Boxoft Image To PDF Demo. Purchase from
www.Boxoft.com to remove the watermark

И. С. Стекольников Физика молнии и грозозащита 1943

И. С. Стекольников

Физика молнии и грозозащита

Издательство
Академии Наук СССР

ЭБ "Научное наследие России"

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. Г. М. КРЖИЖАНОВСКОГО

И. С. СТЕКОЛЬНИКОВ

ФИЗИКА МОЛНИИ и ГРОЗОЗАЩИТА

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1943 Ленинград

ЭБ "Научное наследие России"

Ответственный редактор
академик А. Ф. ИОФФЕ

Подписано к печати 11/III 1943 г. Л 6882. Печ. л. 14,5+ вклейки 1/4 л., уч.-изд. л. 24,8
Тираж 3000 экз. Цена книги в переплете 16 руб. Зак. 979.

16-я типография треста «Полиграфкнига», Москва, Трехпрудный, 9.

ЭБ "Научное наследие России"

ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
3	11 сн.	авторитет	приоритет
8	Табл. 1	Веркальные	Вертикальные
71	Рис. 52, *c*		перевернуть на 180°
74	4 св.	53, a^1	53, *b*
74	4 сн.	рис. 57	рис. 55
78	1 св.	Как видно из рис. 59, разряд состоит из 5 импульсов.	Фотография состоит из 5 импульсов, из которых на рис. 59 показано 3.
79	19 сн.	столетия	столетие
80	Подпись к рис. 61	Развернутая фотография искрового	Развернутый рисунок искрового
104	4 св.	(см. стр. 183)	(см. стр. 180)
108	Надпись на рис. 92	по измерениям ТНИСГЭИ	по измерениям ТНИСГЭИ в горных условиях
108	То же	по измерениям ТНИСГЭИ и др. авторов	по измерениям ТНИСГЭИ и др. авторов в горных условиях
128	15 св.		Формула имеет номер (3)
137	Обознач. на рис. 123	На оси ординат слева стоит: lg	Должно быть: i; g_z
		На оси ординат справа стоит: $100 \cdot 10^8$	Должно быть: $100 \cdot 16^7$
139	2 св.	$23/\eta S$	$23\,\mu S$
140	1 »	на рис. 124	на рис. 123
142	7 сн.	1951 г.	1941 г.
176	Рис. 152, *b*		перевернуть на 180°
181	22 св.	на случай	случай
184	5 »	$U_A \approx 288$ kV,	$U_A \approx 2880$ kV,
207	25 сн.	Потенциал в U^a точке	Потенциал U_a в точке
207	23 »	стр. 188	стр. 183
207	11 »	стр. 187	стр. 184
215	26 св.	стр. 204	стр. 201
228	12 сн.	1339	1933

Стекольников, «Физика молнии и грозозащита».

ЭБ "Научное наследие России"

ЭБ "Научное наследие России"

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1940 г. мною была опубликована монография под названием «Молния», в которой освещались вопросы развития знаний в области изучения грозы, атмосферных разрядов, их разрушительного действия и методов грозозащиты.

В основу монографии были положены исследования автора и его сотрудников, а также обширная литература, из которой основная, в количестве свыше 1 000 названий, вошла в библиографический указатель.

За прошедшие с момента подготовки названной книги к печати три года, в течение которых в области молнии проводилась громадная исследовательская работа, в СССР и ряде других стран накопилось много новых научно ценных и практически важных результатов.

Полученные материалы позволяют сделать некоторые теоретические обобщения и по-новому осветить ряд вопросов образования разрядов, их развития и защиты от них различных объектов.

Опубликованные в ходе наших работ материалы были широко использованы за границей, и по ряду важных направлений за СССР был признан авторитет. Я надеюсь поэтому, что подведение итогов новых исследований и некоторые делаемые при этом теоретические обобщения помогут продвижению представлений о молнии на новую ступень и будут способствовать развитию и рационализации методов грозозащиты.

Как и при работе над монографией «Молния», здесь использован весь доступный литературный материал, однако, учитывая ранее опубликованную подробную библиографию, помещенный в настоящей книге библиографический список включает лишь наиболее важные работы, появившиеся за последние два-три года.

И. Стекольников

ЭБ "Научное наследие России"

ВВЕДЕНИЕ

В последние три-четыре года проблема молнии подвергалась ожесточенным атакам на целом ряде участков. Атаки проводились в основном путем массированного применения ранее разработанных аппаратов (ферромагнитных регистраторов, клидонографов, катодных осциллографов, фотокамер и пр.) и новых созданных приборов и методов исследований. В течение этого же времени были сделаны попытки создания новых теорий формирования туч и механизма протекания разряда.

