

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

538.911

**ФРАКТАЛЬНЫЙ КЛУБОК — НОВОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА***Б.М. Смирнов*

(Институт высоких температур АН СССР)

*Макроскопические фрактальные структуры. — Взрывчатые свойства фрактального клубка. — Фрактальные структуры и шаровая молния. — Процесс реструктуринга. — Параметры фрактального клубка. — Фазовый переход системы клубок—глобула.*

**Введение**

Новые знания в физике меняют наши представления о привычных явлениях. Например, создание лазеров и исследования процессов в них показали, что неравновесные условия легко реализуются, что вызвало появление целого ряда дисциплин, начинающихся со слова "неравновесная" (неравновесная плазма, неравновесная термодинамика, неравновесная газодинамика). Оно означает, что данные дисциплины изучают системы, в которых нарушено равновесие между определенными степенями свободы. Поскольку эти направления, созданные в последние десятилетия, имеют заверченный вид, нетрудно оценить, что дало их становление.

Возможно, к подобной революции физического описания мира придет развитие фрактальных идей в физике. Началом этого послужил выход в свет замечательных книг Мандельброта [1,2], которые привлекли внимание физиков к фрактальным идеям. Эти идеи привели к развитию целого ряда новых физических направлений. Далее мы сосредоточим внимание на одном из направлений, относящемся к этой области, — фрактальные структуры вещества.

Опыт показывает, что наряду с однородными состояниями вещества, каковыми являются классические жидкость и твердое тело, определенное распространение в физике имеют объекты с пористой "рваной" структурой. Основными элементами таких объектов являются фрактальные агрегаты, или фрактальные кластеры (см., например, [3 — 17]) — системы связанных частиц нанометровых размеров. Фрактальные свойства этих объектов выражаются в том, что если выбрать одну из связанных частиц в качестве центра сферы, радиус которой  $R$  существенно превышает размер отдельной частицы, то масса вещества  $m$ , сосредоточенная внутри сферы, зависит от радиуса согласно закону

$$m(R) \sim R^D, \tag{1}$$

где параметр  $D$  носит название фрактальной размерности объекта.

Отметим, что для сплошного твердого тела в трехмерном пространстве, которое мы далее будем рассматривать, этот параметр должен быть равен 3. Для реальных фрактальных кластеров, которые исследуются экспериментально, этот параметр находится в пределах  $D = 1,7 - 2,5$ .

Формула (1) может быть использована для связи массы отдельного кластера с его размером  $R$ . Как видно, с ростом размера фрактального кластера плотность вещества в нем падает согласно закону  $R^{D-3}$  и соответственно уменьшается его прочность. Поэтому размеры фрактального кластера ограничены [18]. Реально размер фрактального кластера, состоящего из нанометровых частиц, ограничен величиной в несколько микрон. Тем самым макроскопический объект не может быть фрактальным кластером, однако он может состоять из фрактальных кластеров.

### Макроскопические фрактальные структуры

Хорошо изученным объектом такого рода является аэрогель [19, 20], который производится в растворе при сверхкритических температуре и давлении. Наиболее распространенным является силика-аэрогель, состоящий из частиц двуокиси кремния (по сути, сильно пористое стекло). Его параметры мы будем использовать при оценках. Отметим, что аэрогель обладает фрактальными свойствами на малых размерах и является однородным на больших размерах, существенно превышающих размер пор (при этом на поры приходится практически весь объем аэрогеля).

Другим объектом, состоящим из фрактальных кластеров, являются фрактальные нити, полученные недавно в эксперименте Лушникова, Негина и Пахомова [21] при лазерном облучении металлических поверхностей (см. также [22]). Начало этому процессу дает образование плотной плазмы вблизи поверхности (давление — десятки — сотни атмосфер, температура — несколько тысяч градусов), которая разлетается в окружающее пространство и в процессе эволюции (рис. 1) превращается во фрактальные нити. Принципиальное значение для образования фрактальных нитей имеет внешнее электрическое поле, которое наводит индуцированные дипольные моменты на фрактальные кластеры, и они объединяются, образуя в конечном итоге фрактальные нити. Фрактальные нити являются аналогами аэрогелей; в отличие от аэрогелей фрактальные нити анизотропны, ибо образуются во внешнем поле (диаметр нити в эксперименте [21] составляет 30 — 40 мкм, их длина — несколько сантиметров). Существенно, что нити формируются в свободном пространстве и далее прилипают к электродам, причем одновременно в эксперименте [21] образовывалось несколько десятков фрактальных нитей.

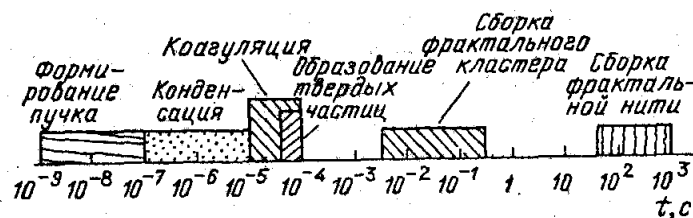


Рис. 1. Времена процессов образования фрактальных нитей

Отметим универсальный характер образования фрактальных нитей. Анализ процессов, приводящих к их образованию [23, 24], показывает, что для этого должны быть выполнены два требования. Во-первых, испаренное вещество должно быть в состоянии атомов и плазмы (а не капель), во-вторых,

последняя стадия процесса эффективно протекает только во внешнем поле. В эксперименте [21] фрактальные нити образовывались из разного материала поверхности и в разных буферных газах. Очевидно, они могут быть образованы и при разных способах воздействия на поверхность — лазерном облучении, электрическом пробое или разряде, взаимодействии поверхности с электронными или ионным пучком и в других случаях, когда это воздействие приводит к испарению атомов и ионов материала поверхности.

