

ИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ С УЧАСТИЕМ ФРАКТАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Б.М. Смирнов

(Научное объединение "ИВТАН" РАН, Москва)

(Доклад на II Международной конференции "Фракталы в природе и в приложениях", в редакцию поступил 9.03.93 г. Сокращенный английский вариант статьи публикуется в "International Journal of Theoretical Physics")

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение (51).
 2. Фрактальные агрегаты в высокотемпературных процессах (51).
 - 2.1. Образование фрактальных агрегатов при испарении материалов.
 - 2.2. Излучение малых частиц и фрактальных агрегатов.
 - 2.3. Излучение пламени свечи.
 3. Фрактальные разряды (56).
 - 3.1. Особенности фрактальных разрядов.
 - 3.2. Разряд Пауэла—Финкелштейна.
 4. Фрактальная концепция шаровой молнии (60).
 - 4.1. Свойства шаровой молнии как светящегося объекта.
 - 4.2. Фрактальные модели шаровой молнии.
 5. Заключение (62).
- Список литературы (62).

1. Введение. Развитие фрактальных концепций в физике, начало которому положили замечательные книги Мандельброта [1, 2], наполнило многие направления физики новым содержанием. В результате исследований в этом направлении стало понятно, что конденсированное состояние вещества может представлять собой не только сплошную среду, но и иметь пористую фрактальную структуру, особенно, если процесс образования конденсированной системы протекает при неравновесных условиях. Поэтому фрактальные концепции считаются физическими концепциями XX в. (см., например, [3]).

Далее мы рассмотрим ряд задач, относящихся к физическим объектам с фрактальной структурой. Фрактальные свойства таких систем были предметом детальных исследований (см., например, книги и обзоры [4—16]). Одно из свойств фрактальных систем связано с их взаимодействием с электромагнитными волнами. Фрактальные системы, как правило, обладают более высокими удельными излучательными параметрами, чем сплошные системы. Далее, представлены два примера такого рода — излучение свечи и фрактальные разряды, и

показано, что образование фрактальных агрегатов в таких системах резко увеличивает мощность создаваемого в них излучения.

При этом отметим, что уровень экспериментального исследования рассматриваемых систем не отвечает уровню понимания протекающих в них процессов. Действительно, анализ на присутствие в них фрактальных агрегатов и измерение их параметров производится лишь в специальных случаях. Поэтому одна из главных задач данной статьи связана с привлечением внимания к этой стороне проблемы.

Наряду с излучением систем, содержащих простейшие фрактальные структуры — фрактальные агрегаты, кратко проанализирована и более сложная фрактальная структура — фрактальный клубок, обладающая рядом специфических свойств, в том числе и излучательных. Фрактальный клубок как физический объект был введен в качестве модели каркаса шаровой молнии. Однако, проявляя специфические физические свойства, в частности совокупность свойств газа, жидкости и твердого тела, этот объект имеет самостоятельное значение безотносительно к проблеме шаровой молнии.

2. Фрактальные агрегаты в высокотемпературных процессах.

2.1. Образование фрактальных агрегатов при испарении материалов. Общая схема образования фрактальных агрегатов в газовой фазе имеет следующий вид. Сначала в газ вносятся пары материала при воздействии высоких потоков энергии на поверхность. Далее, в процессе остывания и релаксации пара атомы и молекулы конденсируются, образуя в объеме кластеры, которые вырастают в макрочастицы. Если плотность

материала в объеме достаточно велика, объединение частиц продолжается и после того, как они стали твердыми, и приводит к образованию фрактальных агрегатов.

Свойства фрактальных агрегатов и характер процессов, протекающих при их образовании, обобщены в монографиях и обзорах [4–16]. Далее мы представим краткую информацию по этим вопросам, которой мы далее воспользуемся. Корреляционная функция для фрактального агрегата — связанной системы твердых частиц — имеет вид

$$\Phi(r) = \langle \rho(\mathbf{r}') \rho(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) \rangle / \langle \rho(\mathbf{r}') \rangle = Ar^{-\alpha}; \quad (1)$$

здесь $\rho(\mathbf{r})$ — плотность частиц в данной точке, усреднение $\langle \dots \rangle$ проводится по расположениям частиц в агрегате. Формула (1) означает, что если провести сферу радиуса r , центром которой является одна из частиц, подсчитать число частиц на сфере и проделать эту операцию много раз, меняя частицы в центре сферы, то средняя плотность частиц на сфере меняется по закону $r^{-\alpha}$ с изменением радиуса сферы r . Отсюда следует, что и средняя плотность частиц внутри сферы в трехмерном пространстве меняется по закону

$$\rho(r) \sim r^{-\alpha} \sim r^{D-3},$$

где $\alpha = 3 - D$, D — фрактальная размерность агрегата. Из приведенных формул следует, что фрактальный агрегат радиуса R содержит следующее число отдельных частиц:

$$n = (R/a)^D, \quad (2)$$

где a — средний радиус частицы.

Имеются разные способы получения фрактальных агрегатов (см. таблицу). Кратко остановимся на некоторых из них. В первом эксперименте Фореста и Виттена [17] фрактальные агрегаты образовывались в результате пропускания сильного электрического тока по проволоке, содержащей определенные компоненты. Испаренный материал охлаждался в процессе расширения в пространство, что и приводило к конденсации и, далее, к агрегации образующихся твердых частиц в кластеры. Средний радиус частиц в структуре составлял 3–4 нм, характерный размер агрегата — несколько микрон. Эта работа была первым экспериментальным исследованием фрактальных агрегатов и заложила методические основы анализа таких объектов.

Этот метод получения агрегатов был модифицирован в цикле работ [18–23], где фрактальные агрегаты в конечном итоге высаживались на поверхность и использовалась их высокая эффективность в поглощении теплового излучения. Проанализируем одну из работ этого цикла [23], где изучалось образование фрактальных агрегатов кобальта.

Малые частицы кобальта были получены в атмосфере аргона при испарении металла традиционным способом [18] с использованием нагретой вольфрамовой спирали в условиях конвекционного переноса пара. Давление аргона находилось в интервале 0,25–10 торр. Частицы металла, подобные саже, собирались на медной сетке, покрытой углеродом, и исследовались с помощью электронного микроскопа. Средняя толщина металлического осадка составляла 10–200 мкм, причем объем частиц кобальта в этом слое оценивался в 10^{-4} – 10^{-2} , т.е. осадок имел пористую структуру и основной его объем занимали поры. Средний радиус частиц в этих образованиях увеличивался с ростом давления аргона, фрактальная размерность образованных агрегатов составляла 1,75–1,9 при давлении аргона 0,9–8 торр, средний радиус частиц менее 8 нм. При давлениях аргона более 8 торр радиус частиц в агрегате превышал 8 нм, а фрактальная размерность агрегата составляла 1,9–2,05. Отметим, что фрактальная размерность агрегатов, образованных при испарении металла в инертный газ, несколько выше, чем в случае его испарения в вакууме.

Методы получения фрактальных агрегатов

Метод получения	Материал	Фрактальная размерность	Литература
Электрический взрыв проволоки	Fe, Zn, SiO ₂	1,60 ± 0,07	[17]
Нагревание вольфрамовой спирали в вакууме	Co, Ni, Al	1,80 ± 0,05	[18–23]
Лазерное облучение металлов	Al, Ti, Fe, Ag, Pt	1,82 ± 0,05	[24, 25]
Взрыв материала	C	1,9	[26]
Сжигание SiH ₄	SiO ₂	1,8 – 2,0	[27–29]

Другой метод получения фрактальных агрегатов использует облучение разных металлов лазерным излучением [24, 25]. Тогда вблизи поверхности образуется слабоионизованный пар металла, находящийся под высоким давлением (температура несколько тысяч градусов, давление несколько десятков атмосфер). Этот пар, расширяясь в пространство, охлаждается и конденсируется на ионах. Когда температура образующихся частиц становится ниже температуры плавления материала, частицы металла объединяются во фрактальные агрегаты. Эксперименты выполнены для разных металлов Al, Ti, Fe, Ag, Pt, в ряде буферных газов (воздух, аргон, гелий) и при разных давлениях порядка 1 атм. Качественный характер результатов при этом один и тот же.

