

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Соловьев Михаил Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Взаимодействие аэрозольных частиц и кластеров в  
низкотемпературной плазме**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19314

**Научный руководитель:**

д.ф.-м.н. А.А. Черемисин  
Оценка научного руководителя

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

Д.Н. Капуста  
Оценка преподавателя практикума

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин  
Итоговая оценка

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2020

**Аннотация:**

Целью работы являлось описание и оценка взаимодействия частиц нано- и микрометрового размера в низкотемпературной плазме. Для получения плазмы, содержащей пылевые частицы, использовалась установка в лаборатории дисперсных систем ИХКиГ СО РАН, состоящая из нескольких параллельно подключенных конденсаторов, коммутирующего устройства и пары электродов. Образование плазмы происходило над поверхностью воды. Для анализа экспериментальных данных теоретически изучен вопрос оценки сил, действующих на пылевую частицу в рамках модели дебаевского экранирования. Построены зависимости этих сил от размеров частиц и расстояний между частицами. На основании результатов проведенных мной расчетов, образование упорядоченных пылевых структур может быть обеспечено силами ионного увлечения и экранированного кулоновского взаимодействия.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, дебаевская длина, пылевая плазма, зарядка пылевых частиц.

## Оглавление

1. Введение:.....	4
2. Теоретическая часть.....	6
2.1 Экранировка Дебая .....	6
2.2 Зарядка частиц.....	6
2.3 Основные силы.....	8
2.3.1 Гравитационная сила .....	9
2.3.2 Сила трения со стороны нейтралов.....	9
2.3.3 Электростатическая сила.....	9
2.3.4 Сила ионного увлечения.....	10
2.3.5 Взаимодействие пылевых частиц в плазме .....	10
2.4 Прочие параметры .....	11
3. Практическая часть .....	11
3.1 Описание установки и эксперимента.....	11
3.2 Обработка результатов эксперимента .....	12
4. Выводы.....	17
5. Список литературы .....	18

## 1. Введение:

Плазма – ионизированный газ, содержащий свободные электроны, положительно и отрицательно заряженные ионы и нейтральные атомы. Один из способов получения плазмы – ионизация газа под действием электрического поля высокой напряжённости. Электроны, ускорившиеся в электрическом поле, сталкиваются с атомами и молекулами и выбивают из них новые электроны, которые тоже после ускорения начинают участвовать в соударениях.

Плазма так же может содержать малые частицы и кластеры, которые влияют на некоторые её свойства. Можно выделить несколько типов такой плазмы, включая пылевую или комплексную и кластерную.

Пылевая плазма обнаружена в атмосфере Земли, присутствует также в межпланетных и межзвёздных облаках, в кольцах планет-гигантов. С ней имеют дело при производстве микроэлектроники, тонких плёнок и наночастиц с использованием технологий плазменного напыления [1]. Но пылевые частицы могут не только вноситься в плазму извне, но и образовываться в ней самопроизвольно, что в свою очередь может сказаться на качестве изделия. В связи с этим определённый интерес представляет изучение свойств пылевой плазмы и явлений, наблюдаемых в ней.

Для частиц в плазме возможны явления, не наблюдаемые в нормальных условиях. Поскольку в ионизированном газе у пылевых частиц есть возможность часто сталкиваться с заряженными компонентами газа, естественно приобретение частицей заряда. Однако в плазме возможно притяжение не только между разноимённо заряженными частицами, но между одноимённо заряженными частицами [2, 3]; возможно образование упорядоченных структур, самоорганизация, образование кластеров.

Основной задачей работы было проведение расчёта сил, действующих на пылевые частицы, от их размеров и расстояний между ними. Для

анализа экспериментальных данных, полученных научным коллективом лаборатории дисперсных систем ИХКиГ СО РАН, так же были поставлены следующие задачи:

- 1) Изучение теории по экранировке Дебая;
- 2) Изучение теории по взаимодействию частиц нано- и микрометрового размера в пылевой плазме;
- 3) Проведение расчёта сил с помощью средств excel и анализ полученных результатов.

