

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

551.594.223(018)

ОБ АНАЛИЗЕ ПРИРОДЫ ШАРОВОЙ МОЛНИИ**Б. М. Смирнов**

1. Шаровая молния — загадочное явление природы, которое на протяжении нескольких веков вызывает внимание исследователей. За это время собрана немалая информация о шаровой молнии, выдвинут целый ряд гипотез, объясняющих ее природу. Однако, поскольку само появление шаровой молнии носит случайный характер, ее детальное экспериментальное исследование затруднено. По этой причине, а также потому, что шаровая молния — весьма необычное явление, в настоящее время нельзя сделать однозначного заключения о природе шаровой молнии. В то же время мы располагаем большой информацией относительно других явлений, протекающих в возбужденном газе. Эта информация может быть использована и при анализе гипотез, описывающих природу шаровой молнии. Целью данной статьи, которая носит методический характер, является анализ природы шаровой молнии с точки зрения протекающих в ней элементарных процессов.

2. Приведем сначала параметры шаровой молнии, которые мы возьмем за основу. При этом мы воспользуемся данными книги Сингера «Природа шаровой молнии»¹, в которой собрана наибольшая информация (около 600 работ) относительно шаровой молнии *). Пользуясь данными этой книги, мы в дальнейшем примем, что диаметр шаровой молнии лежит в интервале 10—40 см, время жизни шаровой молнии порядка 10—100 сек. Большие разногласия вызывает оценка энергии, запасенной в шаровой молнии. Мы будем считать, что по своим световым характеристикам шаровая молния подобна газоразрядной лампе мощностью 10—100 Вт, так что запасенная в ней энергия составляет 10^2 — 10^4 Дж.

3. Проанализируем существующие гипотезы, объясняющие природу шаровой молнии. Шаровая молния представляет собой объем возбужден-

*) Пр процитируем приведенное в этой книге описание шаровой молнии: «Светящиеся сферы возникают во время грозы и обычно в какой-то связи — хотя не обязательно по времени или месту — с обычной молнией. Они представляют собой более или менее шаровидные объекты с диаметром около 25 см и ясно видимым цветом — красным, желтым, а иногда ослепительно белым, и проделывают в воздухе длинный и порой сложный путь вблизи земли, проникают в здания, издают потрескивание, словно электрические разряды, существуют нередко в течение 5 сек, а затем внезапно исчезают с громким взрывом или бесшумно. Сообщения об этих свойствах, столь отличных от свойств обычной линейной молнии, встречали значительное недоверие, однако зарегистрировано очень много подробных наблюдений шаровой молнии и сделано несколько ее фотографий» (см. 2).

