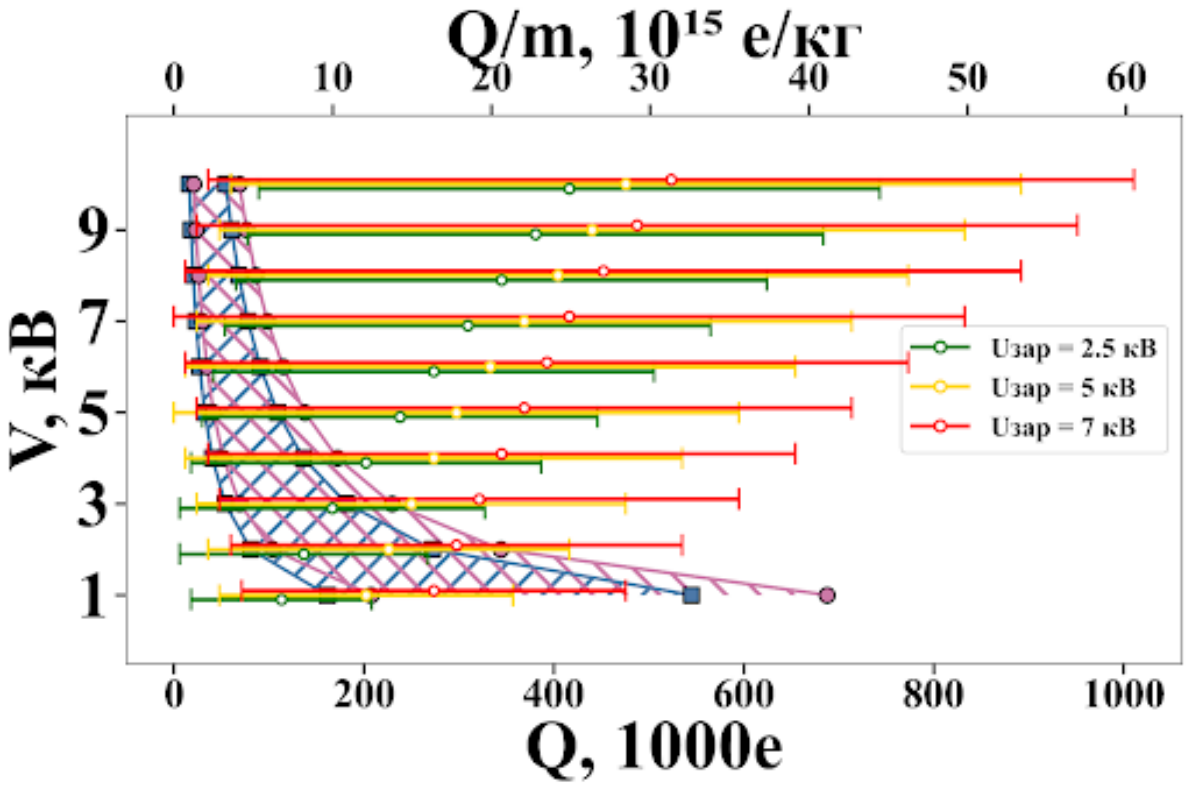


Рис. 4.7.3: Оценка заряда и области удержания для микрочастицы диаметром 20 мкм

При напряжении зарядки 2,5 кВ наибольшее пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания наблюдается при амплитуде удерживающего напряжения $V = 2$ кВ и составляет 71 % для прямоугольного напряжения и 63 % для синусоидального. При увеличении амплитуды до 5 кВ пересечение уменьшается до 18 и 23 % соответственно, а при $V = 7$ кВ — до 4 и 9 %. Таким образом, с увеличением амплитуды удерживающего напряжения степень пересечения диапазонов уменьшается для обеих форм напряжения.

При напряжении зарядки 5 кВ наибольшее пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания наблюдается при амплитуде удерживающего напряжения $V = 2$ кВ и составляет 50 % для прямоугольного напряжения и 63 % для синусоидального. При увеличении амплитуды до 5 кВ пересечение уменьшается до 14 и 16 % соответственно, а при $V = 7$ кВ — до 8 и 10 %. Таким образом, с увеличением амплитуды удерживающего напряжения степень пересечения диапазонов уменьшается для обеих форм напряжения, при этом

Таблица 4.7.7: Пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания для частицы диаметром 20 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 2{,}5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	71 %	63 %
5	18 %	23 %
7	4 %	9 %

для синусоидального напряжения она несколько выше во всём рассмотренном диапазоне.

Таблица 4.7.8: Пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания для частицы диаметром 20 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	50 %	63 %
5	14 %	16 %
7	8 %	10 %

При напряжении зарядки 7 кВ для частиц диаметром 20 мкм наибольшее пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания достигается при амплитуде удерживающего напряжения $V = 1$ кВ и составляет 77 % для прямоугольного напряжения и 66 % для синусоидального. При увеличении амплитуды до 2 кВ пересечение уменьшается до 40 и 50 % соответственно, при $V = 5$ кВ — до 11 и 14 %, а при $V = 7$ кВ — до 7 и 8 %. Таким образом, с увеличением амплитуды удерживающего напряжения степень пересечения диапазонов уменьшается для обеих форм напряжения.

Таблица 4.7.9: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 20 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 7$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	40 %	50 %
5	11 %	14 %
7	7 %	8 %

По сравнению с результатами для частиц диаметром 5–10 мкм, для которых максимальное пересечение достигалось при амплитудах удерживающего напряжения 4–6 кВ и превышало 90 %, для частиц диаметром 20 мкм максимум пересечения смещается в область

меньших значений удерживающего напряжения — 1–2 кВ и составляет 60–70 %. Из рассмотренных значений напряжения зарядки наибольшее пересечение для частиц диаметром 20 мкм достигается при напряжении зарядки 7 кВ.

На Рис. 4.7.4 показано сопоставление областей удержания и оценочных диапазонов заряда для частицы диаметром 35 мкм. При амплитуде удерживающего напряжения $V > 7$ кВ оценочные диапазоны заряда значительно превышают по ширине области удержания, а их пересечение составляет не более 10 %. При $V = 1$ кВ область удержания смещена в сторону больших значений заряда и не пересекается с оценочным диапазоном заряда при напряжении зарядки 2,5 кВ.

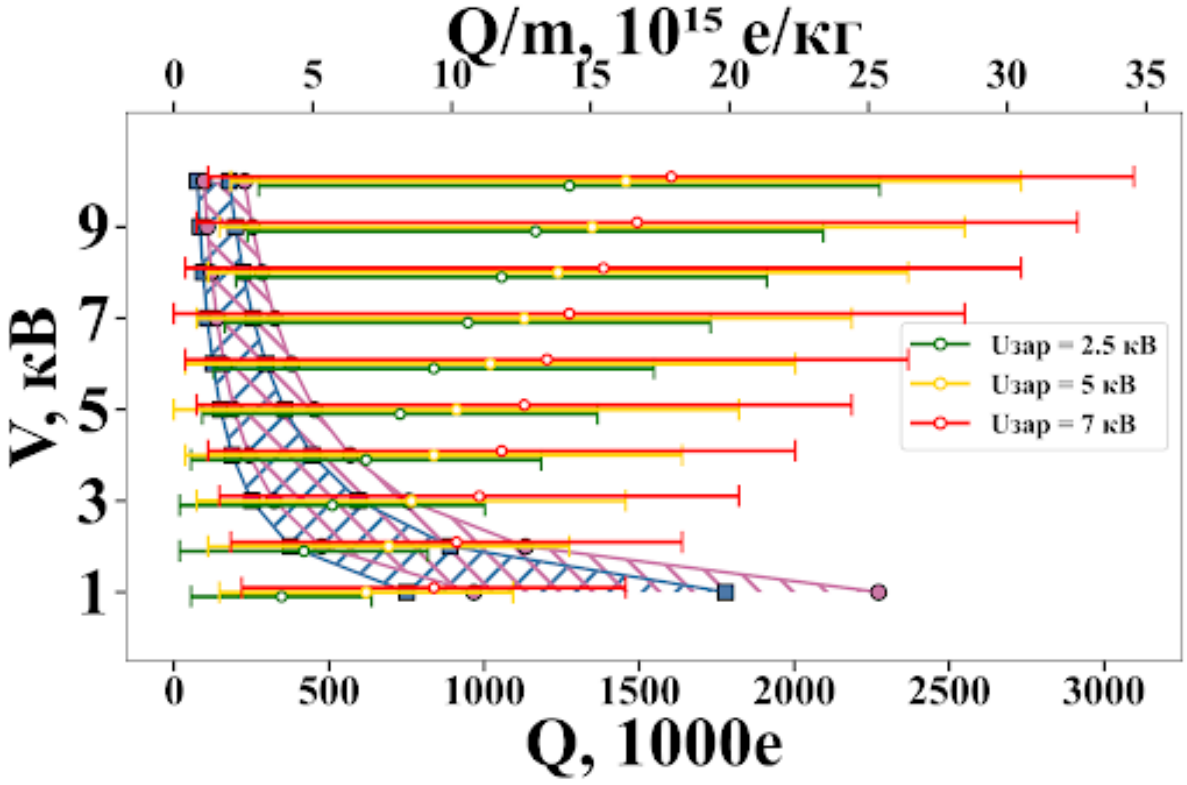


Рис. 4.7.4: Оценка заряда и области удержания для микрочастицы диаметром 35 мкм

При напряжении зарядки 2,5 кВ для частиц диаметром 35 мкм наибольшее пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания наблюдается при амплитуде удерживающего напряжения $V = 2$ кВ и составляет 55 % для прямоугольного напряжения и 43 % для синусоидального. При увеличении амплитуды до 5 кВ пересечение уменьшается до 16 % для прямоугольного напряжения и 20 % для синусоидального, а при $V = 7$ кВ — до 6 и 10 % соответственно. Таким образом, при меньшей амплитуде удерживающего напряжения (2 кВ) прямоугольная форма обеспечивает большее пересечение диапазонов, тогда как при $V = 5$–7 кВ пересечение несколько выше для синусоидального напряжения.

При напряжении зарядки 5 кВ для частиц диаметром 35 мкм наибольшее пересечение

Таблица 4.7.10: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 35 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 2{,}5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	55 %	43 %
5	16 %	20 %
7	6 %	10 %

оценочного диапазона заряда с областью удержания достигается при амплитуде удерживающего напряжения $V = 2$ кВ и составляет 44 % для прямоугольного напряжения и 56 % для синусоидального. При увеличении амплитуды до 5 кВ пересечение уменьшается до 11 % для прямоугольного напряжения и 14 % для синусоидального, а при $V = 7$ кВ — до 7 и 9 % соответственно. Таким образом, для обеих форм напряжения наибольшее пересечение достигается при $V = 2$ кВ, однако при синусоидальном напряжении оно выше во всём рассмотренном диапазоне амплитуд.

Таблица 4.7.11: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 35 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	44 %	56 %
5	11 %	14 %
7	7 %	9 %

При напряжении зарядки 7 кВ наибольшее пересечение при $V = 2$ кВ составляет 35 % для прямоугольного и 45 % для синусоидального напряжения.

Таблица 4.7.12: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 35 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 7$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	35 %	45 %
5	10 %	12 %
7	5 %	7 %

Для частиц диаметром 35 мкм максимальное пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания при обеих формах напряжения достигается при амплитуде удерживающего напряжения V = 2 кВ. Для прямоугольного напряжения наибольшее пересечение

составляет 55 % при напряжении зарядки 2,5 кВ, для синусоидального — 56 % при напряжении зарядки 5 кВ. При увеличении амплитуды удерживающего напряжения до 5–7 кВ пересечение уменьшается до 5–20 % для обеих форм напряжения.

На Рис. 4.7.5 представлено сопоставление областей удержания и оценочных диапазонов заряда для частицы диаметром 50 мкм. При амплитуде удерживающего напряжения $V = 1$ кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ оценочный диапазон заряда не пересекается с областью удержания. Область удержания при синусоидальном напряжении шире на 15–17 % и смещена в сторону больших зарядов по сравнению с прямоугольным напряжением. Благодаря этому пересечение при V > 7 кВ больше для синусоидального напряжения, но процент пересечения менее 10%.

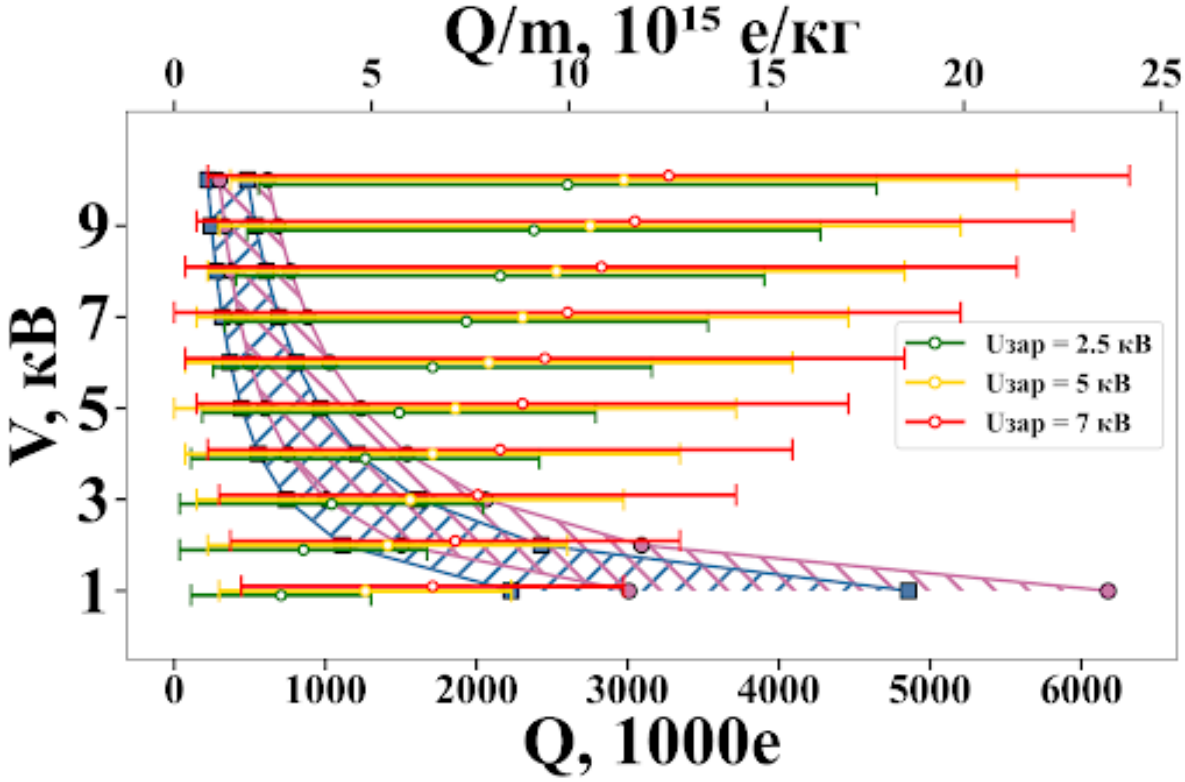


Рис. 4.7.5: Оценка заряда и области удержания для микрочастицы диаметром 50 мкм

При напряжении зарядки 2,5 кВ максимальное пересечение достигается при $V = 3$ кВ и составляет 51 % для синусоидального напряжения и 43 % для прямоугольного (разница 8 %). При $V = 2$ кВ пересечение больше для прямоугольного напряжения — 34 % против 10 % для синусоидального. При $V = 5$ кВ пересечение составляет 20 и 24 % соответственно, а при $V = 7$ кВ — 11 и 14 %. При $V > 7$ кВ пересечение остаётся выше для синусоидального напряжения, но не превышает 10 % для обеих форм.

При напряжении зарядки 5 кВ для частиц диаметром 50 мкм максимальное пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания достигается при амплитуде удержива-

Таблица 4.7.13: Пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания для частицы диаметром 50 мкм при напряжении зарядки 2,5 кВ

Амплитуда напряжения, кВ	Прямоугольное напряжение, %	Синусоидальное напряжение, %
$V = 2$	34	10
$V = 3$	43	51
$V = 5$	20	24
$V = 7$	11	14

ющего напряжения $V = 2$ кВ и составляет 55 % для прямоугольного напряжения и 46 % для синусоидального (разница 9 %). При $V = 5$ кВ пересечение уменьшается до 14 и 17 % соответственно, а при $V = 7$ кВ — до 9 и 10 %. При увеличении амплитуды удерживающего напряжения от 2 до 7 кВ пересечение уменьшается для обеих форм напряжения. При $V = 2$ кВ большее пересечение обеспечивает прямоугольное напряжение, а при $V = 5$ и 7 кВ — синусоидальное, с разницей 3 и 1 % соответственно.

Таблица 4.7.14: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 50 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 5$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	55 %	46 %
5	14 %	17 %
7	9 %	10 %

При напряжении зарядки 7 кВ для частиц диаметром 50 мкм максимальное пересечение оценочного диапазона заряда с областью удержания достигается при амплитуде удерживающего напряжения $V = 2$ кВ и составляет 44 % для прямоугольного напряжения и 53 % для синусоидального (разница 9 %). При $V = 5$ кВ пересечение уменьшается до 12 и 14 % соответственно, а при $V = 7$ кВ — до 7 и 9 %. Для синусоидального напряжения пересечение выше на 2 % при $V = 5$ и 7 кВ.