## 2. Теоретическая часть

### 2.1 Экранировка Дебая

В квазинейтральной плазме, т.е. в плазме, в которой плотности положительных и отрицательных зарядов с высокой точностью совпадают, поле отдельно взятой заряженной частицы экранируется в результате поляризации окружающей среды. То есть за пределами сферы определённого радиуса с центром на частице, действие этого поля пренебрежимо мало. Это явление связано с хорошей проводимостью плазмы в силу наличия в ней большого количества свободных носителей заряда.

В системе из  $N$  различных типов частиц, где частицы  $i$ -й разновидности, переносящие заряд  $q_i$  и имеющие концентрацию  $n_i$  и температуру  $T_i$ , дебаевская длина определяется формулой (в СГС и СИ соотв.) [4]:

$$\lambda_D = \left( \sum_i \frac{4\pi q_i^2 n_i}{kT_i} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

$$\lambda_D = \left( \sum_i \frac{q_i^2 n_i}{\varepsilon_0 kT_i} \right)^{-1/2}. \quad (2)$$

Суммирование ведётся по всем типам частиц, однако должно выполняться условие нейтральности:  $\sum_i q_i n_i = 0$ .

### 2.2 Зарядка частиц

В газоразрядной плазме пылевые частицы, как правило, остаются относительно холодными по сравнению с окружающей средой – явление характерное для неравновесной плазмы. В этом случае заряд частиц определяет только потоками носителей заряда на поверхность. При этом считается, что попавшие на поверхность частицы ионы и электроны поглощаются и рекомбинируют, и возникающие при этом нейтральные частицы могут как вернуться в плазму, так и остаться на частице, что приводит к её росту. Масса электронов много меньше, чем масса ионов,

откуда следует их существенно большая подвижность, поэтому как правило частицы заряжаются отрицательно. Однако растущий отрицательный заряд создаёт в пределах дебаевской длины поле, притягивающее ионы и отталкивающее электроны. Таким образом, заряд растёт только до тех пор, пока потоки ионов и электронов на поверхность частицы не сравняются, после чего он лишь флуктуирует около постоянного значения.

Потенциал, связанный с накоплением заряда, может быть определён по формуле:

$$\varphi_d = -\alpha \frac{kT_e}{e}, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_e$  – температура электронов,  $e$  – элементарный заряд, коэффициент  $\alpha$  имеет порядок единицы, и определяется массой ионов и относительной температурой ионов и электронов [5].

Для количественной оценки заряда, накапливаемого частицей, пользуются приближением:  $a \ll \lambda_D \ll l_{e(i)}$ , где  $a$  – радиус частицы, если считать её сферической,  $\lambda_D$  – дебаевская длина,  $l_{e(i)}$  – длина свободного пробега для электронов (ионов). Так же предполагается, что другие частицы не оказывают влияния на движение носителей заряда вблизи данной частицы, т.е. они экранированы.

Предполагая так же, что электроны и ионы поглощаются при попадании в частицу, получаем формулы для сечений поглощения:

$$\sigma_e(v) = \pi a^2 \left(1 + \frac{2e\varphi_d}{m_e v^2}\right), \quad (4)$$

$$\sigma_i(v) = \pi a^2 \left(1 - \frac{2e\varphi_d}{m_i v^2}\right). \quad (5)$$

Индексы  $i$  и  $e$  обозначают соответственно ионы и электроны, скорость  $v$  берётся относительно скорости частицы. Потоки электронов и ионов на поверхность частицы определяются взятием интеграла от соответствующих сечений по скоростям с учётом функции распределения:

$$I_{e(i)} = n_{e(i)} \int v \sigma_{e(i)} f_{e(i)}(v) d^3v. \quad (6)$$

Равенство потоков, вычисленных по формуле (5), определяет потенциал  $\varphi_d$ . Если ввести величины

$$z = \frac{|Z_d|e^2}{akT_e}, \tau = \frac{T_e}{T_i}, \mu = \frac{m_e}{m_i}, \quad (7)$$

где  $Z_d$  – зарядовое число частицы, величина  $\tau$  для газоразрядной плазмы много больше единицы ( $\tau \sim 10-100$ ). Тогда равенство потоков запишется в виде:

$$\exp(-z) = \frac{n_i}{n_e} \left(\frac{\mu}{\tau}\right)^{1/2} (1 + z\tau). \quad (8)$$

Однако если в выражениях для потока учесть вклад пылевой компоненты, а также учесть условие квазинейтральности  $n_e = Z_d n_d + n_i$  выражение (8) переписется [6]:

$$\exp(-z) = \left(\frac{\mu}{\tau}\right)^{1/2} (1 + z\tau)(1 + P), \quad (9)$$

$$P = |Z_d| \frac{n_d}{n_e}. \quad (10)$$

$P$  – параметр Хавнеса. При  $P \ll 1$  влияние пылевой компоненты очень мало, поэтому заряд соответствует заряду уединённой частицы. При  $P > 1$  заряд частиц стремится к нулю.