Результаты, полученные различными группами исследователей и отличными методами, не согласованы между собой и представляют конгломерат фактических данных, часто несопоставимых без определенных оговорок и пояснений.

Целью настоящей работы является по возможности широкий обзор накопленных результатов с критическим анализом применявшихся методов.

При свете новых фактов многие теории, созданные даже в последние годы, делаются несостоятельными и требуют замены или модификации.

Систематические работы в области грозозащиты позволяют рекомендовать для практического использования конкретные системы и оценить защитные возможности каждой из них. Созданные представления о природе грозовых разрядов позволяют судить о рациональности различных предлагаемых, часто без достаточных научных обоснований, новых методов грозозащиты.

ЭБ "Научное наследие России"

I. ОБРАЗОВАНИЕ ГРОЗ

1. НОРМАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ И ЕГО НАРУШЕНИЕ

Грозовые явления нарушают нормальное состояние атмосферы земли, как в отношении метеорологическом, так и в отношении ее электрического состояния.

Рассмотрим здесь кратко нормальное электрическое состояние земли и окружающей ее атмосферы.

Верхние слои земли и покрывающие ее моря и океаны, составляющие $^3/_5$ земной поверхности, имеют электрическую проводимость в пределах от 10^5—10^8 сек.$^{-1}$ до 10^{10} сек.$^{-1}$. Проводимость воздуха в нормальном состоянии у поверхности земли в среднем равна $2 \cdot 10^{-9}$сек.$^{-1}$. С увеличением высоты она увеличивается сначала медленно, а потом все быстрее и достигает в области слоя Кеннели—Хивисайда (находящегося на высоте около 80 км) величины порядка проводимости пресной воды (10^9 сек. $^{-1}$). В связи с этим можно полагать, что земля и названный проводящий слой образуют сферический конденсатор с проводящим слоем воздуха между обкладками.

В первом приближении изменение проводимости воздуха с высотой h определяется по формуле

$$y = y_0 e^{0,26h}, \tag{1}$$

где h измеряется в километрах.

Опыт показывает, что между обкладками конденсатора существует разность потенциалов, причем наружный слой Кеннели—Хивисайда имеет положительный заряд, а поверхность земли отрицательный.

В нормальном состоянии атмосферы (в отсутствии возмущающих факторов, каковыми являются грозы, дожди, снегопады и др.) поле направлено сверху вниз. Напряжение нормального поля вблизи поверхности земли E равно 120 V/м, т. е. при подъеме на 1 м потенциал увеличивается на 120 V. Наличие поля и проводимость воздуха y_0 обусловливают течение тока (сверху вниз), плотность которого определяется соотношением:

$$j = E_0 y = -8 \cdot 10^{-7} \text{ ACGS/см}^2 = -2.7 \cdot 10^{-16} \text{ А/см}^2.$$

Для всей поверхности земли F полный ток определяется величиной

$$J = Fj = -1360 \text{ А}.$$

Этот ток ежесекундно подводит к земле 1 360 С положительного электричества, благодаря чему заряд должен был бы непрерывно изменяться. Однако опыт показывает неизменяемость заряда земли[1]. Объяснения этому парадоксу, несмотря на существование множества гипотез, не найдено. Одно из наиболее вероятных объяснений причины сохранности заряда земли связано с грозовыми явлениями и будет рассмотрено ниже.

Исходя из условия постоянства тока по высоте (что допустимо, учитывая малую толщину слоя атмосферы по сравнению с радиусом земли), можно напи-

[1] На основании элементарных соображений, основанных на законах электростатики, исходя из напряженности поля $E = 120$ V/м, можно показать, что отрицательный заряд земли равен $5.4 \cdot 10^5$ С.

ЭБ "Научное наследие России"

сать такое соотношение между напряженностью и проводимостью на высоте h и этими же величинами на другой высоте:

$$Ey = E_0 y_0, \tag{2}$$

откуда, принимая во внимание зависимость y от высоты по формуле (1), найдем:

$$E = E_0 e^{-0,26h}. \tag{3}$$

Потенциал (в вольтах) на высоте h будет равен:

$$V = 3800 E_0 (1 - e^{-0,26h}), \tag{4}$$

где E измеряется в вольтах на метр, а потенциал земли принят равным нулю.