Опыт получения фрактальных агрегатов показывает, что процесс их образования требует

относительно высоких потоков энергии, которые испаряют материал, переводя его в газ или пар высокой плотности. Последующая релаксация пара, связанная с его расширением и охлаждением, приводит к образованию фрактальных агрегатов. Для этой цели могут быть использованы разные виды энергии. В частности, в работе [26] фрактальные агрегаты углерода образовывались в результате взрыва углеродсодержащих материалов. Средний радиус частиц в структуре был равен 3 нм, средний радиус фрактальных агрегатов 20 нм, их фрактальная размерность составляла примерно 1,9.

Фрактальные агрегаты могут быть получены при сжигании смеси в газовой среде, если в пламени и вблизи него обеспечиваются условия конденсации и образования твердых частиц. Этот метод используется при сжигании Si Cl₄ в водородо-кислородном пламени [27–29]. Образующий при этом порошок содержит фрактальные агрегаты, состоящие из ~ 10³ частиц радиуса 8–10 нм. Фрактальные размерности агрегатов находится в интервале 1,8–2,0. Интересно, что и сами частицы, входящие в состав фрактальных агрегатов, имеют внутреннюю структуру. Это устанавливается измерением удельной поверхности агрегатов [29], которая в 1,8–3,0 раз превышает удельную поверхность частиц, если их считать сплошными.

Поскольку с ростом размера фрактального агрегата падает его плотность, одновременно падает и его прочность [30]. Как правило, максимальный размер фрактальных агрегатов составляет микроны, а максимальное число частиц в нем ~ 10⁴.

2.2. Излучение малых частиц и фрактальных агрегатов. Рассмотрим излучение горячего газа, содержащего малые частицы. Для простоты будем считать эти частицы сферическими. Кроме того, для используемой области спектра — оптической и инфракрасной и рассматриваемых размеров частиц заведомо выполняется условие малости размера частиц по сравнению с длиной волны излучения λ

$$\lambda \gg r_0, \quad (3)$$

где r_0 — характерный размер частиц.

Сечение поглощения фотона малой сферической частицы радиуса r равно [31]

$$\sigma_{\text{погл}}(\omega) = \frac{12\pi\omega r^3 \epsilon''}{c[(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2]}, \quad (4)$$

где $\omega = 2\pi c/\lambda$ — частота электромагнитной волны, c — скорость света, ϵ' , ϵ'' — действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости материала частицы. Представим сечение поглощения электромагнитной волны в виде [31]

$$\sigma_{\text{погл}} = \pi r^2 \frac{r}{\lambda} f(\omega), \quad (5)$$

где $f(\omega) = 12\epsilon''[(\epsilon' + 2)^2 + \epsilon''^2]^{-1}$. Перейдем отсюда к спектральной мощности излучения p_ω , которая в соответствии с законом Кирхгофа, устанавливающим связь между скоростями процессов излучения и поглощения, равна [31]

$$p_\omega = c\sigma_{\text{погл}}(\omega)U(\omega)/4, \quad (6)$$

где $U(\omega)$ — спектральная плотность черного излучения, т.е. энергия, приходящаяся на единицу объема и единичный интервал частот:

$$U(\omega) = \hbar\omega^3/\pi^2c^3[\exp(\hbar\omega/T) - 1]. \quad (7)$$

Считая частотную зависимость для диэлектрической проницаемости слабой, определим отсюда полную мощность излучения малой частицы [32, 34]:

$$P_{\text{изл}} = \int I(\omega)d\omega = 4\pi r^3 f(\omega_0)k\sigma T^5/\hbar c; \quad (8)$$

здесь σ — постоянная Стефана—Больцмана, ω_0 — эффективная частота излучения и параметр k равен

$$k = \int_0^\infty x^4(e^x - 1)^{-1}dx \left[\int_0^\infty x^3(e^x - 1)^{-1}dx \right]^{-1} = 3,83.$$

Выбранный способ представления мощности излучения частицы позволяет сравнить ее с мощностью излучения абсолютно черной частицы $P_0 = 4\pi r^2\sigma T^4$. Как видно,

$$P_{\text{изл}}/P_0 = kfrT/\hbar c = 3,02fr/\lambda_m, \quad (9)$$

т.е. это отношение пропорционально малому параметру $(3)r/\lambda_m$ и длина волны $\lambda_m = 1,27\hbar c/T = 0,29$ см·К/Т согласно закону Вина отвечает максимальной спектральной мощности излучения для абсолютно черного тела. Отметим, что энергия фотона, отвечающая максимуму спектральной мощности излучения малой частицы, несколько (в 1,2 раза) превышает максимальную энергию фотона для черного излучения при данной температуре.

Проанализируем полученный результат с точки зрения излучения горячего газа, содержащего малые частицы. Существенно, что мощность излучения пропорциональна объему частицы. Это означает, что мощность излучения из единицы объема пропорциональна массе частиц, приходящейся на единицу объема, и не зависит от распределения частиц по размерам. Поэтому для определения мощности излучения из единицы объема достаточно использовать массу вещества, находящегося в объеме в виде больших кластеров.

Далее, для оценки мощности излучения плазмы будем использовать спектральные параметры сажи

[33]. В этом случае [32, 34] $f = 0,9 \pm 0,1$ (отметим, что если формально считать $\epsilon', \epsilon'' \geq 0$, то максимальное значение параметра $f(\omega)$ составляет $f = 3$ и отвечает $\epsilon' = 0, \epsilon'' = 2$). При этом указанная ошибка характеризует изменение данного параметра в оптической области частот. Соответственно мощность излучения, приходящаяся на единицу объема излучающих частиц, дается формулой [32, 34]

$$J_{\text{изл}}/V = \gamma T^5, \quad (10)$$

где V — объем излучающего материала, который находится в состоянии частиц-кластеров, и параметр γ для сажи равен

$$\gamma = 2,5 \pm 0,2 \text{ Вт/см}^3\text{К}^5. \quad (11)$$

Используем полученное соотношение для оценок. Выясним, какой вклад в баланс энергии кластеров вносит излучение. Для этого напишем уравнение баланса энергии для единицы объема плазмы, связанное с уходом излучения, в виде

$$C_p \frac{dT}{dt} = -J_{\text{изл}} = -C_p T \tau_{\text{изл}}^{-1}. \quad (12)$$

Определенное таким способом $\tau_{\text{изл}}$ в соответствии с формулами (10), (11) равно $\tau_{\text{изл}} = C_p/4\gamma T^4$. Сравнивая его с наблюдаемыми временами теплоотвода, можно определить вклад излучения в тепловой баланс горячего газа.

Перейдем к излучению фрактальных агрегатов. Естественно, этот процесс сложнее, чем излучение отдельных частиц, и в рассматриваемом далее случае, когда размер фрактального агрегата меньше длины волны электромагнитного излучения, зависит от факторов, включающих тип материала, а также характер взаимодействия между частицами и между атомами внутри частиц. Выбор этих факторов определяет теоретические модели [36—43], описывающие этот процесс, и приводит к ряду интересных явлений при взаимодействии излучения с фрактальными агрегатами [41—43]. Далее мы используем простую и грубую модель для поглощения излучения фрактальными агрегатами. Поэтому получаемые результаты для этих процессов будут носить качественный характер. Суть используемой модели сводится к тому, что граничные условия для электромагнитной волны, рассеиваемой фрактальным агрегатом, являются теми же, что и для малой сферической частицы. Тогда сечение поглощения электромагнитной волны фрактальным агрегатом, размер которого R_0 мал по сравнению с длиной волны излучения $R_0 \ll \lambda$, определяется формулой (4)

$$\sigma_{\text{погл}} = \frac{\pi c}{\omega} R_0^3 f(\omega). \quad (13)$$

Соответственно, полная мощность излучения отдельного фрактального кластера определяется формулой (8)

$$P_{\text{изл}} = 4\pi R_0^3 f(\omega_0) \sigma T^5 / \hbar c, \quad (14)$$

где σ — постоянная Стефана—Больцмана. Как видно из сравнения формул (8) и (14), для излучения фрактальных агрегатов и излучения частиц радиуса r , из которых составлен фрактальный агрегат, мощность излучения фрактального агрегата, приходящаяся на единицу массы, в $(R_0/r)^{3-D}$ раз больше, чем мощность излучения отдельной частицы. Таким образом, сборка твердых частиц — аэрозолей во фрактальный агрегат приводит к существенному возрастанию выхода излучения.