Используемое приближение ограничения к применению, кроме того, существуют другие модели, иначе подходящие к оценке заряда [6]. Однако при  $a \ll \lambda_D$  хорошей оценкой будет  $Z_d e = a\varphi_d$ .

### 2.3 Основные силы

Основные силы, действующие на пылевую частицу в плазме, можно разделить на силы, не зависящие от заряда частицы (гравитационная, сила торможения о нейтралы) и силы, зависящие от заряда (электростатическая сила, сила ионного увлечения).



### 2.3.1 Гравитационная сила

Гравитационная сила или сила тяжести определяется соотношением:

$$F_g = m_d g, \quad (11)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения. Гравитационная сила пропорциональна объёму частицы, в частности, величине  $a^3$ .

### 2.3.2 Сила трения со стороны нейтралов

При движении частицы, на неё действует сила сопротивления со стороны среды. При этом, в силу большей инертности, пылевые частицы имеют существенно меньшую скорость, и потому сила вязкого трения определяется преимущественно скоростью теплового движения частиц среды. При этом, в случае слабой ионизации, основной вклад в силу трения дают нейтральные атомы и молекулы. Сама сила определяется по формуле [5]:

$$F_n = -\delta \frac{4}{3} \pi a^2 m_n v_{Tn} n_n u. \quad (12)$$

Параметр  $\delta$  характеризует геометрию столкновения. Он лежит в интервале от 1, для случая зеркального отражения или поглощения, и до 1,44 для идеального диффузного отражения (полной аккомодации).  $a$ ,  $m_n$ ,  $v_{Tn}$ ,  $n_n$ ,  $u$  – соответственно, радиус пылевой частицы, масса частицы, скорость теплового движения нейтралов, концентрация нейтралов, скорость относительного движения частицы. Знак минус связан с направлением силы против движения пылинок.

### 2.3.3 Электростатическая сила

Поскольку пылевые частицы имеют заряд, то они могут взаимодействовать с внешним электрическим полем напряжённости  $E$ :

$$F_e = Z_d e E. \quad (13)$$

### 2.3.4 Сила ионного увлечения

Поскольку скорость относительного движения частиц и ионов не нулевая, то существуют силы, связанные с величиной этой скорости. Ионы, попадающие в некоторую окрестность пылевой частицы могут взаимодействовать с ней двумя способами: как заряженные частицы с заряженными, посредством этого взаимодействия ионы могут рассеяться на частицах, даже не касаясь их, и всё равно передать им часть импульса, и при прямом столкновении. Сложность оценки этой силы возникает в связи с сложностью эффекта ион-нейтральных столкновений в окрестности пылинки, влияния соседних пылинок и их полей, сложностью определения точного потенциала в каждой точке в окрестности пылинки. Тем не менее для случая, когда  $a \ll \lambda_D$ , существует приближённая оценка [6]:

$$F_i = \pi n_i m_i v_{Ti} u a^2 \left(1 - \frac{2e\varphi_d}{m_i v_{Ti}^2}\right). \quad (14)$$

Индекс  $i$  также означает ионы, а  $v_T$  – скорость теплового движения.

### 2.3.5 Взаимодействие пылевых частиц в плазме

В силу поляризации плазмы под влиянием зарядов частиц, потенциал их взаимодействия не будет чисто кулоновским. Кроме того, взаимодействие не будет зависеть только от заряда, в него дают вклад силы ионного увлечения: поток плазмы на поверхность какой-нибудь частицы увлекает за собой другие частицы, что создаёт эффективную силу притяжения. Дополнительно вклад в силу могут давать нейтральные компоненты плазмы. Однако, рассмотрим именно электростатическую компоненту и воспользуемся выражением:

$$F_d = -\frac{dU_d(r)}{dr}, \quad (15)$$

$$U_d(r) = Z_d e \varphi(r). \quad (16)$$

На расстояниях много меньше дебаевской длины, потенциал частицы чисто кулоновский и имеет вид  $q/r$ . На расстояниях порядка дебаевской

длины уже имеет значение экранировка, и потому может быть применён потенциал Дебая-Хюккеля:

$$U_d(r) = \frac{z_d^2 e^2}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_D}\right). \quad (17)$$

На расстояниях много больше дебаевской длины преобладают силы, связанные с движением ионов и нейтральных компонентов плазмы – силы ионного увлечения, силы вязкого трения.