Таким образом, действие потоков энергии на поверхность материала вызывает появление слабоионизованного плотного пара, эволюция которого во внешнем электрическом поле может привести к образованию совокупности фрактальных нитей. Такая форма вещества соответствует новому состоянию вещества и заслуживает внимательного изучения. Поскольку образование такого состояния вещества имеет универсальный характер, оно может возникать при разных физических явлениях в случае воздействия потоков энергии на твердые поверхности.

Допустим, что совокупность фрактальных нитей, образовавшихся после воздействия на поверхность, не прилипла к электродам в соответствии с экспериментом [21], а была вынесена в свободное пространство. Там эти нити переплетутся, и клубок фрактальных нитей будет представлять своеобразное состояние вещества, которое далее будет рассмотрено. Учитывая универсальный характер образования такого состояния, можно ожидать, что оно может встречаться в различных лабораторных и естественных явлениях. Возможно, оно ответственно за некоторые загадочные явления природы.

Рассмотрим сначала фазовое состояние вещества, представляющего собой фрактальный клубок. В зависимости от характера взаимодействия между нитями возможны два фазовых состояния. При слабом взаимодействии между нитями фрактальная нить не связана с соседями, а только сталкивается с ними. В конечном итоге такая система фрактальных нитей распадается на отдельные нити. В другом предельном случае совокупность нитей образует жесткую конструкцию. Имеется аналогия между рассматриваемой системой фрактальных нитей и длинной полимерной нитью с самопересечениями<sup>(1\*)</sup>. Аналогом образования жесткой конструкции системы фрактальных нитей является фазовый переход клубок—глобула для полимерной нити, который достаточно хорошо исследован [25 — 27]. Далее мы используем указанную аналогию для численных оценок.

Таким образом, система связанных фрактальных нитей — фрактальный клубок — является своеобразным состоянием вещества, которое может быть образовано при разных способах воздействия потоков энергии на материалы во внешнем электрическом поле. Это состояние по своему удельному весу соответствует газам, а по поведению — жидкостями твердым телам. В качестве демонстрации жидкостных свойств у рассматриваемого состояния вещества на рис. 2 представлен характер прохождения жесткого фрактального клубка через малое отверстие в соответствии с теорией Гайдукова [28, 29]. Рассматриваемый фрактальный клубок в силу жесткости конструкции обладает поверхностным натяжением, однако из-за малого удельного веса поверхностное натяжение относительно невелико. Поэтому под действием потока газа вблизи отверстия сферическая форма поверхности фрактального клубка нарушается; из него вырывается цилиндрическая струя, с помощью которой все вещество перетекает по другую сторону отверстия. Там вдали от отверстия под действием поверхностного натяжения восстанавливается сферическая форма системы. Таким способом Гайдуков [28, 29] объяснял прохождения шаровой мол-

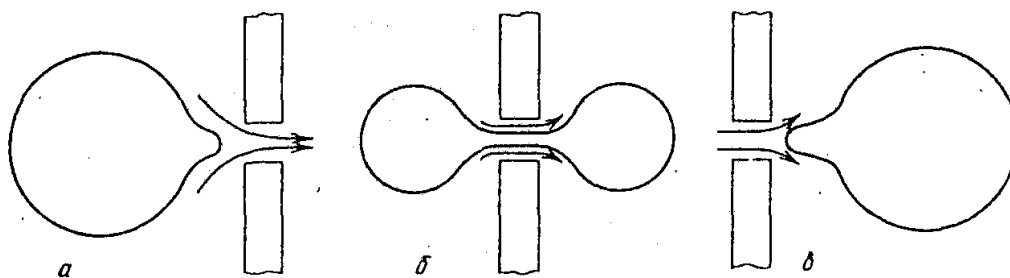


Рис. 2. Прохождение объекта через малое отверстие [28, 29]. *a — в* — Последовательные стадии процесса

нии через отверстия, используя законы газодинамики и рассматривая вещество шаровой молнии как жидкость с ограниченным поверхностным натяжением. Как видно, его результаты относятся к любой разреженной системе со слабым поверхностным натяжением, в том числе и к фрактальному клубку. Этот пример показывает, что связанная разреженная система, какой является фрактальный клубок, может обладать необычными свойствами, понимание которых требует специального анализа.

