

Конденсация водяных паров и взрыв перегретых водных капель — возможные источники энергии шаровой молнии

© А.С. Тарновский

Самарский государственный педагогический университет,
443043 Самара, Россия
e-mail: sameta@rambler.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2003 г.)

Предложена модель шаровой молнии, представляющая собой массу влажного воздуха, нагретого до температуры порядка 600–650 К и содержащего многочисленные заряженные капли и микропузырьки размером 10^{-5} см и меньше, а также водяной пар при температуре, близкой к критической. Конденсация паров в пузырьках и последующее охлаждение образовавшихся микрокапель является источником энергии, идущей на тепловое излучение шаровой молнии. Излучение света и радиоволн объясняется движением ионов и электронов в электрическом поле заряженных пузырьков и капель и собственным тепловым вращательным движением заряженных микрокапель. Микрокапли в результате коагуляции оказываются перегретыми и, следовательно, взрывоопасными. Внешнее электрическое поле, конденсация пересыщенных водяных паров и т. п. могут служить дополнительными источниками энергии взрыва шаровой молнии.

Шаровая молния — одно из все еще неразгаданных явлений природы. Для ее объяснения выдвигаются все новые и новые гипотезы [1–8]: плазмид, т. е. объем, заполненный высокотемпературной плазмой, удерживаемой собственным магнитным полем, химические гипотезы. Например, Д. Араго утверждал, что шаровая молния состоит из окислов азота, озона и пропитана „молниевой материей“. По Дж. Барри, шаровая молния — это некое углеводородное соединение, которое образуется при электрическом разряде и каким-то образом достигает значительной концентрации в относительно малом объеме. Существуют гипотезы, согласно которым шаровая молния состоит из заряженных частиц (Я.И. Френкель и Е. Хилл): пылинок или ионных облаков разного знака, отделенных друг от друга. По И.В. Подмошенскому, шаровая молния образуется из нитевидных частиц. Авторы, склонные к экзотике, ищут источники энергии шаровой молнии во внутриядерных процессах или еще глубже. В 1956 г. В.И. Арабаджи высказал предположение о том, что грозовые электрические поля фокусируют тяжелые частицы, например космические лучи, в шаровую молнию, что влечет за собой самоподдерживающуюся ядерную реакцию. Заметим, однако, что никакого повышения уровня радиации, связанного с прохождением шаровой молнии, в наблюдениях обнаружено не было. В работе Е. Ватаи [2] шаровая молния рассматривается как доказательство существования новых элементарных объектов — лептонуклонов и их кластеров. В работе В.К. Коршунова [3] утверждается, что шаровая молния возникает в результате прохождения через атмосферу Земли монополя Т'Хуфта–Полякова, являющегося сильным катализатором в реакциях распада нуклонов.

В настоящее время популярной является аэрогельная или кластерная модель шаровой молнии, развиваемая с конца 70-х годов Б.М. Смирновым и его коллегами из института теплофизики в Новосибирске. Согласно [4,5], активное вещество шаровой молнии представляет собой

заряженную структуру, состоящую из субмикронных нитей, т. е. пористый фрактальный кластер с большой химической емкостью. Почти весь каркас такой структуры занят свободными порами. Высвобождение энергии из химически заряженного фрактального кластера может быть описано многоступенчатым процессом горения. В качестве примера такого процесса Б.М. Смирнов предлагает многоступенчатое горение фрактального кластера из древесно-угольной пыли в озоне, поглощенном самим кластером, как модельный процесс шаровой молнии. В этой модели цвет и свечение шаровой молнии создается путем, подобным пиротехнике, использующей светящиеся компоненты состава. Предложенная Б.М. Смирновым модель способна удовлетворительным образом объяснить разные свойства шаровой молнии. К. Корум и Дж. Корум сообщили об успешном создании шаровой молнии в открытом воздухе [6], причем вид огненных шаров, полученных на опыте, совпадает с их теоретическим описанием, даваемым фрактальной моделью Б.М. Смирнова.