Таблица I

732

В. М. СМЕРНОВ

Природа молнии	Характер внутренней энергии	Характер распада	Примеры процессов распада	Константа скорости процесса распада	Плотность возбужденных частиц при времени распада молнии 10 сек	Внутренняя энергия при времени распада 10 сек и диаметре 20 см
Плазма, состоящая из электронов и ионов	Выделяется при рекомбинации заряженных частиц	Диссоциативная рекомбинация	$e + O_2^+ \rightarrow O + O$ $e + N_2^+ \rightarrow N + N$ $e + NO^+ \rightarrow N + O$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{сек}$ $2 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{сек}$ $4 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{сек}$	$5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$	10^{-8} дж
Плазма, состоящая из положительных и отрицательных ионов	То же	Тройная рекомбинация положительных и отрицательных ионов	$O_2^- + O_2^+ + O_2 \rightarrow 4O_2$ $NO^+ + NO_2^- + N_2 \rightarrow NO + NO_2 + N_2$	$1,6 \cdot 10^{-25} \text{ см}^6/\text{сек}$ $10^{-25} \text{ см}^6/\text{сек}$	$3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$	10^{-9} дж
Ионы одного сорта	Энергия электрического поля, создаваемого заряженными частицами	Разлет ионов под действием электрического поля	Подвижность тяжелых ионов больше $0,1 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$		10^7 см^{-3}	10^{-7} дж
Возбужденный газ, содержащий электронно-возбужденные атомы или молекулы	Электронное возбуждение атомов	Выделение энергии при тушении электронного возбуждения	$O_2(^4\Delta_g) + O_2 \rightarrow 2O_2$ $O_2(^1\Sigma_g^+) + N_2 \rightarrow O_2 + N_2$ $N_2(^3\Sigma^+) + O_2 \rightarrow N_2 + O_2$ $O(^1S) + O_2 \rightarrow O + O_2$ $O(^1D) + O_2 \rightarrow O + O_2$	$2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^3/\text{сек}$ $2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{сек}$ $4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{сек}$ $3 \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{сек}$ $5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{сек}$	Время жизни при нормальных условиях $< 0,1 \text{ сек}$	
Возбужденный газ, содержащий колебательно-возбужденные молекулы	Колебательное возбуждение молекул	Выделение энергии при тушении колебательного возбуждения	$N_2^* + N_2 \rightarrow 2N_2$ $O_2^* + O_2 \rightarrow 2O_2$ $N_2^* + CO_2 \rightarrow CO_2^* + N_2$	$\sim 10^{-19} \text{ см}^3/\text{сек}^5$ $10^{-17} \text{ см}^3/\text{сек}^{5,6}$ $6 \cdot 10^{-15} \text{ см}^3/\text{сек}^7$	Время жизни при нормальных условиях $< 0,01 \text{ сек}$	
Химическая	Выделяется при химической реакции	Химическая реакция компонент	$2O_3 \rightarrow 3O_2 + 69,4 \text{ ккал/моль}$ $2NO_2 \rightarrow N_2 + 2O_2 + 16 \text{ ккал/моль}$	$4 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3/\text{сек}$ при 400°K ⁸ —	$< 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ $3 \cdot 10^4 \eta \text{ дж}$ (η — концентрация озона) $6 \cdot 10^3 \eta \text{ дж}$ (η — концентрация NO_2)	

ного газа, возникшего после действия обычной молнии. Мы будем исходить из того, что температура этого газа порядка комнатной температуры. Если бы температура шаровой молнии составляла тысячи градусов, то молния всплывала бы вверх *) и не могла бы долго наблюдаться на небольшой высоте. При рассматриваемых температурах азот и кислород при наличии термодинамического равновесия присутствует в виде молекул.

Далее, при анализе природы шаровой молнии мы не будем обсуждать гипотезу шаровой молнии, когда она поддерживается внешним источником (см., например, ⁴) **). В этом случае особого внимания требует сам внешний источник энергии, без анализа которого мы не сможем сделать надежных заключений относительно природы шаровой молнии только на основании элементарных процессов. Кроме того, мы не будем останавливаться на гипотезах космической или ядерной природы шаровой молнии — эти гипотезы не выдерживают серьезной критики.

В табл. I дается сводка результатов относительно элементарных процессов, приводящих к распаду шаровой молнии при различных предположениях о ее природе. Сюда включены гипотезы, согласно которым шаровая молния представляет собой не сильно нагретый возбужденный газ. (Параметры элементарных процессов, приводимые без ссылок, взяты из книги².) Дадим краткие комментарии к табл. I.

а) Плазменная теория шаровой молнии полагает, что в газе имеется некоторое количество заряженных частиц. Атомные ионы вступают в реакцию с молекулами воздуха, образуя молекулярные ионы, например $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$, $N^+ + \bullet_2 \rightarrow NO^+ + O$. Константа первой реакции 10^{-11} см³/сек, второй — $6 \cdot 10^{-10}$ см³/сек, т. е. в воздухе за время порядка 10^{-8} сек атомные ионы преобразуются в молекулярные и распад шаровой молнии обусловлен диссоциативной рекомбинацией электронов и молекулярных ионов. Оценка внутренней энергии шаровой молнии для этого и следующего механизма проводилась следующим образом. Исходя из коэффициента рекомбинации α и времени распада молнии τ , оценивается плотность заряженных частиц, равная $(\alpha\tau)^{-1}$ или $(\alpha N\tau)^{-1}$, где N — полная плотность молекул газа. Отсюда из условия, что на образование каждой пары заряженных частиц тратится энергия порядка потенциала ионизации первоначальной атомной частицы, оценивалась внутренняя энергия шаровой молнии.

