

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 537.52

Памяти физика Мориса Моисеевича Фикса

Шаровая молния остается загадкой

И. Г. Стаханова
Москва, Россия

Рассмотрены история и состояние процесса изучения шаровой молнии с обоснованием подходов к одной из наиболее продвинутых гипотез о природе такой молнии — кластерной гипотезе, которая была впервые сформулирована видным отечественным ученым-физиком И. П. Стахановым.

Итак, мы не решили, что такое шаровая молния, но этого мы и не обещали. И все же мы проделали немалый путь и многое узнали.

И. П. Стаханов

Встреча с шаровой молнией не является невероятным событием. Оценки показывают, что по меньшей мере 0,1 % населения нашей страны наблюдал это явление. К сожалению, и до настоящего времени единственным источником сведений о шаровой молнии все еще остается наблюдение. Найти правильный путь к воспроизведению объекта в контролируемых человеком лабораторных условиях пока еще никому не удалось. Более того, шаровую молнию пока не удается даже удовлетворительно смоделировать. Это составляет резкий контраст с линейной молнией, природа которой была разгадана еще в XVIII веке Вениамином Франклином (Benjamin Franklin).

До настоящего времени относительно этого явления не существовало общепринятых теоретических представлений. Число различных гипотез о шаровой молнии давно превысило сотню и продолжает расти. В теориях не существует преемственности, в большинстве случаев каждая новая гипотеза не развивает старые, а отрицает их. Вопрос о существовании шаровой молнии как физической реальности долгое время подвергался сомнению. Этому способствовало и то, что приходилось объяснять многие необычные и противоречивые свойства объекта, полученные из сообщений случайных и неподготовленных наблюдателей. Судьба этого давно известного, но не исследованного явления, сложилась значительно печальнее, чем, например, судьба исследования метеоритов. Действительно, в начале XIX века под влиянием работ таких физиков, как Эрнст Хладни и Жан Био был пересмотрен запрет Французской академии наук о принятии сообщений о падении метеоритов, а также попыток объяснения этого явления. Французская академия наук в XVIII веке (а ее членами были Даламбер, Дидро, Лагранж)

считала, что рассказы о метеоритах являются чистой выдумкой.

Существенный прорыв в исследовании проблемы шаровой молнии произошел в 70—80-х годах прошлого столетия. Он связан с именем нашего соотечественника И. П. Стаханова, который ввел в научный обиход само понятие "шаровая молния", благодаря которому мы в настоящее время имеем обширную информацию об объекте.

История вопроса

Начало систематическим исследованиям шаровой молнии положено известным французским физиком Франсуа Араго, современником Жана Био и Эрнста Хладни, который был твердо убежден в том, что имеет дело с реальным явлением. В 30—40-х годах XIX века на основе собранных им 20—30 случаев наблюдения шаровой молнии он сделал критический обзор и систематизацию наблюдений и впервые правильно оценил пространственный и временной масштабы объекта (диаметр ~20 см, время наблюдения — секунды или десятки секунд). Ученый считал, что шаровая молния представляет собой тело, содержащее особое вещество — "молниевую" или "громовую" материю. Выводы Араго впоследствии оспаривались, многими учеными разрабатывались новые версии, но проблема остается нерешенной до сих пор. Шаровую молнию рассматривали как оптическую иллюзию в течение большей части XIX и почти до середины XX века, что существенно тормозило исследования в этой области. Тем не менее в конце XIX — начале XX столетия появились и первые попытки уточнить природу "громовой материи" Араго.

Одним из первых авторов химических гипотез был наш соотечественник Н. А. Гезехус (Санкт-Петербург, 1898). Появляется и альтернативное точке зрения Араго направление. Примерно в то же время, что и Араго, Дж. Гаррис предположил, что шаровая молния является формой кистевого разряда. Хотя эту точку зрения подверг критике М. Фарадей, в дальнейшем она распространилась довольно широко. Наиболее известными являются опыты Планте (G. Plante, 1875—1890), а затем многочисленные опыты Тесла (N. Tesla, 1891—1904), которые стали известны лишь в 70-х годах прошлого столетия, когда был полностью опубликован его дневник.

В 1923 г. выходит книга немецкого ученого В. Бранда (W. Brand) о шаровой молнии. Бранд основывался на 200 наблюдениях, полученных с 1823 по 1923 г. Он сформулировал свойства шаровой молнии в 14 пунктах, однако не касался ни ее температуры, ни плотности ее вещества, а также не пытался оценить запас энергии. В. Бранд определял шаровую молнию как одну из форм газового разряда.

К середине XX века значительно расширяется число попыток получить искусственную шаровую молнию в контролируемых условиях. К ним можно отнести эксперименты Нейэра (H. Nauer), Фера (U. Fehr), а также Барри (J. Barry), которые пытались получить шаровую молнию химическим путем. Проводятся также опыты с разрядами, причем широко начинают привлекать внимание безэлектродные разряды. Это опыты Тесла, эксперименты ленинградского физика Г. И. Бабота, выполненные в 40-х годах и, наконец, эксперименты академика Капицы в конце 50-х годов прошлого века. П. Л. Капица предположил, что шаровая молния является не веществом, а процессом. В отличие от своих предшественников П. Л. Капица считал, что шаровая молния — безэлектродный разряд, энергия к которому подводится радиоволнами (в каком-то смысле то же считал и Тесла). В дальнейшем безэлектродный разряд, питаемый радиоволнами, исследовали Гаррисон (E. R. Harrison), затем Гамильтон (C. W. Hamilton) и Ритч (D. J. Ritchie). По-видимому, наиболее удачными были опыты Пауэла и Финкельштейна (J. R. Powell, D. Finkelstein) с высокочастотным разрядом, при атмосферном давлении, поставленные в конце 60-х годов.

Более подробную информацию о попытках экспериментального моделирования шаровой молнии в контролируемых условиях можно получить из монографий американских ученых С. Сингера (S. Singer, *The Nature of Ball Lightning*, Plenum Press, 1971) и Дж. Барри (J. Barry, *Ball Lightning and Bead Lightning*, Plenum Press, 1980). Обе монографии переведены на русский язык (Изд-во "Мир", 1973, 1983). В монографии Дж. Барри содержатся также описания около 1000 известных из литературы случаев наблюдения шаровой молнии, фотографии, претендую-

щие на подлинность фиксации объекта или его следа и полная библиография по проблеме, охватывающая период с начала научной периодики до конца 70-х годов, которая содержит около двух тысяч ссылок.