Для частиц диаметром 50 мкм максимальное пересечение при прямоугольном напряжении (55 %) достигается при напряжении зарядки 5 кВ и амплитуде удерживающего напряжения 2 кВ, а при синусоидальном напряжении (53 %) — при напряжении зарядки 7 кВ и той же амплитуде. При напряжении зарядки 5 кВ и $V = 2$ кВ прямоугольное напряжение обеспечивает пересечение на 9 % больше, чем синусоидальное.

С увеличением диаметра частиц максимальная доля пересечения оценочного диапазона

Таблица 4.7.15: Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частицы диаметром 50 мкм при напряжении зарядки $U_{\text{зар}} = 7$ кВ

V, кВ	Прямоугольное напряжение	Синусоидальное напряжение
2	44 %	53 %
5	12 %	14 %
7	7 %	9 %

заряда с областью удержания уменьшается. Для частиц диаметром 5–10 мкм она превышает 90 %, тогда как для частиц диаметром 35–50 мкм составляет около 50–56 %. При этом амплитуда удерживающего напряжения, соответствующая максимальному пересечению, снижается с 4–6 до 2–3 кВ.

В следующем разделе результаты численных расчётов сопоставляются с экспериментальными данными.

4.8 Экспериментальное подтверждение расчетных областей удержания

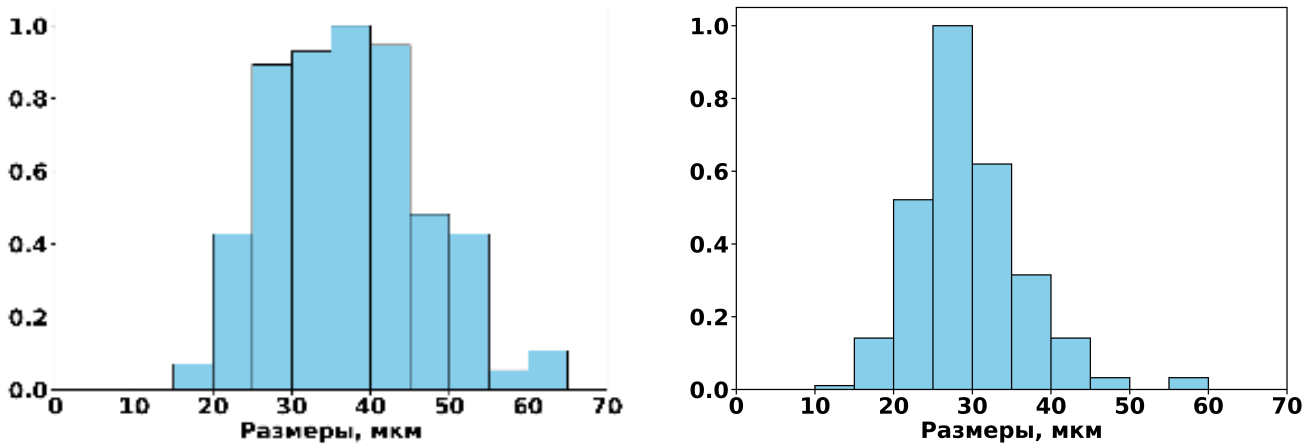
Полидисперсность исходной смеси требует применения различных методов сравнительного анализа для сопоставления расчётных данных с экспериментальными результатами. Проведена серия экспериментов по осаждению на стекло частиц, заряженных и захваченных в ловушке при фиксированных параметрах напряжения, с последующим измерением их размеров.

Расчёты выполнены для одиночной частицы в ловушке без учёта межчастичного кулоновского взаимодействия и коллективных эффектов. Поэтому сопоставление результатов расчётов с экспериментальными данными носит преимущественно качественный характер.

Сопоставление с экспериментом при синусоидальном напряжении

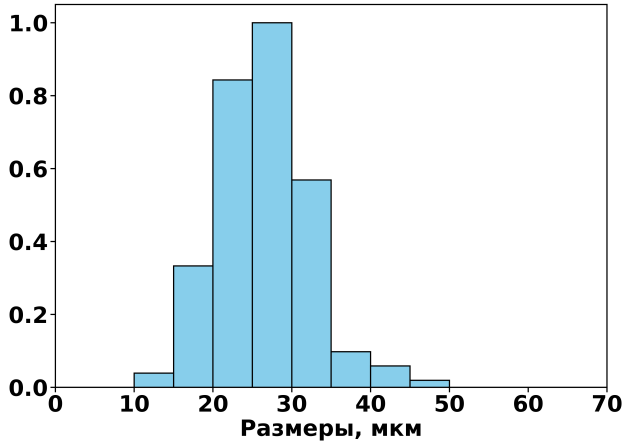
На Рис. 4.8.1 (а–г) приведены нормированные распределения по размерам частиц, выпавших из ловушки при последовательном уменьшении амплитуды синусоидального удерживающего напряжения от 8 кВ до полного выпадения частиц. Частицы однократно загружались в ловушку при амплитуде удерживающего напряжения 8 кВ. Исходная смесь содержала частицы диаметром от 5 до 80 мкм. Перед загрузкой в ловушку частицы заряжались на металлической пластине при потенциале 7 кВ.

Сопоставление экспериментальных данных с расчётными проводилось по следующей схеме. Определялся начальный диапазон зарядов Q_0 как пересечение расчётной области удер-

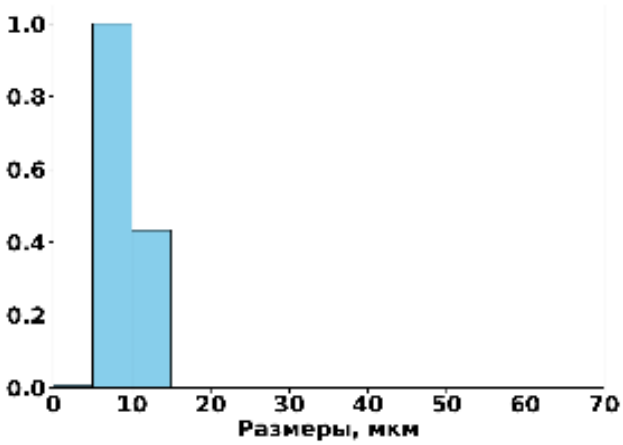


а

б



в



г

Рис. 4.8.1: Распределения по размерам частиц, выпавших из ловушки при последовательном снижении амплитуды удерживающего напряжения: (а) — с 8 до 6 кВ, выборка из 300 частиц; (б) — с 6 до 4 кВ, выборка из 260 частиц; (в) — с 4 до 2 кВ, выборка из 152 частиц; (г) — с 2 до 0 кВ, выборка из 184 частиц.

жания при напряжении 8 кВ с оценочным диапазоном зарядов при напряжении зарядки 7 кВ. Для каждого последующего значения удерживающего напряжения определялась часть начального диапазона зарядов, которая продолжала удовлетворять условиям удержания. Для этого вычислялось пересечение начального диапазона с областью удержания при новом значении напряжения. Степень сохранения исходного диапазона определялась как выраженное в процентах отношение ширины диапазона зарядов, остающегося в области удержания после изменения напряжения, к ширине начального диапазона Q_0.

Рассмотрим в качестве примера частицы диаметром 50 мкм. При амплитуде удерживающего напряжения 8 кВ область удержания соответствует диапазону зарядов 375 866–771 301 e шириной 395 435 e, принятому за 100 %. При напряжении 6 кВ область удержания

смещается в диапазон 601 383–1 236 066 e. Пересечение с исходным диапазоном составляет 601 383–771 301 e шириной 169 918 e, или 42,97 % от первоначального диапазона. Таким образом, 57,03 % исходного диапазона зарядов перестаёт соответствовать условиям удержания. Это согласуется с интенсивным выпадением частиц диаметром 50 мкм при первом снижении напряжения (Рис. 4.8.1а). Согласно расчёту, при дальнейшем снижении напряжения до 4 кВ дополнительного сокращения оставшегося диапазона не происходит.

Частицы диаметром 35 мкм преобладают среди выпадающих частиц на первых трёх этапах снижения напряжения (Рис. 4.8.1а– 4.8.1в), однако их количество последовательно уменьшается. При 8 кВ расчётная область удержания составляет 120 622–284 098 e. При снижении напряжения до 6 кВ условиям удержания соответствует 75,5 % исходного диапазона зарядов, при 4 кВ — 26,4 %, а при 2 кВ пересечение отсутствует. Область удержания при 2 кВ (474 495–1 133 603 e) полностью смещена относительно исходной области. Это объясняет выпадение данной фракции из ловушки и качественно согласуется с экспериментом.

Для частиц диаметром 20 мкм при снижении напряжения с 8 до 6 кВ условиям удержания соответствует 85,6 % исходного диапазона зарядов, а при снижении до 4 кВ — 56,8 %. Несмотря на смещение области удержания в сторону больших зарядов, значительная часть исходного диапазона сохраняется. Расчёт согласуется с экспериментом: частицы диаметром 20 мкм составляют наибольшую долю удерживаемых частиц, их содержание при снижении напряжения практически не изменяется, тогда как частицы диаметром 35 и 50 мкм последовательно покидают ловушку.

Для частиц диаметром 10 мкм расчет показывает, что доля исходного диапазона зарядов, соответствующая условиям удержания, составляет 95,8 % при 6 кВ, 87 % при 4 кВ и 61 % при 2 кВ. Таким образом, частицы диаметром 10 мкм сохраняют наибольшую долю исходного диапазона зарядов среди рассмотренных размеров 20, 35 и 50 мкм при последовательном уменьшении напряжения.

Для частиц диаметром 5 мкм расчет показывает, что при снижении напряжения до 6 кВ удерживается 89,5 % исходного диапазона зарядов, что согласуется с отсутствием заметного выпадения данной фракции на первом этапе (Рис. 4.8.1а). При снижении напряжения до 4 кВ доля уменьшается до 68,8 %, а при 2 кВ — до 8,7 %. Небольшое количество мелких частиц в экспериментальных распределениях также связано с их малой долей в исходной смеси.

Сопоставление с экспериментом при прямоугольном напряжении

В предыдущем эксперименте с синусоидальным удерживающим напряжением частицы однократно загружались в ловушку, после чего амплитуда напряжения последовательно умень-

шалась.

Для проверки результатов расчётов при прямоугольном напряжении проведена серия экспериментов по осаждению частиц. Частицы заряжались методом индукционной зарядки при одном из значений напряжения зарядки: 2,5, 5 или 7 кВ. Затем частицы вносились в ловушку с прямоугольным удерживающим напряжением частотой 50 Гц и амплитудой 2, 5 или 7 кВ.

Для сопоставления результатов расчётов с экспериментальными распределениями частиц по размерам было рассчитано ожидаемое распределение удерживаемых частиц с учётом размерного распределения исходной полидисперсной смеси.

На Рис. 4.8.2 показано распределение частиц по размерам в исходной полидисперсной смеси, построенное по результатам измерения 503 частиц. В диапазоне до 5 мкм зарегистрировано 273 частицы.

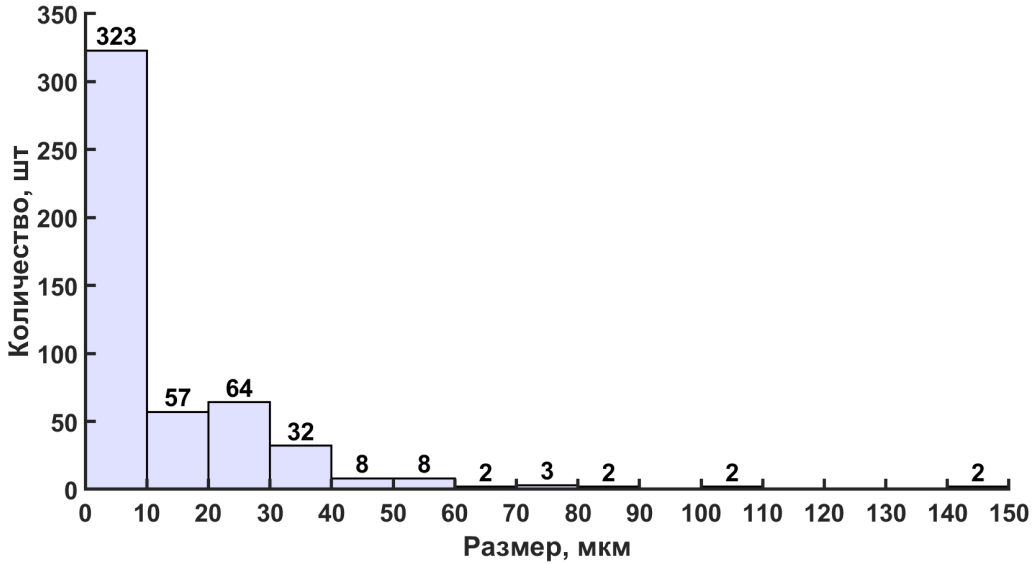


Рис. 4.8.2: Распределение частиц по размерам в исходной смеси

Поскольку расчёты выполнены для частиц диаметром 5, 10, 20, 35 и 50 мкм, исходное распределение было разделено на пять соответствующих размерных групп. Границы групп выбирались посередине между соседними расчётными значениями диаметра. Полученное разбиение исходной смеси приведено в табл. 4.8.1.

В качестве примера определения ожидаемой доли удерживаемых частиц размерной группы 15–27,5 мкм рассмотрим расчёт для частиц диаметром 20 мкм при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении индукционной зарядки 5 кВ.

Определяется пересечение области удержания с оценочным диапазоном зарядов, которые частица может получить при индукционной зарядке. Для частиц диаметром 20 мкм область

Таблица 4.8.1: Распределение частиц в исходной смеси

Размерная группа, мкм	Число частиц	Содержание, %
5 (до 7,5)	306	60,8
10 (7,5–15)	46	9,1
20 (15–27,5)	79	15,7
35 (27,5–42,5)	49	9,7
50 (более 42,5)	23	4,6

удержания составляет 32 320–108 903 e, а оценочный диапазон зарядов — 0–594 614 e.

Таким образом, область удержания полностью входит в оценочный диапазон зарядов, а ширина их пересечения составляет 76 583 e. Ширина оценочного диапазона зарядов равна 594 614 e. Тогда расчётная доля диапазона зарядов, соответствующего условиям удержания, определяется как

$$\eta = \frac{76\,583}{594\,614} \cdot 100\% = 12{,}88\%.$$

В рамках принятой оценки это значение соответствует доле частиц диаметром 20 мкм, заряд которых попадает в расчётную область устойчивого удержания.

Далее расчётная доля удержания учитывается совместно с содержанием данной размерной группы в исходной смеси. Доля частиц размерной группы 15–27,5 мкм в исходной смеси составляет

$$\frac{79}{503} = 0{,}157.$$

Относительное количество удерживаемых частиц данной фракции определяется как произведение её доли в исходной смеси и расчётной доли удержания:

$$12{,}88\% \cdot 0{,}157 \approx 2{,}02\%.$$

Аналогичный расчёт выполняется для всех рассмотренных размерных групп при амплитуде удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении зарядки 5 кВ.

Суммарное относительное количество удерживаемых частиц составляет 55,25 %. Результаты расчёта приведены в табл. 4.8.2.

Ожидаемая доля частиц размерной группы 15–27,5 мкм среди всех удерживаемых частиц определяется как отношение относительного количества удерживаемых частиц данной фракции, равного 2,02 %, к суммарному относительному количеству удерживаемых частиц:

$$\frac{2{,}02}{55{,}25} \cdot 100\% = 3{,}66\%.$$

Таблица 4.8.2: Расчётное распределение удерживаемых частиц при напряжении зарядки 5 кВ и амплитуде удерживающего напряжения 5 кВ

Размерная группа, мкм	η, %	Относительное количество, %	Ожидаемая доля, %
5 (до 7,5)	76,53	46,56	84,27
10 (7,5–15)	53,84	5,00	8,91
20 (15–27,5)	12,88	2,02	3,66
35 (27,5–42,5)	11,31	1,10	2,00
50 (более 42,5)	14,02	0,64	1,16
Сумма	—	55,25	100

Частицы размерной группы 15–27,5 мкм составляют 15,7 % исходной смеси.

Расчет ожидаемой доли удерживаемых частиц выполнен для всех фракций и сопоставлен с распределениями сбросов полученных экспериментально.

На Рис. 4.8.3 показано экспериментальное распределение частиц при амплитуде удерживающего напряжения 2 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Выборка составила 114 частиц. Микроскопический анализ показал наличие отдельных крупных частиц диаметром 20–40 мкм. При этих параметрах пересечение оценочных диапазонов зарядов с областями удержания для частиц диаметром 5–10 мкм составляет около 13 % (Рис. 4.7.1– 4.7.2), что меньше, чем для остальных исследованных фракций.