2.3. Излучение пламени свечи. Известно, что излучение пламени определяется присутствующими в нем твердыми частицами (см., например, лекции Фарадея [44]). Далее, мы проанализируем излучательные параметры пламени свечи, основываясь при этом на измерениях, выполненных в Петрозаводском государственном университете [45, 46]. При этом будем считать, что излучающими частицами являются сажеуглеродные частицы, образующиеся при неполном сгорании углеводов на некоторой стадии процесса горения. Тогда, сравнивая результаты расчета и эксперимента, можно определить эффективность и характер образования сажи в пламени свечи.

Упрощающий фактор при анализе излучения пламени связан с тем, что спектральная мощность излучения P_ω пропорциональна массе излучающих частиц и не зависит от их распределения по размерам, если излучение создается частицами, а не структурами. Поэтому, встав на точку зрения, что излучение создается находящимися в пламени твердыми частицами, можно определить излучательные параметры пламени и сравнить их с экспериментальными данными.

Спектральная мощность излучения сферической твердой частицы радиуса r , приходящаяся на единицу объема, равна в соответствии с формулой (6)

$$P_\omega = j_\omega \sigma_{\text{погл}}(\omega), \quad (15)$$

где

$$j_\omega = \hbar \omega^3 [\exp(\hbar \omega / T) - 1]^{-1} / 4\pi^2 c^2$$

— спектральный поток излучения для абсолютно черного тела, $\sigma_{\text{погл}}(\omega)$ — сечение поглощения электромагнитной волны частицей (4).

Представим распределение температуры пламени в горячей зоне в виде

$$T = T_0 - \alpha r^2, \quad (16)$$

где T_0 — температура самой горячей точки, r — расстояние до нее. При вычислении спектральной мощности излучения в оптической области спектра используем наличие малого параметра $T/\hbar\omega$, где $\hbar\omega$ — энергия фотона. Реально $T/\hbar\omega \sim 0,1$. При этом наиболее сильная зависимость мощности излучения от температуры определяется фактором $\exp(-\hbar\omega/T)$. Учитывая это, получим для спектральной мощности излучения

$$P_\omega = \int N p_\omega dr = N p_\omega(T_0) \int \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{T_0^2} \alpha r^2\right) dr = N p_\omega(T_0) \left(\frac{\pi T_0^2}{\hbar\omega\alpha}\right)^{3/2}, \quad (17)$$

где N — плотность частиц сажи. Спектральный поток излучения составляет

$$I_\omega = \int \frac{N p_\omega dr}{4\pi r^2} = \frac{N p_\omega(T_0)}{4} \left(\frac{\pi T_0^2}{\hbar\omega\alpha}\right)^{1/2}. \quad (18)$$

Эффективная площадь S_ω пламени равна

$$S_\omega = \frac{P_\omega}{I_\omega} = 4\pi \frac{T_0^2}{\hbar\omega\alpha}. \quad (19)$$

Таким образом, в соответствии с формулами (3), (15), (17) имеем для спектральной мощности излучения пламени

$$P_\omega = N p_\omega \left(\frac{S_\omega}{4}\right)^{3/2} = N r^3 \frac{\pi f_\omega}{\lambda} j_\omega \left(\frac{S_\omega}{4}\right)^{3/2}. \quad (20)$$

Основными параметрами, определяемыми из эксперимента, являются спектральный поток излучения I_ω и спектральная мощность излучения P_ω . Для измерения спектрального потока излучения исследуемая точка пламени помещается в фокус оптической системы (рис. 1), а для измерения спектральной мощности излучения детектор помещается на большом расстоянии от пламени и в него собирается излучение с известного телесного угла. Предположение об изотропности излучения, которое нетрудно проверить перемещением детектора, позволяет найти отсюда спектральную мощность излучения. Созданная в Петрозаводском государственном университете спектральная техника позволяла определять абсолютные значения данных параметров. Далее, на основании частотной зависимости этих параметров (например, $I_\omega \sim \omega^{7/2} \exp(-\hbar\omega/T)$) можно определить температуру наиболее горячей точки пламени.

Наряду с указанными использовался дополнительный способ определения температуры пламени. В него добавлялась поваренная соль, и в результате ее разложения в пламя попадали атомы натрия, создававшие черное излучение вблизи центров линий резонансных переходов (длина волны

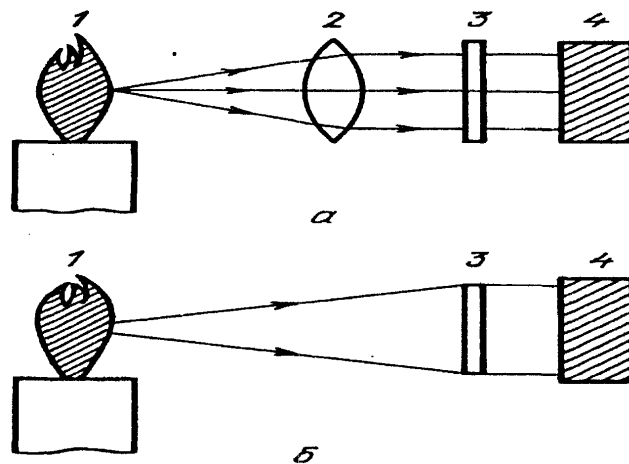


Рис. 1. Схематический вид измерения спектральных параметров пламени свечи. а — Измерение спектральной плотности потока излучения. б — Измерение спектральной мощности излучения пламени. 1 — пламя свечи, 2 — линза, фокус которой находится в исследуемой точке пламени, 3 — селектор излучения по длинам волн, 4 — коллектор излучения

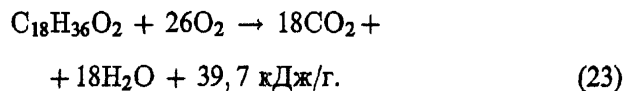
$\lambda = 589,592$ и $588,995$ нм). Поскольку максимальные потоки излучения отвечали абсолютно черному телу, отсюда можно было определить температуру горячей области. Совокупность указанных измерений дала для максимальной температуры пламени значение [45, 46]

$$T_0 = 1800 \pm 50 \text{ К}. \quad (21)$$

Кроме того, из этих измерений найдены следующие значения параметров: эффективная площадь поверхности пламени в зеленой части оптического спектра $S_\omega = 2,6 \pm 0,5$ см², параметр $\alpha = 600 \pm 150$ К/см², параметр в формуле (9)

$$N r_0^3 = 6 \cdot 10^{-5 \pm 0,3}. \quad (22)$$

К оптическим параметрам пламени следует добавить химические, которые связаны с характером процесса горения, протекающего по схеме



В оптимальном режиме горения, которое соответствует оптимальному соотношению между горючим и окислителем, на 1 грамм стеарина приходится 14 грамм воздуха. Максимальная температура продуктов процесса отвечает оптимальному составу горячей смеси и предположению, что на нагревание продуктов тратится вся химическая энергия горючего. Она составляет 2500 К. Как следует отсюда и из формулы (21), на излучение может тратиться не более 30 % химической энергии свечи.

