Ашкинази Л. . Что такое электрический пробой.

Что такое электрический пробой

Л. А. Ашкинази

Почему в линиях электропередачи (ЛЭП) используются высокие напряжения, известно, наверное, всем. Действительно, чем выше напряжение в линии, тем меньше в ней ток (при постоянной передаваемой мощности) и тем меньше тепловые потери. Казалось бы, чем выше напряжение, тем лучше. Однако ЛЭП с рабочим напряжением, скажем, в несколько миллионов вольт не существует, а разработка каждой последующей ЛЭП на большее, чем у предшествующих, напряжение требует больших усилий. По-видимому, есть какой-то эффект, ограничивающий рабочее напряжение ЛЭП.

Оказывается, это тот же самый эффект, который ограничивает «рабочее напряжение» между тучей и землей (или между двумя тучами).

И свет, и звук

Короткий гром — глухой обвал,
Рожденье света и озона,
Далеких молний карнавал.
Н. Майоров

В этих трех строчках уместилась практически вся информация о молнии, хотя автор их был поэтом, а не физиком.

Итак, молния — это кратковременный («короткий») процесс в атмосфере с генерацией звука («гром») и света («рожденье света») и с протеканием химических реакций («и озона»). Во время этого процесса выделяется энергия, во всяком случае в виде света и звука — мы видим свет и слышим звук.

Первый вопрос, который сразу возникает,— откуда берется эта энергия? Ответ очевиден: энергия накапливается в конденсаторе, обкладки которого — это туча и земля, а диэлектрик — воздух между ними. Попытаемся оценить запасенную в этой системе энергию.

Пусть туча имеет размеры 3×3 км, а расстояние между тучей и землей — 1 км. Тогда емкость конденсатора будет около 0,1 мкФ (как получено это значение?). Несмотря на внушительные размеры конденсатора, емкость его весьма скромная — в радиоприемниках есть конденсаторы с емкостью в 1000 раз больше. Правда, энергия заряженного конденсатора зависит еще и от напряжения, а оно между тучей и землей достигает 10^9 В. Таким образом, энергия составляет около $5 \cdot 10^{10}$ Дж (как получена эта величина?), что, например, в 10^9 раз больше энергии заряженного конденсатора фотовспышки (емкость 800 мкФ, напряжение 300 В).

Но для того чтобы эта, даже не очень значительная, энергия электрического поля превратилась в свет, звук или в какую-то другую форму энергии, должно начаться движение зарядов, то есть должен возникнуть электрический ток. Однако в обычных условиях воздух — диэлектрик. Те относительно немногочисленные свободные заряды, которые есть в воздухе в силу каких-то случайных обстоятельств (например, электроны, возникшие из-за ионизации космическими лучами), не могут образовать большого (до 10^5 А, как показывает опыт) тока, протекающего в канале молнии.

Итак, что-то в нашем рассуждении не так.

Куда же бьет молния?

Между катодом и анодом происходит больше явлений, чем это доступно вашему воображению.
Г. Ретер. Электронные лавины в газах

Не следует думать, что Ретер был пессимистом, отнюдь. Просто он понимал ограниченные возможности человеческого разума и необычайную сложность природы.

До сих пор ясны не все детали электрического пробоя в газе (именно так называют процесс прохождения электрического тока через газ). Однако чтобы понять, как протекает процесс в целом, достаточно учитывать сравнительно небольшое число деталей процесса. До полного познания явления электрического пробоя в газе еще очень далеко. Но даже только то, что изучено, позволило создать самые мощные лазеры, самые мощные источники света, самые мощные электронные приборы.

Не все еще ясно и в теории молнии, представителя одного из конкретных видов пробоя в газе — искрового разряда. Но многое уже установлено. Известно, например, что процесс протекает в две стадии — образование канала разряда между тучей и землей и прохождение импульса основного тока.

Обычно туча заряжена отрицательно, а земля положительно. Одиночные электроны, имеющиеся в воздухе, ускоряются электрическим полем и ионизируют нейтральные атомы. При этом возникают новые свободные электроны, которые тоже ионизируют атомы, и так далее. В итоге образуются электронные лавины, движущиеся по направлению от тучи к земле. Два явления наиболее существенны для развития лавин: усиление поля перед головкой лавины и фотоионизация — газ ионизируется испускаемым головкой ультрафиолетовым излучением (рис. 1). Этот процесс в целом называется очень красиво: «ступенчатый лидер». Лидер светится относительно слабо и глазом практически не виден.