б) В воздухе происходит процесс $e + 2O_2 \rightarrow O_2^- + O_2$ с константой $3 \cdot 10^{-30}$ см⁶/сек при 300 °К, так что при нормальных условиях все электроны за время $\sim 10^{-8}$ сек превратятся в отрицательные ионы. Энергия связи электрона в любом отрицательном ионе значительно меньше характерного потенциала ионизации молекулы, так что рекомбинация положительного и отрицательного иона в газовой фазе идет с выделением энергии. Для комплексных ионов константа скорости этого процесса увеличивается со сложностью иона. Поэтому условие существования шаровой молнии, которая предложена И. П. Стахановым⁹ и содержит положительные и отрицательные комплексные ионы, также не выполняется.

в) Для этого механизма шаровой молнии^{1, 10} мы взяли наименьшее из наблюдаемых значений подвижности иона¹¹. В качестве времени

*) Согласно результатам работы³, мыльный пузырь диаметром 20—35 см, наполненный гелием, всплывает вверх со скоростью 1,2 см/сек. Плотность гелия соответствует плотности воздуха при температуре 220 °К.

**) В работе Капицы⁴ описано создание парящего плазменного шнура в плотном газе под действием СВЧ излучения. При некоторых условиях (сорт газа, стабилизации плазменного шнура циркуляцией газа) этот свободно парящий газовый ряд напоминает шаровую молнию.

распада шаровой молнии принимается время, за которое радиус шара удвоится (см. ¹²).

г) Приведенные константы отвечают распаду метастабильных атомов и молекул кислорода и азота; они отвечают распаду при комнатной температуре и резко увеличиваются с ростом температуры. Резонансно возбужденные состояния атомов и молекул (при их распаде нет запрета на излучение фотона) распадаются в молекулярном газе еще скорее. Например, тушение резонансно возбужденного состояния атома натрия (при высвечивании атома в этом состоянии возникает желтая линия) молекулой азота характеризуется константой скорости порядка 10^{-10} см³/сек. Таким образом, тушение электронно-возбужденных состояний в молекулярном газе происходит весьма быстро и природа шаровой молнии не может быть объяснена присутствием в молекулярном газе электронно-возбужденных атомов. Заметим, что проведенный анализ несправедлив в случае, если газ диссоциирован.

д) Приведенные константы соответствуют комнатной температуре и сильно увеличиваются с ее ростом. Колебательно-возбужденные молекулы азота эффективно передают свое возбуждение молекулам кислорода, двуокиси углерода и т. д., которые далее отдают эту энергию на поступательные степени свободы. Поэтому колебательная релаксация молекулярного азота в смеси газов происходит скорее, чем в чистом азоте, и по порядку величины за те же времена, что и релаксация колебательно-возбужденных молекул кислорода. В результате колебательной релаксации энергия, запасенная на колебательных степенях свободы, превращается в тепло за времена, малые по сравнению со временем жизни шаровой молнии.

е) Процесс разрушения озона протекает по схеме $O_3 + M \rightleftharpoons O + O_2 + M$, $O + O_3 \rightarrow 2O_2$, где M — молекула кислорода или азота. В табл. I приведена эффективная константа процесса разрушения озона $2O_3 \rightarrow 3O_2$, которая получена при $T = 400$ °К в воздухе при давлении 1 атм, причем константы отдельных процессов взяты из книги Кондратьева ⁸. При химической природе шаровой молнии понимается, что озон или другое термодинамически неустойчивое химическое соединение составляет малую часть основного газа — воздуха (скажем, несколько процентов) и молекулы этого соединения разрушаются в результате химических реакций друг с другом или с примесями.

4. Из приведенной таблицы вытекает, что среди рассмотренных механизмов шаровой молнии единственной приемлемой является химическая природа шаровой молнии. В этом случае энергия шаровой молнии может выделяться при химических реакциях, сопровождающихся изменением сорта входящих в нее частиц. Мы не обладаем достаточной информацией об элементарных процессах, чтобы сделать следующий шаг, определив, какие компоненты должны составить основу шаровой молнии. Однако можно показать, что одной из таких компонент может быть озон. В канале обычной молнии воздух диссоциирован. Проследим, к чему приведет релаксация атомарного кислорода в воздухе.