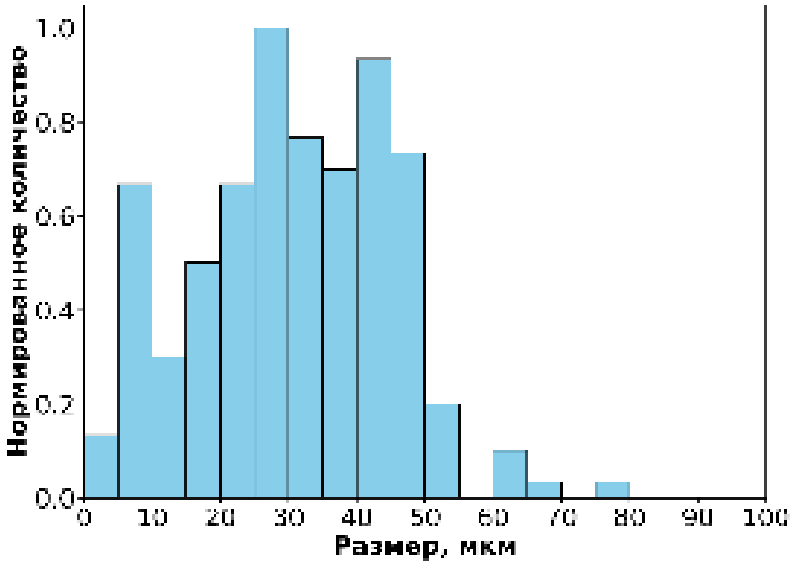


Рис. 4.8.3: Распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 2 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Выборка из 114 частиц

Процентное содержание размерных групп приведено в табл. 4.8.3. Наиболее близкое сов-

падение получено для частиц диаметром 20 мкм: расчётная доля составляет 35,3 %, экспериментальная — 31,9 %. Для частиц диаметром 10 мкм соответствующие значения составляют 18,5 и 12,4 %. Расчет качественно согласуется с экспериментом.

Таблица 4.8.3: Сопоставление расчётного и экспериментального распределений частиц при амплитуде удерживающего напряжения 2 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ

Размерная группа, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	24,3	8,0
10	18,5	12,4
20	35,3	31,9
35	17,0	38,9
50	5,0	8,8

На Рис. 4.8.4 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Выборка составила 58 частиц. Процентное содержание фракций приведено в табл. 4.8.4.

Расчётное и экспериментальное распределения подтверждают наличие всех исследованных размерных фракций. Наиболее близкие значения получены для частиц диаметром 10 мкм: расчётная доля составляет 11 %, экспериментальная — 12,3 %. В обоих распределениях присутствует фракция 5 мкм, широко представленная в исходной смеси. Эксперимент также подтверждает удержание крупных частиц диаметром 35 и 50 мкм, предсказанное расчётом.

В экспериментальном распределении преобладают фракции 5 мкм и 35–50 мкм. Значительная доля частиц диаметром 5 мкм объясняется высоким содержанием мелких частиц в исходной смеси (Рис. 4.8.2). Уменьшение доли частиц диаметром 20 и 35 мкм по сравнению с предыдущими результатами при амплитуде 2 кВ (табл. 4.8.3) согласуется с уменьшением пересечения оценочных диапазонов зарядов с областями удержания (табл. 4.7.7 и 4.7.10).

Сопоставление расчётного и экспериментального распределений показывает хорошее соответствие для группы 10 мкм: расчётная доля составляет 11,0 %, экспериментальная — 12,3 %.

На Рис. 4.8.5 показано экспериментальное распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 7 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Сопоставление экспериментального и расчётного распределений приведено в табл. 4.8.5.

В экспериментальном распределении присутствуют все рассмотренные размерные группы от 5 до 50 мкм, однако преобладают крупные частицы групп 35 и 50 мкм, доли которых

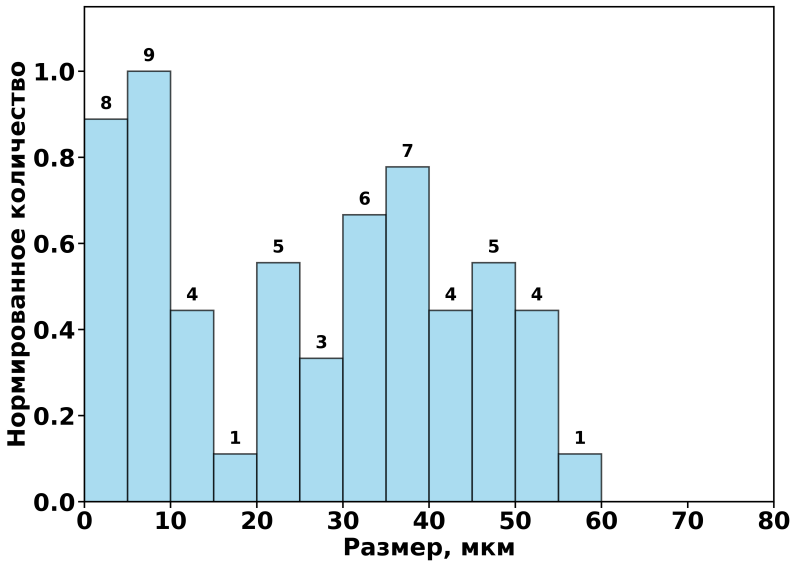


Рис. 4.8.4: Распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Выборка из 58 частиц

Таблица 4.8.4: Сопоставление расчётного и экспериментального распределений частиц при амплитуде удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ

Размерная группа, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	80,6	24,5
10	11,0	12,3
20	4,5	12,3
35	2,5	28,0
50	1,4	23,0

составляют 46,6 и 32,0 % соответственно. Суммарная доля этих двух групп составляет 78,6 %.

Таблица 4.8.5: Сопоставление расчётного и экспериментального распределений частиц при амплитуде удерживающего напряжения 7 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ

Размерная группа, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	87,3	5,8
10	8,4	4,9
20	1,8	10,7
35	1,3	46,6
50	1,2	32,0

На Рис. 4.8.5 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам при

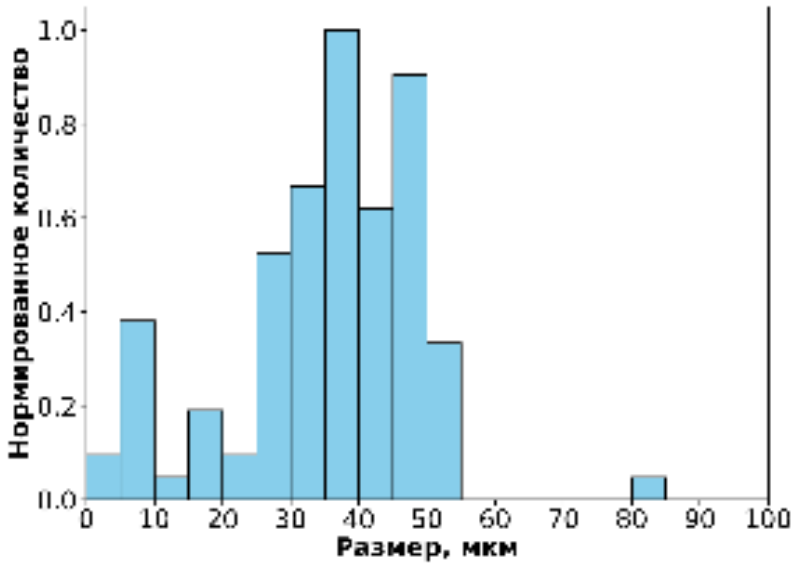


Рис. 4.8.5: Распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 7 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Выборка из 104 частиц

амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 7 кВ и напряжении зарядки 2,5 кВ. Выборка составила 104 частицы. В распределении присутствуют все исследованные фракции диаметром 5–50 мкм. Преобладают частицы диаметром 35 и 50 мкм, доли которых составляют 46,6 и 32 % соответственно, суммарно 78,6 %.

Сопоставление расчётного и экспериментального распределений приведено в табл. 4.8.5. Оба распределения содержат все исследованные размерные фракции.

Экспериментальные результаты при напряжении зарядки 2,5 кВ показывают преимущественное удержание крупных частиц диаметром 20–50 мкм при амплитуде удерживающего напряжения 7 кВ. Их суммарная доля достигает 89,3 %. Это особенно существенно с учётом преобладания мелких частиц диаметром до 5 мкм в исходной смеси. Таким образом, эксперимент подтверждает возможность преимущественного удержания крупных частиц при указанных параметрах ловушки.

На Рис. 4.8.6 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 2 кВ и напряжении зарядки 5 кВ. Выборка составила 326 частиц. Сопоставление расчётного и экспериментального распределений приведено в табл. 4.8.6.

Наиболее близкое совпадение получено для частиц диаметром 5 мкм: расчётная доля составляет 56,5 %, экспериментальная — 59,7 %. В обоих распределениях данная фракция преобладает. Экспериментальные доли частиц диаметром 10–35 мкм не превышают 8 %, расчётные — 15,4 %. Таким образом, расчёт и эксперимент согласуются по преобладанию частиц диаметром 5 мкм.

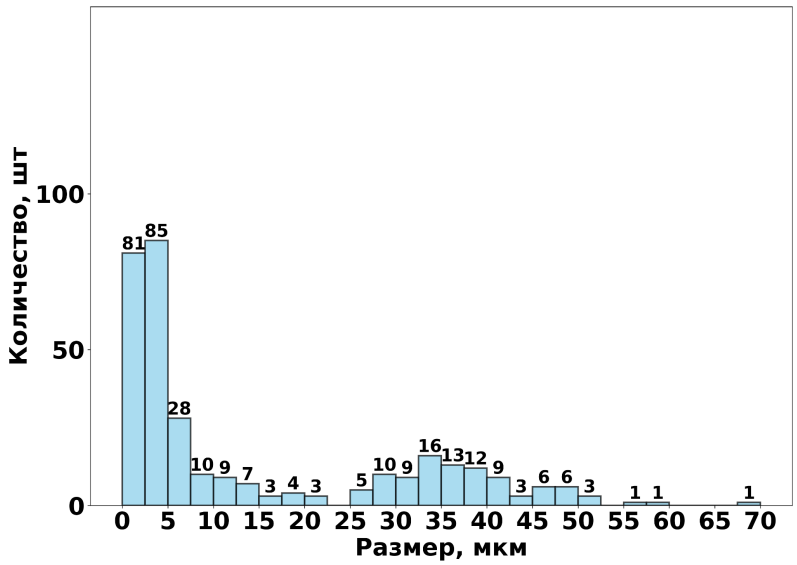


Рис. 4.8.6: Распределение по размерам частиц при прямоугольном напряжении 2 кВ, напряжение зарядки 5 кВ. Выборка из 326 частиц.

Таблица 4.8.6: Сопоставление эксперимента и расчёта для 2 кВ, зарядка 5 кВ

Размер, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	56,5	59,7
10	15	8
20	15,4	4,6
35	8,37	6,5
50	5	18

На Рис. 4.8.7 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении зарядки 5 кВ. Выборка составила 432 частицы. Сопоставление расчётного и экспериментального распределений приведено в табл. 4.8.7.

В обоих распределениях преобладают частицы диаметром 5 мкм: расчётная доля составляет 84,3 %, экспериментальная — 71,2 %. Минимальное содержание наблюдается для частиц диаметром 50 мкм: 1,16 и 2 % соответственно. При увеличении амплитуды удерживающего напряжения с 2 до 5 кВ экспериментальная доля частиц диаметром 5 мкм возрастает с 59,7 до 71,2 %, а доля частиц диаметром 50 мкм уменьшается с 18 до 2 %. Полученные результаты качественно согласуются с расчётом.

На Рис. 4.8.8 представлены результаты осаждения частиц при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 7 кВ и напряжении зарядки 5 кВ. Сопоставление расчётных

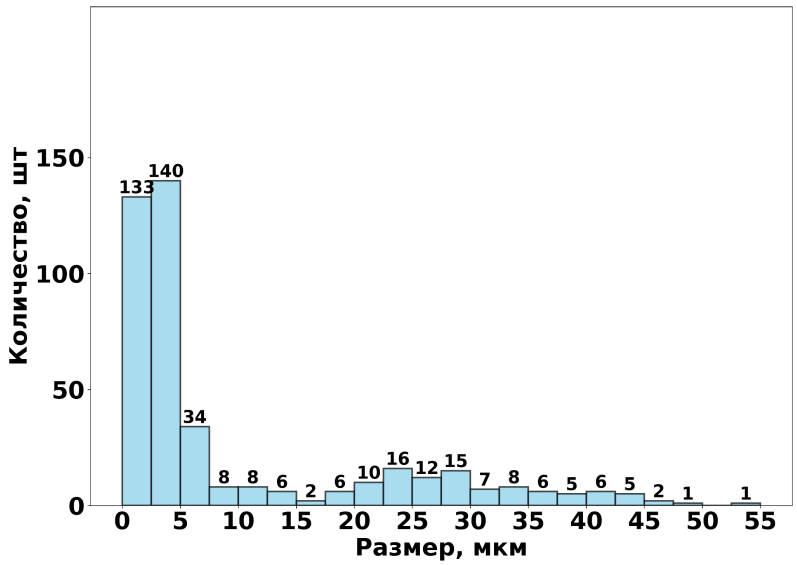


Рис. 4.8.7: Распределение по размерам частиц при прямоугольном напряжении 5 кВ, напряжение зарядки 5 кВ. Выборка из 432 частиц

Таблица 4.8.7: Сопоставление эксперимента и расчёта для 5 кВ, зарядка 5 кВ

Размер, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	84,3	71,2
10	9	5
20	3,6	10,7
35	2	11
50	1,16	2

и экспериментальных долей фракций, полученное по выборке из 429 частиц, приведено в табл. 4.8.8.

Расчёт и эксперимент согласованно показывают преобладание фракции 5 мкм. Её расчётная доля составляет 83,3 %, экспериментальная — 82,2 %. По сравнению с результатами при меньших амплитудах удерживающего напряжения подтверждается рост содержания частиц диаметром 5 мкм и уменьшение доли частиц диаметром 10 и 20 мкм. Таким образом, при напряжении зарядки 5 кВ увеличение амплитуды удерживающего напряжения приводит к преимущественному удержанию мелких частиц.

Полученный результат согласуется с расчётным сопоставлением областей удержания и диапазонов оценённого заряда. Для частиц диаметром 5 мкм на Рис. 4.7.1 видно, что с ростом амплитуды удерживающего напряжения увеличивается пересечение диапазона оценённого заряда с областью удержания. Для крупных частиц, напротив, с увеличением напряжения

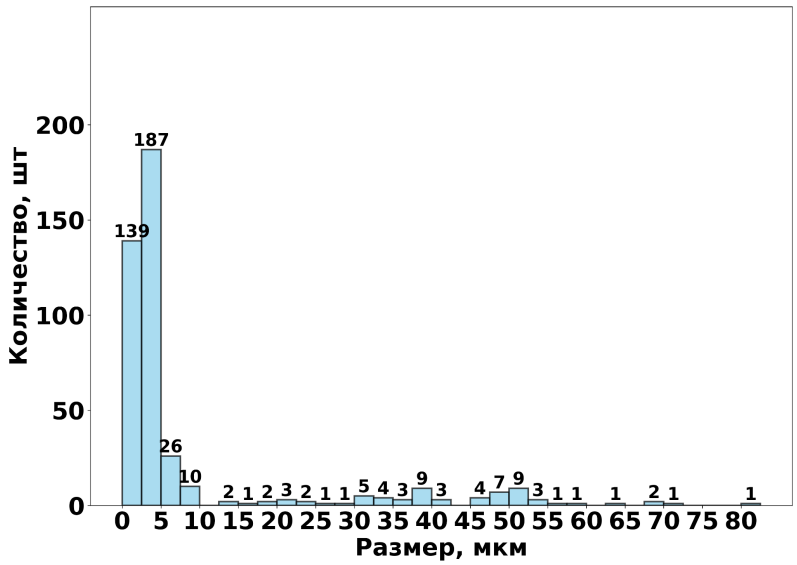


Рис. 4.8.8: Распределение по размерам частиц при прямоугольном напряжении 7 кВ, напряжение зарядки 5 кВ. Выборка из 429 частиц

Таблица 4.8.8: Сопоставление эксперимента и расчёта для 7 кВ, зарядка 5 кВ

Размер, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	83,3	82,2
10	9,1	2,8
20	4,4	2,1
35	2,0	5,8
50	1,2	7,0

диапазон оценённого заряда смещается в область больших зарядов, а пересечение с областью удержания уменьшается, что показано на Рис. 4.7.5 для частиц диаметром 50 мкм.

На Рис. 4.8.9– 4.8.11 представлены экспериментальные распределения частиц по размерам при напряжении зарядки 7 кВ. Как и при зарядке 5 кВ, расчёт предсказывает преобладание частиц диаметром 5 мкм. При амплитуде удерживающего напряжения 2 кВ пересечение оценочных диапазонов зарядов с областями удержания максимально для всех рассмотренных размеров. С увеличением амплитуды пересечение уменьшается, что влияет на состав удерживаемых фракций.

На Рис. 4.8.9 представлено экспериментальное распределение при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 2 кВ и напряжении зарядки 7 кВ. Выборка составила 349 частиц. Сопоставление расчётных и экспериментальных данных приведено в табл. 4.8.9.

В расчётном и экспериментальном распределениях присутствуют все исследованные фрак-

ции диаметром 5–50 мкм. Наибольшая доля приходится на частицы диаметром 5 мкм: 65,6 % по расчёту и 75,9 % в эксперименте. Содержание остальных фракций значительно меньше. Для частиц диаметром 35 и 50 мкм расчётные доли составляют 6,0 и 3,4 %, экспериментальные — 9,0 и 6,6 % соответственно. Таким образом, расчёт качественно воспроизводит размерный состав удерживаемых частиц, включая преобладание фракции 5 мкм и присутствие крупных частиц диаметром 35–50 мкм.