Итак, из опытов Планте следует, что газоразрядная плазма может давать сферические образования, которые существуют лишь в разряде и исчезают сразу же с прекращением его. В экспериментах с безэлектродным газовым разрядом плазменные образования существуют, пока и поскольку производится их подпитка радиоволнами. В химических же опытах никогда не удавалось получить образование, обладающее должной устойчивостью и подвижностью. Таким образом, оба направления исследований не дали результатов, и феномен, называемый шаровой молнией, не был получен. В то же время в XX веке появлялись неоднократные сообщения о том, что шаровая молния или явление, сходное с ней внешне, может наблюдаться в созданных человеком установках, хотя и значительно реже, чем в природе, но происходит это в неконтролируемых человеком условиях.

Таким образом, более чем 100-летние (а теперь уже почти и 200-летние) попытки исследовать, объяснить природу шаровой молнии и получить экспериментально объект, обладающий всеми свойствами наблюдаемого явления, не увенчались успехом. Эти причины были связаны с недостаточностью и противоречивостью информации о данном феномене, получаемой из литературных источников.

Опросы населения

Любая информация быстро искажается при ее передаче от одного человека к другому. К сильным искажениям может привести даже одно промежуточное звено. При изучении явления имеют значения только прямые показания очевидцев. Однако, как показывает опыт, и показания очевидцев далеко не всегда надежны. Многие люди склонны к преувеличению и не могут точно передать то, что они видели. Поэтому зачастую сведения о шаровой молнии черпаются из своего рода фольклора, состоящего из показаний очевидцев, неоднократно пересказанных из уст в уста. Нетрудно понять, что контуры явления при этом расплываются, его черты искажаются и дорисовываются, и достоверность сведений оказывается не выше, чем тех, которые содержатся в старинных былинах. И, тем не менее, огромная и статистически надежная информация находится в памяти тысячи наблюдателей, затерявшихся среди остального населения. Извлечь эту информацию можно только одним способом — методом статистического опроса свидетелей.

В течение 60—80-х годов прошлого столетия были собраны обширные данные о шаровой

молнии путем организованного опроса очевидцев. Впервые к нему прибегли в США. В 1959—1960 г. был проведен опрос 15 тыс. чел. в Оак-Ридже. Анкета состояла из 13—14 вопросов. В результате было получено описание около 500 случаев наблюдения. В 1964—1965 г. аналогичный опрос был проведен NASA также в одном из научных центров; в нем участвовало около 1800 чел. Была разослана анкета почти из 50 вопросов. Таким образом, сведения об объекте пополнились еще 112 анкетами. В Англии журнал *Nature* собрал у своих читателей около 50 сообщений. Сбор информации в Чехословакии дал около 20 сообщений.

В Советском Союзе опрос очевидцев был наиболее широким. Начало опросу положила публикация статьи И. П. Стаханова и С. Л. Лопатникова "Шаровая молния: загадки остаются" в № 12 журнала "Наука и жизнь" за 1975 г. К этой статье были приложены анкета, состоящая из 13 вопросов, а также обращение к очевидцам феномена с просьбой ее заполнить и прислать в редакцию журнала. В Советском Союзе проводились опросы и другими авторами. Так, в конце книги И. М. Имянитова и Д. Я. Тихого "За гранью законов науки" (Москва, Атомиздат, 1980), была помещена анкета для читателей, состоящая из 19 пунктов. Результаты этого опроса неизвестны. Данные А. И. Григорьева, собранные им на базе Ярославского университета, составили к 1986 г. около 3000 сообщений. Кроме того, за последние два десятилетия появились данные опросов в Японии (У. Н. Ohtsuki, Н. Ofuruton, 1987, около 2000 сообщений) и в Венгрии (G. Egely, 1989, около 500 сообщений).

Данные И. П. Стаханова, полученные им в 1975—1981 г. через журнал "Наука и жизнь", занимают особое место среди всей этой информации. Обращение к очевидцам вместе с публикацией анкеты и просьбой заполнить ее повторялось еще дважды ("Наука и жизнь", 1978, № 8, с. 147 и 1979, № 5, с. 125). В журнале были опубликованы и результаты анализа анкет и описаний (тираж журнала в то время достигал 3 млн). К 1981 г. было получено около 2000 описаний, что значительно превысило число случаев, известных к тому времени из научной литературы за все предыдущие столетия. Среди присланных писем более 1500 содержали ответы на вопросы предложенной журналом анкеты. Впоследствии 40 % этих анкет были прокорректированы повторной, более подробной анкетой, содержащей также и подробное словесное описание события.

На основе анализа этих данных И. П. Стахановым была написана монография "О физической природе шаровой молнии", выпущенная Атомиздатом в 1979 г. Напомним, что до выхода монографии, т. е. каких-нибудь 20—25 лет назад, оспаривалось само существование шаровой молнии как природного явления. Монография дала этому феномену права научного гражданства.

Фактический материал в книге (описание и анализ наблюдений очевидцев, первые две главы, составляющие три четверти объема) строго отделен от попыток его объяснения и не связан ни с одной из гипотез о природе объекта. Эта часть может быть интересна не только специалистам, но и широкому кругу читателей. Она написана увлекательно и не требует специальных знаний по физике. Оставшаяся часть (последние три главы) информативна, компактна и предназначена для специалистов.

Кластерная гипотеза И. П. Стаханова

В 1973 г. И. П. Стаханов предположил, что шаровая молния может состоять из ионов, одетых в "шубу". Эта "шуба" представляет собой нейтральные, но имеющие большой дипольный момент, молекулы (рис. 1). Такими молекулами могут быть, например, молекулы воды или аммиака. Предположение, что подобная оболочка может задержать рекомбинацию, позволило объяснить, почему шаровая молния образует отдельную фазу в воздухе, и оценить плотность ее вещества. Поверхностное натяжение и устойчивость формы такого образования объясняются действием кулоновских сил, которые имеют иную природу, чем обычные молекулярные силы, действующие в газах. Большой молекулярный вес вещества (за счет "шуб") компенсирует более высокая температура. Плотность вещества оказывается несколько больше плотности воздуха. Так, в случае плазмы, состоящей из ионов OH^- и H_3O^+ при атмосферном давлении и температуре 600 К, получаем плотность вещества $1,8 \cdot 10^{-3}$ г/см³, что приблизительно в 1,5 раза больше плотности воздуха при комнатной температуре.