В табл. II приведены константы происходящих при этом процессов, которые взяты из книги В. Н. Кондратьева ⁸ и относятся к температуре 400 °К. Заложим эти процессы в уравнения баланса для плотности атомарного, молекулярного кислорода и озона и выясним, какое количество озона образуется в результате этого. Получим приближенно

$$[O_3] = \left\{ \frac{1}{[O]} + \frac{K_1 ([O_2] + [N_2])}{2(K_2 [O_2] + K_3 [N_2]) [O_2]} \right\}^{-1} = \left(\frac{1}{[O]} + 4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^{-3} \right)^{-1};$$

здесь $[O]$ — начальная плотность атомарного кислорода, $[O_3]$ — конечная плотность озона, $[O_2]$, $[N_2]$ — плотности молекулярного кислорода и азота, которые мы считаем неизменными и равными их значениям при

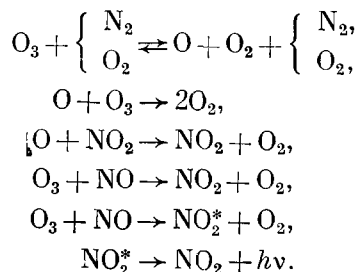
Таблица II

Процессы, протекающие при релаксации
диссоциированного кислорода при 400 °K

Процесс	Константа скорости процесса
$2O + O_2 \rightarrow 2O_2$	$K_1 = 3 \cdot 10^{-33} \text{ см}^6/\text{сек}$
$O + 2O_2 \rightarrow O_3 + O_2$	$K_2 = 6 \cdot 10^{-34} \text{ см}^6/\text{сек}$
$O + O_2 + N_2 \rightarrow O_3 + N_2$	$K_3 = 6 \cdot 10^{-34} \text{ см}^6/\text{сек}$
$O + O_2 + O_3 \rightarrow 2O_3$	$K_4 = 9 \cdot 10^{-34} \text{ см}^6/\text{сек}$
$O_3 + O \rightarrow 2O_2$	$K_5 = 6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3/\text{сек}$
$O_3 + O_2 \rightarrow 2O_2 + O$	$K_6 = 2 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3/\text{сек}$
$O_3 + N_2 \rightarrow O_2 + O + N_2$	$K_7 = 2 \cdot 10^{-22} \text{ см}^3/\text{сек}$

нормальных условиях. Отсюда следует, что при благоприятных условиях образования озона его количество в воздухе может составлять проценты и тем самым содержать достаточную энергию.

5. Предположив химическую природу шаровой молнии, давайте проследим за некоторыми ее свойствами. В объеме, содержащем химическую компоненту, протекают химические реакции, побочным результатом которых является выход излучения. В качестве одного из возможных циклов такого типа для воздуха, содержащего в качестве примеси озон и двуокись азота, являются процессы¹



Возбужденная молекула NO_2 , образуемая в предпоследней реакции, излучает в области длин волн $^{13} 5200\text{--}8100 \text{ \AA}$ (если бы вся энергия реакции уносилась фотоном, то длина волны фотона составляла бы 5000 \AA).

Представленный цикл процессов приводит в конечном итоге к переработке химической энергии, запасенной в озоне. Константы скорости представленных процессов⁸ позволяют составить общую картину данного цикла. Если плотности озона и двуокиси азота сравнимы, то разрушение озона обусловлено реакциями с участием окислов азота. Вероятность образования молекулы в возбужденном состоянии при реакции NO и O_3 (т. е. вероятность появления фотона в результате этой реакции) растет с ростом температуры, изменяясь от 0,08 при 300 °K до 0,32 при 700 °K *).

*) Заметим, что нагревание воздуха после превращения озона в кислород не очень велико. Так, если начальная концентрация озона составляет 1%, его разложение приводит к нагреванию воздуха на 50°.