### Взрывчатые свойства фрактального клубка

Другое свойство фрактального клубка связано с тем, что фрактальная нить состоит из манометровых частиц и поэтому обладает развитой внутренней поверхностью. Размеры частиц в структуре фрактальных нитей заданы самим процессом их образования — рост частиц на последней стадии определяется их коагуляцией и заканчивается, когда температура расширяющейся плазмы сравнивается с температурой плавления вещества. А скорость коагуляции частиц резко падает с их размерами, так что размеры частиц в структуре слабо зависят от условий ее образования. Развитая внутренняя поверхность создает поверхностную энергию структуры. Эта энергия выделяется при сокращении площади внутренней поверхности, когда поверхностные молекулы оказываются внутри вещества и образуют новые химические связи (рис. 3).

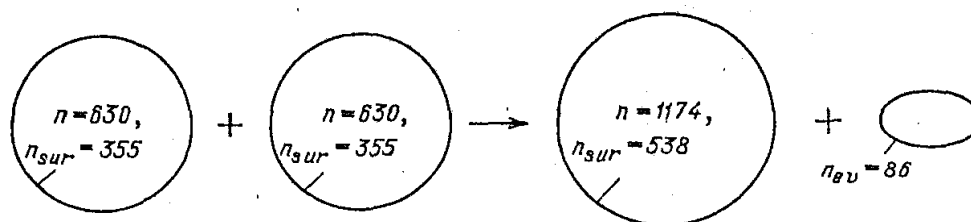


Рис. 3. Объединение двух капель двуокиси кремния, которым отвечает удельная площадь поверхности  $S = 740 \text{ м}^2/\text{г}$ ; здесь  $n$  — число молекул в капле,  $n_{\text{sur}}$  — число молекул, находящихся на поверхности капель,  $n_{\text{ev}}$  — число испарившихся молекул, последующая конденсация которых приводит к энергывыделению

Удельная внутренняя энергия может быть достаточно высокой. Используем для оценки параметры силика-аэрогеля, чья удельная внутренняя поверхность находится в пределах  $500 — 1500 \text{ м}^2/\text{г}$  [19]. Этому отвечает внутренняя энергия  $2 — 5 \text{ кДж/г}$ , совпадающая с удельной химической энергией

порохов. Таким образом, система фрактальных нитей является взрывчатым веществом. Эти свойства, однако, проявляются при достаточно высоких температурах. Если в некоторой области фрактальной нити создать высокую температуру, то возникнет тепловой взрыв, который будет распространяться в виде тепловой волны вдоль нити и переходить на другие нити в точках пересечения.

Эта тепловая волна имеет следующую природу. На фронте тепловой волны структура плавится, распадаясь на отдельные капли. Объединение капель приводит к выделению энергии, которая идет на испарение молекул с поверхности образуемой капли. Эти молекулы переходят в соседние области структуры и, конденсируясь на ней, переносят туда энергию. Так тепловая волна переносится вдоль фрактальной нити. За фронтом тепловой волны охлаждение происходит за счет теплопроводности воздуха или газа, в котором находится нить.

Оценки [30] с использованием параметров силика-аэрогеля показывают, что температура на фронте тепловой волны близка к 2000 К, скорость волны — десятки см/с (рис. 4), ширина фронта волны порядка 10 мкм. Тепловая волна разрушает соответствующую фрактальную нить, ее фронт в силу высокой температуры будет наблюдаться в виде движущейся светящейся точки, а по мере ветвления волн число таких точек будет возрастать.

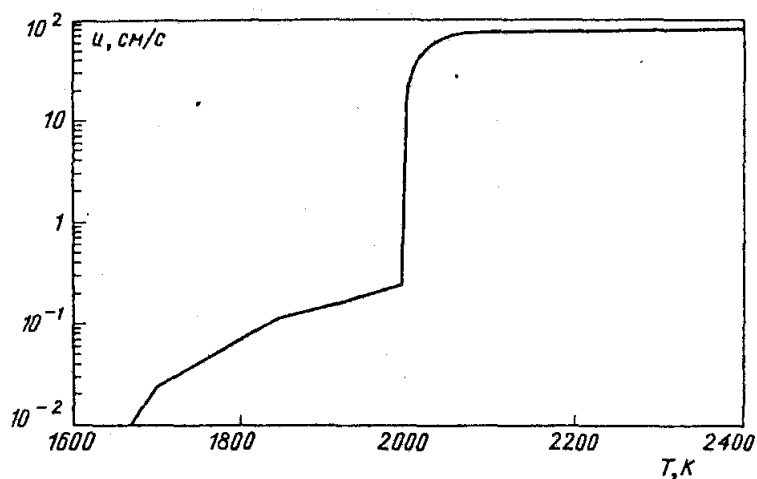


Рис. 4. Скорость распространения тепловой волны вдоль нити двуокиси кремния в зависимости от температуры на фронте волны

Таким образом, фрактальный клубок может обладать взрывчатыми свойствами. При этом взрыв системы проявляется в виде тепловых волн, распространяющихся вдоль отдельных фрактальных нитей. Отметим, что в силу эффективного теплоотвода за счет теплопроводности воздуха такой процесс возможен при высокой скорости процесса уменьшения внутренней энергии нити. Реально это сводится к условию, чтобы температура на фронте тепловой волны превышала температуру плавления вещества, так что сокращение внутренней поверхности структуры осуществляется при объединении жидких капель структуры. Это условие требует, чтобы удельная энергия структуры превышала некоторое пороговое значение, т.е. существует пороговое значение для удельной площади внутренней поверхности структуры (и соответственно для размера частиц структуры), при которых проявляются взрывчатые свойства системы.

