

ПЫЛЕВЫЕ ВИХРИ, ОБЛАКА И СТРУИ В ЯДЕРНО-ВОЗБУЖДАЕМОЙ ПЛАЗМЕ

В. И. Владимиров, Л. В. Депутатова, А. П. Нефедов, В. Е. Фортон,*

*Институт теплофизики экстремальных состояний Российской академии наук
127412, Москва, Россия*

*В. А. Рыков**, А. В. Худяков*

*Государственный научный центр «Физико-энергетический институт им. акад. А. И. Лейпунского»
249020, Обнинск, Россия*

Поступила в редакцию 24 января 2001 г.

Экспериментально исследуется коллективное движение пылевых частиц в плазме, образующейся при торможении продуктов распада ядер калифорния в неоне. Впервые обнаружены компактные вихревые структуры с большим количеством коагулирующих пылевых частиц и эволюционирующие во времени плотные пылевые облака. Пылевые образования имеют резко очерченные границы, а частицы в них образуют упорядоченные структуры жидкостного типа. При неизменных условиях пылевые структуры существуют от нескольких минут до десятков минут. Увеличение напряжения на высоковольтном электроде приводит к образованию струй пылевых частиц. Структуры переходят из одного типа в другой при изменении конфигурации электрического поля. Наблюдается сильная рекомбинация электронов и ионов на пылинках. Методом Монте-Карло изучен процесс передачи импульса дрейфующих во внешнем поле ионов молекулам газа. Показано, что величина переданного импульса настолько велика, что может вызвать движение газа. Объяснены характерные особенности вихревого движения в неоне и воздухе.

PACS: 52.20.Nv, 52.25.Wz

1. ВВЕДЕНИЕ

Пылевая ядерно-возбуждаемая плазма создается ионизирующими частицами, появляющимися в ядерных реакциях, при делении ядер, а также при альфа- и бета-распаде [1, 2]. Для ядерно-возбуждаемой плазмы характерна существенная пространственно-временная неоднородность, обусловленная ее трековой структурой [3]. Накопление заряда пылевыми частицами в такой плазме имеет случайный характер [4], а время изменения заряда определяется интенсивностью распадов в радиоактивном источнике и расстоянием от источника. Пылевая частица в ядерно-возбуждаемой плазме при наличии внешнего электрического поля находится под воздействием дрейфующих к разным электродам сгустков электронов и ионов, имеющих для однородного поля цилиндрическую форму

с осью симметрии, параллельной направлению пролета ионизирующей частицы. Вследствие диффузии сгустки электронов и ионов расплываются в радиальном направлении, а разница в величине коэффициентов диффузии приводит к значительно большему увеличению радиуса электронных сгустков. Они чаще встречают на своем пути пылевые частицы, заряжая их отрицательно. Более редкое воздействие ионных сгустков эффективно разряжает пылевые частицы. Поочередное воздействие сгустков электронов и ионов приводит к сильным флуктуациям электрического заряда пылинки [4]. Во внешнем электрическом поле при достаточно большом давлении газа дрейф электронов и ионов к электродам вызывает передачу импульса нейтральным компонентам среды. Из-за большей скорости и меньшего времени дрейфа к аноду передача импульса электронов нейтралам пренебрежимо мала и главную роль играет передача импульса ионами. Вследствие этого газ будет совершать движение,

*E-mail: dlv@hedric.msk.su

**E-mail: rykov@ippe.obninsk.ru

характер которого зависит не только от геометрии объема, занятого газом, но и от концентрации пылевых частиц, их массы и заряда. Такое движение затрудняет образование неподвижных пылевых структур и приводит к развитию вихрей, облаков обтекаемой формы и струй пылевых частиц.

Цель настоящей работы состоит в экспериментальном исследовании поведения пылевых частиц различного диаметра в ядерно-возбуждаемой плазме в присутствии электрических полей с изменяемой пространственной конфигурацией.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Опыты проводились на установке, аналогичной ранее описанной [1]. В качестве источника ионизирующего излучения был использован тонкий слой ^{252}Cf , ядра которого испытывают альфа-распад и спонтанное деление в количественном соотношении приблизительно 32:1. Интенсивность источника равнялась $4 \cdot 10^6$ делений/с. При такой интенсивности радиоактивного источника концентрация ионов неона вблизи его поверхности $N_i \sim 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. Источник помещался на заземленном металлическом электроде (рис. 1), выполненном в виде диска диаметром 44 мм. На расстоянии 3.5 см от него располагался высоковольтный электрод такого же диаметра. Вблизи этого электрода концентрация ионов $N_i \sim 1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. Концентрация ионов находилась на основании расчета пространственной зависимости плотности мощности энерговклада осколков деления и альфа-частиц в газ, аналогично работе [1].

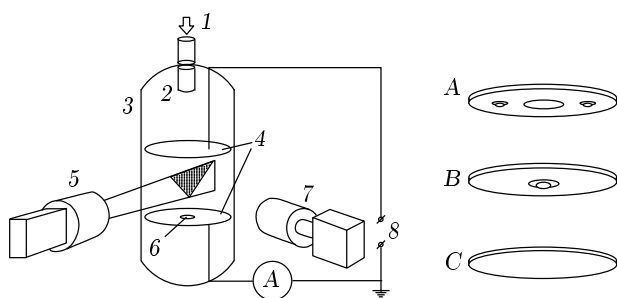


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 — вброс газопылевой смеси из системы вакуумирования и газонаполнения, 2 — сетчатый контейнер с пылевыми частицами, 3 — стеклянные стенки, 4 — металлические электроды, 5 — лазер с цилиндрической линзой, 6 — плоский радиоактивный источник, 7 — телекамера, 8 — источник постоянного напряжения, A, B, C — формы высоковольтного электрода

На плоском высоковольтном электроде монтировались дополнительные электроды для создания неоднородного поля. На рис. 1 показан электрод A, в котором кроме центрального отверстия диаметром 15 мм имеются введенные через изолятор две медные трубки диаметром 2 мм. Дополнительный электрод B имеет полусферическую форму. Электроды помещались в герметичный стеклянный объем цилиндрической формы с внутренним диаметром 50 мм. К высоковольтному и дополнительным электродам прикладывались различные по величине потенциалы.