Оказывается, ступенчатый лидер распространяется со скоростью порядка 10^7 м/с, но расстояние в 1 км он покрывает не за 0,1 мс, а за... 20 мс! Почему? Почему, пройдя каждые 5 м, он останавливается, «размышляет» 0,1 мс, а затем движется дальше, обычно, изменив направление? Здесь познанное кончается. В физике газового разряда вообще нет заасфальтированных трасс, а тут кончается всякое подобие дорог.

Наконец, лидер добирается до земли, замкнув тучу с землей «накоротко» каналом ионизированного газа. На этом первая стадия процесса заканчивается, и начинается вторая. Теперь по образовавшемуся каналу снизу вверх, то есть от земли к туче, проходит короткий (0,1 мс) и мощный импульс основного тока молнии — его-то мы и видим. Температура газа в канале порядка 10^4 К — вот и происходит «рожденье света и озона». Газ расширяется — мы слышим гром.

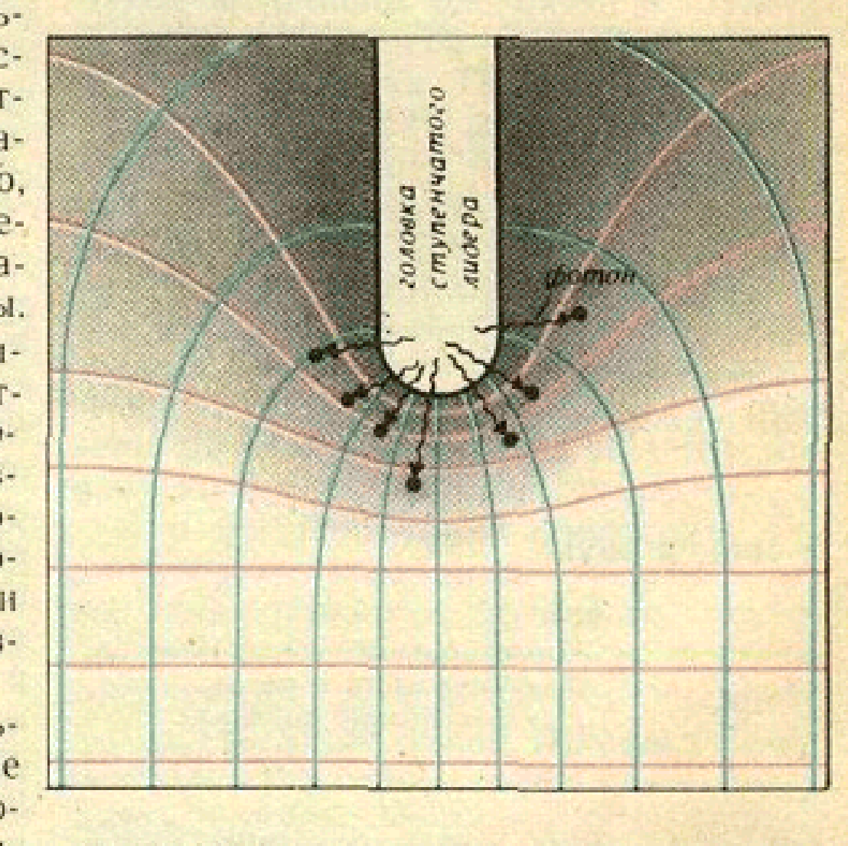
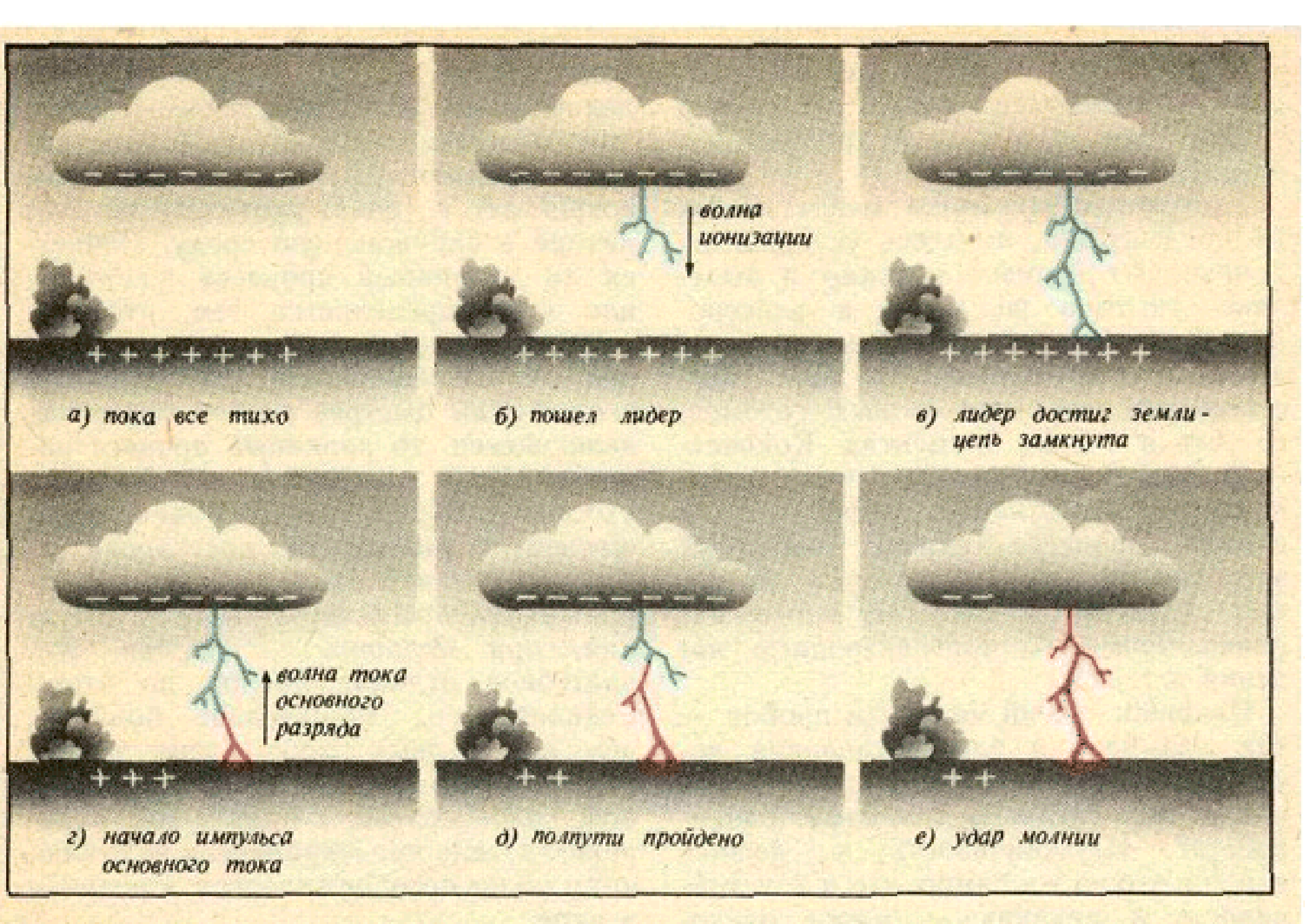