## Фрактальные структуры и шаровая молния

Очевидно, рассматриваемые структуры, представляющие собой клубок фрактальных нитей, и составляют вещество шаровой молнии [22]. Хотя этот тезис и может показаться спорным, однако с развитием исследований по шаровой молнии появляется все больше аргументов в пользу ее фрактальной структуры. Не вдаваясь в подробности, укажем только, что нет других концепций, которые в той же степени объясняли бы различные свойства шаровой молнии (сохранение и изменения формы в процессе эволюции, свечение, характер движения и т.д.) на количественном уровне. К тому же отметим, что все случаи лабораторного получения шаровых молний с внутренним источником энергии ([31—33]) включают в себя те же способы воздействия на материалы, что и при получении фрактальных нитей [21]. Далее мы используем информацию по шаровой молнии для дополнительного анализа рассматриваемого состояния вещества.

Таблица I. Удельный вес средней шаровой молнии

Основа оценки	Значение, г/см <sup>3</sup>
1. Температура светящейся зоны	$10^{-3,6 \pm 0,8}$
2. Средняя внутренняя энергия	$10^{-4,0 \pm 0,9}$
3. Подъемная сила	$10^{-3,0 \pm 0,8}$
4. Отскоки от поверхности	$10^{-3,7 \pm 0,3}$
5. Сохранение сферической формы	$10^{-4,5 \pm 1,0}$
6. Оптическая толщина	$10^{-4,0 \pm 1,0}$
Среднее	$10^{-3,9 \pm 0,4}$

Таблица II. Коэффициент поверхностного натяжения средней шаровой молнии

Основа оценки	Значение, Дж/м <sup>2</sup>
1. Сохранение сферической формы	$10^{-1,7 \pm 0,5}$
2. Прохождение сквозь отверстия	$10^{-1,0 \pm 1,5}$
3. Электрическое поверхностное натяжение	$10^{-1,7 \pm 0,5}$
Среднее	$10^{-1,5 \pm 0,5}$

Будем использовать концепцию средней шаровой молнии, т.е. шаровой молнии с усредненными параметрами. Ряд параметров может быть получен из анализа тысяч наблюдений, другие — с учетом этих данных. Табл. I содержит оценки для средней плотности вещества шаровой молнии, табл. II — оценки для поверхностного натяжения. Прокомментируем эти данные. В п. 1 учитывается, что температура светящейся зоны составляет примерно 2000 К. До этой температуры необходимо нагреть вещество шаровой молнии при разных способах энерговыделения. П. 2 — та же оценка с использованием средней наблюдаемой внутренней энергии. П. 3 использует то, что подъемная сила средней шаровой молнии под действием конвективных потоков равна ее весу, п. 4 использует наблюдаемый случай [34], когда появившаяся на паяльнике шаровая молния отскакивала от поверхности стола. П. 5 использует сохранение сферической формы шаровой молнии с учетом среднего значения коэффициента поверхностного натяжения, п. 6 основан на оцененной по наблюдениям оптической толщине средней шаровой молнии» если ее структура соответствует силика-аэрогелю. Как видно, все оценки лежат в одном интервале, что позволяет определить усредненную характеристику с большей надежностью, чем имеет каждая оценка. Для среднего значения указана статистическая погрешность, которая не учитывает погрешность каждой оценки.

При оценке коэффициента поверхностного натяжения в п. 1 табл. II мы основывались на тех же соображениях, что и в п. 5 табл. I, но использовали среднее значение для удельного веса вещества шаровой молнии. П. 2 основан

на теории Гайдукова [28, 29] для прохождения шаровой молнии через отверстия в наблюдаемых случаях, в п. 3 приводится значение коэффициента поверхностного натяжения, создаваемого средним электрическим зарядом шаровой молнии. Погрешность, указанная для среднего значения, как и в табл. I, не учитывает погрешностей отдельных оценок.

Основываясь на полученных значениях, проанализируем природу поверхностного натяжения, что поможет нам понять природу исследуемой системы. Обычный механизм поверхностного натяжения связан с теми молекулами, которые находятся на поверхности и имеют половину химических связей по сравнению с внутренними молекулами. Рассечем элемент вещества шаровой молнии плоскостью. Тогда коэффициент поверхностного натяжения — порядка энергии, затрачиваемой на рассечение единицы площади вещества. Оценим эту величину, представив структуру шаровой молнии в виде набора шаров радиуса  $r_0$ . Средняя плотность этих шаров  $N$  может быть определена из соотношения

$$\bar{\rho} = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0 N, \quad (2)$$

где  $\bar{\rho}$  — средняя удельная масса вещества шаровой молнии,  $\rho_0$  — средняя удельная масса ее материала.