Газопылевая смесь создавалась импульсным воздействием потока неона, поступающего из дозатора с фиксированным объемом. Этот поток направлялся на контейнер с сетчатым дном, в который помещались исследуемые частицы, и образуемая газопылевая смесь равномерно заполняла весь объем стеклянной ячейки. Перед заполнением газом стеклянная ячейка откачивалась до давления около 1.3 Па для предотвращения потерь электронов на молекулах кислорода. Давление газа менялось от 10^4 до 10^5 Па. В качестве пылевых частиц использовались частицы Zn со средним диаметром 2.4 мкм и массой $5 \cdot 10^{-11}$ г. Начальная концентрация частиц лежала в диапазоне 10^5 – 10^6 см^{-3} . Ячейка подсвечивалась сформированным цилиндрической линзой плоским лазерным лучом с перетяжкой, изменяемой с помощью плоской диафрагмы от 100 до 200 мкм. Рассеянный частицами лазерный свет регистрировался телекамерой, приемником излучения в которой служила ПЗС-матрица.

3. ВИХРИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Для изучения влияния неоднородного электрического поля на движение пылевых частиц был использован плоский электрод с дополнительными высоковольтными электродами A. Центральное отверстие в электроде, предназначенное для ввода частиц из контейнера, не оказывало существенного влияния на движение частиц. Потенциал основного электрода U и потенциалы дополнительных электродов U^* имели положительные значения, причем выполнялось неравенство

$$U^* \geq U.$$

После инъекции в объем ячейки газопылевой смеси происходила сепарация частиц по весу. Оставшиеся частицы постепенно собирались во вращающуюся пылевую структуру (рис. 2a), центр которой расположен под дополнительным электродом, со смеще-

Рис. 2. Вихревое движение пылевых частиц Zn при $U = 187$ В, $U^* = 442$ В, давление неона $0.4 \cdot 10^5$ Па, обзор — 3.2×2.4 см²; *a* — 1.5 мин после инъекции газопылевой смеси, *b* — 3 мин, *в* — 4.5 мин, *г-е* — изменение потенциала дополнительного электрода на восьмой минуте с 400 В до 500 В, *жс* — 10 мин, *з* — общий вид двух вихревых структур на четвертой минуте (обзор — 4.2×3.1 см²). (Светлые полосы в кадрах — блики на стеклянных стенках ячейки и на электродах)

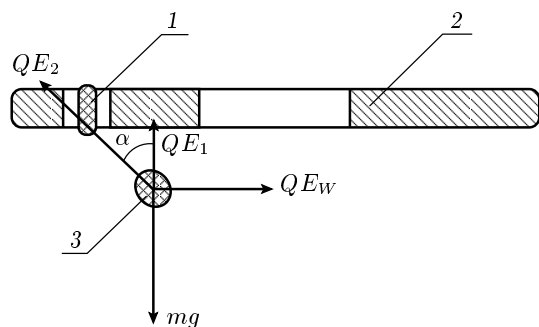


Рис. 3. Расположение пылевой структуры: 1 — дополнительный электрод, 2 — основной электрод, 3 — пылевая структура

нием к центру ячейки. Частицы испытывали ускорение в направлении дополнительного электрода (показано на рисунке черной стрелкой) на участке 1–2, что можно объяснить наличием заряда у частиц. Затем частицы поворачивали в сторону от верхнего электрода на участке 2–3 и замедляли скорость, переходя в итоге во вращательное движение. Скорости частиц v определялись по формуле

$$v = \frac{N}{k} \frac{s}{F}, \quad (1)$$

где N — число кадров в секунду, передаваемых видеокамерой на запись (в эксперименте $N = 25$), k — число кадров, на которых наблюдалась пылевая частица, сместившаяся на расстояние s , F — увеличение оптической системы (в эксперименте $F = 10.5$). Вблизи точки 2 скорости частиц превышают 10 см/с, с противоположной стороны (вблизи точки 4) скорость вдвое меньше — около 5 см/с.

Через несколько минут основная часть частиц стягивалась к центру структуры, а остальной объем почти полностью отчищался от частиц (рис. 2б). Центр структуры отстоял от центра дополнительного электрода на расстоянии 6 мм (рис. 3). С течением времени можно было заметить, что происходит агломерация мелких частиц в более крупные фрагменты, причем в центральной части оставалась мелкая фракция (рис. 2в). При скачкообразном увеличении потенциала на дополнительном электроде и последующем восстановлении прежнего значения потенциала вихревое движение сначала нарушается и частицы стремятся разлететься (рис. 2г), а затем происходит восстановление движения частиц (рис. 2д, е). После восстановления вихревое движение на этой стадии может продолжаться очень долго при постоянных внешних условиях. (Изображенная на рис. 2ж структура наблюдалась более 20 мин, до

выключения источника напряжения.) Отметим, что если в плоскости лазерного «ножа» (вертикальное сечение) форма структуры близка к кругу с диаметром 5 мм, то вдоль оси наблюдения она имеет веретенообразную форму с линейным размером около 1.5 см.

Помещая второй дополнительный электрод симметрично относительно оси ячейки, можно было наблюдать уже две структуры, вращение которых происходит в противоположные стороны (рис. 2з). Характер движения частиц не изменяется, если центральное отверстие в основном электроде отсутствует. При малой начальной концентрации частиц пылевые структуры не образуются, что говорит о ярко выраженном коллективном характере поведения пылевых частиц.