Рис. 1. Для возникновения электронных лавин наиболее существенны два фактора: усиление электрического поля перед головкой лидера (синим цветом показаны линии напряженности поля, красным — эквипотенциальные линии) и фотоионизация (нейтральные атомы ионизируются излучением, испускаемым головкой лидера).



а) пока все тихо
б) пошел лидер
в) лидер достиг земли — цепь замкнута
г) начало импульса основного тока
д) полпути пройдено
е) удар молнии

Рис. 2. Две стадии молнии: образование ионизированного канала разряда (а) — в)) и прохождение импульса основного тока (г) — е)).

Почему-то обычно молнию рисуют бьющей сверху вниз (туча и Зевс-громовержец наверху). Между тем импульс основного тока и свечение начинаются внизу и волной разливаются по каналу, оставленному лидером. Молния, точнее — видимая ее фаза, оказывается, бьет снизу вверх!

Таков вкратце механизм молнии, или пробоя в газе, причем пробоя больших промежутков (рис. 2). При пробое малых промежутков существенными оказываются процессы на электродах.

Неустойчивость и пробой в твердых и жидких диэлектриках

Развитие неустойчивости, то есть катастрофическое нарастание первоначального малого возмущения, является, естественно, процессом нестационарным. От нестационарного процесса мы вправе ожидать, что в конце концов он к чему-то приведет.
Ю. П. Райзер. Основы современной физики газоразрядных процессов

Пробой в твердом теле приводит обычно к пробитому в образце отверстию с оплавленными краями. Именно из-за этого и возникло название «электрический пробой». Пробой чистых жидкостей имеет много общего с пробоем твердых тел (отверстия же при этом, естественно, не остаются).