Проверим справедливость использованного предположения о прозрачности пламени. Имеем, что отношение измеренного спектрального потока излучения J_ω к спектральному потоку абсолютно

черного тела при максимальной температуре пламени j_ω составляет

$$\tau = I_\omega / j_\omega = (\lambda_0 / \lambda)^{1/2}, \quad (24)$$

причем согласно измеренным значениям параметров $\lambda_0 = 20 \text{ нм} \cdot 10^{\pm 0,6}$. В частности, для зеленой области спектра это соответствует оптической толщине пламени $\tau = 0,2 \cdot 10^{\pm 0,3}$, что подтверждает использованное предположение о прозрачности пламени. Далее, значение максимальной температуры пламени (21) и измеренные значения параметров приводят при оптимальных условиях горения к следующему значению плотности углерода в саже, если она состоит из частиц:

$$\rho_c = (1,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{ г/см}^3. \quad (25)$$

Считая, что плотность углерода в саже такая же, как и в графите ($2,1 \text{ г/см}^3$), получим отсюда

$$Nr^3 = (1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} \xi. \quad (26)$$

Сравнивая это с величиной (22), которая следует из значений измеренных параметров, получаем долю углерода, содержащегося в саже:

$$\xi = 4 \cdot 10^{\pm 0,4}. \quad (27)$$

Как видно, мы пришли к противоречию, и единственный способ его преодолеть отвечает предположению, что сажа находится не в состоянии отдельных частиц, а в состоянии фрактальных агрегатов. Такая ситуация наблюдалась в пламени [47] и далее мы проведем оценки, используя параметры фрактальных агрегатов, полученных в работе [26] в результате взрыва углеродсодержащих соединений. Эти параметры следующие: $r_0 = 3 \text{ нм}$, $R = 20 \text{ нм}$, $D = 1,9$. Как следует из формулы (14), образование фрактальных агрегатов приводит к увеличению мощности излучения, приходящейся на единицу массы в $(R/r_0)^{3-D}$ раз. Этот фактор в данном случае равен 9, так что доля сажи в углероде пламени с учетом процесса образования фрактальных агрегатов и при оптимальных условиях горения составляет

$$\xi = 40 \% \cdot 10^{\pm 0,4}, \quad (28)$$

что уже не содержит противоречия. Таким образом, фрактальная концепция пламени приводит в соответствие измеренные значения параметров с рассчитанными и требует более детального анализа состава пламени.

3. Фрактальные разряды.

3.1. Особенности фрактальных разрядов. Газовый разряд, в котором образуются фрактальные кластеры (или фрактальные агрегаты), будем называть для краткости фрактальными разрядами. Такие разряды характеризуются отно-

сительно высоким выходом излучения. Отметим особенность фрактальных разрядов. С одной стороны, они требуют высоких токов на электрод, что приводит к эффективному разрушению электрода и выбрасыванию его материала в виде расширяющегося слабоионизованного пара в область разряда. Из этого пара далее образуются частицы-кластеры, а их объединение дает фрактальные агрегаты или фрактальные кластеры. С другой стороны, температура в области разряда не должна превышать температуру плавления частиц, иначе фрактальные агрегаты не смогут существовать. Эти некоторым образом противоречивые условия определяют параметры существования фрактальных разрядов.

Очевидно, указанные условия могут быть реализованы в импульсном дуговом разряде, в котором момент испарения материала и момент образования фрактальных агрегатов разделены. Продолжительность существования разряда должна превышать время образования фрактальных агрегатов, т.е. длительность фрактальных разрядов должна превышать миллисекунды.

Основная особенность фрактальных разрядов связана с высоким выходом излучения из разряда. В отличие от обычных разрядов, где излучение определяется возбуждениями атомов и молекул в плазме, создаваемыми при столкновениях с электронами, или определяется другими процессами столкновений с участием электронов, послесвечение фрактальных разрядов создается средой, в которой электроны отсутствуют. Поэтому время свечения таких разрядов значительно превышает время рекомбинации электронов и ионов, т.е. значительно больше времени послесвечения обычных разрядов.

Как видно, совокупность процессов, необходимых для реализации фрактального разряда, включает в себя испарение материала электродов и попадание их в горячую зону разряда. Тогда после выключения электрического тока разряда из этого пара образуются фрактальные агрегаты, которые обеспечивают высокий выход излучения из горячей зоны разряда, пока она не остыла. Эти общие требования могут быть выполнены при разных способах возбуждения разряда. Это относится к СВЧ разряду [48, 49], электрическому пробую воздуха и газа [50–53], мощному дуговому разряду [54–62], радиочастотному разряду [63, 64], подводному электрическому пробую [65–67], коронному разряду и т.д. Во всех представленных случаях возбуждения газового разряда выполняются условия образования фрактальных агрегатов в

послесвечении разрядов, что обеспечивает высокий выход излучения из горячей области разряда.

Отметим особенность экспериментов, относящихся к фрактальным разрядам. Ни в одном из них не было проведено анализа на присутствие в разряде фрактальных агрегатов. Кроме того, в большинстве из них экспериментальный анализ разряда является односторонним, что ограничивает возможности их анализа. Обычно в силу высокого выхода излучения и отсутствия внешнего источника энергии фрактальные разряды используются как аналог шаровой молнии. Однако время жизни шаровой молнии значительно превышает время свечения фрактальных разрядов. Тем самым указанная аналогия ограничена, и фрактальные разряды следует рассматривать безотносительно к шаровой молнии.

3.2. Разряд Пауэла—Финкелстейна. Среди исследований фрактальных разрядов особое место занимает эксперимент Пауэла и Финкелстейна [48] в силу многостороннего и детального анализа, выполненного в этом эксперименте. Хотя этот эксперимент был выполнен задолго до появления концепции фрактального агрегата, в силу большой информации, полученной в нем, эксперимент Пауэла и Финкелстейна поможет проверить справедливость этой концепции косвенными методами. Далее рассмотрим эксперимент Пауэла и Финкелстейна [48].

В этом эксперименте для возбуждения газового разряда использовался генератор электромагнитного поля на частоте 75 МГц. Разряд возбуждался в трубке из пирекса диаметром 15 см при давлении воздуха от 0,5 до 3 атм. При более низких давлениях длительность свечения резко сокращается с уменьшением давления. Если разрядная трубка была соединена с большим объемом, позволяющим сохранять постоянное давление при включении и выключении разряда, то свечение продолжалось до 1 с после прекращения разряда. Если разряд зажигался в открытом воздухе, он длился вдвое меньше. Устойчивое свечение наблюдалось как в воздухе, так и в азоте, кислороде, закиси азота.

Важный результат связан с ролью электродов, в качестве которых были использованы различные металлы, причем устойчивое свечение отвечает тугоплавким металлам Pt, Ag, Au, Cu, Zn, Cd, C, Sn, W, Al. Было установлено, что при использовании в качестве электродов таких легко испаряемых материалов, как Hg и Pb, длительность свечения не превышает 50 мс. Поскольку влияние электродов проявляется после выключения разряда, отсюда

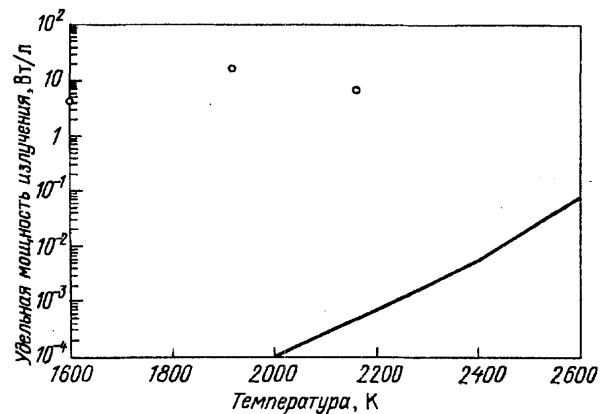


Рис. 2. Температурная зависимость удельной мощности излучения атмосферного воздуха (сплошная кривая) и остывающего воздуха в послесвечении разряда Пауэла—Финкелстейна [48] (кружки)

следует, что именно материал электрода создает это свечение.

Температура в области свечения составляет 2000—2500 К, что было измерено по электрическому сопротивлению тонкой вольфрамовой нити, находящейся в области свечения. Следует отметить, что при этих температурах фрактальные агрегаты могут существовать только в случае платины и вольфрама. Температура плавления других материалов значительно ниже этих температур. Однако следует учесть, что температура плавления окислов большинства использованных материалов выше указанной, т.е. окислы этих материалов могут образовывать фрактальные агрегаты.

Еще одна особенность рассматриваемого свечения связана с сортом газа, в котором протекает процесс. Для буферных газов CO₂ или Ar свечение подобно свечению в дуге и длится порядка секунды после выключения разряда. Свечение в азоте слабое и голубое. По мере добавления кислорода интенсивность свечения увеличивается, и в воздухе оно имеет умеренную интенсивность и желто-белый цвет. В чистом кислороде оно становится ярким и белым. Наиболее сильное свечение происходило при использовании N₂O в качестве буферного газа. Тогда свечение имело слабо оранжевый цвет, максимальную интенсивность и длилось до 2 с.