Поскольку в эксперименте использовались полидисперсные пылевые частицы, их радиусы r_d определялись экспериментально по установившейся скорости их падения v в газе после отключения электрического поля (сопротивление движению частицы учитывалось по формуле Стокса):

$$r_d = \sqrt{\frac{9\eta v}{2\rho g}}, \quad (2)$$

где η — вязкость газа, ρ — плотность вещества пылевых частиц, g — ускорение свободного падения. Скорость падения частиц оказалась равной $v = 1.7 \pm 0.2$ см/с. Вычисленные по (2) радиусы частиц Zn, находившихся в составе вращающейся структуры, лежали в диапазоне 5.5–6.2 мкм. Средняя масса частиц равна $3.5 \cdot 10^{-9}$ г. Увеличившийся приблизительно в 5 раз радиус и приблизительно в 100 раз возросшая масса частиц говорят о коагуляции частиц во вращающейся структуре. Выше отмечалось, что это заметно даже визуально.

Рассмотрим условие равновесия компактного вращающегося пылевого образования (рис. 3). На него действует поле двух электродов и стенки

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_w,$$

сила тяжести $M\mathbf{g}$ и сила давления, вызванного различной величиной скорости обтекающего пылевую структуру газового потока. Это давление может быть вычислено по формуле

$$p = \frac{\rho g}{2}(v_2^2 - v_4^2), \quad (3)$$

где v_2 и v_4 — скорости газа вблизи точек 2 и 4 на рис. 2а. Давление (3) создает силу давления \mathbf{F}_p . Пылевая структура будет в равновесии, если (рис. 3)

$$Q\mathbf{E} + M\mathbf{g} + \mathbf{F}_p = 0, \quad (4)$$

где Q — заряд структуры. Из-за неопределенности массы всей структуры оценим величину заряда q одной входящей в ее состав частицы. Условия равновесия приводят к следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} qE_2 \sin \alpha + f_p \sin \beta &= qE_w, \\ q(E_1 + E_2 \cos \alpha) &= mg - f_p \cos \beta. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь α и β — углы, образуемые векторами \mathbf{E}_2 и \mathbf{F}_p с вертикальным направлением, $m = 4\pi\rho r^3/3$ — масса частицы, f_p — сила давления на частицу. В эксперименте $f_p = \pi r^2 p \approx 3.6 \cdot 10^{-13}$ Н. Эта величина пренебрежимо мала по сравнению с силой тяжести $mg \approx 3.5 \cdot 10^{-8}$ Н. Система (5) позволяет найти неизвестные q и E_w , если сила давления f_p пренебрежимо мала и известны остальные входящие в нее величины. Напряженность поля верхнего электрода вблизи центра вращающейся структуры $E_1 \approx 45$ В/см, а напряженность поля дополнительного электрода $E_2 \approx 100$ В/см. Средний угол $\alpha \approx 45^\circ$. Напряженность поля стенок из (5) $E_w \approx 70$ В/см. Заряд пылевых частиц из решения системы (5) равнялся $2.7 \cdot 10^4$ единиц заряда электрона. В среднем на одну из сотни более мелких частиц приходилось около 270 электронов.

Для получения более точного значения заряда частиц необходимо решать самосогласованную задачу, в которой записывается уравнение Пуассона с учетом внешних полей, полей стенок, полей пространственных зарядов (электронов и ионов) и полей частиц, заряды которых сами зависят от локального суммарного электрического поля. Однако такая самосогласованная задача пока вряд ли реализуема, поэтому при математическом моделировании пылевой плазмы обычно используются эффективные потенциалы взаимодействия пылевых частиц [5].

При увеличении потенциала дополнительного электрода до 500 В вращающаяся структура смещается дальше от него до расстояния 9 мм. Это объясняется увеличением потока электронов на стенку, из-за чего возрастает сила qE_w , отодвигающая структуру. При новых значениях E_2 и E_w структура находит новое положение равновесия, в котором условия (5) выполняются при изменившихся значениях углов.

Коагуляция пылевых частиц в плазме, создаваемой радиоактивным источником, впервые рассматривалась в работе [6]. В этой работе коагуляция заряженных частиц не отрицается. Однако заряд, приходящийся на одну мелкую частицу до коагуляции, может в нашем случае оказаться слишком высоким. С другой стороны, следует отметить, что время коагуляции в описываемом эксперименте измеряется

многими минутами. Коагуляцию может облегчать несферичность частиц и их высокая проводимость. Заряд частиц может быть несколько завышенным из-за рассматриваемого ниже увлечения пылевых частиц движущимся газом.

4. ЖИДКОСТНЫЕ ОБЛАКА ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

При одинаковых потенциалах U и U^* , а также при использовании электрода C (рис. 1), пылевые частицы Zn после инъекции газопылевой смеси скапливаются в течение нескольких минут в облако, имеющее резко очерченные границы (рис. 4а–г). Облако имеет форму усеченного конуса с основанием, находящимся на плоскости верхнего электрода, и вершиной вблизи радиоактивного источника. Весь объем экспериментальной ячейки можно разбить на пять областей, поведение частиц в которых различно. В области I частицы практически неподвижны (левитируют). В области II частицы медленно движутся, создавая восходящий поток. Скорость частиц в этом потоке уменьшается при приближении к краям структуры и ее верхней части. В средней части этого потока скорость максимальна и равна 0.6 см/с. В области III частицы движутся по образующей конуса вниз со скоростью 1.2 см/с, вблизи нижнего электрода часть из них поворачивает к оси структуры, а затем поднимается вверх. Другая часть попадает в область V. В области IV частиц очень мало, а вблизи границы структуры скорость их равна скорости частиц в области III. Приближаясь к нижнему электроду, пылинки отворачивают от него и уходят к стенкам, а около стенок поднимаются вверх, образуя замкнутые траектории. В области V все частицы падают вниз со скоростью около 1 см/с. Скорости частиц определялись по формуле (1).