Это обеспечивает коэффициент преобразования химической энергии в энергию излучения на уровне нескольких процентов. Само время разрушения озона зависит от температуры. Так, при концентрации двуокиси азота, равной 1%, эта величина оказывается порядка $2 \cdot 10^4$ сек при 300 °K, порядка 0,4 сек при 400 °K и порядка 10^{-3} сек при 500 °K.

Представленный цикл процессов заманив в том отношении, что он объясняет химический состав следа шаровой молнии. Согласно измерениям Дмитриева¹ в воздухе, где прошла шаровая молния, отмечалось повышенное содержание только двуокиси азота и озона. Кроме того, рассматриваемый механизм свечения правильно передает наблюдаемый цвет шаровой молнии, объясняет объемный (а не поверхностный) характер свечения шаровой молнии, который восстанавливается из фотографий шаровой молнии¹⁴. Для представления полной физической картины шаровой молнии наряду с элементарными процессами большую роль играют протекающие в ней макропроцессы. В частности, из-за резкой зависимости скоростей рассматриваемых процессов от температуры выгорание химически активного вещества может носить нерегулярный характер, а интенсивность свечения шаровой молнии в течение ее существования может сильно колебаться. Это и наблюдается на фотографии шаровой молнии¹⁴.

6. Оценим время жизни шаровой молнии при химической ее природе. Время жизни шаровой молнии определяется конвективным движением газа под действием силы тяжести и перепада температуры в ней. Тепловой поток газа q в этом случае составляет по порядку величины¹⁵

$$q \sim wN\Delta T \sim G^{1/4} \frac{\kappa \Delta T}{L},$$

откуда

$$w \sim \frac{G^{1/4} \kappa}{LN};$$

здесь w — скорость направленного движения струи газа, N — плотность газа, T — перепад температур, G — число Грассгофа, κ — теплопроводность газа, L — характерный размер шаровой молнии, на котором осуществляется рассматриваемый перенос тепла.

Считая $L \sim 20$ см, мощность выделяемой тепловой энергии порядка 100 вт и принимая остальные параметры, которые относятся к воздуху при нормальных условиях, найдем $G \sim 10^6$, $\Delta T \sim 100$ град, $w \sim 3$ см/сек. Это дает по порядку величины для времени жизни шаровой молнии $L/w \sim 10$ сек, что не расходится с порядком величины для наблюдаемых значений.

7. Шаровая молния может закончить свое существование двумя способами. Либо в результате конвективных движений газа химически активное вещество рассеется в воздухе, что приведет к прекращению свечения. Либо в зону шаровой молнии попадет вещество, эффективно реагирующее с химически активным веществом шаровой молнии. Тогда произойдет тепловой взрыв¹⁶, в результате которого будет переработана заметная часть химической энергии шаровой молнии.

8. Рассмотрим проблему сферической формы шаровой молнии, которая является одной из наиболее трудных проблем шаровой молнии. Обычно считается, что сферическая форма шаровой молнии создается поверхностным натяжением, которое обусловлено взаимодействием между частицами, находящимися внутри шаровой молнии. Поверхностное натяжение на границе шаровой молнии делает сферическую форму шаровой молнии устойчивой по отношению к разным возмущениям.

Давайте оценим поверхностную энергию $U_{\text{пов}}$, которая создается в результате взаимодействия активных частиц, находящихся в шаровой молнии. Эта энергия — порядка

$$U_{\text{пов}} \sim U (N^{-1/3}) N^{-1/3} SN,$$

где U — потенциал взаимодействия двух частиц на среднем расстоянии между ними, N — плотность взаимодействующих частиц, S — величина поверхности шаровой молнии. Поверхностная энергия представляет собой энергию притяжения частиц, находящихся в поверхностном слое. Оценим величину этой энергии в случае, когда активные молекулы обладают дипольным моментом. В табл. III приведены дипольные моменты ряда

Таблица III

Дипольный момент молекул в дебаях (10^{-18} CGSE)

Молекула	O ₃	NO ₂	N ₂ O	H ₂ O	HNO ₃	H ₂ O ₂
Дипольный момент, дебай	0,54	0,32	0,16	1,84	2,16	2,13