Однако свойства шаровых молний, отмеченные в различных наблюдениях, слишком разнообразны, иногда противоречивы и, по-видимому, ни одна теоретическая модель не может объяснить все наблюдаемые случаи появления и прохождения шаровой молнии. На наш взгляд, в природе существуют различные типы шаровых молний, требующие различного теоретического объяснения. Поэтому имеют право на существование различные модели шаровой молнии. Причем ни одна из реалистических моделей шаровой молнии как некоего образования объемом не более кубического метра и с плотностью, приблизительно равной плотности воздуха, не может объяснить тех гигантских энергий взрыва шаровой молнии, которые отмечались в некоторых наблюдениях [4,5,7,8]. Поэтому наряду с теоретическими моделями самих шаровых молний для объяснения этого все еще загадочного явления природы необходимо использовать

дополнительные теоретические модели процессов, позволяющие объяснить, каким образом происходит увеличение энерговыделения при взрыве некоторых шаровых молний, и указать на источник энергии, выделяющейся при взрывах „легких“ и, следовательно, маломощных шаровых молний [7,8].

По данным Б.М. Смирнова [4,5] и П.П. Стаханова [7], шаровая молния — это светящееся сферическое образование в воздухе красного, желтого, белого, голубого или, гораздо реже, зеленого цвета, диаметром от сантиметра до метра. Среднее время жизни 9 с, средняя скорость перемещения 9 м/с. Около 51% шаровых молний заканчивают свое существование взрывом, иногда мощным и разрушительным, остальные — тихим угасанием или распадом на части. Средняя энергия порядка 10 кДж, в отдельных случаях она превышает 1000 кДж. Тепловое излучение шаровой молнии незначительно, порядка 100–500 Вт, и соответствует излучению шара диаметром 20–30 см при температуре 600–650 К [7]. Мощность излучения в оптическом диапазоне составляет несколько ватт и соответствует температурам от 2000 до 10 000 К, однако, скорее всего, это излучение является неравновесным [7, с. 151]. Шаровая молния, по-видимому, может также излучать довольно сильное неравновесное радиоизлучение. Электромагнитное излучение при грозах и, в частности, излучение, связанное с молниями, обладает очень широким спектром частот, по крайней мере, от 10 до 1000 Нз. Причем высокочастотное излучение появляется с некоторым запаздыванием, порядка 5 мс, после регистрации разряда молнии [8, с. 215].

В целом шаровая молния в период своего существования, по данным наблюдений, оказывается удивительно стабильной. Лишь менее 1% наблюдателей отмечают изменение размеров или цвета шаровой молнии, причем данные различны: иногда отмечается рост молнии, иногда цвет изменяется от красного края спектра к фиолетовому, иногда — наоборот. Единственная корреляция между физическими свойствами шаровой молнии, отмечаемая наблюдателями [5], — чем больше ее размер, тем дольше она живет — может быть объяснена условиями наблюдения: более крупную и яркую молнию замечают раньше и дольше удерживают в поле зрения. В подавляющем большинстве случаев шаровые молнии так же, как и обычные, появляются во время грозы. Однако новые данные о японской шаровой молнии [5], использующие большую статистику (2060 случаев), дают другой результат: 89% наблюдений относятся к ясной погоде и только 2.5% наблюдаются в грозу и остаются непонятными.

Шаровая молния обладает электрическими свойствами. Ее действие на человека, как правило, подобно действию электрического тока. Она может вызывать онемение, паралич части тела [5]. По данным Стаханова [7], на 1000 случаев наблюдения шаровой молнии отмечается 5 смертельных исходов. Часто появление шаровой молнии сопровождается несильным звуком — потрескиванием, шипением, свистом. Иногда появление

шаровой молнии сопровождается запахами серы, озона и окислов азота. Такие же запахи иногда возникают при разрядах линейной молнии и других электрических разрядах. В большинстве случаев, однако, наблюдатели не отмечают каких-либо признаков, которые указывали бы на состав „вещества“ шаровой молнии, отличный от состава окружающего воздуха. Иногда отмечается после взрыва или угасания шаровой молнии образование на ее месте небольшого облака пара или тумана.