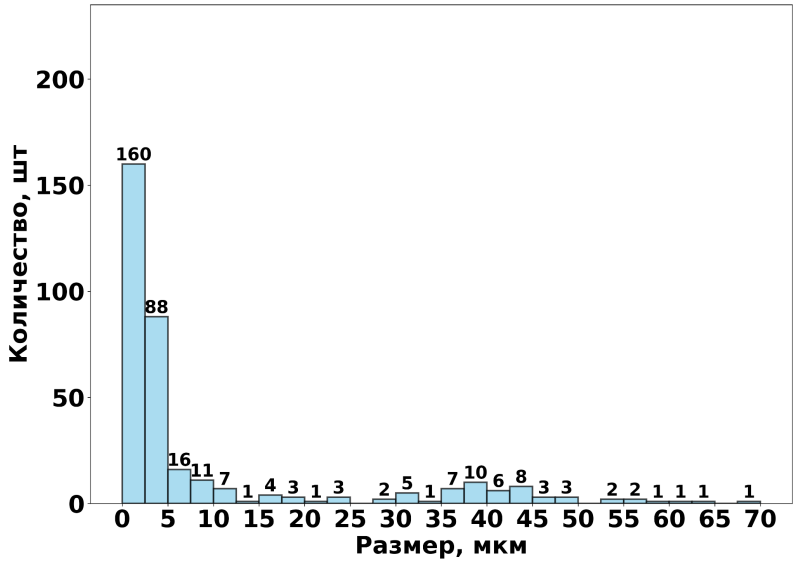


Рис. 4.8.9: Распределение по размерам частиц при прямоугольном напряжении 2 кВ, напряжение зарядки 7 кВ. Выборка из 349 частиц

Таблица 4.8.9: Сопоставление эксперимента и расчёта для 2 кВ, зарядка 7 кВ

Размер, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	65,6	75,9
10	14,3	5,5
20	10,8	3
35	6	9
50	3,4	6,6

На Рис. 4.8.10 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 5 кВ и напряжении зарядки 7 кВ. Выборка составила 471 частицу. Сопоставление расчётного и экспериментального распределений приведено в табл. 4.8.10.

В расчётном и экспериментальном распределениях присутствуют все исследованные фракции диаметром 5–50 мкм. Наибольшая доля приходится на частицы диаметром 5 мкм: 84,3 %

по расчёту и 61,9 % в эксперименте. При увеличении амплитуды удерживающего напряжения с 2 до 5 кВ экспериментальная доля этой фракции уменьшается с 75,9 до 61,9 %, однако она сохраняет преобладающее положение. Для частиц диаметром 10 мкм получены близкие значения: 8,9 % по расчёту и 6,0 % в эксперименте. Эксперимент также подтверждает присутствие крупных частиц диаметром 20–50 мкм. Пересечение оценочного диапазона зарядов с областью удержания для частиц диаметром 5 мкм представлено на Рис. 4.7.1 и в табл. 4.7.3. Таким образом, расчёт качественно воспроизводит состав удерживаемых фракций и преобладание мелких частиц.

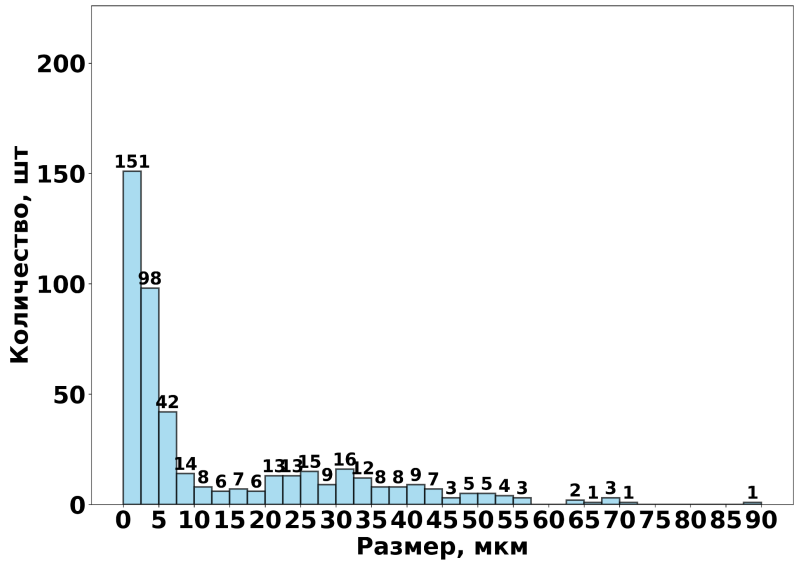


Рис. 4.8.10: Распределение по размерам частиц при прямоугольном напряжении 5 кВ, напряжение зарядки 7 кВ. Выборка из 471 частицы

Таблица 4.8.10: Сопоставление эксперимента и расчёта для 5 кВ, зарядка 7 кВ

Размер, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	84,3	61,9
10	8,9	6
20	3,6	11,5
35	2	13,2
50	1,2	7,4

На Рис. 4.8.11 представлено экспериментальное распределение частиц по размерам при амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 7 кВ и напряжении зарядки 7 кВ. Выборка составила 408 частиц. Сопоставление расчётного и экспериментального распределений приведено в табл. 4.8.11.

В обоих распределениях присутствуют все исследованные фракции диаметром 5–50 мкм. Преобладают частицы диаметром 5 мкм: расчётная доля составляет 83,8 %, экспериментальная — 73,5 %. Эксперимент также подтверждает присутствие частиц диаметром 10–50 мкм, при этом наименьшая доля приходится на фракцию 50 мкм (1,7 %). Таким образом, расчёт качественно воспроизводит состав удерживаемых частиц и преобладание мелкой фракции.

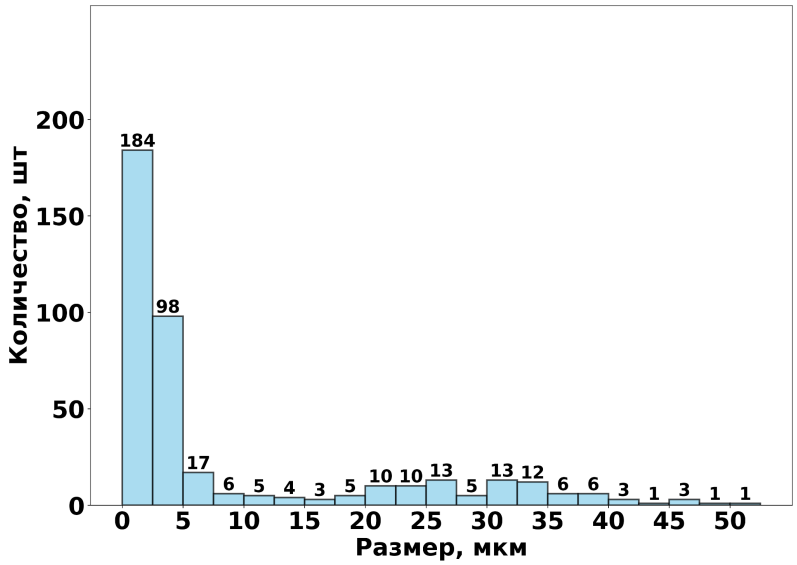


Рис. 4.8.11: Распределение по размерам частиц при прямоугольном напряжении 7 кВ, напряжение зарядки 7 кВ. Выборка из 408 частиц

Таблица 4.8.11: Сопоставление эксперимента и расчёта для 7 кВ, зарядка 7 кВ

Размер, мкм	Ожидаемая доля, %	Эксперимент, %
5	83,81	73,46
10	9,13	3,68
20	3,78	10,07
35	2,06	11,05
50	11,05	1,72

Сопоставление расчётных областей удержания с экспериментальными распределениями показало, что разработанная модель позволяет качественно прогнозировать размерный состав удерживаемых частиц в зависимости от напряжения зарядки и амплитуды удерживающего напряжения. Для синусоидального напряжения расчёт воспроизводит последовательность выпадения частиц при снижении амплитуды, включая преимущественное выпадение крупных частиц диаметром 35–50 мкм. Для прямоугольного напряжения методика, основанная на пересечении областей удержания с оценочными диапазонами зарядов и учёте исход-

ного состава смеси, позволяет определить ожидаемое распределение частиц и качественно сопоставить его с экспериментом.

Выводы

В результате выполненных исследований разработана методика численного расчёта областей удержания заряженных микрочастиц в линейной квадрупольной электродинамической ловушке с учётом действия силы тяжести и вязкого сопротивления воздуха. Показано, что учёт этих факторов существенно изменяет области удержания по сравнению с вакуумом, вследствие чего использование классических диаграмм устойчивости для описания движения микрочастиц в воздухе является некорректным.

Исследовано влияние формы удерживающего напряжения и размеров частиц на области удержания. Установлено, что переход от синусоидального к прямоугольному напряжению изменяет положение и форму областей удержания, а увеличение размера частиц сопровождается смещением областей удержания в сторону больших зарядов. Показано, что изменение частоты и коэффициента заполнения прямоугольного напряжения позволяет эффективно управлять диапазонами устойчивого удержания частиц.

Выполнена оценка зарядов, приобретаемых частицами при индукционной зарядке, что позволило сопоставить результаты численного моделирования с экспериментальными исследованиями.

Сопоставление расчётных и экспериментальных результатов показало качественное согласие по составу удерживаемых фракций диаметром 5–50 мкм. При напряжениях зарядки 5 и 7 кВ расчёт правильно предсказывает преобладание частиц диаметром 5 мкм, что подтверждается экспериментом.

При напряжении зарядки 2,5 кВ и амплитуде прямоугольного удерживающего напряжения 7 кВ экспериментально установлено преимущественное удержание крупных частиц диаметром 35–50 мкм, суммарная доля которых достигает 78,6 %, несмотря на преобладание мелких частиц в исходной смеси. Расчёт предсказывает возможность удержания крупных частиц, но не воспроизводит их преобладание в данном режиме. Полученные результаты демонстрируют возможность размерно-селективного удержания полидисперсных диэлектрических частиц и применимость разработанной модели для качественного прогнозирования состава удерживаемых фракций.

Глава 5. Управление резонансными свойствами диэлектрических колец в СВЧ-диапазоне

Большой интерес сегодня вызывает резонансное возбуждение магнитных мод и формирование отрицательной магнитной индуктивности в субволновых плазмонных и полностью диэлектрических телах в поле монохроматической электромагнитной волны. Замена металлов диэлектриками позволяет избежать больших диссипативных потерь.

В последнее время появились новые направления, ориентированные на полностью диэлектрическую нанофотонику, а также ТГц- и СВЧ-диапазоны, которые позволяют управлять электромагнитными резонансами диэлектрических частиц с высоким показателем преломления.

Для создания метаповерхностей вначале использовали металлический виток, который является магнитным диполем, свойства которого хорошо известны. Его резонансная частота может быть рассчитана на основе его ёмкости и самоиндуктивности, а магнитное поле — из закона Био—Савара—Лапласа.

Было показано [2], что кольцевой диэлектрический контур может обладать такими же свойствами магнитного диполя, как кольцевой металлический контур.

Исследование кольцевых диэлектрических субволновых метаэлементов, их взаимодействия с плазменными и проводящими элементами, а также связанных систем колец с различной взаимной ориентацией плоскостей актуально для разработки диэлектрических метаструктур с малыми диссипативными потерями и управляемыми резонансными характеристиками.

Глава посвящена изучению способов управления резонансным откликом таких структур посредством изменения взаимного расположения двух диэлектрических колец, а также плазменных и проводящих элементов различной геометрии.

5.1 Резонансный спектр одиночного диэлектрического кольца

Наибольший интерес представляет конфигурация, при которой волновой вектор k и вектор электрического поля E лежат в плоскости кольца, а вектор магнитного поля H направлен вдоль его оси (Рис. 5.1.1а). При такой ориентации создаются условия для эффективного возбуждения основной магнитной моды кольцевого резонатора, характеризующейся максимумом магнитного поля во внутренней области кольца.

Исследование связанных систем из нескольких диэлектрических колец требует предва-

рительного определения собственных резонансных характеристик отдельного элемента. Поэтому на первом этапе были экспериментально и численно исследованы резонансный спектр одиночного диэлектрического кольца и пространственное распределение электромагнитного поля в области его основной магнитной моды. Полученные характеристики в дальнейшем использовались в качестве исходных при анализе изменения резонансного спектра и перераспределения электромагнитного поля при взаимодействии нескольких кольцевых резонаторов.

Объектами исследования являлись кольцо с внешним диаметром 38 мм, внутренним диаметром 28 мм и квадратным поперечным сечением 5×5 мм^2 и кольцо с внешним диаметром 16 мм и квадратным поперечным сечением 3×3 мм^2. Кольца изготовлены из высокочастотной конденсаторной керамики на основе титанатов кальция и стронция (TiO_2, $CaTiO_3$, $SrTiO_3$). Величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь были измерены на частоте 1 кГц с помощью измерителя ёмкости и индуктивности Е7-8 и составляли соответственно 150 ± 5 и $3 \cdot 10^{-4}$.

Аналитический расчёт резонансной частоты для указанных параметров колец выполнен по формуле из работы [90]:

$$f_0^2 = \frac{c^2}{2\pi^2 \varepsilon l h_0^2},$$

где

$$l = \ln\left(\frac{8R}{r_0}\right) - \frac{7}{4},$$

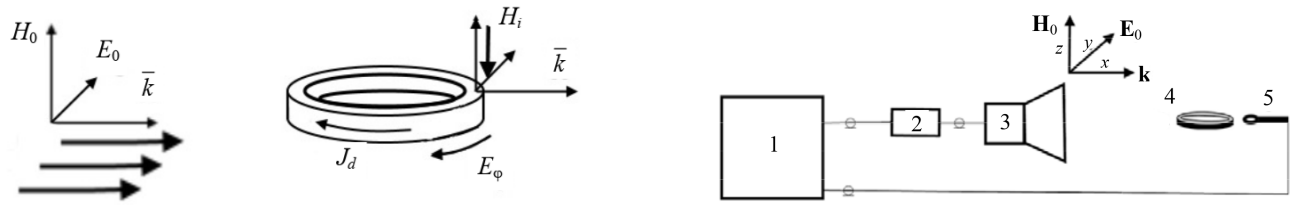
c — скорость света в вакууме, r_0 — эквивалентный (по площади) радиус поперечного сечения кольца, R — усреднённый радиус кольца. Расчёт предсказал частоту 1,35 ГГц для большого кольца и 2,515 ГГц для малого.

В эксперименте одиночное кольцо располагалось на расстоянии 25 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор $\vec{k}$ и вектор электрического поля $\vec{E}$ падающей плоской электромагнитной волны лежали в плоскости кольца, а вектор магнитного поля $\vec{H}$ был направлен перпендикулярно ей (Рис. 5.1.1, а).

При такой ориентации в кольце возбуждались азимутальное электрическое поле E_φ и соответствующий ему азимутальный ток смещения J_d. Взаимное расположение элементов экспериментальной установки при измерении магнитного поля представлено на Рис. 5.1.1, б. Плоскость кольца магнитного зонда совпадала с плоскостью диэлектрического кольца, так что ее нормаль совпадала с направлением вектора $\vec{H}$, что обеспечивало регистрацию магнитной компоненты падающей электромагнитной волны.

Для подтверждения расчётных моделей выполнено сопоставление расчётного и экспери-

ментального сигналов от взаимодействия плоской электромагнитной СВЧ-волны с одиночным диэлектрическим кольцом.



а б

Рис. 5.1.1: (а)Взаимное расположение одиночного кольца и падающей плоской волны, где J_d — азимутальный ток смещения, возбуждаемый в кольце, E_φ — азимутальное электрическое поле, возбуждаемое в кольце; (б) схема установк, где 1 — анализатор радиочастотных цепей; 2 — широкополосный усилитель; 3 — рупорная антенна; 4 — высокочастотный зонд магнитного поля; 5 — диэлектрическое кольцо.

На Рис. 5.1.2 показано хорошее совпадение результатов расчёта и эксперимента для кольца диаметром 38 мм: резонансная частота, зафиксированная в эксперименте, составила 1,3344 ГГц, расчётная частота — 1,330 ГГц. Расхождение между расчётом и экспериментом составило 0,33 %, что подтверждает адекватность разработанной модели.

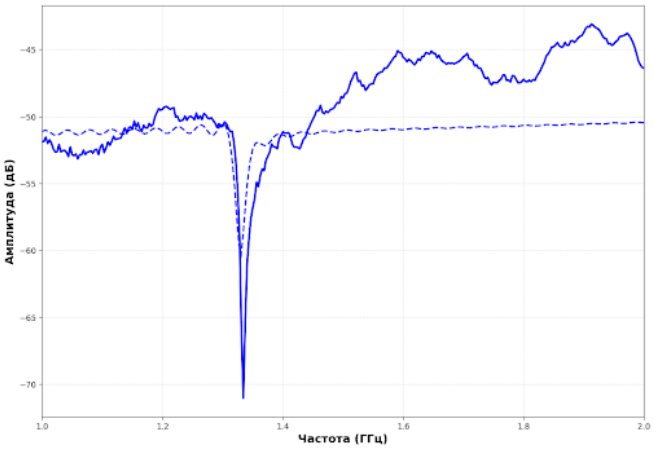


Рис. 5.1.2: Экспериментальный (сплошная линия) и расчётный (пунктирная линия) сигналы от одиночного диэлектрического кольца диаметром 38 мм. Расположение зонда после кольца

На Рис. 5.1.3 приведены экспериментальные спектры резонансных откликов одиночного кольца в ближней и дальней зонах. Видно, что частота основного магнитного резонанса $f_0 = 2{,}48$ ГГц, индуцированного падающей волной, регистрируется в ближней зоне диэлектрического кольца (кривая 1). В дальней зоне от кольца обратного рассеяния падающей волны не наблюдается (кривая 2), измеренный сигнал в области резонансной частоты сов-

падает с фоном (кривая 3).