Таким образом, имеется два вихревых движения частиц. Одно из них — это движение частиц с очень малой плотностью на периферии, а другое — движение внутри структуры с приблизительно вдвое меньшей скоростью. Между ними существует очень резкая граница, вблизи которой по обе стороны скорости частиц одинаковы. Ниже будет показано, что передача импульса ионов нейтралам достаточно велика, для того чтобы газ пришел в движение. По нашему мнению, это одна из основных причин возникновения вихрей. Другая причина может заключаться в интенсивной рекомбинации ионов и электронов на пылевых частицах, что может вызвать появление больших градиентов концентрации и дополнитель-

Рис. 4. Эволюция пылевого облака из частиц Zn: *a* — 2 мин после инъекции пылевой компоненты, *b* — 4 мин, *в* — 4.5 мин, *г* — 4 мин 45 с. Верхний электрод имеет форму *C* (рис. 1). Потенциал верхнего электрода равен 152 В; расстояние между верхним и нижним электродами 3.5 см; давление неона $0.76 \cdot 10^5$ Па; обзор 4.2×3.1 см²

ных потоков плазменных частиц. Наиболее интенсивно ионизация газа и рекомбинация, в том числе и на пылинках, происходят вблизи источника ионизирующего излучения. Сюда и направлен поток ионов, вызывающий уменьшение диаметра структур вблизи этого источника.

В самой нижней части структуры (область V) заряд пылинок становится положительным [4] и они падают на нижний заземленный электрод.

Радиус частиц r_d определялся по скорости падения частиц структуры после выключения источника напряжения между электродами (формулы (1) и (2)), он оказался заключенным в интервале 0.9–1.4 мкм. Масса частиц колебалась от $3 \cdot 10^{-11}$ г до $8 \cdot 10^{-11}$ г.

Из условий равновесия левитирующих частиц в области I и медленно движущихся частиц в области II вычислена величина электрического заряда частиц q по формуле

$$q = \frac{mg}{E}, \quad (6)$$

где E — напряженность внешнего электрического поля. Заряды частиц в зависимости от радиуса лежат в интервале от 400 до 1000 единиц заряда электрона.

Математическая обработка центральной части структуры дает значение среднего расстояния между частицами $b \approx 190 \pm 30$ мкм и величину концентрации $n_d \approx (3-4) \cdot 10^4$ см⁻³. Электрическое поле частиц с такой концентрацией и максимальным зарядом создает на расстоянии 1 см от центра сферы радиусом 1 см (характерный размер структуры) поле с напряженностью $E \approx 4$ В/см, что в 10 раз меньше внешнего поля, и в первом приближении может не учитываться.

Цифровая обработка кадров позволяет получить парную функцию распределения пылевых частиц (парную корреляционную функцию [7]), представленную на рис. 5. Она имеет выраженный максимум, характерный для жидкостных структур. Параметр неидеальности для пылевой компоненты

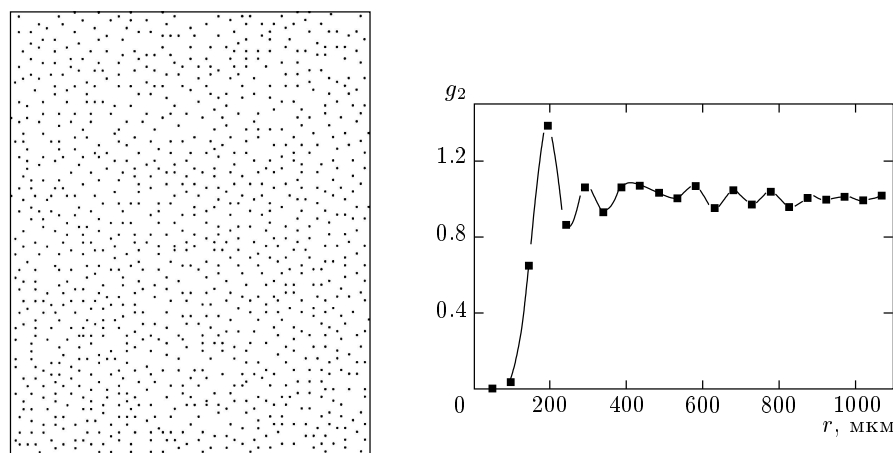


Рис. 5. Оцифрованное изображение центральной части структуры и соответствующая ей парная функция распределения

$$\Gamma = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{bT}, \tag{7}$$

где T — энергетическая температура газа, лежит в пределах от 45 до 340 для частиц различных размеров, что также говорит о жидкостном характере полученных структур. Для частиц с радиусом равным среднему (1.2 мкм) параметр неидеальности равен 130. Разброс размеров частиц, флуктуации их зарядов [4] и движение среды служат серьезным препятствием для образования кристаллических пылевых структур.

При неизменных давлении газа и потенциалах электродов облако в течение нескольких минут образует верхнюю часть обтекаемой формы, близкой к сферической (рис. 4б). Затем оно постепенно меняет очертание границ и плавно падает на нижний электрод (рис. 4в, г). В это время вихревое движение периферийных частиц как бы обтачивает структуру, создавая перетяжку в ее нижней части. В положении, изображенном на рис. 4г, вихревое движение существенно влияет и на поведение верхней части структуры, оказывая на него дополнительное давление. После падения структуры на нижний электрод вихревое движение, ранее характерное для частиц на периферии, охватывает весь объем. Скорость движения частиц в таком вихре вблизи оси ячейки равна 1.2 см/с.