молекул, которые могут являться активными молекулами шаровой молнии. Будем считать, что направление дипольных моментов соседних активных молекул такое, что они притягиваются. Тогда энергия притяжения этих молекул при расстоянии R между ними равна $U \sim d^2/R^3$, где дипольный момент молекулы $d \sim 10^{-18}$ CGSE. Отсюда получим оценку для поверхностной энергии шаровой молнии в рассматриваемом случае (площадь поверхности шаровой молнии $S \sim 10^3 \text{ см}^2$):

$$U_{\text{пов}} \sim 10^{-33} N^{5/3} \text{ эрг} \cdot \text{см}^5,$$

где N — плотность активных молекул.

Эту величину следует сравнить с кинетической энергией движения в шаровой молнии, в результате которого может быть искажена форма шаровой молнии. Согласно ранее приведенной оценке характерная скорость конвективного движения газа $w \sim 3 \text{ см/сек}$. Отсюда кинетическая энергия конвективного движения газа внутри шаровой молнии

$$\mathcal{E} \sim 10 \text{ эрг}.$$

Как видно, поверхностная энергия шаровой молнии, создаваемая диполь-дипольным взаимодействием активных частиц, превышает кинетическую энергию конвективного движения при плотности активных молекул $N > 10^{21} \text{ см}^{-3}$. Это значительно больше плотности молекул в воздухе. Таким образом, диполь-дипольное взаимодействие молекул в шаровой молнии не может обеспечить достаточное поверхностное натяжение, приводящее к сферической форме поверхности шаровой молнии. Заметим к тому же, что наша оценка для поверхностной энергии завышена, ибо мы считали, что соседние дипольные молекулы всегда притягиваются.

Проведем оценку поверхностной энергии в случае, когда поверхностное натяжение создается за счет кулоновского взаимодействия заряженных частиц. Поскольку потенциал взаимодействия частиц с единичным зарядом e на расстоянии R равен e^2/R , то согласно формуле для поверхностной энергии получим

$$U_{\text{пов}} \sim e^2 N_i S,$$

где N_i — плотность заряженных частиц. Эта формула дает при рассматриваемых условиях

$$U_{\text{пов}} \sim 10^{-18} N_i \text{ эрг} \cdot \text{см}^3,$$

и поверхностная энергия превышает кинетическую энергию конвективного движения газа при плотности ионов $N_i > 10^{17} \text{ см}^{-3}$, что также нереально, хотя оценка и завышена.

Наконец, рассмотрим промежуточный случай, когда в активный газ входят дипольные молекулы с плотностью N и заряженные частицы с плотностью N_i , причем $N \gg N_i$. Потенциал взаимодействия заряженной частицы с дипольной молекулой на расстоянии R между ними равен $U(R) \sim ed/R^2$. Будем считать, что это взаимодействие отвечает притяжению. Тогда для поверхностной энергии, создаваемой рассматриваемым типом взаимодействия, имеем

$$U_{\text{пов}} \sim U(N_i^{-1/3}) N_i^{-1/3} SN \sim e d S N N_i^{1/3} \sim 10^{-24} N N_i^{1/3} \text{ эрг} \cdot \text{см}^4.$$

При реальных значениях плотности активных молекул $N \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и плотности заряженных частиц $N_i \sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-3}$ поверхностная энергия, создаваемая в результате взаимодействия заряженных частиц с дипольными молекулами, лишь на порядок меньше поверхностной энергии, обусловленной взаимодействием самих дипольных молекул.

Проведенные оценки показывают, что взаимодействие частиц внутри шаровой молнии даже при благоприятных условиях не может создать достаточное поверхностное натяжение, которое обеспечило бы сферическую форму поверхности шаровой молнии. По этой причине проблема формы шаровой молнии является одной из наиболее трудных. Возможно, строгой сферической поверхности не существует. Тогда для объяснения формы шаровой молнии можно не привлекать поверхностные силы. Возможно, форма шаровой молнии стабилизируется за счет циркуляции газа. Такая возможность была продемонстрирована в экспериментах Капицы⁴. Кроме того, сферичность шаровой молнии может быть объяснена сферически-симметричным распределением поля температур. Действительно, константа скорости химической реакции, в результате которой выделяется тепло, резко увеличивается с ростом температуры. Само же устойчивое распределение температуры, которое мало чувствительно к форме распределения источника тепла, оказывается сферически-симметричным. Константа скорости химической реакции, приводящей к свечению, также резко зависит от температуры. Поэтому профиль светящейся области шаровой молнии повторяет профиль распределения температур.

