

УДК 535.32

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ЭФФЕКТА АНОМАЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ

А. Я. Симонов

Проведены экспериментальные исследования диэлектрических свойств заряженных аэрозольных образований как в лабораторных условиях, так и в свободной атмосфере. Измерена диэлектрическая проницаемость аэрозольной смеси с точностью до шестого знака после запятой. Оценена эффективная поверхность рассеяния аэрозольного облака заряженных диэлектрических частиц. Анализ полученных результатов показал определяющую роль эффекта аномального рассеяния излучения заряженными частицами в процессе их взаимодействия с электромагнитным полем.

Хорошо известно, что при взаимодействии электромагнитного поля с аэрозольными диэлектрическими частицами последние рассеивают излучение очень слабо (максимально сечение рассеяния на одну частицу может достигать геометрического). Заряженные же аэрозольные образования могут рассеивать излучение на много порядков сильнее (например, мощное отражение радиоволн грозowymi облаками, рассеяние радиоволн заряженными частицами межзвездной пыли и др.). Как известно, статический заряд на частицах не приводит к дополнительному усилению рассеяния электромагнитных волн. Эффект усиления может возникнуть только в результате движения носителей заряда в частице. Попытка теоретически рассчитать этот эффект была предпринята в [1]. Экспериментальных наблюдений указанного эффекта до сих пор не произошло.

Лабораторные исследования процессов взаимодействия излучения, особенно в СВЧ диапазоне спектра, с заряженными аэрозольными частицами очень сложны. Дело в том, что современная лабораторная радиолокационная аппаратура имеет совершенно недостаточную чувствительность и использовать ее для изучения диэлектрических свойств аэрозольных образований практически невозможно. Это легко видно из анализа приближенной формулы для сечения рассеяния аэрозольного облака

$$\sigma_{\text{обл}} = \sigma_{\text{геом}} \left[(\sqrt{\epsilon_{\text{см}}} - 1) / (\sqrt{\epsilon_{\text{см}}} + 2) \right]^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{геом}}$ — геометрическое сечение облака, $\epsilon_{\text{см}}$ — диэлектрическая проницаемость облака (аэрозольной смеси). Так как $\epsilon_{\text{см}}$ очень близка к единице, то выражение в скобках в правой части формулы (1) близко к нулю (а точнее, составляет величину порядка 10^{-4} — 10^{-5}). Реальный размер аэрозольного облака, которое можно создать в лабораторных условиях, — 10^3 — 10^4 см². Таким образом, сечение рассеяния аэрозольного облака оказывается слишком малым, чтобы его можно было измерить каким-либо современным лабораторным радиолокационным прибором. Поэтому нами был использован другой способ изучения диэлектрических свойств аэрозольного облака, а именно: непосредственное измерение диэлектрической проницаемости аэрозольной смеси $\epsilon_{\text{см}}$.

Как известно, диэлектрическая проницаемость смеси, состоящей из незаряженных диэлектрических частиц, взвешенных в какой-либо среде (например в воздухе), определяется по следующей формуле:

$$\epsilon_{\text{см}} = \epsilon_0 + Cf(\epsilon, \epsilon_0), \quad (2)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость среды, ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества частицы, $f(\epsilon, \epsilon_0)$ — величина порядка единицы, зависящая от ϵ_0 и ϵ , C — объемная концентрация частиц. Эта формула представляет собой разложение в ряд величины $\epsilon_{см}$ по параметру C , в котором учтена только поправка первого порядка. Таким образом, изменение диэлектрической проницаемости среды за счет взвешенных в ней частиц определяется объемной концентрацией последних (при условии, конечно, что частицы аэрозоля не имеют собственных частот, лежащих вблизи частоты внешнего поля). При этом возникает необходимость создавать большие концентрации частиц аэрозоля, чтобы перейти за пределы минимальной чувствительности измеряющей $\epsilon_{см}$ аппаратуры. Задача создания очень плотного аэрозольного образования сама по себе очень сложна, и, кроме того, такие образования не представляют большого практического интереса. Однако нас интересует исследование заряженных аэрозольных образований, которые могут иметь в спектре рассеяния и поглощения электромагнитного излучения специфические резонансы, связанные с собственными колебаниями двумерного электронного газа на поверхности частицы. Подробно процесс взаимодействия внешнего поля с заряженной диэлектрической частицей был рассмотрен в работе [1], где было вычислено сечение упругого рассеяния поля на модельной заряженной частице. В предположении, что избыточные электроны могут свободно перемещаться по поверхности частицы, может быть найдена дипольная поляризуемость заряженной частицы α , через которую легко выражается сечение рассеяния σ_s :

$$\sigma_s = 8\pi\omega^4 |\alpha|^2 / 3c^4.$$

Подробности вычисления α могут быть найдены в [1], окончательный же результат есть

$$\sigma_s = \frac{8\pi\omega^4 a^6}{3c^4} \left\{ 1 + \frac{3}{\epsilon + 2} \frac{\omega^4}{(\omega^2 - \omega_\epsilon^2)^2 + \omega_\epsilon^4 \gamma^2} \left[\frac{3}{\epsilon + 2} + 2 \frac{\omega^2 - \omega_\epsilon^2}{\omega^2} \right] \right\}, \quad (3)$$