Рекомбинация плазменных частиц на пылевых частицах отражается на зависимости от времени электрического тока между электродами (рис. 6). Представлены результаты измерения тока для трех различных вбросов газопылевой смеси в объем экс-

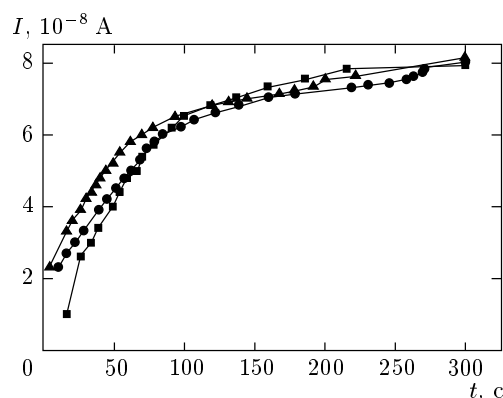


Рис. 6. Зависимость тока от времени

периментальной ячейки. В первые моменты времени после вброса газопылевой смеси плотность и число пылевых частиц велико, а ток мал. В процессе формирования структуры и ее эволюции во времени объем, занятый пылинками, уменьшается. Электрический ток при этом возрастает и достигает насыщения после падения пылевой структуры на нижний электрод.

Другой причиной уменьшения тока при наличии в объеме пылевых частиц могло бы быть попадание ионизирующих частиц в пылевые частицы, после которого ионизирующая частица прекратила бы свое движение, застряв в пылинке. В результате такого процесса дальнейшая ионизация прекращается из-за прерывания трека. Если считать пылевые частицы сферами с радиусом r_d , то средняя длина свободного пробега ионизирующей частицы относи-

тельно столкновений с пылевыми частицами вычисляется по формуле

$$\lambda = (n_d \pi r_d^2)^{-1}. \quad (8)$$

Расчет по формуле (8) даже для наиболее крупных частиц с радиусом 1.4 мкм и для максимальной концентрации 10^6 см^{-3} дает длину свободного пробега 16 см, что намного превышает реальный пробег осколков деления и альфа-частиц в неоне при давлении, близком к атмосферному. Следовательно, процессом потери ионизирующих частиц на пылинках можно пренебречь.

Описанные выше облака образуются при давлениях $0.1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$, и их поведение всегда одинаково. Выше атмосферного давление газа не поднималось. В отсутствие электрического поля или радиоактивного источника облака не возникают, а вброшенные в объем частицы постепенно падают вниз по траекториям, параллельным ускорению свободного падения.

5. ПЫЛЕВЫЕ СТРУИ

Если после образования структуры пылевых частиц поднять потенциал верхнего электрода, то пылевые частицы устремятся к нему со скоростью тем

большей, чем больше величина потенциала. Интересно то, что вверх устремляется не вся структура. В ее верхней части образуются одна или несколько струй движущихся пылинок. Перед подходом к электроду скорость частиц в струе уменьшается, а сама она расширяется в виде раструба. Выполняется условие непрерывности, характерное для жидких сред. Струя может менять форму, расположение ее оснований также может меняться (рис. 7). В областях пространства вне структуры и струй плотность пылевых частиц близка к нулю.

Использование дополнительного электрода, выполненного в виде полусферы и изолированного от основного электрода диэлектриком, дает возможность проводить удаление пылевых частиц из облака (рис. 8а-в). При этом образуется одна пылевая струя, направленная к этому электроду. Потенциал на дополнительном электроде, как правило, в два раза больше, чем на основном. Пылевые частицы, притягиваясь к электроду, остаются на его поверхности. На основе этого эффекта можно разработать устройство, служащее удалению пыли из технологических объемов в ядерных установках.

Если после образования облака частиц подать высокое напряжение на дополнительный электрод, расположенный в стороне от центра высоковольтного электрода (как на рис. 2а-ж), то из пылевого облака образуется вращающаяся структура, подобная рассмотренной выше в разд. 3 (рис. 8з).

6. РАСЧЕТ ПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСА ДРЕЙФУЮЩИМИ ПОТОКАМИ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ МОЛЕКУЛАМ ГАЗА

В этом разделе мы покажем, какую важную роль играет процесс передачи импульса от дрейфующих ионов нейтральным компонентам среды при образовании вихревого движения пылевых частиц. Дрейфующие ионы приобретают между столкновениями дополнительный импульс, взаимодействуя с внешним электрическим полем. За время движения t число ионов N_i приобретет, а значит, и передаст молекулам газа импульс, в линейном приближении равный $m_i w_i N_i t / \tau$, где τ — среднее время между столкновениями, w_i — скорость дрейфа. Для импульса Δp , переданного массе газа Δm за время дрейфа T_d , нетрудно получить следующее соотношение:

$$\frac{\Delta p}{\Delta m} \approx \frac{m_i w_i N_i T_d / \tau}{m_m n V} \approx \frac{j \langle v_T \sigma \rangle T_d}{e} \approx \frac{q E T_d}{m_m n V}, \quad (9)$$

Рис. 7. Движение пылевых частиц CeO_2 в виде струй, направленных к верхнему электроду. Электрод имеет форму C (рис. 1). Потенциал верхнего электрода равен 200 В; расстояние между верхним и нижним электродами 3.5 см; давление неона $0.79 \cdot 10^5 \text{ Па}$; обзор $4.2 \times 3.1 \text{ см}^2$. Нижняя часть облака не освещена

Рис. 8. *a–в* — Удаление пылевого облака из частиц Zn с помощью вспомогательного электрода сферической формы (рис. 1, *B*). Диаметр дополнительного электрода равен 3 мм; потенциал основного электрода равен +153 В, потенциал дополнительного равен +273 В; расстояние между верхним и нижним электродами 4 см; давление неона $0.76 \cdot 10^5$ Па; обзор 4.2×3.1 см². Нижняя часть структуры не видна из-за конечного размера лазерного «ножа». *г* — Образование вихря из облака

где j — плотность тока, v_T — тепловая скорость иона, σ — сечение столкновений ионов с атомами, V — объем газа, n — концентрация атомов газа, E — напряженность поля. Подстановка в (9) величин, характерных для проведенного эксперимента, приводит к значению удельного импульса, переданного массе газа, в несколько см/с.