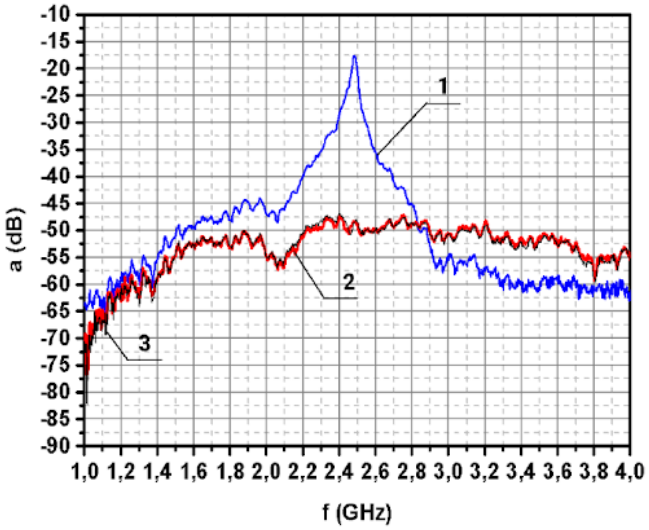


Рис. 5.1.3: Резонансные спектры индуцированного магнитного поля одного кольца. Датчик расположен в центре кольца с ближней стороны от антенны на разных расстояниях от плоскости кольца (вдоль волнового вектора, ось x): 1 — 2 мм; 2 — 30 мм; 3 — спектр без кольца (сигнал фона)

Измеренная резонансная частота 2,48 ГГц одного кольца близка к рассчитанной резонансной частоте 2,5 ГГц при возбуждении электромагнитной плоской волной при скользящем падении в предположении однородного распределения токов смещения в поперечном сечении кольца. Некоторое отличие измеренного значения от рассчитанной величины может быть связано как с погрешностью измерения диэлектрической проницаемости керамики и изменением диэлектрической проницаемости для разных колец, так и с погрешностями расчёта индуктивности кольца с квадратным сечением.

Таким образом, экспериментально и численно определены резонансные характеристики одиночного диэлектрического кольца различного диаметра и установлена частота его основной магнитной моды. Согласие расчётных и экспериментальных данных подтверждает корректность используемой численной модели и позволяет применять её для анализа более сложных систем с кольцевым диэлектрическим элементом.

5.2 Взаимодействия диэлектрического кольца с кольцевыми плазменными и проводящими элементами

В разделе исследуется резонансное магнитное поле системы, состоящей из диэлектрического кольца и плазменного элемента, представляющего собой положительный столб разряда низкого давления в спиральной люминесцентной лампе и в линейной лампе при возбужде-

нии плоской электромагнитной волной СВЧ-диапазона. Показано, что включение разряда приводит к существенному уменьшению амплитуды резонансного магнитного поля, причём величина этого изменения определяется взаимным расположением элементов системы.

В разделе исследовано влияние дополнительных плазменных и проводящих элементов на резонансные характеристики диэлектрического кольца, параметры которого определены в предыдущем разделе. Экспериментально и численно исследованы системы, состоящие из диэлектрического кольца и спиральной газоразрядной лампы, а также линейных плазменных элементов различной длины при возбуждении плоской электромагнитной волной СВЧ-диапазона. Для модели подобраны параметры плазмы, обеспечивающие соответствие расчётных и экспериментальных резонансных спектров. Для установления общих закономерностей влияния проводящего элемента на резонанс дополнительно рассмотрены модельные системы с металлическим полукольцом и линейным проводником. Исследованы различные положения и ориентации этих элементов относительно диэлектрического кольца, а для линейного проводника также проанализировано влияние его длины на резонансный отклик системы.

На Рис. 5.2.1 показана система из диэлектрического кольца, расположенного сверху на спиральной лампе мощностью 13 Вт с внешним диаметром колец 38 мм и диаметром плазмы 7 мм. Кольцо и лампа расположены на расстоянии 25 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор и вектор электрического поля плоской падающей волны были параллельны плоскости диэлектрического кольца и колец газоразрядной лампы, а вектор магнитного поля волны был перпендикулярен ей. Диэлектрическое кольцо помещалось либо непосредственно на лампу, либо над верхним кольцом лампы на расстоянии 5 мм.

Поскольку конструктивно спираль лампы свёрнута в торце, диэлектрическое кольцо тесно примыкает только к полукольцу спирали лампы. Зонд магнитного поля был расположен с дальней от антенны стороны диэлектрического кольца. Расстояние от края кольца до зонда составляло 10 мм, поэтому зонд измеряет резонансный спектр прошедшего сигнала в ближней зоне кольца. Плоскость кольца магнитного зонда была перпендикулярна вектору магнитного поля и параллельна волновому вектору и вектору электрического поля падающей волны.

На Рис. 5.2.2 показаны экспериментальные результаты измерений спектров магнитного поля кольца и спиральной лампы. При выключенной лампе наблюдается стандартный резонансный пик магнитного диполя (кривая 1). При создании плазмы в лампе (лампа включена) резонансный пик пропадает (кривая 2). Кривая 3 представляет фоновый сигнал с зонда, когда кольцо отсутствует и лампа выключена. Включённая лампа с плазмой (без



Рис. 5.2.1: Фотография системы: диэлектрическое кольцо на спиральной лампе. Справа расположен зонд магнитного поля

кольца) незначительно экранирует прошедший сигнал (кривая 4). При других расположениях диэлектрического кольца около спиральной лампы такого сильного эффекта затухания резонансной частоты не наблюдается.

Следовательно, эффект взаимодействия полей диэлектрического кольца с плазменным полукольцом возникает только при близком взаимодействии индуцированного электрического поля в диэлектрическом кольце с плазмой в лампе, в результате чего в плазме протекает наведённый ток с диссипацией энергии. Если длина взаимодействия мала, то и затухание мало. При удалении кольца от лампы более чем на 5 мм эффект резко ослабевает.

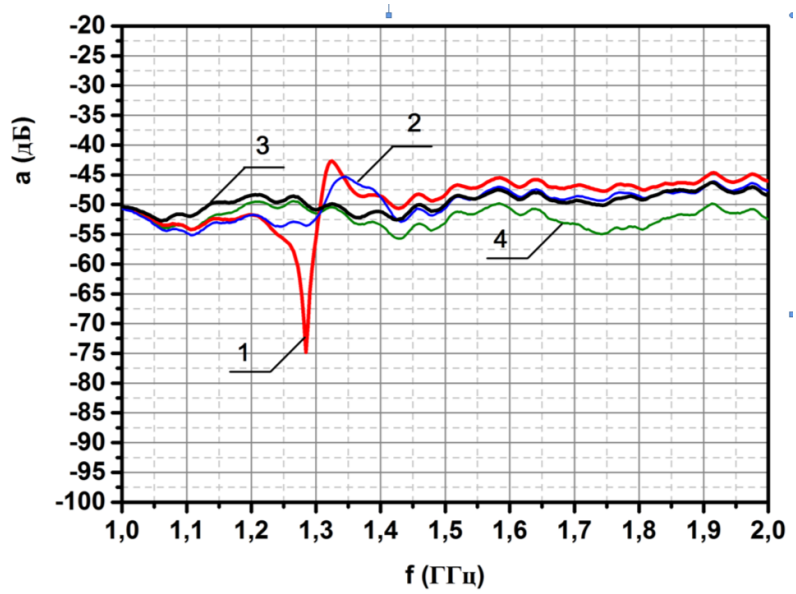


Рис. 5.2.2: Экспериментально измеренные спектры магнитного поля: 1 — кольцо на лампе без плазмы (красная линия 1); 2 — кольцо на лампе с плазмой (синяя линия 2); 3 — без кольца, лампа без плазмы (чёрная линия 3); 4 — без кольца, лампа с плазмой (зелёная линия 4)

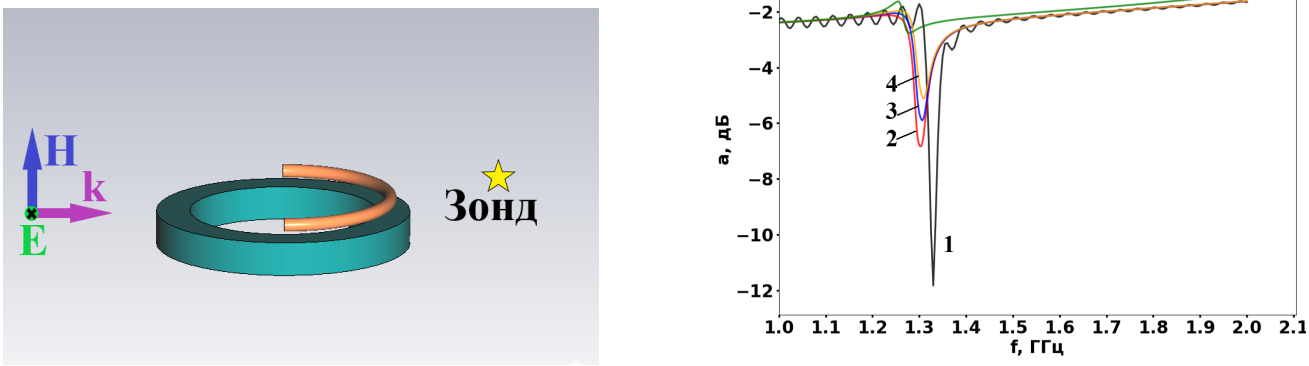
Таким образом, экспериментально показано, что плазменный полукольцевой элемент в виде электрического разряда низкого давления может выполнять роль ключа, с помощью которого можно включать и выключать резонанс.

Для задания электрофизических параметров плазменного элемента в численной модели проведена оценка его эффективной удельной электрической проводимости. Расчёт выполнен для спиральной газоразрядной лампы с длиной трубки $L = 50$ см, радиусом $r = 2,5$ мм и номинальной мощностью $P = 13$ Вт. Рабочая газовая смесь содержит аргон и пары ртути при давлении 5–10 Тор.

Для положительного столба разряда принято оценочное значение напряжённости электрического поля $E \approx 1$ В/см [103]. При погонной мощности 0,26 Вт/см расчётный ток составляет $I \approx 0,26$ А, а эффективная удельная проводимость — $\sigma_{\text{eff}} \approx 132$ См/м.

Концентрация электронов оценивалась по плотности тока и скорости их дрейфа, определённой по литературным данным [104]. Полученное значение превышало 10^{13} см$^{-3}$, что соответствует электронной плазменной частоте более 28,4 ГГц. Это значительно выше резонансной частоты диэлектрического кольца 1,33 ГГц. Таким образом, в используемой модели плазменный столб обладает преимущественно проводящим и экранирующим электромагнитным откликом.

Выполнена серия расчётов для системы из диэлектрического кольца и проводящего полукольца для различных значений проводимости от 100 до 5000 См/м. Обнаружено, что с увеличением проводимости уменьшается амплитуда резонансного магнитного отклика. Наилучшее затухание резонанса достигнуто при проводимости меди 58 млн См/м на Рис. 5.2.3.



а б

Рис. 5.2.3: (а) Схема расположения диэлектрического кольца и металлического полукольца; (б) расчётные спектры магнитного поля: 1 — одиночное диэлектрическое кольцо (чёрная линия 1); 2 — полукольцо с проводимостью 500 См/м (красная линия 2); 3 — 1500 См/м (синяя линия 3); 4 — 5000 См/м (оранжевая линия 4); 5 — 58 000 000 См/м (зелёная линия 5)

Параметры расчёта были заданы в соответствии с условиями эксперимента для полукольца из медного провода диаметром 2 мм.

Полукольцо располагалось в разных положениях на диэлектрическом кольце. На Рис. 5.2.3а показано расположение системы из диэлектрического кольца и проводящего полукольца относительно фронта плоской падающей волны.

Результаты экспериментов и расчётов с медным полукольцом в оплётке, расположенным выпуклостью к зонду, как на Рис. 5.2.3а, приведены на Рис. 5.2.4. Рассчитанные и экспериментальные резонансные спектры одиночного диэлектрического кольца хорошо согласуются по частоте (кривые 1 и 2). При добавлении медного полукольца резонансная частота сдвигается в сторону низких частот и уменьшается по амплитуде как в эксперименте, так и в расчёте (кривые 3 и 4). Уменьшение резонансной частоты связано с увеличением эффективной ёмкости в резонансной цепи при добавлении металлического полукольца. В случае плазмы возникает также диссипация энергии, поэтому амплитуда рассеянного магнитного поля сильно затухает.

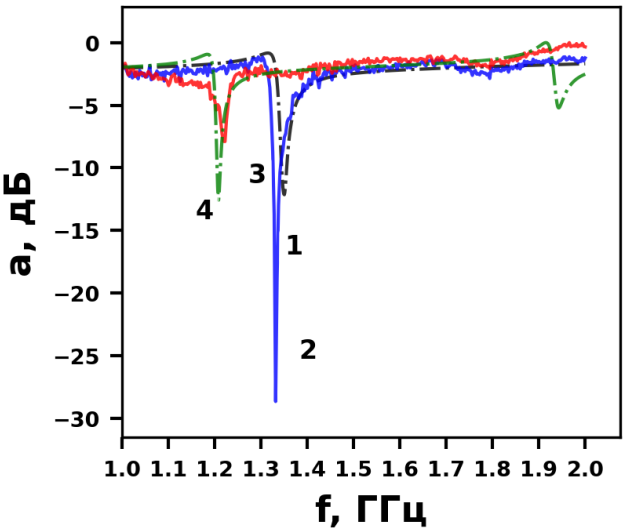


Рис. 5.2.4: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм, расположенного выпуклостью к зонду. Расстояние от кольца до зонда 30 мм: 1 (чёрный) — расчёт, одиночное диэлектрическое кольцо, f = 1,350 ГГц, a_0 = −11,832 дБ; 2 (синий) — эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо, f = 1,331 ГГц, a_0 = −28,675 дБ; 3 (красный) — эксперимент, металлическое полукольцо, f = 1,222 ГГц, a_0 = −7,903 дБ; 4 (зелёный) — расчёт, медное полукольцо, f = 1,208 ГГц, a_0 = −12,5 дБ

На Рис. 5.2.5 показано взаимное расположение системы при положении среза проводящего полукольца вдоль вектора $\vec{k}$. На Рис. 5.2.6 показаны расчётный (зелёный) и экспериментально полученный (красный) сигналы для такого расположения системы.

Сравнение сигналов на Рис. 5.2.4 и Рис. 5.2.6 показывает, что изменение положения среза

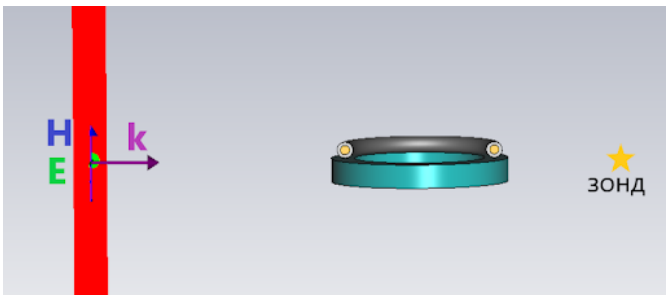


Рис. 5.2.5: Взаимное расположение системы из диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм; срез параллелен вектору $\vec{k}$

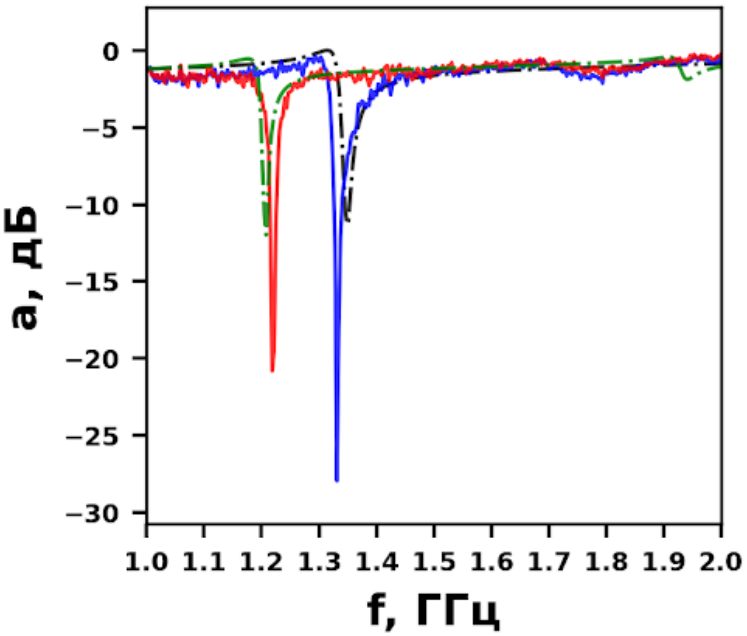


Рис. 5.2.6: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм в изоляции толщиной 0,7 мм; срез параллелен вектору $\vec{k}$. Расстояние от кольца до зонда 30 мм: 1 (чёрный) — расчёт, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}350$ ГГц, $a_0 = -11{,}832$ дБ; 2 (синий) — эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}331$ ГГц, $a_0 = -28{,}675$ дБ; 3 (красный) — эксперимент, металлическое полукольцо, $f = 1{,}219$ ГГц, $a_0 = -20{,}809$ дБ; 4 (зелёный) — расчёт, медное полукольцо, $f = 1{,}208$ ГГц, $a_0 = -12$ дБ

проводящего полукольца относительно направления распространения падающей волны не влияет на величину смещения резонансной частоты диэлектрического кольца. Вместе с тем наблюдается существенное изменение амплитуды резонансного сигнала: в эксперименте она возрастает более чем в два раза.