Согласно модели Б.И. Смирнова, запас энергии шаровой молнии сравним с энергией нескольких спичечных головок, т.е. порядка нескольких килоджоулей, и недостаточен для объяснения наблюдавшихся случаев расщепления шаровой молнией стволов крупных деревьев, разрушения различных конструкций, изгибания водопроводных труб и т.д., где энерговыделение при взрыве должно составлять десятки мегаджоулей. Для того чтобы объяснить наблюдавшиеся мощные и сверхмощные взрывы шаровых молний, необходимо допустить существование неких дополнительных механизмов, приводящих к увеличению энерговыделения при взрыве. При этом первоначальная молния должна играть роль некоего триггерного механизма, приводящего в действие мощные внешние источники энергии. Один из таких источников указан в [7]. При распаде шаровой молнии образуется проводящий канал, соединяющий области с большой разностью потенциалов. Происходят „короткое замыкание“ и в результате выделение дополнительной „взрывной“ энергии. Стаханов пишет [7]: „Энергия накапливается в заряженных проводниках, а шаровая молния служит лишь триггером для освобождения этой энергии. Впрочем, возможность тепловых взрывов в результате выделения внутренней энергии шаровой молнии все же не исключена“.

Другой возможный механизм увеличения энерговыделения при взрыве шаровой молнии предложен в работе [9]: взрыв маломощной шаровой молнии в пространстве, содержащем пересыщенные водяные пары, приводит к взрывной, т.е. очень быстрой конденсации влаги на многочисленных фрагментах, в том числе и на ионах распавшейся шаровой молнии, что в свою очередь приводит к резкому понижению давления в области взрыва и к последующему расширению вовнутрь прилегающих к месту взрыва слоев влажного воздуха, что может привести к конденсации, падению давления и к расширению вовнутрь дальних слоев воздуха, содержащего пересыщенные водяные пары. Возникает своеобразная цепная реакция последовательных конденсаций, расширений и снова конденсаций и расширений пересыщенного влагой воздуха, в результате которой образуется сходящаяся к центру кумулятивная газодинамическая волна. Значительную работу сжатия совершают внешние „сухие“ слои атмосферного воздуха.

Дополнительная энергия выделяется в результате конденсации влаги. На последнем этапе сходящаяся волна приводит к резкому повышению давления и температуры в центральной области (кумулятивный эффект) и

затем сменяется расходящейся волной. Предложенный механизм может объяснить мощные взрывы шаровых молний, „необъясненные“ взрывы в верхних слоях атмосферы [10], в том числе и „загадку века“ — взрыв над Подкаменной Тунгусской, прогремевший в июне 1908 г., который опустошил тайгу на площади более 2000 км², но не оставил никаких следов источника своей энергии [11]. Конденсационный взрыв характерен именно тем, что он не требует никаких „взрывчатых“ веществ, которые бы отличались по составу от атмосферного воздуха. Идея существования дополнительных механизмов, приводящих к увеличению энерговыделения при взрыве шаровой молнии, в частности, модель конденсационного взрыва в атмосфере, вызванного распадом или взрывом обычной маломощной шаровой молнии, не противоречит ни одной из известных реалистических моделей шаровой молнии. Напротив, идея конденсационного взрыва, как отмечено в [12], кроме шаровой молнии, позволяет объяснить и „исследовать“ также и другие атмосферные явления. Заметим, что взрывы шаровых молний иногда оставляют после себя характерный запах, аналогичный запаху, остающемуся разрядом линейной молнии и другими электрическими разрядами. Его, по-видимому, можно объяснить образованием озона и другими чисто атмосферными процессами, не требующими участия посторонних взрывчатых веществ.

В большинстве случаев, однако, прохождение шаровой молнии не оставляет никаких запахов или других посторонних вещественных следов. Этот факт требует, на наш взгляд, допущения, что, наряду с другими типами шаровых молний, включающих в себя посторонние по отношению к атмосферному воздуху вещества, должны существовать и чисто атмосферные шаровые молнии, состоящие из нагретого воздуха и воды в виде горячего пара, паровых пузырьков и заряженных водяных капель. Такие пузырьки и капли могут образовываться при прохождении электрического разряда через область, содержащую достаточно влаги. В ряде работ отмечается, что неравновесные тепловые процессы могут приводить к гораздо большей степени упорядоченности, чем это считалось ранее [13]. Например, при прохождении сильных токов через тонкие проволоки в результате взрыва образуются примерно равные по величине фрагменты с гладкими краями. Аналогичные явления наблюдаются и при прохождении токов через жидкости [14].