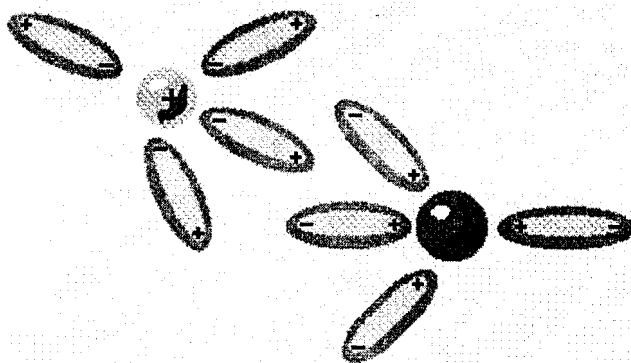


Рис. 1. Два гидратированных иона, объединившихся в один нейтральный кластер

В июне 1973 г. на Общемосковском физическом семинаре В. Л. Гинзбурга И. П. Стаханов высказывает свою гипотезу. Новизна гипотезы и доступное объяснение перечисленных выше свойств этого гипотетического образования вызывают интерес физиков, и в октябре И. П. Стаханов выступает с новой оригинальной гипоте-

зой о кластерной природе шаровой молнии на Научной сессии отделения общей физики и астрономии АН СССР.

Явление гидратации (или сольватации) ионов давно и хорошо известно в растворах. Существуют ли такие образования в газах? На этот вопрос, выдвинув свою гипотезу, И. П. Стаханов не знал ответа. Позже, когда в руках у него появился большой наблюдательный материал, И. П. Стаханов сформулирует эти и другие особенности шаровой молнии в виде парадоксов. Пока же речь идет о выяснении вопроса существования подобных гипотетических соединений ионов с нейтральными молекулами в газовой фазе. Почти весь 1974 г. И. П. Стаханов изучает материалы неформального Международного симпозиума по исследованию нижней ионосферы, который проходил в рамках конференции COSPAR (1971 г., США) на базе Иллинойского университета. Симпозиум был посвящен химии нижней ионосферы. Как оказалось, в ее нижних D- и E-слоях присутствуют образования, состоящие из ионов, окруженных нейтральными молекулами. Эти соединения носят название кластеров. Так появилось название гипотезы.

В настоящее время кластеры и кластерная плазма интенсивно изучаются. Однако в 70-х годах дело было далеко не так, и о подобных соединениях мало кто знал. Поэтому доклад "Кластерная плазма и природа шаровой молнии", прочитанный И. П. Стахановым в марте 1975 г. в Киеве на IV Всесоюзной конференции по низкотемпературной плазме, вызывает неподдельный интерес. Этот доклад закрывает одну проблему, а именно проблему возможности существования кластерных ионов в газовой фазе, но открывает новую — проблему реальности явления, называемого "шаровая молния". Ведь литературные описания и показания неподготовленных свидетелей не могут быть положены в основу научного исследования, но так кажется только на первый взгляд. И. П. Стаханов делает нетрадиционный для физика шаг — он обращается к наблюдателям.

Таким образом, первый весьма непродолжительный период (1973—1975 гг.), связанный с выдвижением кластерной гипотезы, был завершен. Были получены первые результаты, сделаны первые выводы; прочитаны доклады на сессии Отделения общей физики и астрономии АН СССР и на IV Всесоюзной конференции по низкотемпературной плазме; опубликованы четыре работы (в журналах "Письма в ЖЭТФ", УФН, ЖТФ). Начался другой период, который связан с четкой идентификацией объекта исследований и получением статистического портрета шаровой молнии. И. П. Стаханов понимал, что без тщательного анализа наблюдений немислим прогресс в выяснении природы явления. В дальнейшем все теоретические работы его базируются на анализе наблюдательного материала.

Данные наблюдений

Как уже было сказано выше, в декабре 1975 г. в журнале "Наука и жизнь", было опубликовано обращение к очевидцам феномена с просьбой заполнить предложенную анкету. Уже в течение полугода становится ясен успех этой затеи. Число поступивших в редакцию писем приближается к 1000. Правда не все сообщения равносильны, не все сообщения от очевидцев явления, есть письма, содержащие только описание события, есть предложения к эксперименту и, как всегда, теории, претендующие на объяснение природы шаровой молнии, есть даже письма с угрозами в адрес авторов за разглашение государственной тайны. Но среди всего этого потока писем имеется достаточное число ответов на вопросы анкеты. Именно с ними предстояло работать. Письма сортируются, анализируются, и к некоторым респондентам И. П. Стаханов обращается с дополнительными вопросами. Возникает переписка, и респонденты становятся корреспондентами.

Движение шаровой молнии

Первым вопросом, который интересовал автора кластерной гипотезы и который он выясняет у очевидцев, был вопрос о движении шаровой молнии. Из писем и описаний следует, что ее движение напрямую не связано с электрическими полями, и скорее напоминает движение тел в состоянии невесомости. Однако она часто притягивается к предметам, особенно к проводникам. На ее движение оказывают влияние и воздушные потоки, всегда присутствующие в атмосфере. Шаровая молния может огибать предметы, двигаться вдоль рельефа местности, ее можно выгнать из храма метлой, в нее можно выстрелить, попасть и не изменить ее траектории (рис. 2).

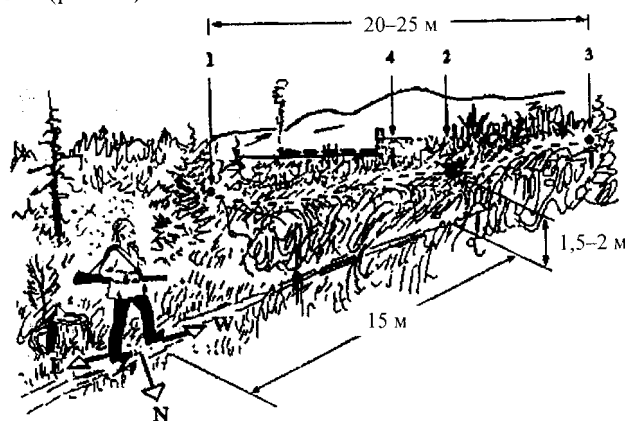


Рис. 2. Траектория шаровой молнии, в которую очевидец выстрелил из дробовика (по рисунку В. А. Бобрин):

1 — место появления в поле зрения; 2 — положение в момент выстрела; 3 — место исчезновения из поля зрения; 4 — железнодорожный вокзал

Описание 1. В. А. Бобрин, доцент из Хабаровска, встретил шаровую молнию в июле 1954 г. вечером перед грозой, когда шел на охо-

ту. Она была около 20—25 см в диаметре, белая, двигалась горизонтально, повторяя рельеф местности. Когда она проходила на расстоянии 15 м от наблюдателя, он выстрелил в нее из дробовика. Никакого эффекта не последовало, шар только слегка качнулся. Примерно через 20 с молния ушла из поля зрения, пройдя около 40 м. Таким образом, дробинки свободно прошли через вещество шаровой молнии, не придав ему сколько-нибудь заметного количества движения.

Молния может стоять на месте или двигаться по весьма причудливой траектории. На рис. 3 слева приведено такое движение.