Рассмотрим этот же процесс на макроскопическом уровне. На рис. 9 изображены силы, действующие на ионы при движении их через газ. На дрейфующее облако ионов со стороны внешнего электрического поля действует сила F_E . Ввиду того что скорость дрейфа постоянна, со стороны газа на облако действует сила сопротивления F_C . В свою очередь, ионы действуют на газ с равной ей по величине и противоположной по направлению силой F , которая и является той силой, которая может привести газ в движение. Причина возникновения этой силы на молекулярном уровне состоит в передаче приобре-

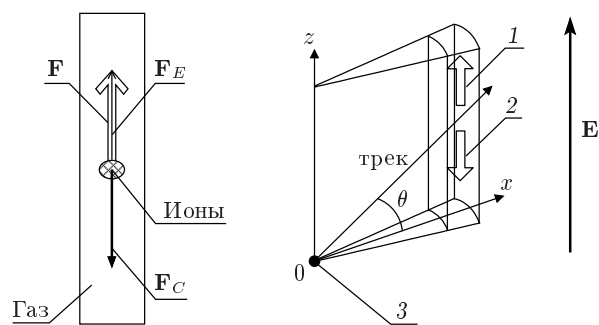


Рис. 9. Силы, возникающие при движении ионов через газ

тенного за счет поля дополнительного импульса от ионов молекулам среды.

Удельный переданный импульс частиц, усредненный по промежутку времени T , рассчитывался по формуле

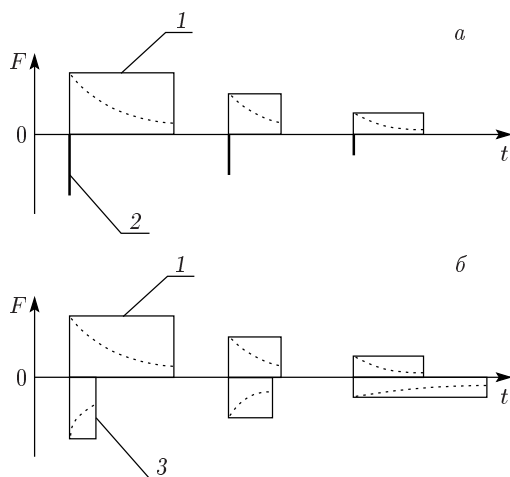


Рис. 10. Зависимость силы от времени: 1 — импульсы положительных ионов, 2 — импульсы электронов, 3 — импульсы отрицательных ионов; штриховые линии — сильная рекомбинация по пути следования импульсов к электродам; а — инертный газ, б — электроотрицательный газ

$$\left\langle \frac{\Delta p}{\Delta m} \right\rangle = \left\{ \frac{1}{\Delta m T} \int F(t) dt \right\} \Delta t, \quad (10)$$

где Δp — импульс, переданный массе газа Δm за время Δt при действии на газ средней по времени силы F . Эта сила вызвана взаимодействием заряда ионного или электронного облака с внешним электрическим полем E . В условиях эксперимента из-за ограниченной интенсивности источника ионизирующих частиц зависимость силы F от времени имеет импульсный характер:

$$F(t) = \begin{cases} Q_{e,i} E, & t \in [t_s, t_e], \\ 0, & t \notin [t_s, t_e]. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь $Q_{e,i}$ — заряд электронного или ионного сгустка, t_s и t_e — начальное и конечное время его движения к электроду. Время усреднения T может быть произвольным. Необходимо лишь, чтобы оно соответствовало достаточно большому количеству историй. Промежуток времени Δt равен характерному времени изменения скорости движения вихря; в эксперименте он равен приблизительно 1 с. Для упрощения расчета, который носит оценочный характер, поле предполагается однородным.

На рис. 10 схематически представлена зависимость (11). В качестве примера изображены по три характерных ситуации в инертном газе и в электроотрицательном газе (например, в воздухе). Первые импульсы — события ионизации, происшедшие

вблизи источника, дают большие импульсы силы. Их вклад в величину $\Delta p / \Delta m$ является определяющим. Второй случай — ионизация произошла в средней части междуэлектродного пространства — импульсы силы для положительных и отрицательных ионов примерно равны. В третьем случае импульс силы отрицательных ионов преобладает. Из-за большей, чем у ионов почти на четыре порядка скорости дрейфа электронов во всех случаях их вклад в $\Delta p / \Delta m$ пренебрежимо мал. При удалении от радиоактивного источника число электронно-ионных пар уменьшается, что приводит к уменьшению амплитуды импульсов силы.

Расчет среднего по времени значения удельной величины импульса, переданного от ионов нейтральным компонентам, проведен методом Монте-Карло. Учтен трековый характер проходящих процессов. На рис. 9 показано, как в результате прохождения ионизирующей частицы через газ в электрическом поле, направленном вдоль оси z , появляются два дрейфующих в противоположных направлениях сгустка (ионов и электронов). Если рассматривать весь трек, то эти сгустки имеют цилиндрическую форму, причем ось цилиндра параллельна первоначальному треку. Учитывался только вклад осколков деления. Для калифорниевского источника вклад 16 альфа-частиц (вторая половина из 32 уходит в подложку) в изучаемый процесс приблизительно равен вкладу одного осколка деления, поэтому результат просто умножается на 2. Угол раствора в направлении оси x выбирался настолько малым, чтобы временной интервал между треками был больше времени дрейфа ионов к электродам. Тогда отпадает необходимость обработки эффектов от случайных совпадений налагающихся треков. Угол вылета θ разыгрывается случайным образом. Результат усредняется по времени, соответствующему прохождению 2000 треков. Длина ячейки вдоль оси z полагается равной средней длине пробега осколков деления, а вдоль оси x каждая ячейка имеет размер, равный сотой доле длины пробега осколка деления. Вычислялось число ионов, производимое осколком в пределах тех ячеек, которые он пересекает. Вклады ионов и электронов (или ионов противоположного знака) в каждой элементарной ячейке, вырезанной шагом вдоль оси x , берутся с противоположными знаками.