Размеры дождевых капель колеблются от 1 μm до нескольких mm, размеры капель тумана — от 0.1 до 1 μm [15, с. 220]. Скорость седиментации таких капель меньше 1 cm/h. Допустим, что в результате разряда линейной молнии (или любого другого электрического разряда) может образоваться паровоздушная смесь при температуре, близкой к критической $T_c = 374.15^\circ\text{C}$, содержащая большое число нагретых до такой температуры водяных капель (или пузырьков), размеры которых меньше размеров капелек тумана. Обычно водность облаков не превышает 10 g/m³, но мы допустим, что масса всех водных капель в шаровой молнии приблизительно равна

или чуть больше массы нагретого влажного воздуха, так чтобы плотность шаровой молнии в целом не превышала заметным образом плотности окружающего воздуха. Напомним, что плотность насыщенного влагой воздуха при температуре, близкой к критической, составляет менее половины плотности воздуха при температуре $T = 20^\circ\text{C}$: плотность воды и пара при критической температуре $\rho_c = 0.307\text{ g/cm}^3$. В средней шаровой молнии размером порядка 10 dm³, согласно нашему предположению, должно содержаться почти 10 g воды и пара, которые в результате охлаждения и конденсации могут выделить порядка 40 kJ энергии. Такая шаровая молния может обеспечить тепловое излучение мощностью в 1–2 kW в течение 10 s без заметного изменения своих параметров. Если капли достаточно малы, порядка 10⁻⁶–10⁻⁷ cm, то существенный дополнительный вклад в энергию шаровой молнии даст поверхностная энергия капель. Полная поверхностная энергия воды составляет 118 mJ/m³. Она не зависит от температуры [15, с. 36] и может выделяться в виде тепла в результате коагуляции капель.

Рассмотрим водный пузырек радиуса r при температуре $T \geq 300^\circ\text{C}$ и плотности воды 0.45 g/cm³, содержащий насыщенный водяной пар, давление которого p много больше атмосферного. Избыточное давление пара уравнивается поверхностным натяжением водной пленки

$$p = \alpha/r. \quad (1)$$

Давление и коэффициент поверхностного натяжения α в уравнении (1) зависят от температуры. При $T = 300^\circ\text{C}$ [15, с. 293] $\alpha = 15\text{ erg/cm}$, $p = 90\text{ kg/cm}^2 = 10^8\text{ din/cm}^2$. Следовательно, $r \sim 10^{-7}\text{ cm}$. При $T = 200^\circ\text{C}$ $r \leq 10^{-5}\text{ cm}$. Такие водные пузырьки оказываются температурно-устойчивыми: при понижении температуры растет поверхностное натяжение α , следовательно, увеличивается давление водной пленки и за счет работы сжатия восстанавливается первоначальное равновесие. И, наоборот, при спонтанном повышении температуры происходит уменьшение поверхностного натяжения, вследствие чего происходит расширение водяного пара, понижение температуры и восстановление равновесного состояния. Поэтому процесс потери тепла такими пузырьками вследствие конденсации содержащихся в них паров является устойчивым и квазиравновесным. В итоге происходит уменьшение размеров пузырьков, повышение давления и температуры водяного пара.

Так продолжается до тех пор, пока весь водяной пар внутри пузырька не сконденсируется полностью. После чего существенным оказываются процессы коагуляции образовавшихся и нагретых почти до критической температуры водных капель и их остывание. Если коагуляция оказывается достаточно быстрой, то вода, содержащаяся в каплях, оказывается в перегретом состоянии, а сами капли — взрывоопасными. Существование такой шаровой молнии может закончиться взрывом сравнительно небольшой мощности. Однако такой взрыв приводит к рассеиванию в окружающее

пространство многочисленных фрагментов первоначальной шаровой молнии, среди которых могут быть заряженные микрокапли и ионы, что в свою очередь может послужить триггерным механизмом, инициирующим вторичный взрыв гораздо больше мощности, например, в результате быстрой конденсации пересыщенных водяных паров в окружающем пространстве, короткого замыкания и т.п. Если же плотность образовавшихся горячих водных капель оказывается недостаточной для быстрой коагуляции или коагуляция сдерживается значительными электрическими зарядами одного знака, сосредоточенными на каплях, тогда капли постепенно остывают, испаряются или рассеиваются в окружающее пространство. И существование такой шаровой молнии заканчивается тихим угасанием, иногда с предварительным распадом на части различной величины.