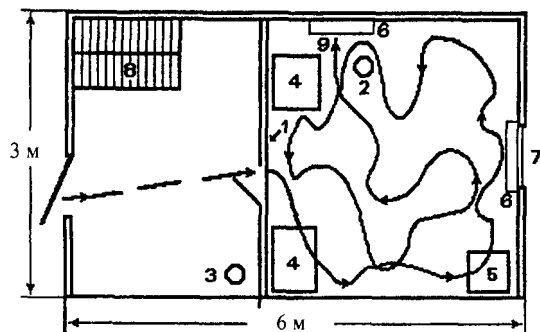


Рис. 3. Траектория шаровой молнии, залетевшей в комнату медицинского учреждения (по рисунку врача В. В. Варсонофьева):

- 1 — деревянный барьер высотой около 1 м;
- 2 — табуретка, на которой сидел очевидец;
- 3 — местоположение второго очевидца; 4 — столы;
- 5 — металлический сейф; 6 — батареи отопительной системы; 7 — окно, закрытое ставнями;
- 8 — деревянная лестничная клетка

Описание 2. В 1967 г. врач В. В. Варсонофьев, находясь в поселке Мирный (около г. Казани), дежурил в комнате площадью 3×3 м². Он сидел на табурете за барьером высотой 1 м. Около 15—16 ч началась гроза с сильным ветром. После сильного удара грома в открытую дверь влетела голубая парообразная масса диаметром 30—40 см, которая начала быстро двигаться по комнате. Пройдя 10—15 м, она подкатилась под табурет, на котором сидел врач. Хотя она находилась непосредственно у его ног, так что они были частично погружены в нее, тепла он не ощущал. Вслед за этим шаровая молния притянулась к батарее центрального отопления и исчезла с резким шипением, проплавив участок батареи в 3—4 мм.

Молния может двигаться горизонтально, подниматься вверх или опускаться вниз. При условии, что ее движение не ограничено стенами помещений, она может проходить значительные расстояния в несколько десятков и даже сотен метров. Так, расстояние более 50 м проходят более 50 % молний, которые наблюдают вне помещений и в ясную погоду. При слабом и умеренном ветре таких молний оказывается 20,9 %, а при сильном ветре и урагане эта цифра сокращается до 14,9 %. В полной выборке, содержащей 1452 ответа на вопрос анкеты о ее движе-

нии, молнии, проходящие расстояния больше 50 м, составили 18,4 % (267 случая). Неподвижные молнии (молнии, которые прошли расстояние менее метра) наблюдались в 158 случаях, т. е. составили 11 %, и почти половина молний прошла расстояние от 1 до 10 м (46,3 %, 673 случая).

Итак, из наблюдений следует, что шаровая молния движется как автономное тело; может проходить значительные расстояния; ее движения не связаны с какими-нибудь токнесущими или волноводными каналами.

Надежность информации, полученной от очевидцев

Имея информацию очевидцев о простом визуальном наблюдении шаровой молнии, уместно поставить вопрос о надежности этого наблюдения случайным свидетелем. У каждого человека свое чувство времени, чувство цвета, чувство расстояния и т. п., а опыт наблюдения, к сожалению, невозможно повторить. Все это создает определенные трудности при интерпретации таких наблюдений, тем более для исследователя, привыкшего к точным математическим формулировкам и строгим физическим законам.

Поставив вопрос: "Почему более чем 100-летние попытки получить, исследовать и объяснить шаровую молнию не увенчались успехом?", И. П. Стаханов отвечает: "... для исследования этой проблемы адекватна и соответствующая методика, основанная на более тщательном наблюдении и индукции, чем на дедуктивных выводах". Он полагает, что для того чтобы достичь прогресса в исследовании природы шаровой молнии, нужно прежде всего выявить те ее свойства, которые непосредственно следуют из наблюдений. Для этого необходима статистика, которую можно получить из анкетного опроса очевидцев явления.

В этом случае появляется возможность унифицировать ответы, предлагая наблюдателю из предложенных ответов выбрать наиболее подходящий, и тем самым получить однородные и более полные по характеру совокупности данных из первых рук. Анкетная информация, кроме того, позволяет зафиксировать тот момент, когда дальнейший сбор ее не может изменить уже набранную статистику. При анкетном опросе появляется также и возможность контроля при сопоставлении двух описаний одного и того же очевидца, полученных в разное время, например через несколько лет. Такой способ контроля и был использован в проведенном опросе. В течение десяти лет очевидцам было разослано около 1000 повторных анкет и получено около 600 ответов. В сопроводительном к анкете письме наблюдателей просили заполнить анкету, ответить на ряд поставленных во второй части анкеты вопросов и дать словесное описание события. Таким образом, в 40 % случаев была получена

подробная повторная информация о каждом конкретном наблюдении. Заметим, что словесное описание во многих случаях сопровождается также и первой анкетой.

Данные очевидцев феномена являются до настоящего времени единственным источником информации об объекте, и будут оставаться таковыми до тех пор, пока шаровая молния не будет получена в лабораторном эксперименте.

Температура шаровой молнии

Из описания 2 можно заключить, что температура шаровой молнии невелика. Ниже рассмотрим другие наблюдения.

Описание 3. Это было в г. Константиново Сталинской области, летом 1936 г. Небо заволкло низкими темными тучами, ни ветра, ни дождя не было. Восемнадцатилетняя девушка, В. А. Слюркалова сидела в комнате с глинобитным полом за швейной машиной системы "Зингер" с металлическим станком (рис. 4). Одновременно с сильным ударом грома в левом углу комнаты, в том месте, где выходила электропроводка, с вспышкой и треском выкатился огненный шарик размером 3—4 см, который спокойно прокатился по электропроводке и, достигнув лампочки, висевшей над швейной машинкой, скатился с нее, упал на левое колено свидетельницы, потом на пол и покотился в правый угол комнаты под кровать. Ни боли, ни ожога она не почувствовала. Когда шарик исчез, она обнаружила на левом колене красноватую, как после ожога, полосу длиной 10 см и вмятину размером 0,5 см в глубину. Когда этот след прошел, свидетельница не помнит.

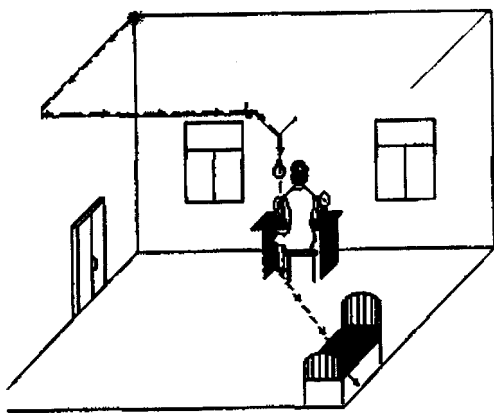


Рис. 4. Траектория шаровой молнии по рисунку В. А. Слюркаловой

Описание 4. В июле 1975 г. после полудня кассир К. В. Гаврилова после сильного удара грома вошла в комнату для того, чтобы выключить телевизор. Вытащив штекер антенны из задней стенки телевизора и отводя руку, она увидела, как около пальцев движется маленький, диаметром 3 см, светящийся шарик. Он двигался вдоль руки со скоростью 0,25 м/с. Видимо, шарик коснулся пальцев. Ожога на руке не было,

но два пальца совершенно омертвели, рука сразу онемела и плохо слушалась две недели. Боль в руке чувствовалась еще дольше. Потом все прошло.