На рис. 2 мощность излучения, выходящего из 1 л воздуха в области длин волн 0,4—1,1 мкм, сравнивается с равновесным излучением воздуха при рассматриваемой температуре. Как видно, равновесное излучение кислорода не вносит вклада в наблюдаемое излучение. На рис. 3 представлена зависимость от времени для видимого (длина волны 0,7—1,1 мкм) и инфракрасного (длина волны 0,7—1,1 мкм) излучения. Отметим, что согласно

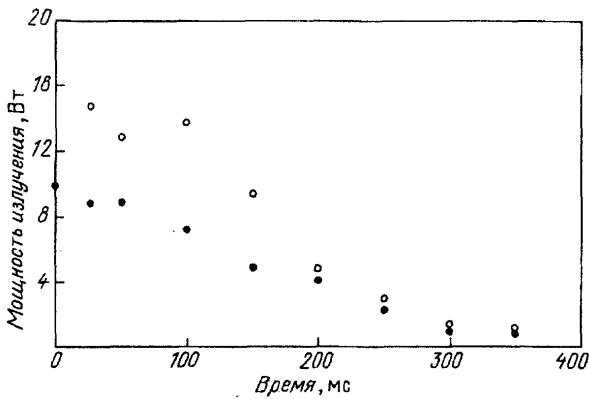


Рис. 3. Временная зависимость мощности излучения разряда Пауэла—Финкелштейна [48] в послесвечении для видимой (0,4–0,7 мкм) (светлые кружки) и инфракрасной (0,7–1,1 мкм) областей спектра излучения (темные кружки). Измерения относятся к платиновым электродам и воздуху при атмосферном давлении в качестве разрядного газа

закону Вина максимум черного излучения при температуре 2000 К соответствует длине волны 1,5 мкм. Спектральные свойства рассматриваемой системы свидетельствуют о смещении этого максимума в синюю сторону.

Проанализируем результаты, полученные Пауэлом и Финкелштейном. Будем считать, что излучение создается частицами или структурами, которые образуются в горячей зоне из атомов материала, испаряемого с электродов. При этом на основе используемой информации мы не можем сделать выбор между этими вариантами. Сделаем оценки для обоих случаев, считая, что излучение создается отдельными частицами-кластерами или состоящими из них фрактальными агрегатами, используя для частиц излучательные параметры сажи $f(\omega) = 0,9$.

Оценим сначала вклад излучения в баланс энергии рассматриваемой системы. Пусть остывание воздуха связано с выходом из объема излучения, создаваемого малыми частицами — кластерами. Оценим время остывания объема. Из уравнения теплового баланса (12) имеем $\tau_{изл} = C_p T / 4J_{изл}$. Принимая в соответствии с экспериментом $J_{изл} \sim 10$ Вт/л, $T = 2000$ К, получим $\tau \sim 10$ с. Согласно эксперименту кривые для временной зависимости мощности излучения аппроксимируются экспоненциальными зависимостями с временной константой 0,2–0,3 с. Таким образом, в этом случае на излучение тратится малая часть тепловой энергии воздуха. Проведенная оценка показывает, что в принципе можно создать конструкцию разряда с малыми тепловыми потерями с временными константами вплоть до 10 с.

Оценим количество испаренного материала, которое обеспечивает наблюдаемую мощность

излучения $J_{изл} \sim 10$ Вт/л при температуре $T = 2000$ К. Если излучающее вещество (платина) находится в виде частиц-кластеров, получим, что концентрация платины в виде отдельных частиц, которая обеспечивает наблюдаемый выход излучения, должна составлять $\sim 10^{-4}$ г/г (грамм платины на грамм воздуха), т.е. в 1 литре воздуха должно содержаться примерно 30 мкг платины. Отметим, что излучающий объем является оптически прозрачным. Действительно, наблюдаемая мощность излучения 10 Вт, приходящаяся на 1 л воздуха, излучается с поверхности абсолютно черного тела с температурой 2000 К, площадь которой составляет $\approx 0,1$ см².

Допустим теперь, что излучающие частицы объединяются во фрактальные агрегаты. Тогда мощность излучения, приходящаяся на единицу массы излучающего материала, возрастает. Для оценки примем, что параметры фрактального агрегата те же, что наблюдались в эксперименте [17] и представлены в таблице, т.е. размер частиц в агрегате составляет $r = 3$ нм, фрактальная размерность равна $D = 1,6$ и радиус фрактального агрегата $R_0 = 1$ мкм. Тогда, как следует из формул (5) а (13), мощность излучения на единицу массы возрастает в $(R_0/r)^{3-D} \sim 3000$ раз, что соответствует концентрации платины в разряде $\sim 10^{-8}$ г/л.

Образование фрактальных агрегатов может иметь принципиальное значение для рассматриваемых процессов излучения, ибо это ведет к резкому возрастанию эффективности использования испаренного материала, а его концентрация относительно мала. Согласно проведенным оценкам, наблюдаемое излучение может быть обеспечено концентрацией атомов испаренного материала в воздухе $\sim 0,01$ ppm (10^{-8} молекул материала на молекулу воздуха), если он находится в форме фрактальных агрегатов.

Обсудим возможность и характер образования фрактальных агрегатов в рассматриваемом разряде. Ранее было отмечено, что из 10 материалов электродов, для которых наблюдалось длительное свечение после выключения разряда, только в двух случаях температура светящейся зоны (~ 2000 К) ниже температуры плавления материала, т.е. из данного материала могут быть образованы фрактальные агрегаты. Однако это не отвергает возможности образования фрактальных структур в других случаях. Например, в случае Al фрактальный агрегат может состоять из Al_2O_3 , и подобная ситуация может иметь место в других случаях.

Физическая картина образования фрактальных агрегатов в рассматриваемой системе может быть

описана следующим образом. Пока горит разряд, температура воздуха в зоне разряда относительно велика, и фрактальные агрегаты разрушаются под действием электрического тока или связанных с ним процессов. Тем самым испаренный материал находится в газе в форме атомов или частиц-кластеров, так что излучение такой системы относительно мало. После выключения источника разряда возникает возможность образования фрактальных агрегатов. По мере образования фрактальных агрегатов мощность излучения возрастает, и далее она падает по мере остывания газа.

Принимая кластер-кластерный механизм образования фрактальных агрегатов [68, 69], можно оценить время их формирования в воздухе, которое при рассматриваемых параметрах составляет 0,01–0,1 с. Это время может быть заметным на шкале используемых времен, что даст немонотонную зависимость мощности излучения от времени. Именно, после выключения разряда мощность излучения сначала возрастает, пока испаренный материал не превратится в кластеры, а далее она падает из-за остывания газа. Такие зависимости наблюдались неоднократно в эксперименте Пауэла и Финкелстейна [48] и являются косвенным подтверждением присутствия фрактальных агрегатов в послесвечении.

Проанализируем роль химических процессов в рассматриваемом явлении. Отметим, что химическая энергия, выделяемая при вступлении в химическую связь испаренного материала, относительно невелика. При рассматриваемых условиях в случае, если излучение создается малыми частицами (т.е. концентрация испаренного материала относительно велика), эта энергия не превышает 0,1 Дж и на один-два порядка ниже энергии, испускаемой в виде излучения. Далее, только в случае использования N_2O в качестве буферного газа структуры, образованные из испаренного материала, могут работать в качестве катализатора при разложении этого соединения. В случае всех других буферных газов такая возможность отсутствует, т.е. химическая энергия, выделяемая при химических процессах, не влияет на процессы излучения в послесвечении.

Однако сами химические процессы в большой степени определяют спектральные характеристики и мощность излучения через параметры образуемых фрактальных структур. От химического состава соединений, образуемых испаренным материалом, зависит скорость образования фрактальных агрегатов, а также его механические и оптические параметры. Поэтому буферный газ влияет на цвет и

мощность излучения. Например, в чистом кислороде мощность излучения в несколько раз выше, чем в воздухе. Если в используемом буферном газе не существует соединения испаренного материала, из которого могут образовываться фрактальные агрегаты, то в таком буферном газе не будет наблюдаться длительное излучение в послесвечении. Эксперимент Пауэла и Финкелстейна свидетельствует о существовании разных вариантов.

Таким образом, детальное исследование послесвечения высокочастотного разряда, выполненное Пауэлом и Финкелстейном, свидетельствует о том, что длительное свечение после выключения разряда создается материалом, испаренным с электродов, который образует химические соединения с буферным газом или его примесями. Анализ протекающих при этом процессов показывает, что наиболее вероятное состояние этих соединений — фрактальные агрегаты. Тогда при рассматриваемых условиях эксперимента концентрация испаряемого материала в буферном газе составляет порядка 10^{-8} ppm или 10^{-8} г/л.