Разумеется, образование пароводяных пузырьков не является обязательной стадией в процессе существования шаровой молнии. В результате мощного электрического разряда могут сразу же образоваться перегретые или просто горячие капли любого размера, взвешенные в горячем и влажном воздухе.

Для того чтобы объяснить электрические свойства шаровой молнии и испускаемое ею электромагнитное излучение, необходимо допустить, что по крайней мере часть водных капель несет на себе определенный электрический заряд. Излучать могут ионы, имеющие заряд того же знака, что и заряд капли. Оторвавшись от капли, такой ион в результате электрического взаимодействия с ней приобретет кинетическую энергию $E = Ze^2r^{-1}$, которая при $r \sim 10^{-7}$ см и $Z = 1$ соответствует температуре $T \sim 10^4$ К. При последующих столкновениях такие ионы будут приводить к неравновесному излучению в видимой части спектра. Капли больших размеров и с большим зарядом, для которых величина Ze^2r^{-1} имеет тот же порядок также будут приводить к излучению в видимой части спектра. Капли, для которых величина Ze^2r^{-1} достаточно велика, будут излучать в ультрафиолетовой части спектра, если эта величина мала — в инфракрасной его части. Ионы и электроны, заряды которых противоположны по знаку заряду капли, приближаясь к ней, также будут набирать необходимую для излучения в видимой или невидимой части спектра энергию.

Можно качественно объяснить тот факт, что шаровые молнии зеленого цвета не наблюдаются или наблюдаются крайне редко. Дело в том, что зеленый цвет соответствует середине видимого спектра. Достаточно учесть (или допустить), что эффективный диапазон излучения шаровой молнии достаточно широк без резкого максимума в центральной его части, и мы придем к выводу, что излучение шаровой молнии, середина диапазона излучения которой соответствует зеленому цвету, будет восприниматься наблюдателем как излучение белого цвета. Если же центр спектра излучения сдвинут достаточно далеко к фиолетовому или красному краю видимого спектра, то излучение шаровой молнии будет

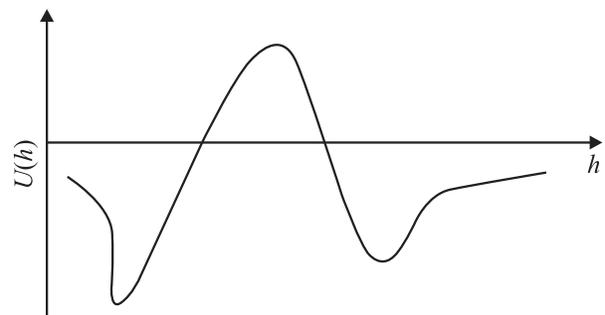
окрашенным соответствующим образом. Вероятность того, что спектр излучения окажется достаточно узким и сосредоточенным именно в области зеленого цвета, мала для неравновесного и равновесного излучения шаровой молнии. Этим обстоятельством можно объяснить сравнительную редкость наблюдения шаровых молний зеленого цвета.

Радиоизлучение шаровой молнии можно объяснить тепловым движением заряженных капель. После конденсации пара внутри микропузырьков и тепловой релаксации на каждую степень свободы микрокапли, в том числе и на вращательную, будет приходиться приблизительно kT энергии. Такие капли будут вращаться с угловой скоростью ω , удовлетворяющей условию

$$Mr^2\omega^2 \sim kT. \quad (2)$$

При массе капли $M \sim r^3 \approx 10^{-21}$ г и $T \approx 600$ К это приведет к излучению с частотой $\omega \sim 10^{10}$ с $^{-1}$, что соответствует сантиметровому диапазону. Капли размером $r \sim 10^{-5}$ см будут излучать с частотой $\omega \sim 10^6$ с $^{-1}$, т.е. в средне- и длинноволновом радиодиапазонах. Каким образом, однако, возникает запаздывание начала излучения шаровой молнии в радиодиапазоне? В начальный момент шаровая молния содержит в основном только пароводяные пузырьки, которые не излучают в радиодиапазоне, после конденсации содержащегося в микропузырьках пара образовавшиеся заряженные микрокапли опять излучают в основном в оптическом, а не в радиодиапазоне. И только образовавшиеся в результате коагуляции заряженные капли более крупных размеров, наконец, начинают излучать в радиодиапазоне. Процесс образования из микропузырьков с паром сравнительно крупных заряженных капель требует времени. Этот факт по крайней мере качественно объясняет отмечаемый наблюдателями факт задержки радиоизлучения на время порядка 5 мс.