Обнаружить шаровую молнию позволяет ее свечение. Из анализа анкет следует, что световой поток от шаровой молнии в среднем сравним с тем, который испускает электрическая лампочка в 100 Вт (два интервала 50—100 Вт включают более половины ответов, а промежуток между 20—200 Вт — две трети их). В таблице приведены данные ответов очевидцев на вопрос анкеты об ощущении тепла в зависимости от кратчайшего расстояния до объекта. На этот вопрос анкеты ответили 1327 чел., и 68 из них (5,1 %) утверждают, что они почувствовали тепло от шаровой молнии. При наблюдении с расстояния менее 1 м только десятая часть очевидцев объявила, что они почувствовали слабое, еле заметное тепло. Часто не вызывает ощущения тепла прохождение шаровой молнии на расстоянии 10—20 см от незащищенных одеждой частей тела. Тепло не всегда ощущается и при прямом контакте с шаровой молнией (это видно из приведенных выше описаний).

Число случаев	Расстояние до шаровой молнии, м		
	<1	1—5	>5
Общее	274	462	577
С ощущением тепла	27	27	13
Относительное, с ощущением тепла	9,8 %	5,8 %	2,3 %

Интенсивное свечение шаровой молнии сбивает людей с толку, поэтому при наблюдении с большого расстояния они склонны поверить в раскаленный шар. Это скорее психологический эффект. Как оказалось при повторном анкетировании, ощущение тепла часть наблюдателей связала не с самой шаровой молнией, а с ее взрывом или поджогом ею окружающих предметов (стога сена, бумаги и т. п.). Однако шаровая молния не всегда поджигает даже легковоспламеняющиеся предметы. Например, П. П. Елисеев написал, что молния диаметром 12—15 см "появилась в поле после сильного раската грома; долетела до снопа сена, коснулась верха снопа и пропала. Сноп не обгорел".

Через шаровую молнию видны окружающие предметы, т. е. вещество ее прозрачно. Тепловое излучение через поверхность сферы диаметром 20 см составляет свыше 7 кВт при температуре 1000 К. Сомнительно, чтобы такой источник не был бы замечен наблюдателем с расстояния меньше 1 м, поэтому говорить о температуре шаровой молнии в 5—10 тыс. градусов, как предполагают некоторые исследователи, не приходится. При температуре в 500—600 К тепловое излучение равно 0,5 кВт (падает более чем на порядок), или около 40 Вт/м² на расстоянии 1 м. Неудивительно, что при такой температуре излучение замечает только десятая часть наблюдателей, находящихся на этом и меньшем расстоя-

нии, поэтому уместно поставить вопрос "Имеет ли шаровая молния температуру выше температуры окружающего воздуха?"

Обратимся к очевидцам. И. М. Лосева написала, что шаровая молния в форме веретена 5×10 см "залетела через форточку, упала на ковер; вращалась, уменьшаясь в размерах. На ковре прожгла дырку". Инженер В. С. Коваленко видел, как шаровая молния диаметром 20 см "спускалась вниз по стволу дерева по винтовой линии, обожгла кору". Студентка И. В. Артемова сообщила, что "после взрыва шаровой молнии диаметром 8 см на стене осталось четко видимое опаленное пятно". Научный сотрудник из Москвы Н. Г. Грачев видел, как шар радиусом 2—5 см "появился из радиоприемника, двигался равномерно в горизонтальном направлении, прокатился по столу, оставив на его поверхности слегка желтый след". Наблюдатель, находясь на расстоянии 30 см от шаровой молнии, тепла не ощутил.

Подобных сообщений имеется достаточное количество. Итак, можно ожидать, что температура шаровой молнии выше температуры окружающего воздуха и обычно не превышает 200—300 °С (или 500—600 по абсолютной шкале). Таким образом, шаровая молния практически не излучает тепло, однако излучает свет. Это удивительное свойство шаровой молнии было сформулировано И. П. Стахановым в виде парадокса.

Парадокс 1.

Шаровая молния излучает видимый свет несмотря на низкую температуру ее вещества.

Поверхностное натяжение шаровой молнии

Из описаний очевидцев следует, что шаровая молния имеет достаточно устойчивую границу.

Описание 5. Вот как описывает инженер-конструктор В. К. Агеев шаровую молнию диаметром 10—20 см, висевшую на потолке. Это происходило в г. Дубна Московской обл. летним днем в конце 50-х—начале 60-х годов. Молния висела под потолком, слегка покачиваясь из стороны в сторону. Когда открыли дверь, шар покати́лся по потолку в сторону двери и, дойдя до электропровода, задержался, а затем, оторвавшись от него, продолжил свое движение в том же направлении. При встрече с еще одним электропроводом с изолятором он также приостановился. Покатившись снова, шар вышел через дверь. В обоих случаях в момент отделения шара от электропроводки он немного вытягивался и очень сильно напоминал мыльный пузырь перед отделением от трубки, через которую его надувают. Наблюдение длилось 2—3 мин.

Описание 6. Приведем описание эксперимента, который был проведен над шаровой молнией восьмилетним мальчиком. Это было летом 1936 г. Г. О. Симонов заметил шаровую молнию после близкого удара линейной молнии на высоте 10—

15 см от земли. Она имела вид маленького ворсистого мячика диаметром 4—5 см. Мальчик накрыл его пустой банкой, однако молния в виде красной змейки выскочила через дырку в банке. После этого она снова обратилась в шарик, который, пройдя по воздуху еще метров 12, ушел из поля зрения.

Описание 7. М. Г. Митин в июле 1929 г. около 16 ч сидел у закрытого окна. После разряда линейной молнии и умеренного дуновения ветра одна створка окна слегка приоткрылась, и он увидел огненную струю,двигающуюся с улицы в щель рамы окна. Она была шириной 1 см и толщиной 5—6 мм. И передний, и задний края ее были округлыми. "Змейка" вползла на подоконник сантиметров на 15, повела концом туда-сюда, уменьшила скорость движения, затем в течение 1—2 с полностью пролезла в отверстие и свернулась в шар диаметром 10 см. Клубок светился, шуршал и шелкал. Ушла молния через нижнее отверстие в стекле таким же способом. Цвет "змейки" был желтым, а шара — малиновым.