Расчеты проводились для неона при давлении $5 \cdot 10^4$ Па, для калифорниевского источника с интенсивностью $4 \cdot 10^6$ делений/с, а напряженность электрического поля выбиралась равной 100 В/см (значения, характерные для эксперимента). Вектор напряженности поля направлен вниз, так как в экспе-

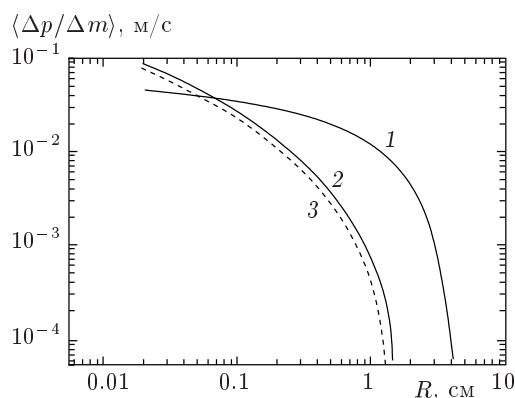


Рис. 11. Результаты расчета величины переданного импульса

рименте верхний электрод поддерживался под положительным потенциалом. Необходимые для расчета скорости дрейфа брались из работ [8–10]. Результаты представлены на рис. 11 (кривая 1). В неоне носителями отрицательного заряда являются электроны. Если поле направлено против оси z , то движущиеся вверх электроны из-за их очень малого времени дрейфа не могут дать большого вклада в переданный импульс. А вклад ионов приводит к передаче импульса в направлении источника, что и сказывается на характере движения пылевых частиц. Поскольку потери энергии на ионизацию вдоль трека и густота треков уменьшаются, ионы, движущиеся вблизи оси z и родившиеся вблизи источника, вносят больший вклад в переданный импульс.

В работе [1] изучалось поведение пылевых частиц CeO_2 в ядерно-возбуждаемой плазме, образуемой в атмосферном воздухе осколками деления и альфа-частицами ^{252}Cf с интенсивностью $1 \cdot 10^5$ делений/с. При увеличении напряженности внешнего электрического поля левитация частиц сменяется вращательным движением, и при установившемся режиме их траектории представляют собой замкнутые кривые, а движение всего ансамбля частиц в плоскости наблюдения имеет вид двух устойчивых вихревых образований. Вращательное движение наблюдалось и для одиночных частиц. Характер движения макрочастиц не изменялся при смене знака приложенного напряжения и при поворотах экспериментальной ячейки. Во всех случаях движение вихрей происходило таким образом, что частицы вблизи оси установки имели скорость, направленную от радиоактивного источника. Вторая особенность результатов эксперимента [1] заключается в том, что зависимость угловой скорости вращения частиц в

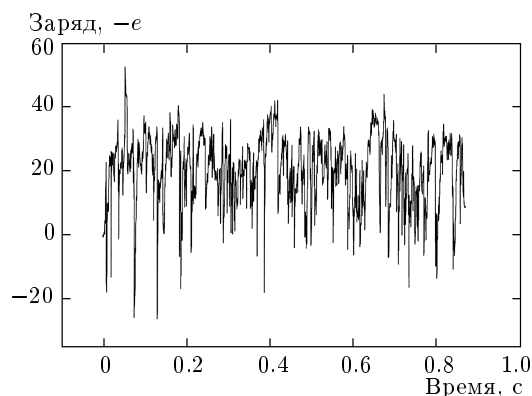


Рис. 12. Зависимость инвертированного заряда пылинки от времени при расстоянии от источника, равном 1 см. Средний заряд 20.6 единиц

вихре от напряженности электрического поля подобна вольт-амперной характеристике.

Рассмотрим сначала процесс приобретения электрического заряда пылинкой диаметром 1 мкм в воздухе, когда она подвергается действию проходящих в некоторой окрестности дрейфующих ионов разного знака. Расчет зависимости заряда от времени аналогично работе [4] проводился методом Монте-Карло при напряженности электрического поля 100 В/см. Результаты расчета представлены на рис. 12. Пылинка помещалась в точки с координатами $z = 1$ см (средняя часть экспериментальной ячейки в работе [1]). Координата R цилиндрической системы координат менялась от 2 см до 0. Хотя величина заряда растет по мере приближения к источнику, она все же остается небольшой — от 9 единиц заряда на периферии до 20 единиц заряда на оси. Флуктуации заряда вызваны случайным характером взаимодействия ядерных частиц с веществом [4]. Величина среднего заряда слишком мала, для того чтобы вызвать быстрое движение. Ранее в работе [2] при определении заряда частиц не учитывалось движение газа, что привело к завышенной оценке величины заряда.

Если предположить, что главной причиной вихревого движения частиц служит движение воздуха, а пылинки визуализируют его, то можно объяснить особенности экспериментов, проводимых в воздухе [1]. Мы провели расчеты переданного импульса для условий этого эксперимента (воздух при атмосферном давлении и напряженности электрического поля 100 В/см). Результаты представлены на рис. 11 (кривая 2 — верхний электрод при положительном потенциале, кривая 3 — при отри-

цательном). Уменьшение потерь энергии на ионизацию вдоль трека, а также уменьшение густоты треков, как и в неоне, приводит к большему вкладу в переданный импульс ионов, движущихся вблизи оси z . В каждой элементарной ячейке число пар ионов возрастает при приближении к источнику. Те ионы, которые направляются к верхнему электроду, проходят в газе больший путь и передают больший импульс. В воздухе за время порядка нескольких долей микросекунды при взаимодействии с кислородом образуются отрицательные ионы O_2^- , подвижность которых мало отличается от подвижности положительных ионов N_2^+ , и вклад в передачу импульса этих ионов при изменении направления поля почти одинаков. Передача импульса в воздухе почти не зависит от направления электрического поля, что и наблюдается в эксперименте. Это приводит к возникновению движения воздуха, направленного от источника ионизирующих частиц при любой полярности. Поэтому для электроотрицательных газов направление вращения газа в ограниченном объеме совпадает с нормалью к поверхности источника. В ограниченном стенками и электродами пространстве появится вихревое движение газа, которое и визуализируется с помощью пылевых частиц.