На Рис. 5.2.7 показано сравнение рассчитанных сигналов при расположении проводящего полукольца, когда между проводом и диэлектрическим кольцом присутствует зазор, обусловленный изоляцией толщиной 0,7 мм (2 — зелёный сигнал), аналогично Рис. 5.2.5,

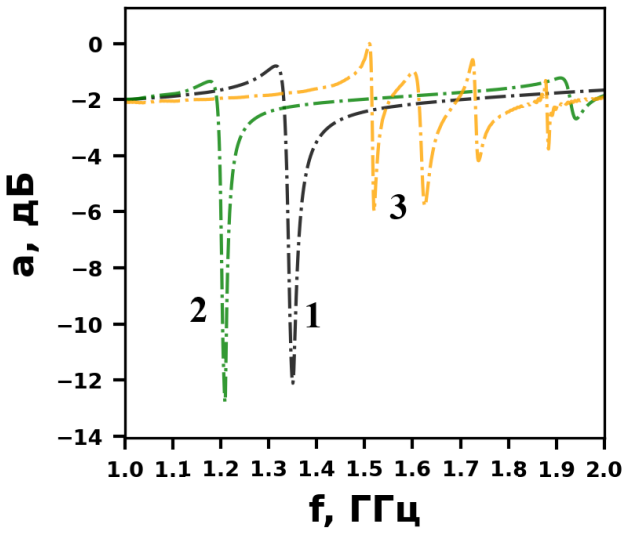


Рис. 5.2.7: Расчётные резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и полукольца из медного провода диаметром 2 мм, срез параллелен вектору $\vec{k}$. Расстояние от кольца до зонда 30 мм: 1 (чёрный) — расчёт, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}350$ ГГц, $a_0 = -12$ дБ; 2 (зелёный) — расчёт, медное полукольцо в изоляции толщиной 0,7 мм, $f = 1{,}208$ ГГц, $a_0 = -12$ дБ; 3 (жёлтый) — расчёт, медное полукольцо, расположенное вплотную к диэлектрическому кольцу, $f = 1{,}5$ ГГц, $a_0 = -5$ дБ

и когда проводящее полукольцо расположено непосредственно на диэлектрическом кольце, без зазора (3 — жёлтый сигнал). В отличие от одиночного диэлектрического кольца (1 — чёрный сигнал) и системы с воздушным зазором (2), в спектре наблюдается не один, а четыре резонансных максимума с частотами 1,520; 1,626; 1,738 и 1,884 ГГц. При этом амплитуда основного резонансного пика уменьшается по сравнению с предыдущими случаями. Полученный результат свидетельствует о перераспределении энергии электромагнитного поля между несколькими резонансными модами системы.

Установлено, что резонансные характеристики диэлектрического кольцевого резонатора определяются не только наличием проводящего элемента, но и условиями его электромагнитной связи с резонатором. При сохранении величины частотного сдвига изменение ориентации проводящего полукольца влияет на эффективность возбуждения резонансной моды, тогда как непосредственный контакт с диэлектрическим кольцом приводит к расщеплению резонансного спектра и перераспределению энергии между несколькими собственными модами системы.

5.3 Взаимодействия диэлектрического кольца с линейными плазменными и проводящими элементами

В разделе исследовано влияние линейных плазменных и проводящих элементов на резонансные характеристики диэлектрического кольцевого резонатора при его возбуждении плоской электромагнитной волной СВЧ-диапазона. В качестве плазменных элементов использованы линейные люминесцентные лампы низкого давления различной мощности и геометрических размеров, а в качестве проводящих моделей плазмы — медные провода различной длины. Показано, что размещение линейного проводящего элемента за диэлектрическим кольцом приводит к уменьшению амплитуды резонансного магнитного поля при сохранении хорошего согласия между результатами численного моделирования и эксперимента.

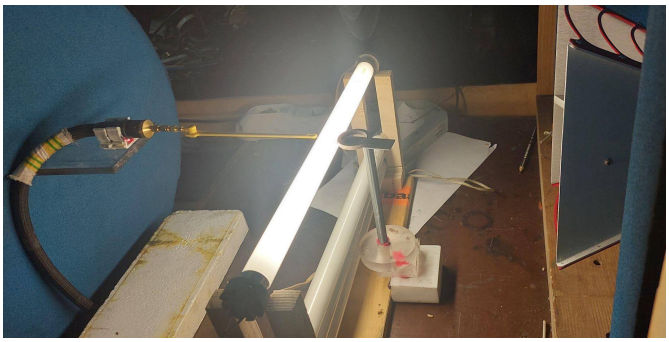


Рис. 5.3.1: Взаимное расположение системы из линейного плазменного столба и диэлектрического кольца

На Рис. 5.3.1 представлена фотография экспериментальной установки, демонстрирующая взаимное расположение диэлектрического кольца и линейного плазменного столба низкого давления, сформированного в люминесцентной лампе. Лампа расположена за диэлектрическим кольцом относительно направления распространения падающей электромагнитной волны, перпендикулярно волновому вектору и параллельно вектору электрического поля. Зонд магнитного поля установлен над лампой для регистрации резонансного магнитного поля системы.

На Рис. 5.3.2 представлены экспериментальные резонансные спектры магнитного поля системы «диэлектрическое кольцо — линейная лампа» при расположении лампы за диэлектрическим кольцом, как показано на Рис. 5.3.1. При выключенной лампе наблюдается выраженный резонансный отклик диэлектрического кольца с резонансной частотой 1,319 ГГц (кривая 1). После зажигания разряда резонансная частота смещается до 1,343 ГГц, а амплитуда резонансного сигнала возрастает (кривая 2). Для сравнения приведены спектры выключенной и включённой лампы в отсутствие диэлектрического кольца (кривые 3 и 4),

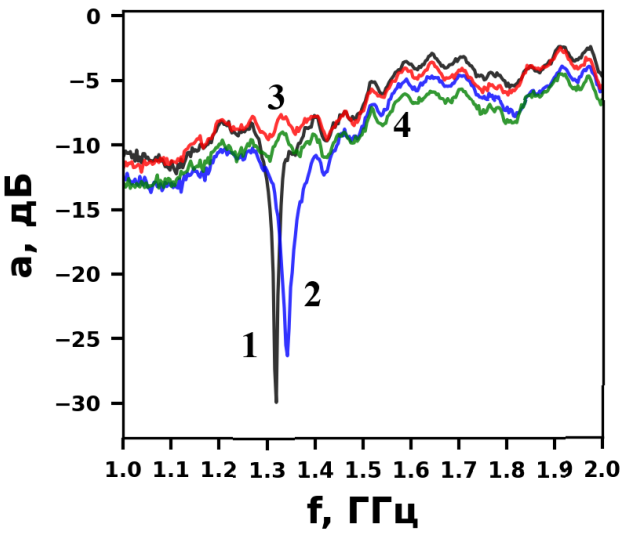


Рис. 5.3.2: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и линейной лампы диаметром 12 мм и длиной 320 мм. Расстояние от кольца до лампы 10 мм: 1 (чёрный) — эксперимент, диэлектрическое кольцо и выключенная лампа, $f = 1{,}319$ ГГц, $a_0 = -30$ дБ; 2 (синий) — эксперимент, диэлектрическое кольцо и включённая лампа, $f = 1{,}343$ ГГц, $a_0 = -26$ дБ; 3 (красный) — эксперимент, выключенная лампа без кольца; 4 (зелёный) — эксперимент, включённая лампа без кольца

демонстрирующие отсутствие собственного резонансного отклика в рассматриваемом диапазоне частот.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при расположении плазменного столба за диэлектрическим кольцом взаимодействие плазмы с электромагнитным полем резонатора приводит к изменению его резонансных характеристик, однако не вызывает существенного подавления резонансного отклика.

На Рис. 5.3.3 показано взаимное расположение элементов системы, при котором линейный плазменный столб расположен между антенной и диэлектрическим кольцом. Соответствующие экспериментальные резонансные спектры представлены на Рис. 5.3.4.

В отличие от предыдущего случая, размещение плазменного столба перед диэлектрическим кольцом приводит к практически полному подавлению резонансного отклика. При выключенной лампе наблюдается характерный резонансный минимум диэлектрического кольца на частоте около 1,33 ГГц (кривая 1). После включения разряда резонансный минимум исчезает, а зарегистрированный спектр (кривая 2) становится близким к спектрам, измеренным для лампы без диэлектрического кольца (кривые 3 и 4). Это свидетельствует о том, что плазменный столб, расположенный между источником излучения и резонатором, существенно ослабляет возбуждение диэлектрического кольца падающей электромагнитной волной,

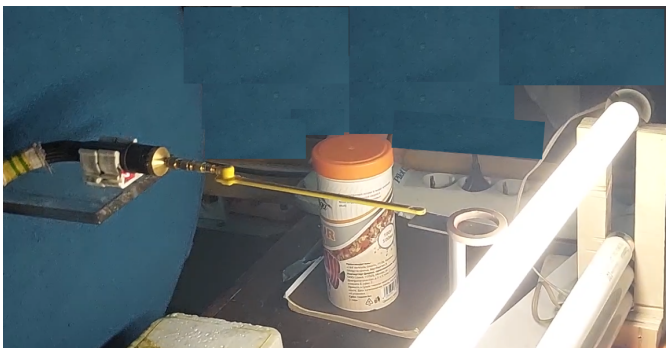


Рис. 5.3.3: Взаимное расположение диэлектрического кольца и линейного плазменного столба, расположенного между антенной и кольцом

вследствие чего его собственный резонанс практически не проявляется.

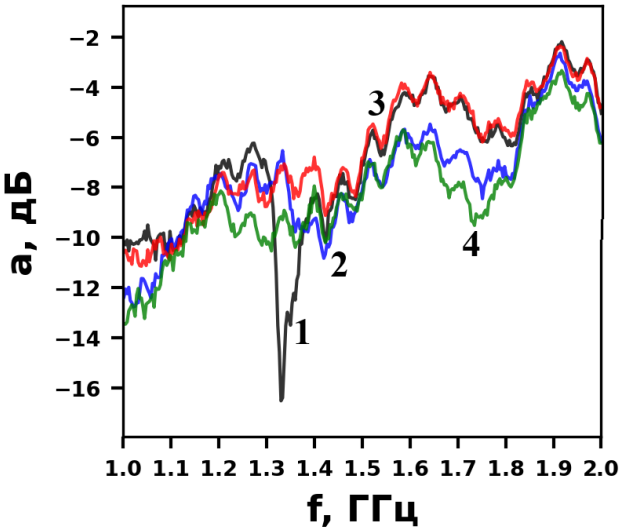


Рис. 5.3.4: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и линейной лампы диаметром 12 мм и длиной 320 мм. Расстояние от кольца до лампы 10 мм: 1 (чёрный) — эксперимент, диэлектрическое кольцо и выключенная лампа, $f = 1{,}33$ ГГц, $a_0 = -16$ дБ; 2 (синий) — эксперимент, диэлектрическое кольцо и включённая лампа; 3 (красный) — эксперимент, выключенная лампа без кольца; 4 (зелёный) — эксперимент, включённая лампа без кольца.

Для сопоставления экспериментальных результатов с численным моделированием и выделения влияния проводящего элемента без учёта плазменных диссипативных потерь были проведены аналогичные исследования системы, в которой линейный плазменный столб заменён медным проводом различной длины. Длина проводника рассматривалась относительно длины волны, соответствующей резонансу диэлектрического кольца. Резонансная частота составляет 1,33 ГГц, длина волны — 230 мм. Рассмотрены два варианта взаимного расположения элементов: проводник, расположенный за диэлектрическим кольцом относительно направления распространения падающей волны, и проводник, расположенный между антен-

ной и диэлектрическим кольцом.



Рис. 5.3.5: Взаимное расположение системы из линейного проводника, диэлектрического кольца и магнитного зонда. Проводник расположен между диэлектрическим кольцом и зондом

На Рис. 5.3.5 показано взаимное расположение проводника в диэлектрической оплётке и диэлектрического кольца. Проводник расположен за кольцом относительно направления распространения падающей электромагнитной волны, между диэлектрическим кольцом и магнитным зондом, перпендикулярно волновому вектору.

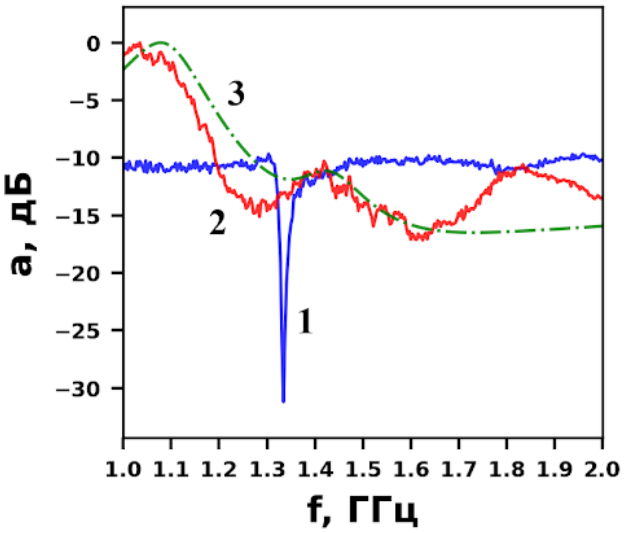


Рис. 5.3.6: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и линейного проводника длиной 115 мм, соответствующей половине длины волны, и диаметром 2 мм, расположенного после кольца: 1 (синий) — эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}331$ ГГц, $a_0 = -28{,}675$ дБ; 2 (красный) — эксперимент; 3 (зелёный) — расчёт

На Рис. 5.3.6 приведены резонансные спектры магнитного поля, полученные для одиночного диэлектрического кольца и для системы «диэлектрическое кольцо — линейный проводник» длиной 115 мм, соответствующей половине длины волны на резонансной частоте. Синяя кривая 1 соответствует экспериментальному спектру одиночного кольца, красная кривая 2 — экспериментальному результату для системы с проводником, зелёная кривая 3 — результату

численного моделирования при аналогичных параметрах. Расчётные и экспериментальные данные качественно согласуются и показывают полное затухание резонансного отклика в области частоты около 1,3 ГГц при добавлении проводника.

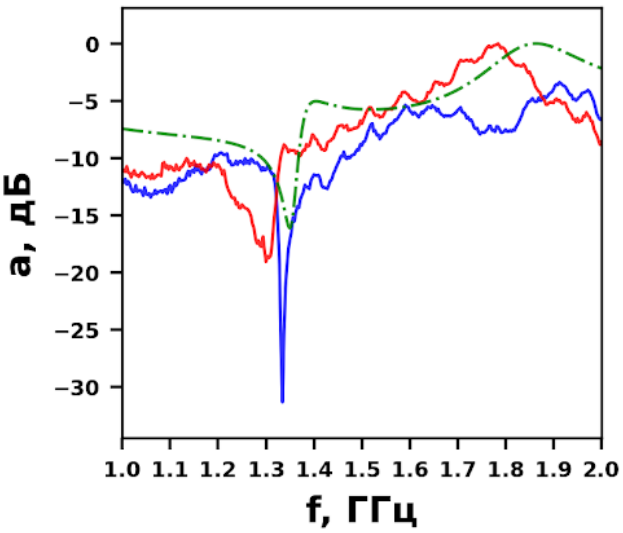


Рис. 5.3.7: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и линейного проводника длиной 230 мм и диаметром 2 мм, расположенного после кольца: 1 (синий) — эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}334$ ГГц, $a = -28{,}675$ дБ; 2 (красный) — эксперимент, $f = 1{,}300$ ГГц, $H = -19{,}055$ дБ; 3 (зелёный) — расчёт, $f = 1{,}5$ ГГц, $H = -21$ дБ

На Рис. 5.3.7 показаны расчётные и экспериментально полученные спектры для системы из диэлектрического кольца и проводника длиной, равной длине волны. При резонансе одиночного диэлектрического кольца на частоте 1,334 ГГц эксперимент показал изменение резонансной частоты системы до 1,3 ГГц, уменьшение амплитуды на 10 дБ и большее уширение по сравнению с узким резонансом одиночного кольца. Расчёт также показал уменьшение амплитуды и сдвиг резонансной частоты.

Резонансные спектры магнитного поля для системы с проводником длиной, равной четверти длины волны, представлены на Рис. 5.3.8. В отличие от случая, когда длина проводника составляла половину длины волны, существенного уменьшения амплитуды резонансного отклика не наблюдается. Экспериментальные и расчётные результаты качественно согласуются между собой и показывают сохранение выраженного резонансного пика с незначительным смещением его частоты относительно одиночного диэлектрического кольца.

Для случая расположения линейного проводника между антенной и диэлектрическим кольцом также были проведены экспериментальные исследования проводников различной электрической длины. Схема взаимного расположения элементов представлена на Рис. 5.3.9, а соответствующие резонансные спектры магнитного поля — на Рис. 5.3.10.