где a — радиус сферической диэлектрической частицы, ϵ — диэлектрическая проницаемость вещества частицы, $\omega_\epsilon = \sqrt{2Ze^2/(\epsilon+2)ma^3}$ — частота дипольного плазменного резонанса в частице, Z — избыточный заряд частицы, e , m — заряд и масса электрона, $\gamma = \pi(ma^2\omega^2/2kT)^2 \times \exp(-ma^2\omega^2/2kT)$ — ширина дипольного плазменного резонанса, k — постоянная Больцмана, T — температура, c — скорость света. Из выражения (3) видно, что сечение носит отчетливо резонансный характер. Характерные частоты резонанса соответствуют радиоволнам от сантиметрового до миллиметрового диапазона в зависимости от отношения Z/a^3 . При $Z=100$, $a=1$ мкм, $\epsilon=2$ резонансная длина волны $\lambda=1,6$ см, при $Z=10^4$, $a=1$ мкм, $\epsilon=2$ — $\lambda=1,6$ мм. При надлежащем выборе Z , a и T из-за малости $\gamma(\omega_\epsilon)$ резонансное сечение рассеяния может на много порядков превышать соответствующее рэлеевское значение ($\sigma_{рэл} = 8\pi\omega^4 a^6 / 3c^4$). Например, при $Z=20$, $a=1$ мкм, $T=300$ К, $\epsilon=2$ (длина резонансной волны $\lambda=3,7$ см) $\sigma_s/\sigma_{рэл} = 2,5 \cdot 10^{16}$ ($\sigma_{рэл} \sim 10^{-26}$ м², $\sigma_s \sim 10^{-10}$ м²). Таким образом, избыточный заряд на частице может приводить в районе плазменного резонанса к заметному увеличению сечения упругого рассеяния электромагнитных волн. Величина фактора усиления может оказаться очень большой, хотя при его оценке (см. [1]) не учитывался целый ряд эффектов, которые приводят к его уменьшению (межэлектронные столкновения, столкновения с дефектами на поверхности, электрон-фононные процессы и т. п.). В настоящее время учет всех этих эффектов практически невозможен, поскольку почти ничего не известно об устройстве поверхностного слоя заряженной диэлектрической частицы. Кроме того, все приведенные выше оценки относились к модели сферической диэлектрической частицы, обладающей тем свойством, что избыточные электроны

на ней могут свободно перемещаться по поверхности. В реальных условиях мы, как правило, имеем дело с частицами неправильной формы и ничего не знаем о возможности свободного перемещения электронов, поэтому эффект резонансного рассеяния для реальных заряженных частиц может быть в какой-то степени «задавлен». Однако возможность его экспериментального наблюдения представляется весьма вероятной. Этот эффект приведет к значительному росту диэлектрической проницаемости заряженной аэрозольной смеси $\epsilon_{см}$, которая уже не будет описываться формулой (2) и может принимать достаточно большие для регистрации значения при существенно меньших концентрациях.

Для измерения диэлектрической проницаемости заряженной аэрозольной смеси $\epsilon_{см}$ использовался диэлькометр — устройство для изучения диэлектрических свойств веществ в СВЧ диапазоне спектра, основанное на регистрации смещения собственной частоты резонатора при введении в него диэлектрического образца [2]. Измерение осуществляется путем преобразования разности частот опорного резонатора и резонатора с образцом в длительность прямоугольных импульсов с последующей регистрацией их или среднего значения тока. Диэлькометр обладал следующими техническими характеристиками. 1) Диапазон измерения от 1 до 1,01. 2) Погрешность измерения ($\epsilon_{см} - 1$) не более 3%. 3) Чувствительность по $\epsilon_{см}$ не хуже 10^{-6} . 4) Рабочие частоты — 10 ГГц и 6 ГГц.

Условием получения корректных результатов при работе с диэлькометром является равномерное заполнение всего объема рабочего резонатора исследуемым аэрозолем. Для используемых в настоящей работе аэрозолей конденсационного типа это условие обеспечивалось за счет турбулентной диффузии.