Отметим, что особенность фрактального разряда связана с высокой эффективностью и продолжительностью излучения в послесвечении разряда. Поэтому такие разряды привлекались для создания лабораторного аналога шаровой молнии как явления в атмосферном воздухе, связанном с возникновением длительного свечения без внешнего подвода энергии. Этому была посвящена и рассмотренная выше работа Пауэла и Финкелстейна [48], а также другие методы создания продолжительного свечения в воздухе после выключения разряда. Проанализируем возможный характер образования фрактальных агрегатов в некоторых из них.

Один из таких способов относится к дуговому разряду, зажигаемому в воде [65–67]. После зажигания этого разряда в воде между электродами образуется каверна, содержащая разрядную плазму. После выключения разряда эта каверна ведет себя как автономный объект. Особенностью данного типа разряда является то, что окружающая разряд вода ограничивает зону, занятую плазмой и испаренным материалом. Это ускоряет процессы образования фрактальных агрегатов по мере остывания системы.

Еще один тип послесвечения разряда, где, видимо, образуются фрактальные агрегаты, был разработан Теслой в последние годы прошлого века и недавно повторен братьями Корумами [63, 64]. Основу разряда составляет радиочастотный искровой разрядник (используемая частота 67 кГц). При

многократном повторении импульсов в воздухе создается слабо проводящий канал. Такой разряд позволяет получить искру в воздухе при относительно малых вложениях энергии.

Иногда в некоторых точках проводящего канала данного разряда прорастали шары диаметром в несколько см и с временем жизни до нескольких секунд. Авторы [63, 64] утверждают, что это фрактальные структуры и что разряд Теслы является лабораторным аналогом шаровой молнии.

Однако экспериментальных данных недостаточно для подтверждения фрактальной структуры светящихся образований. Тем не менее, поскольку этот эффект чувствителен к материалу электродов, можно утверждать, что свечение создается материалом электрода. Испаренный материал доставляется в зону свечения по проводящему каналу в результате процесса катафореза. Присутствие испаренного материала в проводящем канале влияет на параметры искры в процессе повторения импульсов.

Таким образом, анализ фрактальных разрядов показывает, что присутствие в них фрактальных агрегатов подтверждается как высоким выходом излучения для этих разрядов, так и характером протекающих в них процессов. Тем не менее требуются дополнительные детальные исследования фрактальных разрядов с подробным изучением протекающих в них процессов и образуемых структур.

4. Фрактальная концепция шаровой молнии.

4.1. Свойства шаровой молнии как светящегося объекта. Рассмотрим свойства шаровой молнии, которые вытекают из анализа наблюдательных данных [71–73] и будут полезны при описании фрактальной модели шаровой молнии. Средний диаметр шаровой молнии составляет 23 ± 5 см, среднее время жизни шаровой молнии равно $8 \cdot 10^{\pm 0,3}$ с и средняя яркость шаровой молнии отвечает яркости электрической лампы мощностью 100–150 Вт. К этим численным параметрам добавим, что, во всяком случае, в большинстве случаев свечение шаровой молнии не связано с внешним источником энергии и оно имеет пятнистую структуру, причем температура светящихся пятен — горячих зон внутри шаровой молнии — оказывается ~ 2000 К, что следует из анализа яркости. Средняя температура воздуха внутри шаровой молнии примерно на 100 К выше температуры окружающего воздуха, что следует из анализа газодинамики средней шаровой молнии и теплообмена с окружающим воздухом. Таким образом,

поле температур шаровой молнии включает в себя небольшие сильно нагретые области, которые создают свечение шаровой молнии и находятся внутри основной слабо нагретой области. Отметим, что этот вывод следует из анализа наблюдательных данных.

Представленная информация может быть использована для анализа лабораторных аналогов шаровой молнии и ее моделей. В частности, поскольку время свечения фрактальных разрядов (0,1–1 с) значительно меньше времени жизни шаровой молнии, они не годятся в качестве модели для шаровой молнии, хотя по другим параметрам (отсутствие внешнего источника энергии, яркость свечения) они и являются аналогами шаровой молнии.

4.2. Фрактальные модели шаровой молнии. Фрактальные модели имеют большое значение в понимании шаровой молнии. Исследования шаровой молнии с использованием фрактальных концепций показало существование новых фрактальных структур со специфическими свойствами, которые образуются как в естественных условиях, так и в лабораторных системах. Изучение таких физических объектов дает понимание качественно новых физических систем.

Фрактальная концепция шаровой молнии опирается на наличие у нее жесткого каркаса, и описывающие его модели менялись по мере привлечения новых лабораторных аналогов в качестве модели для каркаса шаровой молнии. На первой стадии эта модель строилась как система нитевидных аэрозолей [74], причем основу этой модели составляли эксперименты по электрическому взрыву металлических проволочек [75]. Первая фрактальная модель шаровой молнии [76] использовала концепцию фрактальных агрегатов и связанную с ними информацию. Ее сменила аэрогельная модель шаровой молнии [77]. Аэрогель состоит из связанных фрактальных агрегатов и является макроскопической системой лабораторных размеров, в отличие от фрактальных агрегатов, размеры которых не превышают десятков микрон. Основой для следующей модели — модели фрактального клубка [78] — были эксперименты по образованию фрактальных нитей в результате лазерного облучения металлической поверхности [79]. Фрактальные нити [79, 80] образуются в результате быстрой конденсации слабо ионизованного металлического пара во внешнем электрическом поле [81, 82], а фрактальный клубок представляет собой систему переплетенных фрактальных нитей. При этом средняя плотность

вещества фрактальных нитей на 2—3 порядка ниже плотности сплошной массы данного материала, и сами нити занимают $\sim 0,01$ часть объема, в котором они находятся. Тем самым средняя плотность вещества в каркасе шаровой молнии на 4—5 порядков ниже плотности материала, из которого он составлен, т.е. каркас шаровой молнии имеет относительно малый вес.

Как видно, развитие фрактальной концепции шаровой молнии происходило в соответствии с одним из принципов развития науки — принципом преемственности. Это означает, что каждая последующая модель вытекала из предыдущей и использовала ее основные элементы. Вместе с тем она включала в себя новые элементы, основываясь на дополнительной физической информации. Тем самым каждая последующая модель становится все более сложной. Соответственно, последняя фрактальная модель шаровой молнии, включая в себя большое число факторов и описывая большое число наблюдаемых свойств шаровой молнии, является вместе с тем слишком сложной, чтобы ее можно было предложить на первой стадии изучения шаровой молнии.

В силу своей разреженной структуры каркас шаровой молнии обладает одновременно свойствами твердого тела, жидкости и газа; кроме того, разреженная структура каркаса отвечает его малому удельному весу и малому поверхностному натяжению. Этим объясняется ряд механических и газодинамических свойств шаровой молнии: ее способность летать, проникать сквозь малые отверстия и узкие щели, отскакивать от твердой поверхности, ее малое сопротивление воздуху при движении в нем и т.д.

Важное свойство фрактального клубка, представляющего собой систему переплетенных фрактальных нитей, является возможность фазового перехода клубок—глобула, подобного фазовому переходу для полимерной нити с самопересечениями [83—85]. Это означает, что при малых температурах фрактальный клубок приобретает сферическую форму под действием взаимодействия между отдельными нитями в зоне их контакта. При высоких температурах порядок в системе взаимодействующих нитей нарушается, что ведет к потере ее сферической формы. Оценки [78] показывают, что для шаровой молнии со средними параметрами этот переход ожидается при температуре 700 ± 200 К. Отметим, что примерно 90% наблюдаемых шаровых молний имеет сферическую форму. Обычно шаровая молния сохраняет свой размер и форму в течение своего существования, но примерно в 1 %

случаев наблюдения шаровой молнии фиксируется изменение ее формы, как правило, лента (палка) — шар и наоборот [86]. Добавим к сказанному, что простые модели шаровой молнии не способны описать этих переходов.