## 2.4 Прочие параметры

Кроме сил, действующих в плазме, зарядки нейтральных частиц и экранирования электрических полей, для плазмы характерна такая величина как степень ионизации, равная отношению количества ионов в плазме к количеству нейтральных до начала ионизации. Для низкотемпературной газоразрядной плазмы эта величина порядка  $10^{-8}$ - $10^{-6}$ .

## 3. Практическая часть

### 3.1 Описание установки и эксперимента

Экспериментальная установка состоит из нескольких параллельно подключенных конденсаторов, что обеспечивает максимальную ёмкость эквивалентного конденсатора, ключа и пары электродов. В течение некоторого времени на обкладках конденсатора накапливается заряд. При полной зарядке, замыкается ключ, и всё накопленное напряжение подаётся на электроды. Под действием большой разности потенциалов, из катода вылетают электроны, которые быстро разгоняются и при первом же столкновении выбивают из нейтральных атомов и молекул новые электроны. Те в свою очередь ускоряются полем и выбивают электроны из других атомов. Кроме того, существующие в зазоре свободные заряженные частицы так же участвуют в ионизации. Появление свободных зарядов в зазоре уменьшает эффективное сопротивление зазора, в результате чего больше электронов покидает катод в единицу времени. Таким образом

происходит ударная ионизация газа в зазоре между электродами. Электрическое поле, возникающее из-за разности потенциалов, существует порядка 1 мс; плазма существует самостоятельно порядка 0,6 с, после чего свободные электроны захватываются ионами. Весь эксперимент записывался на камеру с фильтром. В ходе эксперимента состав плазмы определялся спектрометром: используемое оборудование позволяет измерять относительную концентрацию атомов на основе спектра излучения плазмы. Температура плазмы оценивалась на основе интенсивности излучения.

### 3.2 Обработка результатов эксперимента

В спектре излучения плазмы удалось выделить спектры азота, кислорода, железа и кремния. В видимом диапазоне – на длине волны от 400 до 700 нм – излучают в основном железо и кремний, тогда как азот и кислород излучают в диапазоне от 750 нм до 950 нм. Исходя из отношений интенсивности излучения для разных веществ, получено следующее распределение по концентрациям (относительно концентрации ионов кислорода):