Доводом в пользу такого объяснения сферической формы шаровой молнии являются эксперименты по поджиганию горючей смеси, добавляемой в малом количестве к воздуху¹. Эта смесь, зажигание которой в большом объеме воздуха инициируется с помощью искры, горит в небольшом сферическом объеме, составляющем малую часть от всего заполненного горючей смесью объема.

Анализ, проведенный в данной заметке, позволяет заключить, что среди рассмотренных наиболее приемлемой является химическая природа шаровой молнии^{*}). Остается много проблем, требующих решения. Следует выяснять, какая химическая смесь составляет основу шаровой молнии, в каком состоянии (газ, аэрозоль) эта смесь находится, какие

^{*}) Мы рассматривали случай, когда светящийся шар возникает в ненагретом воздухе и поддерживается за счет внутренней энергии находящихся в нем частиц. Имеются другие возможности создания светящегося шара. К ним относится возникновение светящихся объемов газа под действием внешнего СВЧ излучения⁴. Эти объекты содержат слабоионизованную плазму с температурой газа 2000—2500 °К. Другой тип светящихся сфер представляет собой сгусток испаренного металла, который образуется под действием молнии или сильного разряда. Такие огненные шары тяжелее воздуха, так что падают и катятся по земле. Однако эти типы светящихся сфер не соответствуют многим из наблюдаемых случаев шаровой молнии.

процессы и цепные реакции приводят к выделению энергии и свечению шаровой молнии, при каких условиях она существует, насколько сферична ее форма. Эти проблемы невозможно решить без эксперимента. Без экспериментального подтверждения и любое теоретическое обоснование природы шаровой молнии не будет убедительным. А для постановки эксперимента необходимо ограничить круг условий, при которых его следует выполнять. Именно эту задачу и ставил перед собой автор при написании данной заметки.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. С. Сянггер, Природа шаровой молнии, М., «Мир», 1973.
 2. М. Юман, Молния, М., «Мир», 1972.
 3. J. R. Powell, D. Finkelstein, Am. Sci. 58, 262 (1970).
 4. П. Л. Капица, ЖЭТФ 57, 1801 (1969).
 5. R. Frey, J. Lukasik, J. Dufuing, Chem. Phys. Lett. 14, 514 (1972); M. A. Kovacs, M. E. Mack, Appl. Phys. Lett. 20, 487 (1972).
 6. F. A. Smith, W. Tempest, J. Acoust. Soc. Am. 33, 1626 (1961).
 7. J. C. Stephenson, R. E. Wood, C. B. Moore, J. Chem. Phys. 48, 4790 (1968).
 8. В. Н. Кондратьев, Константы скорости газофазных реакций, М., «Наука», 1971.
 9. И. П. Стаханов, Письма ЖЭТФ 18, 193 (1973); ЖТФ 44, 1373 (1974).
 10. Б. В. Войцеховский, Б. [Б.]Войцеховский, ДАН СССР 218, 77 (1974).
 11. Б. М. Смирнов, Ионы и возбужденные атомы в плазме, М., Атомиздат, 1974.
 12. Б. М. Смирнов, Физика слабоионизованного газа, М., «Наука», 1972, стр. 228.
 13. R. J. Gordon, M. C. Lin, Chem. Phys. Lett. 22, 262 (1973); W. Braun et al., J. Chem. Phys. 61, 461 (1974).
 14. D. W. Davis, R. B. Standler, Nature 240 (5377), 144 (1972); М. Т. Дмитриев, В. М. Дерюгин, Г. А. Калинин, ЖТФ 42, 2187 (1972).
 15. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.
 16. Д. А. Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике, М., «Наука», 1967.
-