Основных механизмов пробоя твердых тел и жидкостей три.

Если вещество состоит из ионов (атомы связаны ионной связью), то электрическое поле может эти связи разорвать. При таком механизме электропрочность должна быть тем выше, чем больше энергия связи ионов. И действительно, такая закономерность наблюдается, например для ионных кристаллов (рис. 3). Далее происходит следующее. Во-первых, ион движется по веществу, разрушая химические связи и порождая новые свободные ионы, которые сразу же начинают выполнять свое «черное дело». Во-вторых, все эти ионы отбирают энергию у поля и отдают ее веществу (тормозясь при соударениях). Вещество нагревается, плавится и испаряется, в результате чего происходит еще и пробой в парах. Что там раньше, что позже, разобраться трудно — все эти процессы идут одновременно. А кончаются они, — в зависимости от мощности источника электроэнергии и напряжения пробоя — тихим щелчком или грохотом (если пробой в парах — последняя стадия, то откуда грохот понятно, а если до пробоя в парах дело не дошло?).

Следующий механизм очень похож на предыдущий, но здесь ускоряются, ионизируют атомы, отбирают и выделяют энергию не ионы, а электроны. Ясно, что такой механизм будет иметь место, например, в веществах, состоящих из одинаковых атомов, то есть в чистых элементах. Кончается пробой в этом случае так же, а начинается, естественно, иначе — для начала процесса нужен свободный электрон. Причин, по которым он может оказаться в веществе, много: наличие примесей, приэлектродные явления и т. п.

Наконец, третий механизм пробоя — так называемая электротепловая неустойчивость. Что такое неустойчивость и как она, согласно эпиграфу, развивается? Неустойчивость в физике вообще это то же самое, что и неустойчивость в механике,— малое отклонение от состояния равновесия нарастает (шарик, лежащий на вершине сферы, чуть-чуть отклонившись, не возвращается, а скатывается дальше). В данном случае неустойчивость возникает следующим образом. Сопротивление изолятора хотя и велико, но все же не бесконечно. Какой-то ток через него проходит, и поэтому изолятор нагревается. При нагревании сопротивление изолятора уменьшается (растет число свободных носителей зарядов), ток возрастает, возрастает и выделяющееся количество теплоты. Итак, при увеличении температуры возрастает выделяющееся тепло. Правда при этом возрастает и тепло, уходящее из изолятора в окружающую среду. Начнется ли «лавинный процесс» разогрева или нет, определяется тем, что при увеличении температуры растет быстрее — выделяющееся или уходящее тепло. Если быстрее растет тепло выделяющееся, то лавинный процесс начнется. Если же быстрее растет тепло уходящее, то температура будет уменьшаться и равновесие восстановится. Как показывает опыт, при малых напряжениях преобладает вторая ситуация, при больших — первая. Характерное отличие пробоя по этому механизму — значительно большее, чем при первых двух, время развития процесса. Приходит же этот пробой, как и другие, к плавлению, испарению и, если предохранители не отключат раньше источник энергии, к разряду в паре.