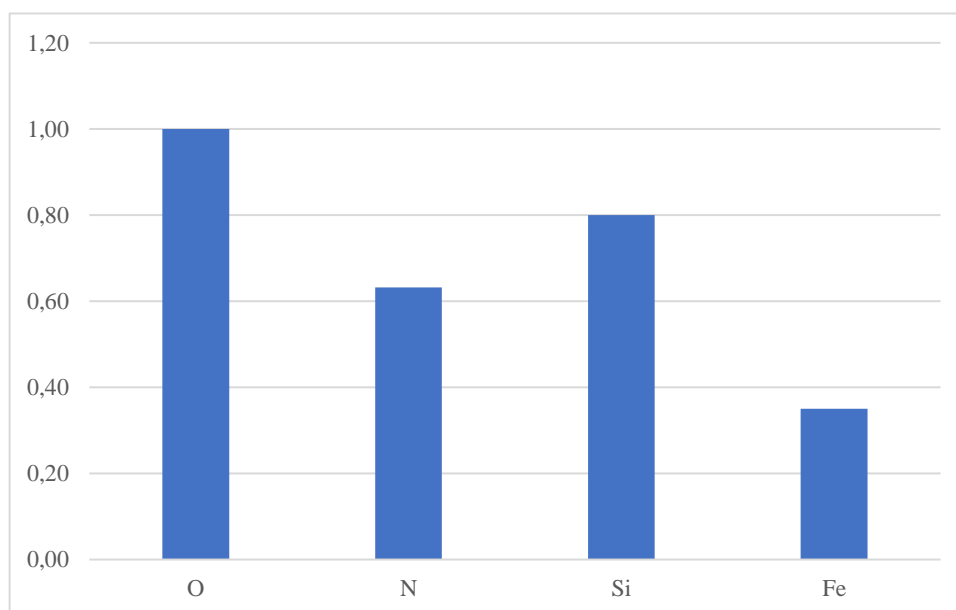


Рисунок 1 – относительная концентрация ионов в исследуемой плазме

Кислород и азот – основные компоненты воздуха, их наличие в плазме ожидаемо. Наличие железа связано с тем, что с поверхности электродов в условиях эксперимента активно идёт испарение вещества. Присутствие кремния в плазме, вероятно, связано с составом электродов.

Поскольку до начала эксперимента для воздуха в лаборатории выполнялось соотношение  $p = nkT$ , связывающее давление газа, температуру газа и концентрацию частиц, можно определить концентрацию атомов азота и кислорода к началу эксперимента:

$n_O \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_N \approx 3,77 * 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – количество атомов кислорода и азота в единице объёма соответственно. Концентрация ионов может быть оценена с учётом характерной для данного типа плазмы степени ионизации порядка  $10^{-7}$ .

Таблица 1 – концентрации ионов в плазме

Вещество	Концентрация $n$ , $10^{12} \text{ см}^{-3}$
O	1,72
N	1,08
Si	1,37
Fe	0,60

Из условия квазинейтральности для плазмы следует, что концентрация электронов  $n_e \approx 3,77 * 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Расчётная температура плазмы составляет около 1000 К.

По формуле 1 вычисляется дебаевская длина  $\lambda_D \approx 5 \text{ мкм}$  для исследуемой плазмы. Из этого следует, что приближения, используемые в теоретической части, справедливы для частиц, чей радиус не превосходит 1 мкм.

Используя формулу 3, оценим заряд, скапливающийся на частице в зависимости от её радиуса.

При  $a=1$  мкм, зарядовое число приближённо равно 900, с точностью до множителя порядка единицы. С использованием приближения, ожидается линейная зависимость от радиуса (в мкм) с коэффициентом  $900\alpha$ , однако стоит учесть, что зарядовое число должно быть целым. В таблице 2 приведены значения сил, действующих на частицы, в зависимости от их радиусов. Для электростатической силы предполагалось, что частицы находятся в поле напряжённостью 120 В/м – поле Земли, поскольку в эксперименте никакие другие поля намеренно не создавались. При расчёте силы тяжести в качестве плотности взята плотность сажи  $0,4$  г/см<sup>3</sup> и плотность песка  $1,4$  г/см<sup>3</sup>.

Таблица 2 – основные силы, действующие на частицу.

Радиус, см	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$
Сила тяжести (сажа), дин	$1,64 \cdot 10^{-18}$	$1,64 \cdot 10^{-15}$	$1,64 \cdot 10^{-12}$	$1,64 \cdot 10^{-9}$
Сила тяжести (песок), дин	$5,75 \cdot 10^{-18}$	$5,75 \cdot 10^{-15}$	$5,75 \cdot 10^{-12}$	$5,75 \cdot 10^{-9}$
Сила трения о нейтралы, дин	$\delta \cdot 3 \cdot 10^{-7}$	$\delta \cdot 3,5 \cdot 10^{-5}$	$\delta \cdot 3,5 \cdot 10^{-3}$	$\delta \cdot 0,35$
Электростатическая сила, дин	$\alpha \cdot 1,73 \cdot 10^{-12}$	$\alpha \cdot 1,73 \cdot 10^{-11}$	$\alpha \cdot 1,73 \cdot 10^{-10}$	$\alpha \cdot 1,73 \cdot 10^{-9}$
Сила ионного увлечения, дин	$1,43 \cdot 10^{-13}$	$1,67 \cdot 10^{-11}$	$1,68 \cdot 10^{-9}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$

На рисунке 2 представлена зависимость силы тяжести в динах от радиуса частицы в сантиметрах. Для удобства представления, по вертикали отложен десятичный логарифм силы, по горизонтали десятичный логарифм радиуса частицы.