Для генерации заряженных аэрозольных образований нами использовалась лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1. Реактор (2) изготовлен в виде стеклянного шара, что позволяет производить визуальное наблюдение за процессом образования и коагуляции аэрозоля. На реакторе предусмотрены специальные входы для реагентов (3), электродов (1) и отбора проб (7). Электрод (5) тщательно изолирован от реактора тефлоновой пробкой (4), сам реактор во избежание искрового пробоя ставится на изолирующую подкладку. Потенциал на электроде создается высоковольтным источником (6), с помощью которого можно варьировать напряжение от 5 до 50 кВ.

При включении установки рабочие вещества подаются в реактор через входы (3) либо под давлением из баллонов в виде сжиженных газов, либо посредством барботирования сухого очищенного воздуха через растворы компонентов. Попадая в реактор, рабочие вещества смешиваются, происходит их химическое взаимодействие с образованием конечного продукта в виде аэрозольной смеси. Последующая коагуляция аэрозольных частиц происходит в электростатическом поле электрода (5). Электрод выполнен в виде иглы, либо имеет неправильную форму с множеством остриев по всему объему реактора.

На описанной выше установке получался заряженный аэрозоль хлористого аммония (NH_4Cl) из различных компонентов (летучие амины + хлористый водород). Аэрозоль хлористого аммония является обычным модельным аэрозолем, широко используемым как в лабораторной практике, так и при постановке натуральных атмосферных экспериментов.

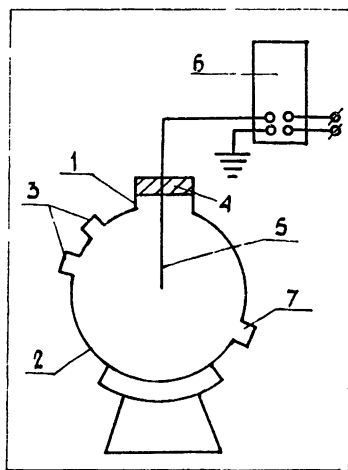


Рис. 1.

В табл. 1 представлены типичные результаты измерения диэлектрической проницаемости заряженной аэрозольной смеси ($\epsilon_{см}$) на основе хлористого аммония. Измерения проводились на частоте 10 ГГц. Значения ($\epsilon_{см}-1$), как видно из табл. 1, по крайней мере на два порядка превышают расчетные значения, которые могут быть получены по формуле (2) (это легко видно, так как при весовой концентрации 2 г/м^3 объемная концентрация $C=2 \cdot 10^{-6}$). В качестве сравнительного или «опорного» эксперимента нами проводились также исследования незаряженных частиц хлористого аммония. При распылении порошка NH_4Cl в резонатор диэлькометра (при тех же весовых концентрациях, что и в экспериментах с заряженными частицами) прибор показывал отклонение $\epsilon_{см}$ от единицы лишь в пятом знаке после запятой.

Таблица 1

Диэлектрические проницаемости заряженных аэрозольных образований

Исходные реагенты	Сдвиг частоты, МГц	Диэлектрическая проницаемость	Весовая концентрация, г/м ³	Напряжение на электроде, кВ
Диэтиламин + HCl	3,82	1,000769	2	10
Диметиламин + HCl	3,64	1,000728	2	10
Дибутиламин + HCl	3,75	1,000750	2	10
$\text{NH}_3 + \text{HCl}$	5,2	1,001040	2	10
(из водных растворов)				
$\text{NH}_3 + \text{HCl}$	25	1,0050	5	10
(сжиженные газы)				

Лабораторный метод исследования диэлектрических свойств заряженных аэрозольных образований с помощью диэлькометра хотя и является достаточно чувствительным, однако не может в полном объеме характеризовать влияние заряда на процесс взаимодействия электромагнитного поля с заряженными частицами. Дело в том, что любые лабораторные исследования заряженных частиц сопряжены со значительными трудностями по их транспортировке и «содержанию» в определенном объеме. Заряженные частицы достаточно быстро диффундируют к стенкам окружающей их камеры (или канала, по которому их транспортируют), где возникает поверхностный заряд, искажающий как сам процесс зарядки, так и показания регистрирующей аппаратуры. Следует отметить, однако, что эти трудности сказываются лишь на точности расчета заряда индивидуальной частицы и приводят к необходимости постоянно измерять этот заряд, а также «очищать» тем или иным способом поверхности. Заряд, возникающий на поверхности рабочего резонатора диэлькометра при проведении измерений, уменьшает чувствительность прибора и тем самым может лишь уменьшить диэлектрическую проницаемость (измеряемую) заряженных аэрозольных образований. Поэтому нам представлялось весьма интересным исследование свойств заряженных образований в свободной атмосфере, где можно непосредственно измерять сечение рассеяния (отражения) облака. Так же как и в лабораторных исследованиях, в качестве модельного аэрозоля был выбран аэрозоль хлористого аммония.