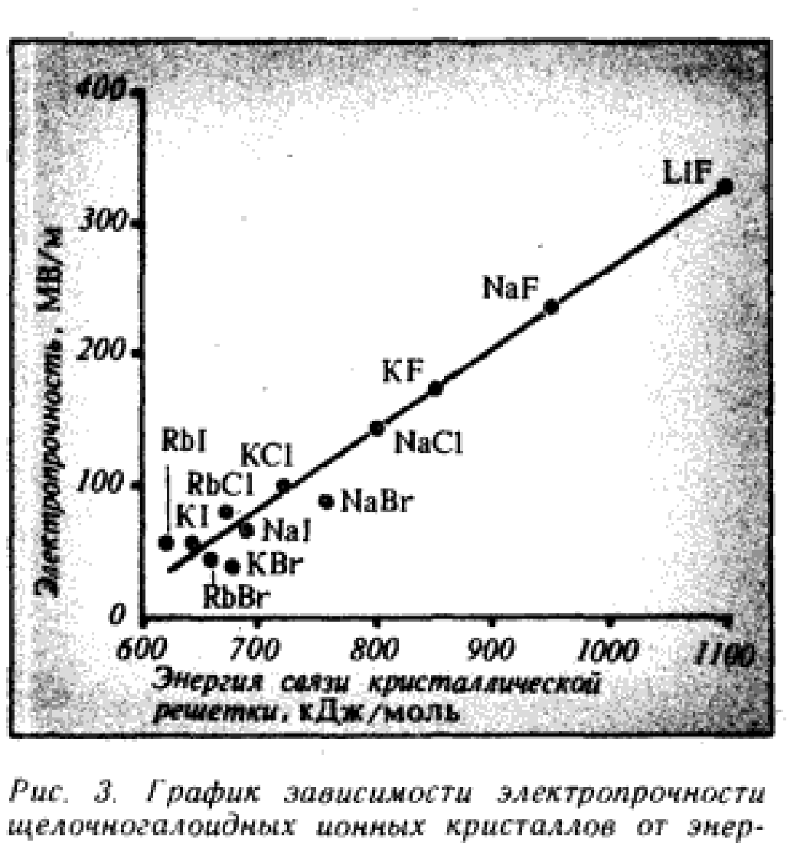


Рис. 3. График зависимости электропрочности щелочногалоидных ионных кристаллов от энергии связи кристаллической решетки.

И в твердых, и в жидких диэлектриках есть еще несколько механизмов пробоя, связанных с примесями и неоднородностями. Но «нельзя объять необъятное», по крайней мере, в одной статье.

Самый лучший и самый малоизученный изолятор — вакуум

Теория высоковольтного пробоя вакуума характерна наличием многих гипотез. Это можно объяснить тем, что при проведении исследований отдельные авторы наталкивались на все новые и новые факторы.
Н. В. Черепнин. Сорбционные*) явления в вакуумной технике

Кроме рассмотренных нами твердых, жидких и газообразных диэлектриков в природе есть еще один, причем наилучший. Это — вакуум. Его очевидное отличие от остальных диэлектриков состоит в том, что вакуум не содержит никаких носителей зарядов, даже связанных. Следовательно, источником электронов или ионов, которые потом составят ток пробоя, должны быть электроды. Возможен, например, такой процесс: электростатические силы, притягивающие один электрод к другому, отрывают слабо держащуюся на электроде частичку (пыль, заусенец после механической обработки, кристаллик, отделенный микротрещиной). Оторванная частичка пересекает зазор и при ударе о противоположный электрод испаряется. В парах материала частички и происходит пробой.

---

*) Сорбция (от латинского sorbeo — поглощаю) — поглощение твердым телом или жидкостью какого-либо вещества из окружающей среды.