Пусть  $\epsilon_0$  — энергия, которую следует затратить на рассечения единицы поверхности материала шаровой молнии, если он представляет собой сплошную массу. Тогда поверхностное натяжение вещества шаровой молнии в соответствии с рассматриваемым механизмом равно (с учетом формулы (2))

$$\alpha \leq \epsilon_0 \cdot 2r_0 N \cdot \frac{2}{3} \pi r_0^2 / 3 = \frac{\epsilon_0 \bar{\rho}}{\rho_0}, \quad (3)$$

где  $2r_0 N$  — среднее число шаров, приходящееся на единицу площади секущей плоскости, центры которых находятся на расстоянии от плоскости менее  $r_0$ ,  $\frac{2\pi r_0^2}{3}$  — средняя площадь рассеченного шара.

Проведем численную оценку, используя силика-аэрогель в качестве вещества шаровой молнии и данные табл. I ( $\rho_0 = 2 \text{ г/см}^2$ ,  $\epsilon_0 = 7 \text{ Дж/м}^2$  [46],  $\bar{\rho} = 10^{-3,9 \pm 0,4} \text{ г/см}^3$ ). Имеем

$$\alpha \leq 10^{-3,4 \pm 0,4} \text{ Дж/м}^2.$$

Сравнение с данными табл. II показывает несостоятельность этого механизма создания поверхностного натяжения.

Более сильный механизм поверхностного натяжения связан с проникновением свободных поверхностных концов шаровой молнии друг в друга. Для этого необходимо включить механизм реструктуринга [35, 36], который отвечает разрушению слабых связей между элементами структуры и возникновению более сильных. Средняя плотность вещества вблизи поверхности несколько выше (но не на порядок величины!), чем внутри шаровой молнии. Тем самым на поверхности шаровой молнии образуется корка, которая и обеспечивает поверхностное натяжение. Под действием внешних условий возможно и изменение формы шаровой молнии<sup>(2\*)</sup>, что запрещено при классическом механизме создания поверхностного натяжения.

Проведем численную оценку для рассматриваемого механизма, используя

аэрогельную модель каркаса шаровой молнии. Коэффициент поверхностного натяжения равен по порядку величины

$$\alpha \sim \eta N r_0 \xi;$$

где  $\eta$  — часть поверхности частиц, которая участвует в образовании связи,  $N$  — плотность частиц в структуре,  $r_0$  — их радиус,  $\xi$  — глубина проникновения элементов структуры друг в друга, которая порядка корреляционного радиуса структуры, т.е. размера, на котором происходит переход от фрактальной к однородной структуре. Используем параметры типичного силика-аэрогеля с плотностью, соответствующей табл. I. Имеем  $r_0 = 1,5$  нм,  $D = 2,3$  [38 — 40], откуда  $\xi \sim 10$  мкм,  $N \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Принимая  $\eta \sim 0,01 — 0,1$ , получим  $\alpha \sim 0,02 — 0,2$  Дж/м<sup>2</sup>, что не противоречит данным табл. II.

### Процесс реструктуринга

Таким образом, принципиальное значение в эволюции рассматриваемого состояния системы фрактальных нитей имеет реструктуринг — процесс, приводящий к уплотнению структуры. В силу этого данное состояние не является стационарным — оно уплотняется и "старееет". Видимо, процесс реструктуринга присущ разреженным фрактальным структурам. Собственно, он и изучался для фрактальных агрегатов, модели реструктуринга [35, 36] относятся к этим системам.

В качестве примера такого типа приведем экспериментальные исследования [41], посвященные изучению образования фрактальных агрегатов золота в растворе из частиц радиуса 7,5 нм. Изменением плотности раствора можно менять заряд, сосредоточенный на частицах золота, и тем самым регулировать скорость процесса образования фрактального агрегата. При высокой скорости процесса (время образования агрегата в растворе менее 1 мин) имеет место кластер-кластерный (ССА) механизм агрегации [42, 43]. В этом случае малые кластеры объединяются в более крупные, пока не сформируются фрактальные агрегаты предельных размеров. В этом режиме агрегации почти каждое соприкосновение частиц кластеров приводит к их объединению, и в результате образуется относительно рыхлый кластер с фрактальной размерностью около 1,8.

При малой скорости агрегации (~ 1 суток) осуществляется другой режим процесса — RLCA-режим (кластер-кластерная агрегация, ограниченная диффузией) [44, 45]. В этом случае соприкосновение двух частиц кластеров с малой вероятностью ведет к их объединению. В результате образуется более плотная структура с фрактальной размерностью около 2,1.

В указанной работе [41] наблюдался реструктуринг агрегатов, образующихся в ССА-режиме. Эти агрегаты, которые были сформированы относительно быстро (за секунды) в течение продолжительного времени (порядка суток) "старели" и трансформировались в RLCA-кластеры. Тем самым происходила перестройка структуры, сопровождавшаяся ее уплотнением. Согласно накопленному опыту процесс реструктуринга присущ разреженным фрактальным структурам.