В пользу существования поверхностного натяжения говорят шарообразная форма молнии и ее поведение при отклонении от сферы. Шаровая молния восстанавливает сферическую форму после небольших деформаций при соударении с предметами; при распаде на несколько молний или слиянии нескольких молний в одну; при ее прохождении через узкие отверстия и щели. Шаровая молния даже при взрыве может отскочить, сохранив или, точнее, восстановив свою форму. Капли вещества шаровой молнии, образующиеся при ее разлете, сохраняют целостность, проходя большие расстояния и не расплываясь. Таких сообщений было более 100.

Описание 8. Е. И. Устиненко наблюдала шаровую молнию в г. Котлас Архангельской обл. в июле 1958 г. Молния диаметром 30 см плыла по комнате на расстоянии 1 м от пола. В комнате находились 6 чел. При взрыве молния распалась на большое число маленьких шариков, которые медленно опускались на пол, исчезая в щелях половиц. Загорелись обои, в момент взрыва все испытали удар током.

Описание 9. Н. С. Новицкая видела, как шаровая молния диаметром 15—20 см упала на асфальт и крутилась в круге радиус 1 м. Затем она распалась на три шара, которые вращались, пока не погасли. На асфальте не осталось никаких следов. Происходило это в Берзниках Пермской обл. в июле 1979 г.

Описание 10. При ударе линейной молнии в тополь, от него отскочили два ярко-красных шара, которые затем слились в один диаметром 10—20 см. Молния залетела в сарай и стала снижаться над топором, наткнувшись на него, она стала искрить. Потом, двигаясь над землей, она опалила встретившиеся перья, и, пролетев дальше, взорвалась над щеплятами, не причинив им вреда. Эту картину наблюдал в апреле 1979 г. в

течение 1 мин десятиклассник Сергей Демченко в совхозе Приморский Новоазовского района Донецкой обл.

На поверхности шаровой молнии могут наблюдаться поверхностные колебания и волны. При раскачке этих волн вследствие неустойчивости образуются "протуберанцы". Ниже приведено описание восемнадцатилетнего Н. М. Куницина, ныне доцента, наблюдавшего шаровую молнию в июле 1926 г. недалеко от г. Владивостока.

Описание 11. Дом отдыха, где проводил свой отпуск юноша, был расположен на гористом, богатом зеленью мысе. Возвращаясь в полночь из одного корпуса в другой, он должен был пройти вверх по тропинке 120—130 м. Ночь была темная, и продвигался он ощупью. Вдруг через густую зелень на расстоянии 30—40 м от себя он увидел свечение. Шар диаметром более 20 см медленно и бесшумно двигался по направлению к тропинке. Свечение шара напоминало свет и цвет полной луны. Оно немного переливалось по оттенкам, создавая впечатление внутреннего перемещения вещества в шаре. При приближении шара к кустам на его поверхности с легким треском появлялись и исчезали маленькие змеевидные язычки длиной 3—4 см. Сама поверхность была бархатистой и имела тонкий волнующийся слой светло-коричневого цвета. Шар двигался по рельефу горы на постоянной от земли высоте ~70 см. Подойдя к тропинке, он пересек ее в 5—10 м от наблюдателя и поплыл дальше. Тогда наблюдатель неожиданно для себя бросил камень в шаровую молнию. Камень пролетел от ее поверхности на расстоянии 10—12 см. Поверхность шара в этом месте прогнулась внутрь, он выбросил несколько змеек и качнулся влево. Затем шар вернулся на прежнее место, и поверхность его выровнялась. Время наблюдения очевидец оценивает 3 мин.

Факт устойчивости поверхности шаровой молнии также подтверждает гипотезу о существовании поверхностного натяжения. Оценка ее поверхностного натяжения дает величину, сравнимую с поверхностным натяжением органических жидкостей (порядка 1—10 эрг/см²). Движение шаровой молнии как тела в состоянии невесомости говорит о том, что плотность ее вещества близка к плотности воздуха в нормальных условиях. Таким образом, мы имеем дело с очередным парадоксом шаровой молнии.

Парадокс 2.

Вещество шаровой молнии при плотности газа имеет поверхностное натяжение, характерное для жидкостей.

Электрические проявления шаровой молнии и оценка ее энергии

Хорошо известно, что облако газа или пара в воздухе не может иметь определенных границ и

быстро расплывается с течением времени. Что же касается шаровой молнии, то она образует отдельную фазу в воздухе с устойчивой фазовой границей. Она может проходить значительные расстояния не только в спокойной обстановке, но и при ветре, что невозможно для обычного газового облака. Существование поверхностного натяжения означает то, что вещество шаровой молнии представляет собой не просто газ, а ионизованный газ. Плотность заряженных частиц такого газа должна лежать между плотностью воздуха (10^{19} см⁻³) и плотностью плазмы, большей, чем 10^{16} см⁻³, ибо при меньшей плотности плазма не образует отдельной фазы.

То, что вещество шаровой молнии имеет заряд, подтверждают очевидцы. Она притягивается к проводникам. Сообщения, подобные описанию 8, когда наблюдатели почувствовали удар током при ее взрыве или распаде, не единичны. О "взрыве" шаровой молнии при ее исчезновении сообщили 527 наблюдателей. Другими способами ее исчезновения наблюдатели называют ее спокойное погасание (311 случаев) и ее распад (108 случаев).

Приведем описание шаровой молнии, посетившей 21 июня 1984 г. дачу Ф. Ф. Аникина в дачном поселке завода "Экситон", в г. Павловский Посад. Произведенные этой молнией разрушения охватывают практически все типичные случаи взаимодействия молнии с окружающими предметами.

Описание 12. Шаровая молния появилась в доме после грозы; дождь уже прошел, но где-то вдали гремело и сверкало. В доме находились три человека: жена хозяина дачи Н. И. Аникина, их сын (окончивший Энергетический институт) и внук. Вдруг раздались удар и треск, и жена увидела, как мимо нее от холодильника к газовой плите на расстоянии 30 см от лица пролетел светящийся шар. Он был диаметром около 8—10 см, красно-оранжевого цвета, правильной формы, с резкой границей. Шар ударился о плиту и исчез, оставив на последней пятно копоти. Тепла наблюдательница не ощутила, сила света и размер шара не менялись. Ее сын с наушниками на голове в соседней комнате чинил радиоприемник. Услышав сильный треск в наушниках, он снял их и увидел, что антенна в середине расплавлена, а провода наушников сгорели. Кроме этих повреждений, оказалось, что перегорели приемник и два телевизора (не включенные); разлетелся на мелкие части корпус электрического счетчика, медные провода которого расплылись и осели на стену в виде желтого пятна; прогнулась металлическая черепица на крыше, образовалась дыра и в этом месте загорелась балка. На втором этаже дома находится мансарда с двумя окнами на противоположных стенах. В стекле одного окна было проплавлено круглое отверстие диаметром 10 см с правильными краями без оплавлений. Из противопо-