Рассмотрим теперь вопрос об устойчивости шаровой молнии. Для сферических дисперсных частиц, обладающих небольшим электрическим зарядом, и при условии, что их радиус больше толщины диффузного слоя, т.е. $r \geq 10^{-7}$ см, зависимость полной энергии от расстояния h , согласно [15, с. 281], характеризуется одним максимумом и двумя минимумами (см. рисунок). Первый минимум соответствует слипанию частиц



(капель), второй — их молекулярному притяжению. На средних расстояниях между частицами преобладает электростатическое отталкивание, препятствующее их сближению. Высота максимума $U(h)$ играет роль потенциального барьера и определяет вероятность коагуляции капель. Взаимное притяжение капель на далеких расстояниях приводит к существованию поверхностных сил на границе шаровой молнии и, следовательно, к ее устойчивости. Поверхностное натяжение на границе шаровой молнии, очевидно, существенно меньше поверхностного натяжения на границе водной капли и воздуха минимум на два порядка. Однако и небольшое поверхностное натяжение, порядка 10^{-7} J/cm², согласно [7, с. 119], обеспечит устойчивость шаровой молнии при условии, что отклонения плотности ее вещества от плотности окружающего воздуха не превышают 1%.

Для устойчивости отдельной заряженной капли необходимо, чтобы ее электростатическая энергия отталкивания была меньше поверхностной энергии притяжения, т.е.

$$Z^2 e^2 r^{-1} < 4\pi r^2 \sigma. \quad (3)$$

Если капля возникла в результате слияния нескольких капель с одинаковыми объемами и зарядами, то ее заряд будет пропорционален объему, т.е. $Z \sim r^3$. И следовательно, электростатическая энергия капли в процессе коагуляции растет как r^5 , в то время как ее молекулярная поверхностная энергия пропорциональна r^2 . Поэтому коагуляция заряженных частиц с ростом их размеров приводит к нарушению условия (3) и к потере устойчивости. Но, с другой стороны, более высокий заряд капли гарантирует ее от дальнейшей коагуляции. Возникает некое относительно устойчивое состояние, характеризующееся определенными средними размерами капель и их зарядами. Гораздо опаснее для существования шаровой молнии оказывается потеря заряженными водными каплями их электрических зарядов. В результате такой потери исчезает потенциальный барьер и медленная коагуляция, согласно [15], сменяется быстрой, характерное время которой определяется выражением $\theta = \eta/2kTv_0$, где η — вязкость среды, v_0 — число частиц в единице объема. Вязкость воздуха при $T = 600$ К составляет $\eta = 3 \cdot 10^{-4}$ г/см · с. Число частиц размером 10^{-7} см, если их масса в одном см³ составляет 10^{-3} г, плотность близка к единице, найдем $v \cong 10^{16}$ см⁻³. И время половинной коагуляции $\theta = 10^{-8}$ с. Спустя время τ в единице объема останется

$$v = \frac{v_0}{1 + \tau/\theta}$$

капель. К моменту $\tau = 10$ с число капель уменьшится в 10^9 раз, их размеры достигнут 10^{-4} см.

Такие частицы являются оптически активными: они отражают и преломляют падающий на них свет. Наличие известного числа таких капель в объеме шаровой молнии при наличии посторонних источников света

будет приводить к характерным оптическим явлениям. Рассеянный, отраженный и преломленный капельками свет, добавляясь к ослабевающему собственному свечению оставшихся заряженных капель, может восприниматься наблюдателем как часть собственного свечения шаровой молнии. При этом видимое свечение шаровой молнии будет, возможно, все еще достаточно ярким, неоднородным по объему шаровой молнии в результате относительных перемещений крупных капель, продолжающейся их коагуляции. Такое свечение будет изменяющимся со временем, как бы переливающимся. Продолжающиеся на протяжении всего существования такой „водяной“ молнии механические процессы — коагуляция мелких слабозаряженных капель и распад более крупных электрически заряженных капель могут объяснить отмечаемые наблюдателями звуковые эффекты: шипение, потрескивание, свист, издаваемый шаровой молнией.