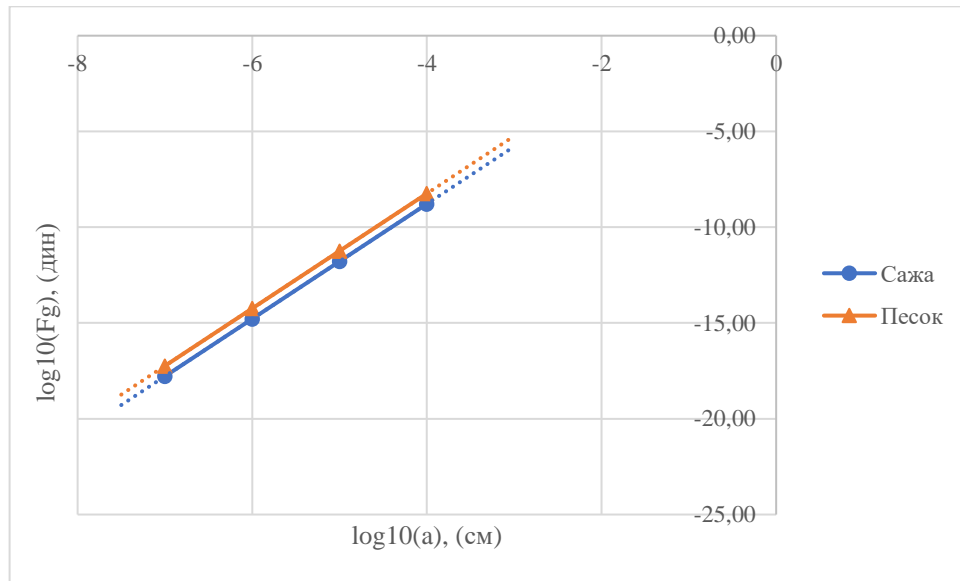


Рисунок 2 – Зависимость силы тяжести от радиуса частицы для разных материалов

На рисунке 3 представлена зависимость сил от радиуса для частиц сажи. Аналогично по вертикали отложен десятичный логарифм силы в динах, по горизонтали десятичный логарифм радиуса в сантиметрах.