ложного окна была выбита рама, деревянные доски которой были расщеплены на мелкие волокна. Выбитые стекла большей частью находились на улице, но часть их осталась на полу. Были обнаружены повреждения и вне дома: оборвался провод, ведущий от столба к дому; в соседнем доме вышел из строя холодильник; перегорел кабель, идущий по стене дома к мотору от насоса для накачки воды. Мотор остался цел. Вероятно, Н. И. Аникина видела осколок той молнии, которая произвела эти разрушения. Выбитая из фронтона рама на даче Ф. Ф. Аникина пролетела по горизонтали расстояние около 4 м с высоты 5 м. Полагая, что масса рамы равнялась 40—50 кг, можно оценить энергию, пошедшую на приведение ее в движение, в 300—400 Дж.

Раскалывание деревьев, столбов, пробивание стен, большие ожоги, разрушение кирпичных труб относятся к сильным повреждениям. О подобных разрушениях сообщили 65 наблюдателей из 348, ответивших на вопрос анкеты о взаимодействии шаровой молнии с окружающими телами. Только два случая из нашей почты можно отнести к очень сильным разрушениям. Инвалид войны Г. И. Шумилов написал, что в июле 1970 г. в 16 км от Куйбышева в результате взрыва шаровой молнии развалился дачный домик. О случае разрушения трансформаторной будки сообщил физик из Москвы канд. физ.-мат. наук С. С. Олевский, наблюдавший в 1955 г. в г. Анапе как шаровая молния, разворотив трансформаторную будку, разрушила русскую печь в доме напротив. Образовались дыры величиной с кулак в перегородке и трубе. Сообщения о раскалывании мелких предметов, следах ожога или копоти на дереве или бумаге, загорании, ожогах на коже, ощущении взрывной волны имеются в 101 анкете. Об оплавлении металлических и стеклянных предметов говорят 28 наблюдателей и 14 наблюдателей сообщают об испарении воды. Взрыв шаровой молнии не имел никаких последствий, кроме вспышки или звука, в 138 случаях.

Прямой контакт шаровой молнии с металлическим предметом не всегда приводит к его оплавлению. Иногда плавление металлических частей не сопровождается повреждением неметаллических, поэтому оценка энергии по оплавлениям дает очень большой разброс — от нескольких килоджоулей до нескольких десятков килоджоулей. Возможно, оплавления являются результатом действия электрического тока, возникающего при взрыве шаровой молнии. Похоже, что и сам взрыв является электрическим разрядом, а не взрывом в обычном смысле слова. Если это так, то энергия, выделяемая при взрывах и оплавлениях, не имеет отношения к запасу энергии шаровой молнии. Оценивая величину энергии по расщеплению древесины, получаем цифру 100—200 кДж. В этом случае вещество шаровой молнии всасывается в щели дерева и взрывается внутри, что приводит к

расщеплению дерева вдоль волокон. Световая энергия шаровой молнии невелика, а тепловое излучение дает значение от 10 до нескольких десятков килоджоулей.

Подводя итог, можно считать энергию шаровой молнии, заключенной в пределах между несколькими килоджоулями и несколькими сотнями килоджоулей. Плотность энергии будет при этом порядка 1—10 Дж/см³.

"Взрыв" шаровой молнии может сопровождаться появлением тока в цепях, находящихся в контакте с ней. При "взрыве" шаровой молнии могут обнаруживаться токи, которые текут в проводниках и действие которых может проявляться на значительном удалении от нее. Это приводит к перегоранию лампочек, порче электроприборов (например, к плавлению обмоток трансформатора), перегоранию предохранителей, иногда на значительном расстоянии (метры и десятки метров). В некоторых случаях очевидцы утверждают, что исчезновение шаровой молнии сопровождается вспышкой электрической лампочки при отсутствии тока в сети. Последствия взаимодействия шаровой молнии с окружающими телами различны. Поражения людей и животных от шаровой молнии также часто носят характер токовых поражений (елочка на теле и т. д.). Это относится как к смертельным поражениям, так и к ударам током, которым сопровождается контакт с шаровой молнией. Добавим, что физиологические последствия при контакте с ней вызывают болезненные явления, аналогичные явлениям при поражении током.

Появление шаровой молнии тесно связано с грозовой активностью атмосферы. Наблюдается она в основном в грозу (83 %, 1057 сообщений), а при наблюдении ее в ясную погоду (219 сообщений) наблюдатели обычно пишут о предгрозовом состоянии атмосферы или же о прошедшей грозе. Поэтому, считал И. П. Стаханов, шаровая молния должна состоять из проводящего вещества с низкой работой выхода, выполняющего роль триггерного механизма, который рассеивает заряд, накопившийся на проводниках во время грозы. В этом кроется причина столь широкого разброса как степени тяжести поражений человека, так и степени последствий взаимодействия шаровой молнии с окружающими предметами.

Парадокс 3.

Вещество шаровой молнии представляет собой газообразную плазменную среду, существующую при комнатной температуре.

Итоги обработки наблюдений

Если в течение XVIII и XIX веков физика развивалась как опытная наука, то в XX веке открытия рождались в основном "на кончике пера" теоретика. В этом плане исследование природы

шаровой молнии с использованием показаний очевидцев выпадает из общего ряда теоретических исследований XX века. Однако оказалось, что несмотря на "ненадежность" каждого конкретного описания, анализируя весь статистически значимый массив наблюдений, можно получить дополнительную, весьма важную и полезную информацию о феномене. Можно с уверенностью утверждать, что данные И. П. Стаханова и до настоящего времени остаются уникальным и единственным в мире банком данных, содержащим подробные и сопоставимые описания большого числа событий, допускающих современные методы статистической обработки. Начиная с 1976 г. в руках у И. П. Стаханова оказался обширный материал наблюдений, который постоянно пополнялся. Он кропотливо разбирал те противоречия, которые имелись в описаниях; переписывался с очевидцами; выезжал на места появления шаровой молнии, исследовал место "взрыва", разговаривал со свидетелями. В июле и декабре 1976 г. он получил из США от доктора В. Л. Садовского материалы двух американских отчетов о результатах опроса очевидцев шаровой молнии, упомянутых нами ранее. И. П. Стаханов провел сравнение результатов опросов, и оно показало принципиальное сходство характеристик объекта.