### Параметры фрактального клубка

Проведем численные оценки для фрактального клубка с целью составить представление о реальной системе такого рода. Чтобы эти оценки имели



отношение к реальному объекту, будем считать, что отдельная фрактальная нить обладает параметрами, соответствующими эксперименту [21], а их система характеризуется параметрами средней шаровой молнии. Плотность вещества внутри отдельной фрактальной нити составляет  $\rho_f = 0,01 - 0,1 \text{ г/см}^3$  [21]. Сравнивая эту величину с плотностью вещества средней шаровой молнии  $\bar{\rho} = 10^{-3,9 \pm 0,4} \text{ г/см}^3$  (см. табл. I), находим, что нити занимают  $\bar{\rho}/\rho_f = 10^{-2,4 \pm 0,9}$  часть объема, в котором они находятся. Таким образом, рассматриваемая система оказывается дважды пористой. Во-первых, нити имеют фрактальную пористую структуру, так что внутри занимаемого ими объема на материал приходится  $\sim 1\%$  этого объема. Во-вторых, сами нити занимают малую часть объема фрактального клубка.

Обозначив через  $R$  радиус нити, определим геометрические параметры данной системы. Пусть  $dl$  — полная длина нитей, находящихся в элементе объема  $dV$ . Поскольку масса вещества в данном элементе пространства равна  $\bar{\rho}dV = \pi R^2 dl \rho_f$ , имеем

$$\frac{dl}{dV} = \frac{\bar{\rho}}{\pi R^2 \rho_f}. \quad (4)$$

Отдельные нити пересекаются друг с другом, и мы полагаем, что каждая нить имеет много таких пересечений. Найдем среднее расстояние между соседними пересечениями нити. Проведем линию вдоль нити, считая, что при  $x = 0$  имеет место ее пересечение с нитями структуры. Очевидно, что вероятность ее непересечения с нитями на расстоянии  $x$  от этой точки равна  $\exp(-x/\lambda)$ , где  $\lambda$  — параметр, который далее определим. Отметим аналогию этого параметра с длиной свободного пробега классической частицы, которая рассеивается на непрозрачной структуре. Из приведенной формулы следует, что вероятность пересечения на расстоянии  $h \ll \lambda$  от выбранной точки равна  $h/\lambda$ . Возьмем элемент плоскости, перпендикулярный данной линии, с площадью  $S$  и выделим объем, построенный на этой плоскости с высотой  $h$ . Полная длина нитей в этом объеме равна  $l' = Sh\bar{\rho}/(\pi R^2 \rho_f)$ , а их проекция на плоскость равна  $2Rl' \sin \theta$ , где  $\theta$  — угол между нормалью к плоскости и нитью. Усредняя по углам, имеем для средней проекции нити на плоскость

$$\int 2Rl' \sin \theta d \cos \theta = \frac{\pi R l'}{2}.$$

Очевидно, вероятность пересечения линии на расстоянии  $h$  от очередного пересечения равна

$$\frac{\pi R l'}{2S} = \frac{h}{\lambda}.$$

Отсюда получаем для среднего расстояния между соседними переселениями нитей

$$\lambda = \frac{2Sh}{\pi R l'} = \frac{2\rho_f R}{\bar{\rho}}. \quad (5)$$

Для рассматриваемых параметров системы ( $R = 20 \text{ мкм}$ ) имеем  $\lambda = 10^{0,2 \pm 0,9} \text{ см}$ .

Проведем оценки для теплового взрыва системы, считая, что случайно

зародившийся очаг с высокой температурой распространяется вдоль соответствующей линии и далее размножается при пересечениях с другими линиями. На этой стадии число тепловых волн и соответственно яркость свечения растут экспоненциально со временем по закону  $\exp(t/\tau)$ , где  $\tau = \lambda/u$ , а  $u$  — скорость распространения тепловой волны. Принимая  $u = 30 - 60$  см/с (см. рис. 4), получим  $\tau = 10^{-1,4 \pm 1,0}$  с.

Полное время теплового взрыва определим из уравнения  $dl/dt = -nu$ , где  $l$  — полная длина нитей в системе,  $n = \exp(t/\tau)$  — число одновременно распространяющихся тепловых волн. Считая, что в начальный момент времени имеется один зародыш, получим для полного времени теплового взрыва  $t_{\text{вз}} = \tau \ln(l/\lambda)$ . Поскольку согласно формуле (4) полная длина нитей в системе пропорциональна объему, то время жизни системы зависит от занимаемого объема. Для параметров средней шаровой молнии получим:  $t_{\text{вз}} = 10^{-0,2 \pm 1,4}$  с. Отметим нестационарный характер теплового взрыва рассматриваемой системы.

### Фазовый переход клубок—глобула

Рассматриваемая система фрактальных нитей может оказаться в связанном состоянии и тогда будет сохранять свою форму. Для анализа такого состояния удобно использовать аналогию с самопересекающейся полимерной нитью большой длины. В точках самопересечения полимерной нити образуются связи. Фазовый переход нити клубок—глобула происходит при определенной степени взаимодействия в точках пересечения. В состоянии глобулы система имеет жесткий каркас и ее форма не меняется со временем, в состоянии клубка отдельные элементы нити могут свободно перемещаться друг относительно друга.