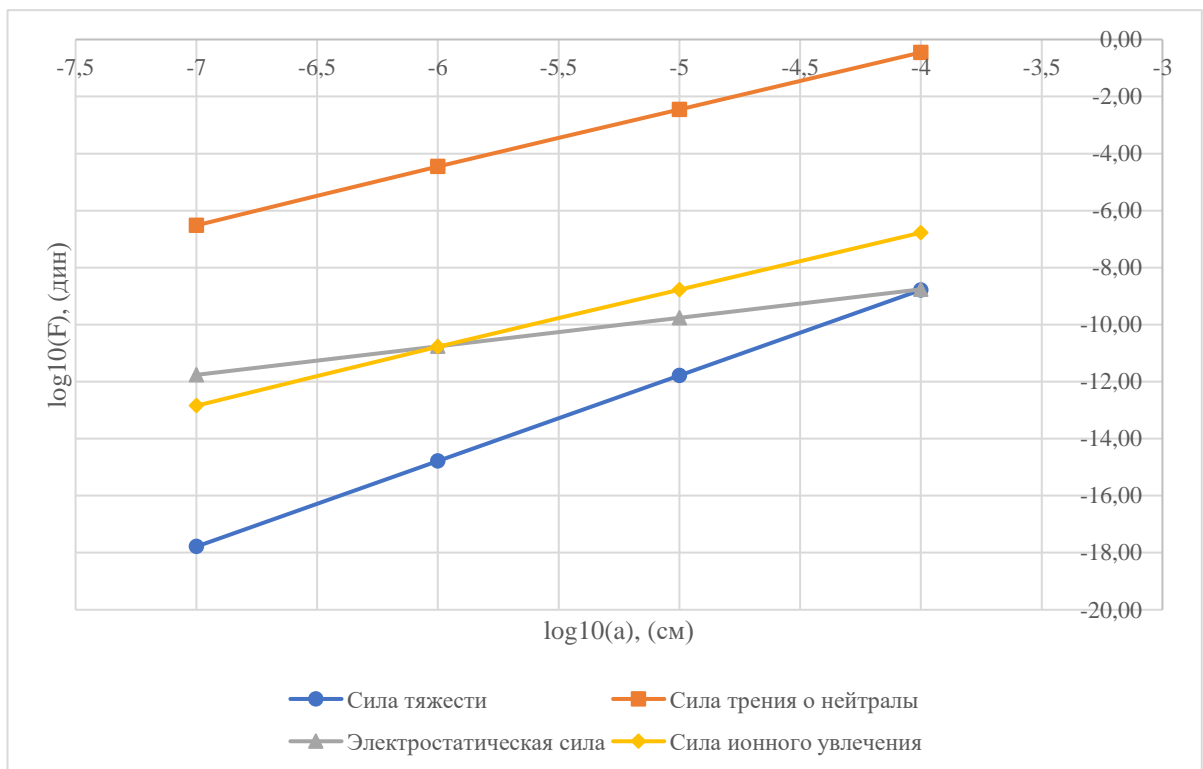


Рисунок 3 – зависимость сил, действующих на частицу сажи от радиуса частицы.

Сила взаимодействия между частицами радиусов  $a_1$  и  $a_2$  может быть описана как функция расстояния:

$$F_d = Z_d^2 e^2 \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{\lambda_D} \right) \frac{1}{r} \exp \left( -\frac{r}{\lambda_D} \right) = 18,5 * 10^{-6} a_1 a_2 \left( \frac{1}{r} + \frac{1}{\lambda_D} \right) \frac{1}{r} \exp \left( -\frac{r}{\lambda_D} \right)$$

Выражение получено подстановкой полученных данных в формулы 15, 16 и 17. Все величины в СГС. Модуль этой силы на расстоянии трёх дебаевских длин равен:

$$F = 1,64 * a_1 a_2$$

Как видно, для двух частиц микрометрового радиуса, эта сила имеет -8 порядок. При этом, за счёт экспоненциальной зависимости от расстояния, эта сила будет незначительна уже на расстоянии порядка 5-10  $\lambda_D$ . В то же время на расстоянии около одной дебаевской длины, сила для микрометровых частиц будет иметь -7 порядок.

На рисунке 4 представлена зависимость сил электростатического взаимодействия между частицами для случаев  $a_1=a_2$ . По вертикали отложен десятичный логарифм силы в динах, по горизонтали десятичный логарифм расстояния в сантиметрах в промежутке от 0,5 мкм до 50 мкм. На рисунке 5 представлен график экранированного кулоновского потенциала Дебая-Хюккеля для частицы радиусом 100 нм.



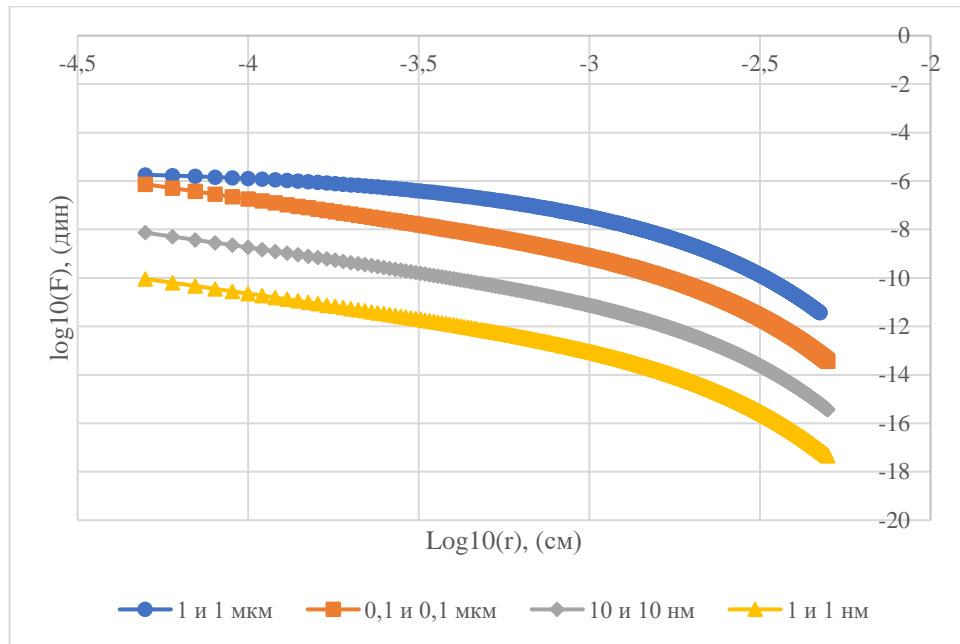


Рисунок 4 – зависимость силы взаимодействия заряженных частиц от расстояния между ними для разных радиусов