Описанные ниже натурные эксперименты ни в коем случае не претендуют на количественную точность, а являются, естественно, качественными, оценочными, позволяющими лишь утверждать, что эффект резонансного рассеяния волн заряженными частицами оказывает существенное влияние на процесс их взаимодействия с электромагнитным излучением.

Для создания аэрозольного облака в свободной атмосфере использовался генератор, состоящий из двух баллонов, оборудованных диспергирующим коллектором. Один из баллонов заправлялся жидким хлористым водородом, другой — аммиаком. Давление в баллонах (60 кг/см^2) поддерживалось с помощью газообразного азота. Диспергирующий коллектор представлял собой эластичную полиэтиленовую

трубку, расположенную по спирали вокруг баллонов (или специального каркаса), с центральным электродом из нихромовой проволоки внутри и калиброванными (80—100 мкм) отверстиями на поверхности. Длина каждого коллектора — 20 м, расстояние между отверстиями — 3 мм. Питание электродов генератора осуществлялось от высоковольтного источника напряжения (10 кВ).

Генератор аэрозолей диспергировал рабочие жидкости, в результате чего образовывалось аэрозольное облако из частиц, несущих существенный электрический заряд, возникающий как за счет подзарядки от высоковольтного источника, так и за счет трибоэффекта. Наличие значительного заряда регистрировалось при помощи простейшего устройства, состоящего из осадительного электрода (из мелкоячеистой металлической сетки) и заземленного микроамперметра.

Диэлектрические свойства заряженного аэрозольного облака исследовались путем измерения эффективной поверхности рассеяния облака в СВЧ диапазоне спектра. Генератор аэрозолей помещался в рабочий объем измерительного поля радиолокатора, при этом размеры облака обычно составляли примерно 10^3 м³. В связи с невозможностью разделения сигналов, отраженных от генератора и облака, первоначально была проведена оценка уровня отражения от генератора аэрозолей. Эксперименты проводились при слабом ветре силой 1—2 м/с, направленном от радиолокационных станций вдоль линии визирования. При этом облако развивалось в струю с поперечным сечением 6—8 м. По протяженности в строб попало около 50 погонных метров струи. Все измерения проводились на радиолокационных установках, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн при различных поляризациях излучения. Анализ полученных в результате измерений диаграмм обратного отражения показал, что во время образования облака структура отраженных сигналов резко изменяется, приобретает шумовой характер, значительно расширяется спектр флуктуаций. Наиболее вероятной причиной такого резкого изменения структуры отраженных сигналов можно считать появление отражения от аэрозольного облака, соизмеримого по уровню с отражением от генератора (которое составляет от нескольких десятков до единиц квадратных метров для различных длин волн). Естественно, такие значения сечения рассеяния (отражения) никак не могут быть получены из формулы (1) при использовании формулы (2), т. е. речь может идти только об эффекте аномального резонансного рассеяния электромагнитного излучения заряженными аэрозольными частицами.

Таким образом показано, что проницаемость заряженных аэрозолей существенно больше, чем следующая из (2), справедливой для незаряженных аэрозольных смесей. Это дает основания полагать, что существенный вклад в процесс рассеяния волн заряженными аэрозольными образованиями вносит явление дипольного плазменного резонанса избыточных электронов на поверхности частицы (см. [1]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лушников А. А., Максименко В. В., Симонов А. Я., Сутугин А. Г. — Изв. вузов — Радиофизика, 1984, 27, № 6, с. 726.
2. Потапов А. А., Гудков О. И. — В сб.: Исследования в области физики твердого тела. — Иркутск, 1974, вып. 2, с. 91.

Научно-исследовательский
физико-химический

Поступила в редакцию
19 февраля 1986 г.

THE EXPERIMENTAL OBSERVATION OF THE EFFECT OF ABNORMAL RESONANT SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC FIELD BY CHARGED DIELECTRIC PARTICLES

A. Ya. Simonov

Laboratory-scale and real atmospheric experimental investigations of dielectric properties of charged aerosol are performed. The dielectric permeability of charged aerosol mixture is measured to within, 0,000001. The effective scattering surface of charged aerosol cloud is evaluated. The analysis of the results obtained pointed to decisive role of the abnormal resonant scattering effect in the process of electromagnetic field interaction with charged dielectric particles.