Результаты, следующие из анализа наблюдений, И. П. Стаханов старался обсудить в серьезной физической аудитории. Он неоднократно выступал на семинарах В. Л. Гинзбурга, М. А. Леонтовича и др. (в Институте физических проблем, Арзамасе-16, Физико-техническом институте им. Иоффе и т. д.). В его архиве сохранились рукописи более 30 докладов по этой теме, прочитанных им на различных семинарах, конференциях, симпозиумах, школах. В 1979 г. выходит первое издание его монографии о шаровой молнии, и эта проблематика приобретает научный статус. В 1981 г. Оргкомитет Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (ICPIG-15, г. Минск) предлагает ему провести дискуссию на тему "Природа шаровой молнии". Так впервые на конференции международного уровня была рассмотрена проблема шаровой молнии. Из пленарного доклада И. П. Стаханова "Наблюдение шаровой молнии" становится ясно, что важный подготовительный и трудоемкий этап в истории ее исследования завершен — получены физические выводы, основанные на анализе анкет и описаний. В 1985 г. выходит второе, дополненное и переработанное издание монографии, а летом следующего года впервые в рамках АН СССР в Ярославле состоялась выездная сессия Секции газового разряда Координационного совета АН СССР, посвященная физике долгоживущих плазменных образований и шаровой молнии. Это знаменует новый этап — этап планирования и подготовки эксперимента. С осени 1986 г. И. П. Стаханов организует работу Общественного ежемесячного семинара по

проблеме. Внезапная смерть в начале 1987 г. прерывает эти многообещающие начинания.

Монография И. П. Стаханова "О физической природе шаровой молнии" и до настоящего времени остается самой значительной из монографий, посвященных природе объекта. В этом плане данная уникальная книга не имеет аналога ни в отечественной, ни в зарубежной литературе. Книга выдержала три издания в течение короткого срока. На третье посмертное издание монографии, финансируемое Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 96-02-30084), имеется рецензия академика РАН В. Д. Шафранова (УФН, 167(10), 1134, 1997). В предисловии к нему ее редакторы А. А. Рухадзе и М. М. Фикс отмечают: "В книге решена как частная задача нарисовать общую картину явления, вытекающую только, или хотя бы в основном, из наблюдаемых фактов, так и более общая: сформулированы те черты явления, которые должны получить объяснение в гипотезах. Это позволило сократить количество гипотез, число которых давно перевалило за сотню и постоянно растет".

Приходится сожалеть, что монография опубликована только на русском языке и поэтому недоступна широкой мировой научной общественности. Это тем более досадно, что публикаций И. П. Стаханова в научных журналах по проблеме сравнительно немного — всего восемь, причем четыре из них относятся к его первому исследовательскому периоду, когда была выдвинута кластерная гипотеза. Чем больше проходит времени со дня смерти И. П. Стаханова, тем чаще физики обращаются к его гипотезе, ссылаясь в основном на монографию и эти первые статьи. Однако его последние статьи наиболее значимы. Они написаны на основе статистического знания о наблюдаемых свойствах объекта. В сравнительно небольшой (8 стр.) статье "К вопросу о природе шаровой молнии" (1987, ЖТФ, т. 57, в. 8, с. 1575) приведена оценка работы выхода заряда из вещества шаровой молнии, выдвинута гипотеза о природе ее взрыва, на основании сведений о ее движении дается оценка плотности вещества, разъясняются наблюдаемые аномалии движения.

Кластерная гипотеза И. П. Стаханова объясняет все особенности поведения шаровой молнии при единственном предположении о возможности задержки рекомбинации в плотной неидеальной кластерной плазме. Выяснить механизм и дать объяснение возможности этой задержки И. П. Стаханов собирался к лету 1987 г. В настоящее время в работах С. В. Шевкунова показано, что при сближении гидратированных ионов разного знака в межионный промежуток втягиваются дополнительные молекулы воды, что препятствует рекомбинации и на несколько порядков увеличивает время жизни таких ионов в кластере.

Важно отметить, что уже первые сообщения очевидцев показали, что молния несет электрический заряд или, по крайней мере, поляризуется в электрическом поле. Понять причину этого И. П. Стаханов смог не сразу. Непонятно было, почему последствия взаимодействия шаровой молнии с окружающими предметами и разброс энергии, выделяемой при таком взаимодействии, так сильно разнятся. Именно поэтому раздел об электрических явлениях, сопровождающих шаровую молнию, был включен им только во второе издание монографии.

Благодаря работам И. П. Стаханова (1973—1987 гг.) создана база, стимулирующая правильное направление экспериментального поиска, и мы имеем на сегодняшний день ясно сформулированную научную задачу. Он показал, что отсутствие прямой связи движения шаровой молнии с

какими-нибудь токнесущими или волноводными каналами является ахиллесовой пятой всех теорий, предполагающих внешние источники энергии; что электрические явления, сопровождающие шаровую молнию, несовместимы с нейтральным составом ее вещества (т. е. с химическими гипотезами); что вещество шаровой молнии не может состоять из высокотемпературной плазмы.

Автор считает своим долгом выразить благодарность академику В. Л. Гинзбургу и д-ру физ.-мат. наук А. А. Рухадзе за поддержку работы над архивом ее мужа.

Статья поступила в редакцию 22 июня 2004 г.

Ball lightning remains as a riddle

I. G. Stakhanova
Moscow, Russia

In the article the consideration is made to the history and state of a process of study of a ball lightning with substantiation of the approaches to one of the most advanced hypotheses about the nature of such lightning, namely, the cluster hypothesis, which had been formulated by the outstanding domestic scientist I. P. Stakhanov for the first time.

УДК 538.6

Магнитное поле, создаваемое в дуговом канале ТОКОМ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА

В. О. Бушма, Д. В. Калашников

Московский энергетический институт (Технический университет), Москва, Россия

Численно определены координатные составляющие магнитного поля, создаваемые в пространстве дугового столба током основного металла. Расчет выполнен для средней напряженности магнитного поля в канале проплавления при различных положениях катодного пятна на основном металле. Полученные данные будут использованы при создании математической модели дуги с интенсивно расходуемым электродом, помещенной в узкую щелевую разделку.

При создании математической модели, адекватно описывающей поведение электрической дуги в узкой щелевой разделке при дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом (ДС НПЭ), необходимо знать величину и распределение напряженности магнитного поля в дуговом канале, которая создается током пластинчатого электрода [1] и токами частей изделия.

Для определения составляющих магнитного поля, создаваемых токами, протекающими по

частям изделия, необходимо найти распределение потенциала в каждой из частей изделия.

Рассмотрим трехмерную задачу распределения потенциала в каждой из частей основного металла изделия в следующей постановке (рис. 1, а, б). В обе части изделия поступает равномерно половина тока пластинчатого электрода. Места токоподключения к пластине заштрихованы. На незаштрихованных поверхностях пластины имеют место нулевые условия Неймана. В каждую