Принципиальное свойство шаровой молнии связано с хранением и превращением энергии в шаровой молнии. Поскольку элементами структуры шаровой молнии являются нанометровые частицы, которые объединяются во фрактальные агрегаты, а те, в свою очередь, в макроскопические фрактальные структуры, то каркас шаровой молнии обладает высокой удельной поверхностной энергией, достигающей ~ 1 кДж/г. Превращение внутренней энергии в тепловую, которое сопровождается укрупнением частиц структуры, может привести к нагреванию элементов структуры до температур ~ 2000 К. Этот процесс осуществляется в виде тепловых волн, которые распространяются вдоль фрактальных нитей структуры [87,88]. При этом одновременно может существовать много независимых тепловых волн, распространяющихся вдоль отдельных фрактальных нитей структуры.

Этот процесс объясняет пятнистую структуру свечения шаровой молнии [71—73], ибо в области фронтов тепловых волн возникают горячие зоны с температурой ~ 2000 К. Кроме того, механизм свечения шаровой молнии снимает кажущееся противоречие между характерной температурой светящихся зон (~ 2000 К), которая отвечает наблюдаемой яркости шаровой молнии, и средней температуре воздуха внутри шаровой молнии (~ 400 К), которая следует из анализа тепловыделения и газодинамики шаровой молнии; при этом цвет шаровой молнии определяется свечением примесей, находящихся в горячих зонах.

Фрактальная концепция шаровой молнии позволяет связать различные ее параметры. Например, время жизни шаровой молнии в рамках этой концепции можно рассматривать как характерное время, за которое может быть переработано вещество ее каркаса. Чем больше размер шаровой молнии, тем больше времени для этого требуется. Таким способом можно объяснить наблюдаемую корреляцию между размером и временем жизни шаровой молнии [71, 89]. Фрактальная концепция описывает и характер образования каркаса шаровой молнии как совокупность процессов в расширяющемся и охлаждающемся слабо ионизованном паре, находящемся во внешнем электрическом поле [81, 82]. Этот пар образуется в результате испарения поверхности под действием высоких потоков энергии. Отметим, что время

формирования фрактальных нитей и клубков достаточно велико и составляет минуты для характерных параметров процессов в шаровой молнии, тогда как стадия этого процесса, которая заканчивается образованием фрактальных агрегатов, длится десятки миллисекунд.

Обратим внимание еще на одно принципиальное свойство фрактального клубка, который составляет каркас шаровой молнии. В силу высокой разреженности структуры отдельные связи в ней могут разрываться и далее образовываться новые. Это приводит к уплотнению структуры, и каркас шаровой молнии не является стабильным, а стареет со временем. Данное свойство подобно соответствующему свойству фрактальных агрегатов, образуемых в растворах, которое наблюдалось и моделировалось, к примеру, в работах [90—92].

Чтобы понять возможность и недостатки современной фрактальной концепции шаровой молнии, сравним концепцию фрактального клубка с предыдущей аэрогельной концепцией каркаса шаровой молнии [77]. Аэрогель — пористый разреженный материал, состоящий из окислов или органических соединений. Наиболее распространенный материал аэрогеля SiO_2 — тот же, что у стекла и кварца. Минимальный удельный вес изготавливаемых образцов аэрогеля составляет 3 г/л [93], удельная площадь внутренней поверхности аэрогеля достигает 1600 м²/г [94]. Эти значения могут объяснить наблюдаемые газодинамические и энергетические свойства шаровой молнии. Что касается характера превращения поверхностной энергии в тепловую, то в аэрогеле, как в изотропной системе, на больших размерах может распространяться только одна тепловая волна, тогда как во фрактальном клубке одновременно может существовать много тепловых волн, распространяющихся вдоль отдельных фрактальных нитей. Таким образом, модель фрактального клубка описывает пятнистую структуру шаровой молнии, тогда как аэрогельная модель не включает в себя эту особенность шаровой молнии. В то же время модель фрактального клубка не дает возможности оценить внутри самой модели число одновременно существующих тепловых волн. Это означает, что модель фрактального клубка является промежуточной версией фрактальной концепции шаровой молнии и требует последующей модификации. Видимо, полезным для этого являются исследования фрактальной полимерной модели шаровой молнии [35, 95].

Таким образом, фрактальная концепция шаровой молнии позволяет объяснить основные принципиальные свойства шаровой молнии. Отметим,

что мы не ставили здесь целью описать разные свойства шаровой молнии, часть которых может быть понята без привлечения фрактальных концепций. Целью анализа было показать, что шаг за шагом, опираясь на лабораторные аналоги, можно прийти к реалистичной фрактальной концепции шаровой молнии. История становления этой концепции показывает, что она состоит из некоторого набора элементов, которые могут быть включены в нее последовательно. Хотя в настоящее время фрактальная концепция шаровой молнии не является завершенной, она позволяет объяснить многие удивительные свойства шаровой молнии, которые с первого взгляда кажутся нереальными. Понимание деталей природы шаровой молнии подготавливает путь для детальных исследований фрактальной концепции шаровой молнии, который к настоящему времени частично пройден. В результате этих исследований вырисовывается качественно новый физический объект, имеющий отношение к процессам как в природе, так и в лабораторных системах. Этот объект интересен безотносительно к шаровой молнии, проявляет одновременно свойства газа, жидкости и твердого тела, а также другие специфические свойства, и ведет нас к качественно новым позициям в физике.

5. Заключение. Рассмотренные примеры показывают роль общих фрактальных концепций [1, 2] при рассмотрении различных физических процессов и явлений. Хотя фрактальные свойства не являются основными параметрами объектов и процессов, наличие фрактальной структуры может принципиально изменить их свойства. Представленные примеры подтверждают это. Другой результат проведенного анализа относится к неполному набору экспериментальных методов, используемых при исследовании рассматриваемых объектов и явлений. За исключением небольшого числа специальных исследований, в арсенале экспериментальных методов обычно отсутствует анализ фрактальных параметров объектов, что сильно снижает информацию о них,

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mandelbrot B.B.* Fractals: Form, Chance and Dimension. San Francisco: Freeman, 1977.
2. *Mandelbrot B.B.* The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: Freeman, 1982.
3. *Staufer D., Stanley H.E.* From Newton to Mandelbrot. Berlin: Springer-Verlag, 1990.
4. Kinetics of Aggregation and Gelation. Eds. F. Family, D.P. Landau. Amsterdam: North-Holland, 1984.
5. On Growth and Form. Eds. H.E. Stanley, N. Ostrowsky. The Hague.: Martinus Nijhoff, 1985.