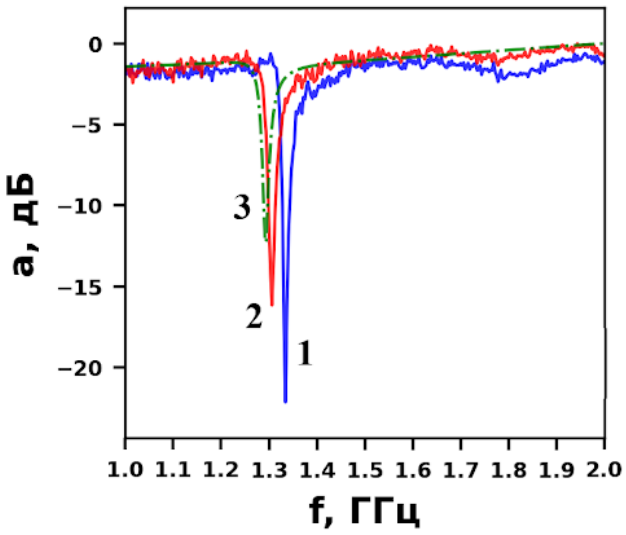


Рис. 5.3.8: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и линейного проводника длиной, равной четверти длины волны, и диаметром 2 мм, расположенного после кольца: 1 (синий) — эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}334$ ГГц, $a = -22$ дБ; 2 (красный) — эксперимент, $f = 1{,}306$ ГГц, $a = -16$ дБ; 3 (зелёный) — расчёт, $f = 1{,}292$ ГГц, $a = -12$ дБ

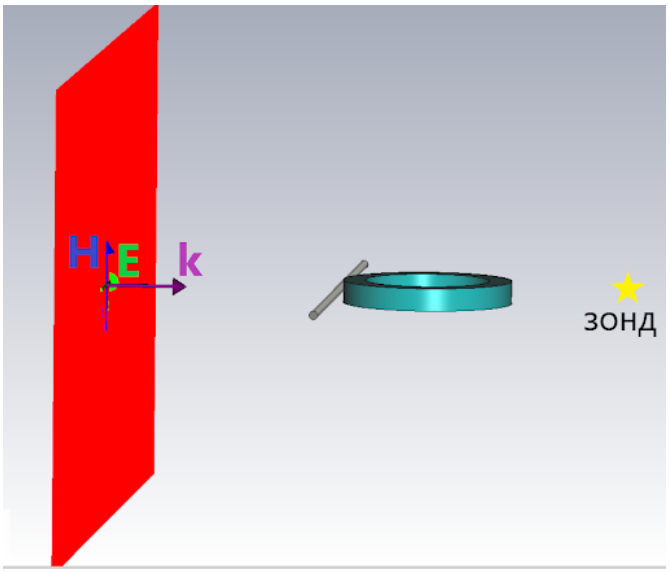


Рис. 5.3.9: Взаимное расположение системы из линейного проводника перед диэлектрическим кольцом

Анализ полученных результатов показывает, что существенное подавление и изменение формы резонансного отклика наблюдаются только при использовании проводника длиной, равной половине длины волны. Для проводников других длин резонансный отклик диэлектрического кольца сохраняется, а изменения его амплитуды и резонансной частоты имеют значительно менее выраженный характер.

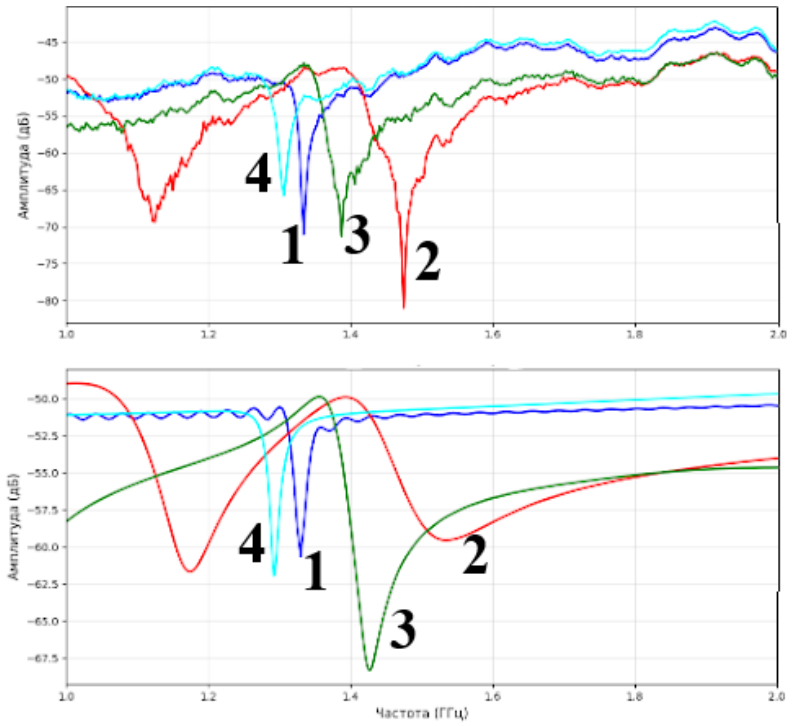


Рис. 5.3.10: Резонансные спектры магнитного поля для диэлектрического кольца и линейного проводника различной длины диаметром 2 мм, расположенного между падающей волной и диэлектрическим кольцом: 1 (синий) — эксперимент, одиночное диэлектрическое кольцо, $f = 1{,}334$ ГГц, $a = -22$ дБ; 2 (красный) — проводник длиной, равной половине длины волны; 3 (зелёный) — проводник произвольной длины, равной $0{,}74\lambda$; 4 (голубой) — проводник длиной, равной четверти длины волны

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. Экспериментально и численно исследованы устойчивые и неустойчивые траектории заряженных микрочастиц в воздухе при синусоидальном, симметричном и асимметричном прямоугольном удерживающем напряжении.

2. Установлено, что прямоугольное напряжение обеспечивает удержание частиц при меньших значениях заряда и амплитуды напряжения. Показано, что асимметрия импульсов вызывает движение частиц по диагональным траекториям, направление которых определяется знаком их заряда.

3. Разработан метод расчёта областей удержания частиц диаметром 5–50 мкм в координатах «амплитуда удерживающего напряжения — заряд частицы». Определено влияние размера частиц, формы, частоты и асимметрии напряжения; расчётные результаты подтверждены экспериментально.

4. Показано, что изменение частоты внешнего переменного электрического поля позволяет как стабилизировать движение частиц, так и возбуждать неустойчивость, а постоянное внешнее поле обеспечивает управление положением кулоновской системы в ловушке.

5. Экспериментально показано устойчивое удержание диэлектрических микрочастиц в квадрупольной ловушке с коронным разрядом при синусоидальном и прямоугольном напряжении частотой 50 Гц. Обнаружен режим удержания частиц в узком диапазоне размеров 3–6 мкм. Показано, что с увеличением диаметра электродов расширяется диапазон размеров удерживаемых частиц и возрастает доля более крупных частиц.

6. Экспериментально и численно установлено, что плазменные и проводящие элементы позволяют подавлять резонансный отклик диэлектрического кольца, смещать его резонансную частоту и изменять форму спектра в зависимости от геометрии и взаимного расположения элементов.

Полученные результаты расширяют представления о динамике заряженных микрочастиц в квадрупольных электродинамических ловушках при атмосферном давлении и создают основу для разработки методов бесконтактного удержания, сепарации и диагностики микронных частиц.

Установленные закономерности взаимодействия диэлектрических резонаторов с плазменными и проводящими элементами могут быть использованы при создании перестраиваемых резонаторов, фильтров, антенн, сенсоров и диэлектрических метаструктур с управляемыми электромагнитными характеристиками.

Список литературы

1. The physics and applications of strongly coupled Coulomb systems (plasmas) levitated in electrodynamic traps / B. M. Mihalcea [и др.] // Physics Reports. — 2023. — Т. 1016. — С. 1—103. — DOI: 10.1016/j.physrep.2023.03.004.
2. All-dielectric magnetic dipole and Biot–Savart–Laplace law for displacement currents in the ring / M. M. Bukharin, L. M. Vasilyak, A. Basharin [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2025. — Т. 137. — DOI: 10.1063/5.0265372.
3. *Паулъ В.* Электромагнитные ловушки для заряженных и нейтральных частиц // Успехи физических наук. — 1990. — Т. 160, № 12. — С. 109—127.
4. *Paul W.*, *Raether M.* Das elektrische Massenfilter // Zeitschrift für Physik. — 1955. — Т. 140. — С. 262—273. — DOI: 10.1007/BF01328923.
5. *Ghosh P. K.* Ion Traps. — Oxford : Clarendon Press, 1955. — DOI: 10.1093/oso/9780198539957.001.0001.
6. *Fischer E.* The three-dimensional stabilization of charge carriers in a quadrupole field // Zeitschrift für Physik. — 1958. — Т. 156. — DOI: 10.1007/BF01332512.
7. *Selwyn G. S.* Optical characterization of particle traps // Plasma Sources Science and Technology. — 1994. — Т. 3. — С. 340.
8. *Selwyn G. S.*, *Singh J.*, *Bennett R. S.* In situ laser diagnostic studies of plasma-generated particulate contamination // Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films. — 1989. — Т. 7. — С. 2758—2765. — DOI: 10.1088/0963-0252/3/3/016.
9. Synthesis of nanoparticles of different morphology in a DC discharge / A. V. Fedoseev [и др.] // Nanomaterials. — 2025. — Т. 15. — DOI: 10.3390/nano15231802.
10. *Whipple E. C.*, *Northrop T. G.*, *Mendis D. A.* The electrostatics of a dusty plasma // Journal of Geophysical Research. — 1985. — Т. 90, A8. — С. 7405—7413. — DOI: 10.1029/JA090IA08P07405.
11. Micron-sized dust particles detected in the outer solar system by the Voyager 1 and 2 plasma wave instruments / D. A. Gurnett [и др.] // Geophysical Research Letters. — 1997. — Т. 24, № 24. — С. 3125—3128. — DOI: 10.1029/97GL03228.
12. *Horányi M.* Charged dust dynamics in the solar system // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — 1996. — Т. 34. — С. 383—418. — DOI: 10.1146/annurev.astro.34.1.383.

13. Dusty plasma effects in Saturn's magnetosphere / M. Horányi, T. W. Hartquist, O. Havnes [и др.] // Reviews of Geophysics. — 2004. — Т. 42. — DOI: 10.1029/2004RG000151.

14. *Ландау Л. Д.* К теории фазовых переходов I. — Москва, 1969.

15. *Ландау Л. Д.* К теории фазовых переходов II. — Москва, 1969.

16. *Wigner E.* On the Interaction of Electrons in Metals // Physical Review. — 1934. — Т. 46. — С. 1002. — DOI: 10.1103/PhysRev.46.1002.

17. *Klitzing K. von, Dorda G., Pepper M.* New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance // Physical Review Letters. — 1980. — Т. 45, № 6. — С. 494—497. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.45.494.

18. *Jahn H. A., Teller E.* Stability of polyatomic molecules in degenerate electronic states. I. Orbital degeneracy // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. — 1937. — Т. 161. — DOI: 10.1098/rspa.1937.0142.

19. *Ikezi H.* Coulomb solid of small particles in plasmas // The Physics of Fluids. — 1986. — Т. 29, № 6. — С. 1764—1766. — DOI: 10.1063/1.865653.

20. Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma / H. Thomas, G. E. Morfill, V. Demmel [и др.] // Physical Review Letters. — 1994. — Т. 73, № 5. — С. 652—655. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.73.652.

21. *Chu J. H., Lin I.* Coulomb lattice in a weakly ionized colloidal plasma // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 1994. — Т. 205, № 1. — С. 183—190. — DOI: 10.1016/0378-4371(94)90498-7.

22. *Hayashi Y., Tachibana K.* Observation of Coulomb-Crystal Formation from Carbon Particles Grown in a Methane Plasma // Japanese Journal of Applied Physics. — 1994. — Т. 33. — С. L804. — DOI: 10.1143/JJAP.33.L804.

23. Воздействие электронного пучка на пылевые структуры в плазме / Л. М. Василяк, М. Н. Васильев, С. П. Ветчинин [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2003. — Т. 123, № 3. — С. 498—502. — DOI: 10.1134/1.1567418.

24. Формирование пылевых структур сложной формы в плазме при неоднородном выделении тепла / Л. М. Василяк [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2005. — Т. 127, № 5. — С. 1166—1172. — URL: http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_127_1166.pdf#2#1.

25. *Fortov V. E.*, *Morfill G. E.* Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. — Boca Raton, FL : Taylor & Francis, 2009. — DOI: https://doi.org/10.1201/9780367802882.

26. Complex (dusty) plasmas: Current status, open issues, perspectives / V. E. Fortov, A. V. Ivlev, S. A. Khrapak [и др.] // Physics Reports. — 2005. — Т. 421. — С. 1. — DOI: 10.1016/j.physrep.2005.08.007.

27. Coulomb stable structures of charged dust particles in a dynamical trap at atmospheric pressure in air / L. M. Vasilyak, V. I. Vladimirov, L. V. Deputatova [и др.] // New Journal of Physics. — 2013. — Т. 15, № 4. — DOI: 10.1088/1367-2630/15/4/043047.

28. The internal energy of micron-sized particles confined in the electrodynamic trap / R. A. Syrovatka, L. V. Deputatova, V. S. Filinov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Т. 1147. — DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012118.

29. Расчет термодинамических величин заряженных структур микрочастиц в электродинамических ловушках / Д. С. Лапицкий, В. С. Филинов, Л. М. Василяк [и др.] // Прикладная физика. — 2017. — № 4. — С. 32—36. — DOI: 10.1088/1742-6596/1147/1/012118.

30. Solitary density waves in the strongly coupled one component Coulomb particle structures as experimental support of the general versatility of the caustic theory / R. Syrovatka, V. Filinov, L. Vasilyak [и др.] // Physics Letters A. — 2019. — Т. 383, № 16. — С. 1942—1945. — DOI: 10.1016/j.physleta.2019.03.023.

31. Solitary waves in a long structure of charged particles confined in the linear Paul trap / R. A. Syrovatka, Y. V. Medvedev, V. S. Filinov [и др.] // Physics Letters A. — 2019. — Т. 383, № 4. — С. 338—344.

32. Wave-like excitations in the system of a charged long filament interacting with the microparticles in the linear Paul trap / R. A. Syrovatka, V. S. Filinov, L. M. Vasilyak [и др.] // Contributions to Plasma Physics. — 2020. — Т. 61, № 2. — DOI: 10.1002/ctpp.202000109.

33. Захват и удержание заряженных пылевых частиц электродинамическими ловушками / Д. С. Лапицкий, В. С. Филинов, Л. В. Депутатова [и др.] // Теплофизика высоких температур. — 2015. — Т. 53, № 1. — С. 3—10. — DOI: 10.7868/S0040364415010160.

34. Measurement of the charge of a single dust particle / L. V. Deputatova, V. S. Filinov, D. S. Lapitsky [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2015. — Т. 653. — DOI: 10.1088/1742-6596/653/1/012129.

35. Пространственная сепарация частиц в электродинамической ловушке / Р. А. Сыроватка, Л. М. Василяк, В. И. Владимиров [и др.] // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. — 2019. — Т. 34, № 4. — DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-19-25.

36. Динамика пылевых структур в плазме при модуляции высокочастотного напряжения разряда / Л. М. Василяк [и др.] // Письма в Журнал технической физики. — 2008. — Т. 34, № 16. — С. 14—21. — DOI: https://doi.org/10.1134/S106378500808018X. — URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=pjtf&paperid=10332.

37. *Rudyi S. S.*, *Vovk T. A.*, *Rozhdestvensky Y. V.* Features of the effective potential formed by multipole ion trap // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. — 2019. — Т. 52. — DOI: 0.1088/1361-6455/ab14a2.

38. Multipole electrodynamic ion trap geometries for microparticle confinement under standard ambient temperature and pressure conditions / B. M. Mihalcea, L. C. Giurgiu, C. Stan [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2016. — Т. 119, № 11. — DOI: 10.1063/1.4943933.

39. *Rybin V.*, *Rudyi S.*, *Rozhdestvensky Y.* Nano- and microparticle nonlinear damping identification in quadrupole trap // International Journal of Non-Linear Mechanics. — 2022. — Т. 147. — DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2022.104227.

40. *Rudyi S.*, *Shcherbinin D.*, *Ivanov A.* Butterflies and bifurcations in surface radio-frequency traps: the diversity of routes to chaos // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. — 2024. — Т. 34, № 10. — DOI: 10.1063/5.0223552.

41. Single-phase multipole radiofrequency trap / S. S. Rudyi, T. A. Vovk, I. A. Kosternoi [и др.] // AIP Advances. — 2020. — Т. 10, № 8. — DOI: 10.1063/5.0013810.

42. *Kokorina O.*, *Rybin V.*, *Rudyi S.* // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Т. 2103. — DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012222.

43. *Шеретов Э. П.*, *Терентьев В. И.* Основы теории квадрупольных масс-спектрометров при импульсном питании // Журнал технической физики. — 1972. — Т. 42. — С. 953.

44. Some properties of charged particle trajectories in quadrupole mass spectrometers: Part I. General theory / E. P. Sheretov [и др.] // International Journal of Mass Spectrometry. — 2002. — Т. 219, № 2. — С. 315—324. — DOI: 10.1016/S1387-3806(02)00738-8.

45. *Ding L., Sudakov M., Kumashiro S.* A simulation study of the digital ion trap mass spectrometer // International Journal of Mass Spectrometry. — 2002. — Т. 221. — С. 117. — DOI: 10.1016/S1387-3806(02)00921-1.

46. A digital ion trap mass spectrometer coupled with atmospheric pressure ion sources / L. Ding, M. Sudakov, F. L. Brancia [и др.] // Journal of Mass Spectrometry. — 2004. — Т. 39. — С. 471—484. — DOI: 10.1002/jms.637.

47. Digital asymmetric waveform isolation (DAWI) in a digital linear ion trap / F. L. Brancia, B. McCullough, A. Entwistle [и др.] // Journal of the American Society for Mass Spectrometry. — 2010. — Т. 21, № 9. — С. 1530—1533. — DOI: 10.1016/j.jasms.2010.05.003.