Очевидно, то же самое имеет место и в рассматриваемой системе фрактальных нитей — фрактальном клубке — в случае многократного пересечения каждой из нитей с другими. Тогда существующая теория о переходе клубок—глобула в полимерах [25 — 27] может быть использована при анализе состояния фрактального клубка. С учетом этого фазовый переход происходит при температуре, которая порядка температуры Флори  $T_F$ . Последняя определяется условием  $B(T_F) = 0$ , где  $B(T)$  — второй вириальный коэффициент. Представим это соотношение в виде

$$B(T_F) = \int \exp\left(-\frac{U_{12}}{T_F} - 1\right) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 = 0, \quad (6)$$

где  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  — совокупности координат атомов для соответствующих элементов нити,  $U_{12}$  — потенциал взаимодействия между атомами разных нитей,  $T$  — температура. Оценим температуру Флори  $T_F$  для комка фрактальных нитей. В этом случае  $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$  представляют собой совокупности координат атомов соответствующих нитей, которые могут устанавливать связи с атомами другой нити. Далее будем считать каждую нить жесткой системой входящих в ее состав частиц и атомов, а высокую подвижность частиц в зоне соприкосновения учтем тем, что связи устанавливаются по всей зоне соприкосновения. Поэтому если спроектировать точки соприкосновения нитей на плоскость, находящуюся в зоне соприкосновения, получим почти сплошную зону. Размер этой зоны порядка радиуса нити. Тем самым температура Флори  $T_F$  удовлетворяет соотношению

$$R^2\lambda \sim \left( \exp \frac{D}{T_F} \right) R^2 a.$$

Левая часть этого соотношения учитывает область в вириальном коэффициенте, где имеет место сильное отталкивание, поскольку она занята веществом, правая часть отвечает притяжению между элементами нити, что и приводит к образованию связи. В этой формуле  $\lambda$  — расстояние между ближайшими точками соприкосновения нити с другими,  $a$  — радиус сил взаимодействия между молекулами,  $D$  — энергия связи, относящаяся к одной поверхностной молекуле.

Проведем оценки с использованием параметров средней шаровой молнии и считая, что фрактальные нити состоят из  $\text{SiO}_2$ . Используем структуру с плотной упаковкой, так что имеется короткодействующее взаимодействие в системе и каждая молекула имеет 12 ближайших соседей. Тогда, учитывая  $6D = \Delta H = 133 \pm 7$  ккал/моль [46],  $a = 3 \cdot 10^{-8}$  см,  $\lambda = 10^{0.2 \pm 0.9}$  см, получим  $T_F = 700 \pm 200$  К.

Эта оценка показывает, что система связанных фрактальных нитей может образовывать жесткий каркас, однако при повышении температуры жесткость системы разрушится, что приведет к превращению системы фрактальных нитей в бесформенную массу.

### Заключение

Из анализа фрактального клубка — системы фрактальных нитей — следует, что характер образования этого объекта универсален. Расширение в пространство слабоионизованного атомного пара, образуемого при воздействии потоков энергии на поверхность конденсированного тела, может привести к образованию такой системы, если эволюция пара происходит в сильном электрическом поле. Тем самым данное явление относится к разным материалам, разным газам, в которых протекает эволюция слабоионизованного пара, и при разных способах воздействия на поверхность — электрическом, лазерном или радиационном, пучковом и т.д.

Далее отметим специфические свойства рассматриваемого объекта. По плотности вещества это газ, но, как связанное состояние вещества, он может проявлять свойства как жидкости, так и твердого тела. Как система, состоящая из нанометровых частиц, фрактальный клубок обладает большой поверхностной энергией, поскольку заметная доля находящихся в нем молекул находится на поверхности частиц. Эта энергия выделяется при протекании процесса уплотнения структуры, связанного с укрупнением частиц. Удельная поверхностная энергия рассматриваемых систем может быть сравнимой с удельной химической энергией порохов. По сути дела, это свойство относится к любым системам, составленным из нанометровых частиц, в том числе к аэрогелям и фрактальным агрегатам. Специфическим для рассматриваемого объекта является характер выделения этой энергии, который сопровождается распространением тепловых волн вдоль отдельных фрактальных нитей.

Вместе со сказанным следует отметить "деликатность" объекта, связанную как с трудностью его детектирования, так и с процессом старения объекта, приводящим к его разрушению. Процесс старения объекта связан не с укрупнением частиц в нем, как в случае процесса уплотнения структуры [47], а с уменьшением числа пор разного размера. Этот необратимый процесс при-

водит к увеличению средней плотности вещества в пространстве. Судя по имеющейся информации, характерное время жизни фрактального клубка порядка суток.

Таким образом, фрактальный клубок является своеобразным физическим объектом со специфическими свойствами. Этот объект требует детального исследования, причем одной из главных проблем в этом направлении является разработка методов детектирования данного объекта.

#### ПРИМЕЧАНИЯ

(1) На эту связь указал автору В.Л. Бычков.

(2) Отметим, что согласно коллекции наблюдательных данных Григорьева и др. [37] среди 2013 случаев наблюдения шаровой молнии в 25 случаях ее сферическая форма превращалась в ленточную, а в 15 случаях наблюдения шаровая молния ленточной формы в процессе эволюции приобретала сферическую форму.