Мы рассматривали случай, когда размеры капелек предельно малы. Но в шаровой молнии одновременно могут существовать капельки различного размера. Маленькие и заряженные обеспечивают достаточно долгое время существования, устойчивость и свечение шаровой молнии. Более крупные, размером 10^{-4} см и более, которые с какого-то момента времени начинают быстро коагулировать, определяют конечную судьбу шаровой молнии. Если к моменту коагуляции до достаточно крупных размеров капли успевают охладиться, то существование шаровой молнии заканчивается спокойным угасанием или распадом. Если же хотя бы часть капель в результате быстрой коагуляции успевают достичь крупных размеров $r \geq 10^{-4}$ см до того, как они охладятся ниже температуры кипения, то вода в таких каплях оказывается в перегретом состоянии, а сами капли — взрывоопасными. Как известно [15, с. 189], для достаточно чистой жидкости и на сравнительно небольшие промежутки времени степень перегретости может быть довольно высокой.

Разумеется, водные капли, нагретые до 200°C , будут весьма неустойчивыми. Спонтанное вскипание одной из таких капель приведет ее к разрыву на множество мелких фрагментов, которые, попадая в соседние перегретые капли, вызовут своеобразную цепную реакцию вскипания и взрывов перегретых водных капель. Именно такой процесс представляет, на наш взгляд взрыв одного из возможных типов шаровой молнии, а именно такой шаровой молнии, прохождение и взрыв которой не оставляет в окружающем пространстве никаких видимых следов, кроме некоторого дополнительного количества влаги. Эта дополнительная влага сама по себе не может привлечь внимание наблюдателей. Воздух состоит из различных компонентов: азот, кислород, аргон и т.п. Но все эти компоненты строго фиксированы в количественном отношении, и локальное изменение относительной доли любого из них, будучи замеченным, вызовет у специалистов повышенное внимание. Лишь количество влаги в воздухе может меняться в широких

пределах произвольным образом, не привлекая внимания исследователей. Именно в этом факте заключается достоинство и необходимость гипотезы существования чисто „водяной“ шаровой молнии.

Список литературы

- [1] Изв. вузов. Физика. 1992. № 3 (выпуск полностью посвящен проблеме шаровой молнии).
- [2] *Vatai E.* // *Nuovo Cimento A.* 1989. Vol. 101. N 6. P. 905–927.
- [3] *Korshunov V.K.* // *Int. J. Mod. Phys. A.* 1990. Vol. 5. N 21. P. 1629–1631.
- [4] *Смирнов Б.М.* Проблема шаровой молнии. М.: Наука, 1988. 208 с.
- [5] *Смирнов Б.М.* // *УФН.* 1990. Т. 160. Вып. 4. С. 1–45.
- [6] *Корум К.Л., Корум Дж.Ф.* // *УФН.* 1990. Т. 160. Вып. 4. С. 47–58.
- [7] *Стаханов И.П.* О физической природе шаровой молнии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
- [8] *Сингер С.* Природа шаровой молнии. М.: Мир, 1973. 240 с.
- [9] *Тарновский А.С.* // *ЖТФ.* 1990. Т. 60. Вып. 3. С. 200–203.
- [10] *Дмитриев М.Т.* // *Авиация и космонавтика.* 1979. № 3. С. 44–46.
- [11] *Тарновский А.С.* // *Авиация и космонавтика.* 1992. № 7. С. 38–39.
- [12] *Smirnov B.M.* // *Rev. Phys. Rep. Review Section of Phys. Lett.* 1993. Vol. 224. N 4. P. 151–236.
- [13] *Майоров С.А., Ткачев А.И., Яковенко С.И.* // *Изв. вузов. Физика.* 1991. № 11. С. 3–34.
- [14] *Apsden H.* // *Phys. Lett.* 1985. Vol. A111. N 1–2. P. 22–24.
- [15] *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М.: Химия, 1989. 464 с.