6. *Herrmann H.J.* Phys. Rep. 1986, 136, 155.
7. Fractals in Physics. Eds. L. Pietronero, E. Tosatti. Amsterdam: North-Holland, 1986; перевод: Фракталы в физике. М.: Мир, 1988.
8. *Jullien R. Botet R.* Aggregation and Fractal Aggregates. Singapore.: World Scientific, 1987.
9. *Meakin P.* Grit Rev. Sol. State Mater. Sci. 1987, 13, 143.
10. Universalities in Condensed Matter. Eds. R. Jullien, L. Peliti, R. Rammal, N. Bocara. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
11. *Feder J.* Fractals. New York: Plenum Press, 1988.
12. Fractals Physical Origin and Properties. Ed. L. Pietronero. New York: Plenum Press, 1988.
13. *Vicsek T.* Fractal Growth Phenomena. Singapore: World Scientific, 1989; 1991.
14. *Smirnov B.M.* Phys. Rep. 1990, 188, 1.
15. *Смирнов Б.М.* Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991.
16. *Smith J.M.* Fundamental of Fractals for Engineers and Scientists. New York: John Wiley, 1991.
17. *Forrest S.R., Witten T.A.* J. Phys. 1979, A12, L109.
18. *Granqvist C.G., Buhrman R.A.* J. Appl. Phys. 1976, 47, 2200.
19. *Niklasson G.A. et al.* Bull. Am. Phys. Soc, 1983, 28, 528.
20. *Niklasson G.A., Yatsuya S., Granqvist C.G.* Sol. State Common. 1986, 59, 579.
21. *Niklasson G.A., Granqvist C.G.* Phys. Rev. Lett. 1986, 56, 256.
22. *Niklasson G.A. et al.* J. Appl. Phys. 1987, 62, 259.
23. *Niklasson G.A., Torebring A., Larsson C., Granqvist C.G.* Phys. Rev. Lett. 1988, 60, 1735.
24. *Лушников А.А., Пахомов А.В., Черняев Г.А.* ДАН СССР, 1987, 292, 86.
25. *Lushnikov A.A., Maksimenko V.V., Pakhomov A.V.* J. Aerosol Sci. 1989, 20, 865.
26. *Ершов А.П., Куперштох А.Л., Коломийчук В.Н.* Письма ЖТФ, 1990. 16: №3, 43.
27. *Hurd A.J., Shaefer D., Martin J.E.* Phys. Rev. 1987, A35, 2361.
28. *Martin J.E.* Phys. Rev. 1987, A36, 3415.
29. *Freltoft T., Kjems J.K., Sinha S.K.* Phys. Rev. 1986, B33, 269.
30. *Kantor Y., Witten T.A.* J. Physique, 1984, 45, L675.
31. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 1981.
32. *Смирнов Б.М.* Аэрозоли в газах и плазме. М.: ИВТАН, 1990.
33. *Кондратьев К.Я., Васильев О.В., Ивлев Л.С.* Влияние аэрозоля на перенос излучения. Л.: Изд-во ЛГУ, 1973.
34. *Смирнов Б.М.* Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988.
35. *Бычков В.Л.* — Шаровая молния. Под ред. Б.М. Смирнова. М.: ИВТАН, 1991. Т. 2. С. 120,
36. *Berry M.U., Percival I.C.* Opt. Acta. 1984, 33, 577.
37. *Шалаев В.М., Штокман М.И.* ЖЭТФ. 1987, 92, 509.
38. *Бутенко А.В., Шалаев В.М., Штокман М.И.* ЖЭТФ, 1988, 94, 107.
39. *Shalaev A.M., Stockman M.I.* Zs. Phys. 1988, D10, 71.
40. *Butenko A.V., Shalaev A.M., Stockman M.I.* Zs. Phys. 1988, D10, 81.
41. *Раутиан С.Г. и др.* Письма ЖЭТФ. 1988, 47, 200.
42. *Акимов И.А. и др.* Оптика и спектр. 1988, 63, 1276.
43. *Карнов С.В. и др.* Письма ЖЭТФ. 1988, 48, 528.
44. *Faradey M.* The Chemical History of Candle. New York: Crowell, 1957.
45. *Луизова Л.А., Смирнов Б.М., Хахаев А.Д.* ДАН СССР, 1989, 309, 1359.
46. *Луизова Л.А., Смирнов Б.М., Хахаев А.Д., Чугин В.Л.* ТВТ. 1990, 28, 897.
47. *Nelson J.* Nature. 1989, 339, 611.
48. *Powell J.R., Finkelstein D.* Scientist. 1970, 58, 2318.
49. *Манькин Э.А., Шахпаронов И.М.* — Шаровая молния. Под ред. Б.М. Смирнова. М.: ИВТАН, 1991. Т. 2. С. 68.
50. *Barry J.D.* J. Atmospher. and Terr. Phys. 1968, 3, 313.
51. *Karoun K.* Chech. J. Phys. 1971, B21, 1246.
52. *Андрюанов А.М., Симицын В.И.* ЖТФ, 1977, 47, 2318.
53. *Oforuton H., Ohtsuki Y.H.* — Science of Ball Lightning. Ed. Y.H. Ohtsuki. Singapore: World Scientific, 1989. P. 310.
54. *Silberg P.A.* Appl. Phys. 1978, 49, 1111.
55. *Silberg P.A.* — Problem of Atmospheric and Space Electricity, Ed. S.C. Corotini. Amsterdam: Elsevier, 1965.
56. *Golka R.K.* Proc. of the 9th Intern. Symposium Electromaghnetic Compatibility. Wroclaw, 1988. P. 59.
57. *Dijkhuis G.C.* Ned. Tijdsch. v. Natk. 1985, B51, 125.
58. *Dijkhuis G.C.* Proc. of the 9th Intern. Wroclaw Sympos. on Electromagnetic Compatibility. Wroclaw, 1988, P. 166.
59. *Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачева Л.Н., Широков Н.Н.* ЖТФ, 1990, 60: №12, 73.
60. *Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачева Л.Н., Широков Н.Н.* — Шаровая молния. Под ред. Б.М. Смирнова. М.: ИВТАН, 1991. Т. 1. С. 17.
61. *Авраменко Р.Ф., Бахтин Б.И., Николаева В.И., Поскачева Л.Н., Широков Н.Н.* — Шаровая молния. Под ред. Б.М. Смирнова. М.: ИВТАН, 1991. Т. 2. С. 53.
62. *Igoikin S.I., Savelyev S.K.* Proc. of the 9th Intern. Conference on Atmospheric Electricity. St. Petersburg, 1992. P. 830.
63. *Corum K.L., Corwn J.F.* Tesla Coil Build. Assoc. News. 1989, 8, 13.
64. *Корум К.Л., Корум Д.Ф.* УФН, 1990, 160: №4, 47.
65. *Голубничий П.И., Громенко В.М., Крутое Ю.М.* — Шаровая молния. Под ред. Б.М. Смирнова. М.: ИВТАН, 1991. Т.1. С. 73.
66. *Golka R.K.* NASA Conference Publ. 1991, 11, 3106.
67. *Golka R.K.* Proc. of the 9th Inter. Conference on Atmospheric Electricity. St. Petersburg, 1992. P. 854.
68. *Meakin P.* Phys. Rev. Lett. 1983, 51, 1119.
69. *Kolb M., Botet R., Jullien R.* Phys. Rev. Lett. 1983, 51, 1123.
70. *Смирнов Б.М.* УФН. 1990, 161: №4, 1,
71. *Смирнов Б.М.* УФН. 1992, 162. №8, 43.
72. *Smirnov B.M.* Phys. Rep. 1987, 152, 177; 1993, 224, 151.
73. *Александров В.Я., Голубев Е.М., Подмошенский И.В.* ЖТФ, 1982, 52, 1987.
74. *Александров В.Я., Бородин И.П., Киченко Е.В., Подмошенский И.В.* ЖТФ. 1982, 52, 818.
75. *Смирнов Б.М.* УФН. 1986, 149, 177.
76. *Смирнов Б.М.* УФН. 1987, 152, 133.
77. *Смирнов Б.М.* УФН. 1991, 161: №8, 141.
78. *Lushnikov A.A., Negin A.E., Pakhomov A.V.* Chem. Phys. Lett. 1990, 175, 138.
79. *Лушников А.А., Негин А.Е., Пахомов А.В., Смирнов Б.М.* УФН. 1991, 161: №2, 113.
80. *Смирнов Б.М.* ТВТ. 1991, 29, 185.
81. *Smirnov B.M.* Plasma Chem. Plasma Proces, 1992, 12, 177.
82. *Flory P.* Principles of Polymer Chemistry. Ithaka, N.Y.: Cornell Univ. Press, 1971.
83. *De Gennes P.G.* Scaling Concepts in Polymer Physics. Ithaka, N.Y.: Cornell Univ. Press, 1977; перевод: Идеи скейлинга в физике полимеров. М.: Мир, 1982.
84. *Гроссберг А.Ю., Хохлов А.Р.* Статистическая физика молекул. М.: Наука, 1989.
85. *Grigorjev A.I., Grigorjeva I.D., Shirjaeva S.O.* — Science of Ball Lightning. Ed. Y.H. Ohtsuki. Singapore: World Scientific, 1989. P. 88.
86. *Смирнов Б.М.* УФН, 1991, 161: №6, 171.
87. *Смирнов Б.М.* ЖТФ, 1992, 61: №12, 82.
88. *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985.
89. *Meakin P.* J. Chem. Phys. 1985, 83, 3645.
90. *Dimon P. et. al.* Phys. Rev. Lett. 1986, 57, 595.
91. *Meakin P., Jullien R.* J. Chem. Phys. 1988, 89, 246.
92. *Tilotson T.M., Hrubesh L.M.* J. Non-Cryst. Sol. 1992, 12, 177.
93. *Mulder C.A.M., van Lierop J.G.* Aerogels. Ed. J. Fricke. Berlin: Springer-Verlag, 1986. P. 68,
94. *Bychkov V.L.* Proc. of the 9th Intern. Conference on Atmospheric Electricity. St. Petersburg, 1992. P. 842.