#### 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. Kinetics of Aggregation and Gelation/Eds. F. Family, D.P. Landau. — Amsterdam: North-Holland, 1984.
4. On Growth and Form./Eds. H.E. Stanley, N. Ostrowsky. — The Hague: Martinus Nijhoff, 1985.
5. *Herrmann H.J.*//Phys. Rep. 1986. V. 136. P. 155.
6. *Sander L.M.*//Nature, London. 1986. V. 322. P. 789.
7. *Смирнов Б.М.*//УФН. 1986. Т. 149. С. 117.
8. *Liu S.H.*//Sol. State Phys. 1986. V. 39. P. 206.
9. Fractals in Physics/Eds. L. Pietronero. E. Tosatti. — Amsterdam: North-Holland, 1986.
10. *Sander L.M., Cates M.E.*//Science. 1986. V. 322. P. 789.
- [11] *Meakin P.*// Crit. Rev. Sol. State Mater. Sci. 1987. V. 13. P. 143.
12. *Jullien R., Botet R.* Aggregation and Fractal Aggregates. — Singapore a.o.: World Scientific, 1987.
13. Universalities in Condensed Matter./Eds. R. Jullien, L. Peliti, R. Rammal, N. Bocara. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1988.
14. Computer Simulation Studies in Condensed Matter. Physics./Eds. D.P. Landau, K.K. Mon, H.B. Schuttler. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1988.
15. *Vicsek T.* Fractal Growth Phenomena. — Singapore a.o.: World Scientific, 1989.
16. *Smirnov B.M.*//Phys. Rep. 1990. V. 188. P. 1.
17. *Смирнов Б.М.* Физика фрактальных кластеров. — М.: Наука, 1991.
18. *Kantor Y., Witten T.A.*// J. de Phys. 1984. Т. 45. P. L675.
19. Aerogels // Ed. J. Fricke. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1985.
20. *Смирнов Б.М.*//УФН. 1987. Т. 152. С. 133.
- [21] *Lushnikov L.A., Negin A.E., Pakhomov A.V.*//Chem. Phys. Lett. 1990. V. 175. P. 138.
22. *Лушиников А.А., Негин А.Е., Пахомов А.В., Смирнов Б.М.*//УФН. 1991. Т. 161, № 2. С. 113.
23. *Smirnov B.M.*// Trends in Physics: Book of abstracts of the 8th General Conference of European Physical Society/Ed. F. Pleiter. — Amsterdam: North-Holland, 1990. — P. 83.
24. *Смирнов Б.М.*//ТВТ. 1991. Т. 29. С. 418.
25. *Flory P.* Principles of Polymer Chemistry. — Ithaka, N.Y.: Cornell Univ. Press, 1971.
26. *De Gennes P.O.* Scaling Concepts in Polymer Physics. — Ithaka, N.Y.: Cornell Univ. Press, 1977: перевод: де Жан П. Идеи скейлинга в физике полимеров. — М.: Мир, 1982.
27. *Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р.* Статистическая физика молекул. — М.: Наука, 1989.
28. *Гайдуков Н.И.*//ЖТФ. 1989. Т. 59. С. 88.
29. *Гайдуков Н.И.*// ДАН СССР. 1988. Т. 301. С. 1076.
30. *Смирнов Б.М.*//УФН. 1991. Т. 161, № 6. С. 171.
- [31] *Сингер С.* Природа шаровой молнии/Пер, с англ. — М.: Мир, 1973.
32. *Барри Дж.* Шаровая молния и четочная молния/Пер, с англ. — М.: Мир, 1983.
33. *Смирнов Б.М.*//УФН. 1990. Т. 160, № 4. С. 1.
34. *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
35. *Meakin P.*// J. Chem. Phys. 1985. V. 83. P. 3645.
36. *Meakin P., Jullien R.*// J. Chem. Phys. 1988. V. 89. P. 246.
37. *Grigor'ev A.I., Grigorjeva I.D., Shirjaeva S.O.*//Science of Ball Lightning/Ed. Y.H. Ohtsuki. — Singapore a.o.: World Scientific. 1989. — P. 88.

38. *Courtens E., Vacher R., Pelous J., Woignier T.*//Europhys. Lett. 1988. V. 6. P. 245.
39. *Vacher R., Courtens E., Coddens G., Pelous J., Woignier T.*//Phys. Rev. Lett. Ser. B. 1989. V. 39. P. 7384.
40. *Courtens E., Vacher R., Stoll E.*// Physica. Ser. D. 1989. V. 38. P. 41.
- [41] *Dimon P. et al.*// Phys. Rev. Lett. 1986. V. 57. P. 595.
42. *Meakin P.*// Ibidem. 1983. V. 51. P. 1119.
43. *Kolb M., Botet R., Jullien R.*//Ibidem. — P. 1123.
44. *Kolb M., Jullien R.*// J. de Phys. 1984. T. 45. P. L977.
45. *Jullien R., Kolb M.*// J. Phys. Ser. A. 1984. V. 17. P. L639.
46. *Каранетьянц М.Х., Каранетьянц М.Л.* Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. — М.: Химия, 1968.
47. *Mulder C.A.M., van Lierop J.G.*// Aerogels/ Ed. J. Fricke. — Berlin a.o.: Springer-Verlag, 1986. — P. 68.

Статья поступила 12.05.91 г.