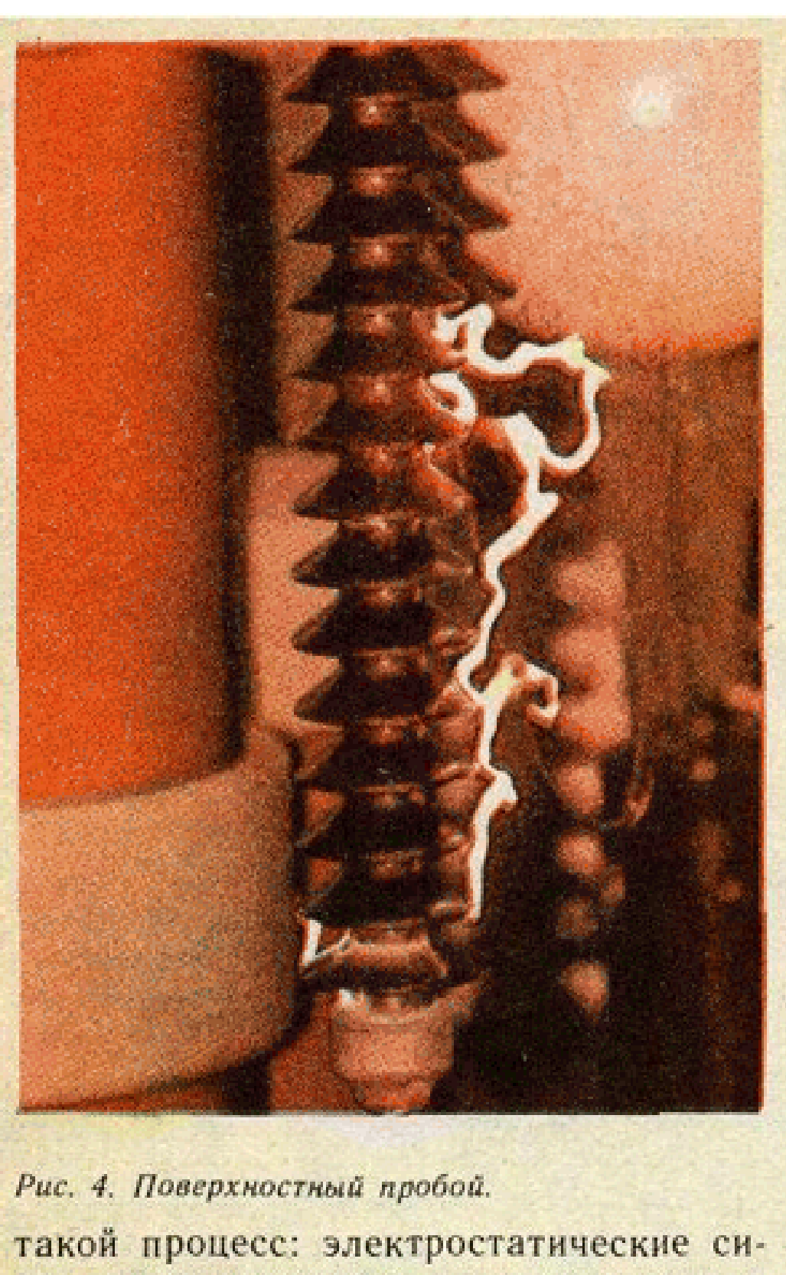


Рис. 4. Поверхностный пробой.

И снова — ЛЭП

Видимо, пришло время стимуляции условий для развития более тщательных и фундаментальных исследований поведения изоляторов.
Дж. Фаррелл. Электрический пробой в вакууме

Наш рассказ начался с высоковольтных ЛЭП. Вернемся к ним и обратим наше внимание на изоляторы, с помощью которых подвешены провода к опорам. Эти изоляторы — вы, конечно, помните, как они выглядят,— состоят из отдельных «тарелок» (рис. 4).

Очевидно, что прямую палку сделать проще, чем довольно хитрой формы диск. Зачем же изоляторам придают такую причудливую форму? Что меняется, если прямую палку заменить ребристой? Расстояние между электродами по объему диэлектрика, конечно, не изменится, но зато увеличится расстояние по поверхности диэлектрика, то есть по границе между изолятором и воздухом. По-видимому, существует какой-то особый вид пробоя, связанный с поверхностью твердого тела. Практически именно этот вид пробоя наблюдается в опыте с керамическим кубиком, к противоположным граням которого приложена разность потенциалов. В этом случае пути между электродами внутри диэлектрика, по воздуху и по поверхности совпадают, а соответствующие напряжения пробоя относятся примерно как 10:3:1. В этом есть нечто загадочное. Казалось бы, поверхность — понятие чисто геометрическое. Почему же напряжение пробоя по поверхности меньше остальных? Разгадка в том, что на самом деле поверхность — понятие не только геометрическое.

После поверхностного пробоя на диэлектрике, как правило, повреждения отсутствуют. Значит, пробой происходит все-таки в газе, окружающем образец. Но почему тогда канал пробоя «стелется» по образцу? Может быть, газ в непосредственной близости к образцу как-то отличается от газа вдали? Но к этому может привести только выделение газа из образца. Действительно, на поверхности твердого тела всегда имеется слой сорбированного газа и влаги. Чтобы проверить, не происходит ли «поверхностный пробой» в слое более плотного газа у поверхности образца, можно провести такой опыт. Поместим образец в вакуум и нагреем. При нагревании сорбированные на поверхности газ и влага удаляются, а новые не сорбируются, так как образец находится в вакууме. В таких условиях напряжение поверхностного пробоя становится значительно выше. Следовательно, поверхностный пробой — это, по существу, пробой в газе (маленькая молния). Однако этот процесс изучен еще плохо, о чем свидетельствует эпиграф к разделу.

Copyright ©1996-2002 МЦНМО
Пишите нам: kvant@mccme.ru
Проект осуществляется при поддержке Московского комитета образования, Московского Института Открытого Образования, Электронного журнала "Курьер образования"
Rambler's Top100