48. *Ding L., Sun L., Wang W.* The Development of the Digital Ion Trap // Mass Spectrometry Reviews. — 2026. — Т. 45, № 6. — С. 1040—1063. — DOI: 10.1002/mas.70022.

49. Simulations of a digital ion filter and a digital ion trap for heavy biomolecules / F. Simke [и др.] // International Journal of Mass Spectrometry. — 2022. — Т. 473. — DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijms.2021.116779. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387380621002608.

50. *Sudakov M., Nikolaev E.* Ion Motion Stability Diagram for Distorted Square Waveform Trapping Voltage // European Journal of Mass Spectrometry. — 2002. — Т. 8, № 3. — С. 191—199. — DOI: 10.1255/ejms.491.

51. Will the Digital Mass Filter Be the Next High-Resolution High-Mass Analyzer? / P. T. A. Reilly [и др.] // Journal of the American Society for Mass Spectrometry. — 2021. — Т. 32, № 10. — С. 2615—2620. — DOI: 10.1021/jasms.1c00234.

52. Modeling of a linear ion trap with driving rectangular waveforms / A. I. Ivanov [и др.] // Journal of Mass Spectrometry. — 2024. — Т. 59, № 6. — DOI: 10.1002/jms.5030.

53. Mass-selective instability and resonance ejection modes for DIT with rectangular asymmetric wave shape / A. I. Ivanov [и др.] // European Journal of Mass Spectrometry. — 2024. — Т. 30, № 3/4. — С. 143—149. — DOI: 10.1177/14690667241270234.

54. *Ivanov A. I., Konenkov A. N., Konenkov N. V.* The second stability region of quadrupole mass filter with square wave shape power supply // European Journal of Mass Spectrometry. — 2025. — Т. 31, № 5/6. — С. 139—146. — DOI: 10.1177/14690667251371841.

55. *Klimov V.* Nanoplasmonics. — Boca Raton, FL : Jenny Stanford Publishing, 2013. — ISBN 978-981-4267-16-8. — DOI: 10.1201/b15442.

56. Optical response features of Si-nanoparticle arrays / A. B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel [и др.] // Physical Review B. — 2010. — Т. 82, № 4. — DOI: 10.1103/PhysRevB.82.045404.

57. Strong magnetic response of submicron silicon particles in the infrared / A. García-Etxarri, R. Gómez-Medina, L. S. Froufe-Pérez [и др.] // Optics Express. — 2011. — Т. 19. — С. 4815—4826. — DOI: 10.1364/OE.19.004815.

58. Demonstration of Magnetic Dipole Resonances of Dielectric Nanospheres in the Visible Region / A. B. Evlyukhin [и др.] // Nano Letters. — 2012. — Т. 12, № 7. — С. 3749—3755. — DOI: 10.1021/nl301594s.

59. Engineering light absorption in semiconductor nanowire devices / L. Cao, J. S. White, J.-S. Park [и др.] // Nature Materials. — 2009. — Т. 8. — С. 643—647. — DOI: 10.1038/nmat2477.

60. Antenna resonances in low aspect ratio semiconductor nanowires / D. J. Traviss [и др.] // Optics Express. — 2015. — Т. 23. — С. 22771—22787. — DOI: 10.1364/OE.23.022771.

61. *Tribelsky M. I.*, *Miroshnichenko A. E.* Giant in-particle field concentration and Fano resonances at light scattering by high-refractive-index particles // Physical Review A. — 2016. — Т. 93. — DOI: 10.1103/PhysRevA.93.053837.

62. Direct imaging of hybridized eigenmodes in coupled silicon nanoparticles / J. van de Groep [и др.] // Optica. — 2016. — Т. 3. — С. 93—99. — DOI: 10.1364/OPTICA.3.000093.

63. *Coenen T.*, *Groep J. van de*, *Polman A.* Resonant modes of single silicon nanocavities excited by electron irradiation // ACS Nano. — 2013. — Т. 7. — С. 1689—1698. — DOI: 10.1021/nn3056862.

64. Giant field enhancement in high-index dielectric subwavelength particles / P. Kapitanova, V. Ternovski, A. Miroshnichenko [и др.] // Scientific Reports. — 2017. — Т. 7. — DOI: 10.1038/s41598-017-00724-5.

65. Demonstration of Zero Optical Backscattering from Single Nanoparticles / S. Person [и др.] // Nano Letters. — 2013. — Т. 13, № 4. — С. 1806—1809. — DOI: 10.1021/nl4005018.

66. Directional visible light scattering by silicon nanoparticles / Y. Fu, A. Kuznetsov, A. Miroshnichenko [и др.] // Nature Communications. — 2013. — Т. 4. — DOI: 10.1038/ncomms2538.

67. Nonradiating anapole modes in dielectric nanoparticles / A. E. Miroshnichenko [и др.] // Nature Communications. — 2015. — Т. 6. — DOI: 10.1038/ncomms9069.

68. Resonant light guiding along a chain of silicon nanoparticles / R. M. Bakker, Y. F. Yu, R. Paniagua-Domínguez [и др.] // Nano Letters. — 2017. — Т. 17, № 6. — С. 3458—3464. — DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b00381.

69. Electromagnetic toroidal excitations in matter and free space / N. Papasimakis [и др.] // Nature Materials. — 2016. — Т. 15, № 3. — С. 263—271. — DOI: 10.1038/nmat4563.

70. Extremely high Q-factor metamaterials due to anapole excitation / A. A. Basharin [и др.] // Physical Review B. — 2017. — Т. 95, № 3. — DOI: 10.1103/PhysRevB.95.035104.

71. Suppression of scattering for small dielectric particles: anapole mode and invisibility / B. Luk'yanchuk, R. Paniagua-Domínguez, A. I. Kuznetsov [и др.] // Philosophical Transactions of the Royal Society A. — 2017. — Т. 375. — DOI: 10.1098/rsta.2016.0069.

72. Optical anapoles: concepts and applications / K. V. Baryshnikova [и др.] // Advanced Optical Materials. — 2019. — Т. 7. — DOI: 10.1002/adom.201801350.

73. *Nemkov N. A.*, *Stenishchev I. V.*, *Basharin A. A.* Nontrivial nonradiating all-dielectric anapole // Scientific Reports. — 2017. — Т. 7. — DOI: 10.1038/s41598-017-01127-2.

74. Multipolar passive cloaking by nonradiating anapole excitation / A. K. Ospanova, G. Labate, L. Matekovits [и др.] // Scientific Reports. — 2018. — Т. 8. — DOI: 10.1038/s41598-018-30935-3.

75. Mantle cloaking due to ideal magnetic dipole scattering / B. Cappello, A. K. Ospanova, L. Matekovits [и др.] // Scientific Reports. — 2020. — Т. 10. — DOI: 10.1038/s41598-020-59291-x.

76. Sharp optical magnetic resonances in dielectric waveguide grating structures / W. Liu [и др.] // Journal of the Optical Society of America B. — 2017. — Т. 34. — С. 1899—1904. — DOI: 10.1364/JOSAB.34.001899.

77. Optically resonant dielectric nanostructures / A. I. Kuznetsov [и др.] // Science. — 2016. — Т. 354, № 6314. — DOI: 10.1126/science.aag2472.

78. All-dielectric magnetic metasurface for advanced light control in dual polarizations combined with high-Q resonances / D. O. Ignatyeva, D. Karki, A. A. Voronov [и др.] // Nature Communications. — 2020. — Т. 11. — DOI: 10.1038/s41467-020-19310-x.

79. *Paniagua-Domínguez R.*, *Luk'yanchuk B.*, *Kuznetsov A. I.* Control of scattering by isolated dielectric nanoantennas // Dielectric Metamaterials. — Woodhead Publishing, 2020. — С. 73—108. — DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102403-4.00008-6. — URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081024034000086.

80. Optical nanoantennas / A. E. Krasnok [и др.] // Physics-Uspekhi. — 2013. — Т. 56, № 6. — С. 539—564. — DOI: 10.3367/UFNe.0183.201306a.0561.

81. Induction theorem analysis of resonant nanoparticles: design of a Huygens source nanoparticle laser / I. Liberal [и др.] // Physical Review Applied. — 2014. — Т. 1. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.1.044002.

82. Broadband Polarization-Conversion Metasurface for a Cassegrain Antenna with High Polarization Purity / W.-L. Guo [и др.] // Physical Review Applied. — 2019. — Т. 12, № 1. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.12.014009.

83. All-dielectric reflective half-wave plate metasurface based on the anisotropic excitation of electric and magnetic dipole resonances / Z. Ma [и др.] // Optics Letters. — 2018. — Т. 43, № 4. — С. 911—914. — DOI: 10.1364/OL.43.000911.

84. *Song H.*, *Sun L.*, *Wang G. P.* Tunable perfect magnetic mirrors and retroreflectors in terahertz band // Optics Express. — 2020. — Т. 28, № 1. — С. 753—759. — DOI: 10.1364/OE.382965.

85. *Asadchy V.*, *Albooyeh M.*, *Tretyakov S.* Optical metamirror: all-dielectric frequency-selective mirror with fully controllable reflection phase // Journal of the Optical Society of America B. — 2016. — Т. 33, № 2. — A16—A20. — DOI: 10.1364/JOSAB.33.000A16.

86. Dielectric nanoresonators and metamaterials / R. Paniagua-Domínguez [и др.] // Journal of Applied Physics. — 2019. — Т. 126, № 15. — DOI: 10.1063/1.5129100.

87. Polarization-Dependent, Frequency-Selective THz Stereometamaterial Perfect Absorber / M. Parvinnezhad Hokmabadi [и др.] // Physical Review Applied. — 2014. — Т. 1, № 4. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.1.044003.

88. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces / A. Tittl [и др.] // Science. — 2018. — Т. 360, № 6393. — С. 1105—1109. — DOI: 10.1126/science.aas9768.

89. *Pfeiffer C.*, *Grbic A.* Controlling Vector Bessel Beams with Metasurfaces // Physical Review Applied. — 2014. — Т. 2, № 4. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.2.044012.

90. Resonant microwave fields and negative magnetic response, induced by displacement currents in dielectric rings: theory and the first experiments / A. B. Shvartsburg [и др.] // Scientific Reports. — 2017. — Т. 7. — DOI: 10.1038/s41598-017-02310-1.

91. Subwavelength dielectric elliptical element as an anisotropic magnetic dipole for inversions of magnetic field / A. B. Shvartsburg, V. Y. Pecherkin, S. Jiménez [и др.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2018. — Т. 51. — DOI: 10.1088/1361-6463/aae1eb.

92. Resonant phenomena in an all-dielectric rectangular circuit induced by a plane microwave / A. B. Shvartsburg, V. Y. Pecherkin, S. Jiménez [и др.] // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2021. — Т. 54. — DOI: 10.1088/1361-6463/abc280.

93. *Pozar D. M.* Microwave Engineering. — 4-е изд. — Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2012. — ISBN 978-0-470-63155-3. — URL: https://www.wiley.com/en-sg/Microwave+Engineering,+4th+Edition-p-9781118213636.

94. Magnetic light / A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, Y. H. Fu [и др.] // Scientific Reports. — 2012. — Т. 2. — DOI: 10.1038/srep00492.

95. Colossal magnetic fields in high refractive index materials at microwave frequencies / B. Luk'yanchuk, L. M. Vasilyak, V. Y. Pecherkin [и др.] // Scientific Reports. — 2021. — Т. 11. — DOI: 10.1038/s41598-021-01644-1.

96. Transverse Kerker effect in all-dielectric spheroidal particles / M. M. Bukharin, V. Y. Pecherkin, A. K. Ospanova [и др.] // Scientific Reports. — 2022. — Т. 12. — DOI: 10.1038/s41598-022-11733-4.

97. Extreme metasurfaces enable targeted and protected wireless energy transfer / E. Zanganeh [и др.] // Advanced Materials Technologies. — 2023. — Т. 8. — DOI: 10.1002/admt.202202133.

98. Возбуждение кольцевых диэлектрических магнитных диполей плоской электромагнитной волной / В. Я. Печеркин, А. Б. Шварцбург, Л. М. Василяк [и др.] // Успехи прикладной физики. — 2018. — Т. 6, № 3. — С. 191—198.

99. Кооперативный характер образования пылевых структур в плазме / Л. М. Василяк [и др.] // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2002. — Т. 121, № 3. — С. 609—613. — URL: https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/r_121_0609.pdf#1#1.

100. *Davis E. J.* Electrodynamic balance stability characteristics and applications to the study of aerocolloidal particles // Langmuir. — 1985. — Т. 1, № 3. — С. 379—387. — DOI: 10.1021/la00063a021.

101. Параметрическое возбуждение и стабилизация пылевых структур в тлеющем разряде при воздействии электрическими импульсами наносекундной длительности / Л. М. Василяк [и др.] // Письма в ЖТФ. — 2007. — Т. 33, № 3. — С. 87—94. — URL: https://journals.ioffe.ru/articles/11822 (дата обр. 20.10.2026).

102. Электрофизические основы техники высоких напряжений : учебник для вузов / И. М. Бортник, И. П. Верещагин, Ю. Н. Вершинин [и др.]. — М. : Энергоатомиздат, 1993. — 543 с.

103. Измерение катодного и анодного падений напряжений в мощных амальгамных лампах низкого давления / Л. М. Василяк [и др.] // Прикладная физика. — 2010. — № 3. — С. 18—23. — URL: http://applphys.orion-ir.ru/appl-10/10-3/PF-10-3-18.pdf (дата обр. 20.10.2026).

104. *Голятина Р. И.*, *Майоров С. А.* Характеристики дрейфа электрона в аргоне с парами ртути // Прикладная физика. — 2016. — № 3. — С. 5—10. — URL: https://applphys.orion-ir.ru/appl-16/16-3/PF-16-3-5.pdf.

105. Квантовые вычисления на ионах в ловушках: принципы, достижения и перспективы / И. В. Заливако, Н. В. Семенин, Н. О. Жаднов [и др.] // Успехи физических наук. — 2025. — Т. 195, № 6. — С. 585—620. — DOI: 10.3367/UFNr.2024.12.039884.

106. R. A. Syrovatka, L. M. Vasilyak, L. V. Deputatova [и др.] // Contributions to Plasma Physics. — 2016. — Т. 56. — С. 321.

107. *Pecherkin V. Y.*, *Vasilyak L. M.*, *Vladimirov V. I.* Coulomb structures of charged microparticles in vertically oriented linear electrodynamic trap // Plasma Physics Reports. — 2023. — Т. 49. — С. 300—302. — DOI: 10.1134/S1063780X22601675.

108. Линейная квадрупольная ловушка Пауля с заряженной нитью / Л. М. Василяк, В. И. Владимиров, Л. В. Депутатова [и др.] // Прикладная физика. — 2021. — № 5. — С. 88—92. — DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-88-92.

109. Cleaning dielectric surfaces by the electrical fields of the linear electrodynamic Paul trap / R. A. Syrovatka, V. S. Filinov, L. M. Vasilyak [и др.] // Journal of Electrostatics. — 2021. — Т. 112. — DOI: 10.1016/j.elstat.2021.103583.

110. Charge and Mass Measurements of a Dust Particle in the Linear Quadrupole Trap / R. A. Syrovatka, L. V. Deputatova, V. S. Filinov [и др.] // Contributions to Plasma Physics. — 2016. — Т. 56, № 5. — С. 419. — DOI: 10.1002/ctpp.201500131.

111. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity / D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier [и др.] // Physical Review Letters. — 2000. — Т. 84. — С. 4184—4187. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.84.4184.

112. Диэлектрические резонансные магнитные диполи: парадоксы, перспективы, первые эксперименты / А. Б. Шварцбург, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк [и др.] // Успехи физических наук. — 2018. — Т. 188. — С. 780—789. — DOI: 10.3367/UFNr.2017.03.038139.

113. *Richards J. A.*, *Huey R. M.*, *Hiller J.* A new operating mode for the quadrupole mass filter // International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics. — 1973. — Т. 12, № 4. — С. 317—339. — DOI: 10.1016/0020-7381(73)80102-0.

114. *Polyakov D. N.*, *Shumova V. V.*, *Vasilyak L. M.* // Plasma Sources Science and Technology. — 2021. — Т. 30. — DOI: 10.1088/1361-6595/ac0a46.

115. Зарядка микрочастиц в коронном разряде в воздушном потоке / Л. М. Василяк [и др.] // Успехи прикладной физики. — 2017. — Т. 5, № 4. — С. 329—338. — URL: https://advance.orion-ir.ru/UPF-17/4/UPF-5-4-329.pdf (дата обр. 20.10.2026).

116. Mapping the stability diagram of a digital ion trap (DIT) mass spectrometer varying the duty cycle of the trapping rectangular waveform / A. Berton, P. Traldi, L. Ding [и др.] // Journal of the American Society for Mass Spectrometry. — 2008. — Т. 19. — С. 620—625. — DOI: 10.1016/j.jasms.2007.12.012.

117. Optical magnetic mirrors without metals / S. Liu [и др.] // Optica. — 2014. — Т. 1, № 4. — С. 250—256. — DOI: 10.1364/OPTICA.1.000250.

118. *Richards J. A.* Quadrupole mass filter spectrum control using pulse width modulation // International Journal of Mass Spectrometry and Ion Physics. — 1977. — Т. 24, № 2. — С. 219—224. — DOI: 10.1016/0020-7381(77)80029-6.