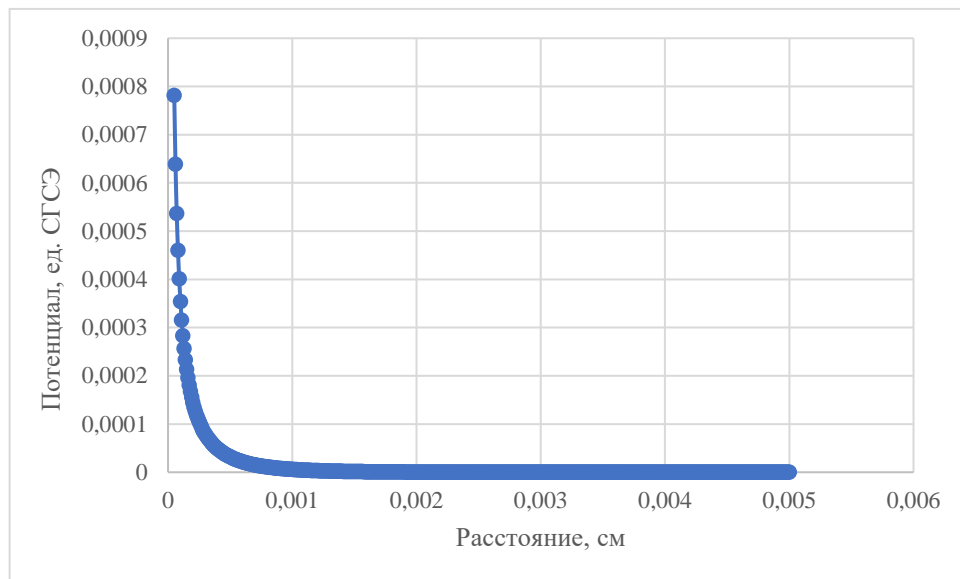


Рисунок 5 – потенциал Дебая-Хюккеля

#### 4. Выводы

Теоретически оценены силы, действующие на частицы нано- и микрометрового размера в исследуемой плазме. Для всех размеров частиц самой большой по модулю оказалась сила вязкого трения, направленная против скорости движения частицы и, следовательно, препятствующая её движению относительно плазмы. Для частиц микрометрового размера сила

тяжести и электростатическая сила имеют одинаковый порядок в предположении, что частица находится в поле, сравнимом с полем Земли. Для остальных размеров электростатическая сила существенно больше силы тяжести. Получено так же, что для крупных частиц сила ионного увлечения несмотря на малую степень ионизации является второй по порядку величины после силы трения, тогда как для частиц радиуса  $\sim 1-10$  нм она оказывается меньше электростатической.

Известно, что в пылевой плазме возможно образование упорядоченных структур. Исходя из порядков величин, можно предположить, что силой притяжения, компенсирующей кулоновское отталкивание, может быть сила ионного увлечения. Однако для более точной оценки потенциала взаимодействия двух частиц, необходимо продолжить исследования.

## 5. Список литературы

1. Молотов В.И., Нефедов А.П., Петров О.Ф., Торчинский В.М., Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А. Неустойчивость пылезвуковых колебаний в положительном столбе разряда постоянного тока // Ежегодник «Исследовано в России». 1999.
2. Цытович В.Н. Плазменно-пылевые кристаллы, капли и облака // Успехи физических наук. 1997. №1. С. 57-99.
3. Вишняков В.И. Взаимодействие нано-размерных частиц в электронно-пылевой плазме // Фізика аеродисперсних систем. 2016. №53. С. 152-163.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики : в 5 т. Т. 3. Электричество / под ред. О.В. Салехацкой. 4-е изд. М. : Физматлит, 2004. 656 с.
5. Block D. Dusty (complex) plasmas – routes towards magnetized and polydisperse systems / D. Block, A. Melzer // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2019. - Vol. 52, N 6.
6. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // Успехи физических наук. 2004. №5. С. 495-544.