Расчеты проводились при условии работы ионизационной камеры в режиме насыщения вольт-амперной характеристики. При меньших значениях напряженности электрического поля рекомбинация приводит к потере зарядов как в самом треке, так и на пути ионов к электродам, что схематически изображено на рис. 10 штриховой линией. Вследствие этого происходит уменьшение электрического тока и величины переданного импульса. Предложенная модель появления вихревого движения объясняет второй важный экспериментальный факт — выход скорости вращения на плато в соответствии с вольт-амперной характеристикой. Причина в обоих случаях одна и та же. До выхода на плато обе величины растут, так как уменьшается рекомбинация в треках, а с выходом на плато все ионы, созданные источником, достигают электродов. Поэтому скорость вихревого движения находится в той же зависимости от приложенного напряжения, что и вольт-амперная характеристика. В самом деле, величина переданного импульса, согласно (9), прямо пропорциональна времени дрейфа (обратно пропорциональна скорости дрейфа) и напряженности поля. Скорость дрейфа, в свою очередь, прямо пропорциональна полю. Тогда при насыщении, когда нет потери зарядов, зависимость от напряженности поля исчезает:

$$\frac{\Delta p}{\Delta m} \approx \frac{qET_d}{m_m nV} = \frac{qE}{m_m nV} \frac{L}{w_i} = \frac{qL}{m_m nVK}$$

(здесь L — расстояние между электродами, а K — подвижность ионов).

Размерность и физический смысл удельной величины переданного импульса массе газа соответствуют скорости движения этой массы газа. Однако для ее нахождения нужно учитывать силу вязкого трения в газе и решать уравнения гидродинамики. Полученные в настоящей работе оценки показывают, что проводить такой расчет необходимо.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментов изучено коллективное движение пылевых частиц Zn в плазме, образующейся при торможении продуктов распада ядер калифорния в неоне. В объеме, содержащем газовую среду, источник ионизирующих излучений и пылевые частицы, создавалось электрическое поле с различной пространственной конфигурацией. Впервые обнаружены компактные вихревые структуры с большим количеством пылевых частиц. В этих структурах происходит процесс коагуляции пылинок, в результате чего масса частиц увеличивается почти в 100 раз. Обнаружены также эволюционирующие во времени плотные пылевые облака с резкими границами. Частицы в этих облаках создают упорядоченные структуры жидкостного типа. При неизменных условиях пылевые структуры обоих типов существуют десятки минут. При увеличении напряжения на высоковольтном электроде образуются струи из пылевых частиц. Такие струи можно направить в желаемом направлении, если использовать дополнительный электрод, потенциал на котором выше потенциала основного электрода.

Показано, что на образование вихревого движения пылевых частиц существенное влияние оказывает процесс передачи импульса ионов нейтральным компонентам среды. Движение ионов вызвано внешним электрическим полем, а также интенсивной рекомбинацией ионов и электронов на пылевых частицах, что может вызвать появление больших градиентов концентрации и дополнительных потоков плазменных частиц. Наиболее интенсивно ионизация газа и рекомбинация, в том числе и на пылинках, происходят вблизи источника ионизирующего излучения. Сюда и направлен поток ионов, вызывая уменьшение диаметра структур вблизи источника.

Разброс размеров частиц, флуктуации их зарядов и гидродинамическое движение среды служат серьезными препятствиями образования кристаллических пылевых структур. Поведение пылевых частиц существенно зависит от внешнего поля. Проведенные расчеты позволили объяснить различный характер поведения вихревого движения пылевых частиц в инертных газах и электроотрицательных газах. В последнем случае переданный ионами импульс всегда будет вызывать вихревое движение с таким направлением вращения, что частицы, расположенные вблизи оси экспериментальной ячейки, будут удаляться от радиоактивного источника.

Пылевые частицы могут оказывать значительное влияние на характер процессов в плазме. Поэтому необходимо развивать кинетические модели пылевой ядерно-возбуждаемой плазмы с учетом рекомбинации плазменных частиц на пылевых частицах.

Мы благодарны А. И. Чусову за помощь в проведении экспериментов, а также В. С. Филинову, А. П. Буднику и В. А. Жеребцову за обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-17620).

ЛИТЕРАТУРА

1. V. E. Fortov, A. P. Nefedov, V. M. Torchinsky et al., *Phys. Lett. A* **258**, 305 (1999).
2. В. Е. Фортов, В. И. Владимиров, Л. В. Депутатова и др., *ДАН* **366**(2), 184 (1999).
3. A. P. Budnik, Yu. V. Sokolov, and A. S. Vakulovskiy, *Hyperfine Interactions* **88**, 185 (1994).
4. В. А. Рыков, А. В. Худяков, В. И. Владимиров и др., *Тезисы докл. XV Междунар. конф. «Уравнения состояния вещества»*, Терскол (2000), ИПХФ РАН (2000), с. 175.
5. О. М. Белоцерковский, И. Е. Захаров, А. П. Нефедов и др., *ЖЭТФ* **115**, 819 (1999).
6. И. А. Белов, А. С. Иванов, Д. А. Иванов и др., *ЖЭТФ* **117**, 105 (2000).
7. И. А. Квасников, *Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем*, Изд-во МГУ, Москва (1991).
8. Л. Хаксли, Р. Кромптон, *Диффузия и дрейф электронов в газах*, Мир, Москва (1976).
9. И. Мак-Даниель, Э. Мэзон, *Подвижность и диффузия ионов в газах*, Мир, Москва (1976).
10. В. Е. Голант, А. П. Жилинский, И. Е. Сахаров, *Основы физики плазмы*, Атомиздат, Москва (1977).