При расчетах по формулам (1), (3) и (4) значения y_0 и E_0 следует брать на высоте около 50 м над земной поверхностью (ибо в слое, лежащем ниже 50 м, напряжение поля и проводимость изменяются с высотой несколько иначе, чем в более высоких слоях). При $h = 50$ м, по Бендорфу:

$$y = y_0 = 4.4 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1},$$
$$E = E_0 = -55 \text{ V/см}.$$

Слой Кеннели—Хивисайда, расположенный на высоте около 80 км, согласно полученной формуле, будет иметь потенциал около 213 000 V. Сопротивление всей «атмосферы» в сферическом конденсаторе определяется отношением 213 000 : 1 360, что дает 157 Ω.

Мощность источников, поддерживающих в проводящем конденсаторе с обкладками земля—слой Кеннели—Хивисайда указанную разность потенциалов, равна приблизительно $2.9 \cdot 10^5$ kW.

Наиболее сильное нарушение нормального электрического поля земли приносит гроза. С метеорологической точки зрения гроза—местный процесс в земной атмосфере, основные проявления которого—бурная конденсация водяного пара и связанные с этим атмосферно-электрические разряды. Образование грозы связано с наличием облаков и мощных вертикальных воздушных потоков, вследствие чего грозы сопровождаются внезапным и обильным выпадением жидких и твердых осадков.

Исключительно сложные процессы, имеющие место при формировании грозы, не позволяют считать в настоящее время картину развития этого явления полностью изученной. Для уяснения основных фаз формирования грозы рассмотрим некоторые метеорологические детали. Одна из наиболее характерных особенностей грозы—сильный восходящий ток воздуха; наглядное проявление этого—куполообразные вершины кучевых облаков, развитие которых приводит к грозовым тучам (Cumulo Nimbus). Быстрая, вертикальная конвекция и внезапная конденсация—это те процессы, объяснение которых ведет к пониманию основных явлений грозы. Поэтому следует рассмотреть условия, при которых устанавливаются вертикальные температурные градиенты, необходимые для этой конвекции. Эти условия таковы.

1. Сильное нагревание воздуха у поверхности земли, особенно при слабых ветрах. Слабые ветры впрочем содействуют лишь местным или тепловым грозам; более сильный ветер, перемешивая воздух, мешает образованию изолированных восходящих токов, вызывающих этот вид грозы. Большое значение в образовании токов имеет неравномерность прогревания отдельных участков земной поверхности. Над сильно нагретым участком теплый воздух восходит вверх, а более холодные массы его опускаются. В этом процессе существенную роль играет орография местности. Так, над склонами гор и холмов, где воздух нагревается сильнее, усиливается и конвекция, к которой может присоединяться и дневной приток воздуха от долин к склонам. Этим объясняются образование облаков восходящих токов и частые грозы в горах. Восхождение воздушных масс с наветренной стороны горных склонов также усиливает конвекцию и зачастую приводит к выпадению осадков грозового характера с этой стороны даже сравнительно небольших возвышений рельефа.

ЭБ "Научное наследие России"

2. Натекание холодного воздушного слоя на другой слой, потенциально более теплый. Это, повидимому, причина многих океанических гроз и главная причина гроз над сушей, связанных с циклонами.

3. Подтекание под насыщенный слой более плотного воздуха с соответственным подъемом первого слоя.

Для развития начавшейся конвекции необходимо создание чрезвычайно важного условия—неустойчивой стратификации атмосферы в значительной толще, т. е. такого распределения температуры в атмосфере, при котором температура поднимающихся, и при этом динамически охлаждающихся воздушных масс, будет на каждой высоте больше температуры окружающего воздуха. Это условие выполняется не всегда.

Изолированная масса воздуха, имеющая одинаковое с окружающим воздухом давление p и получившая повышение температуры от t до t', приобретает ускорение j, направленное от поверхности земли, величина которого определяется соотношением

$$j = g\frac{t'-t}{t},$$

где g—ускорение силы тяжести. Давление в атмосфере по мере увеличения высоты уменьшается, и нагретый воздух при подъеме расширяется, производя при этом работу. Полагая, что конвекция происходит не турбулентно, что способствует обмену тепла между поднимающимся потоком и окружающим воздухом, будем считать процесс расширения воздуха адиабатическим. Благодаря этому работа расширения идет за счет внутренней теплоты расширяющихся масс, что ведет к ее динамическому охлаждению.

Степень уменьшения температуры с высотой определяется при этом соотношением

$$\frac{dt'}{t'} = \frac{AR}{C_p}\frac{dp}{p}, \tag{5}$$

где p—давление, t'—температура на высоте z, $A = 10^{-7}4.19$, R—газовая постоянная, C_p—удельная теплоемкость при постоянном давлении (равная 0.24 для сухого воздуха).

Вводя гидростатический градиент

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho = -g\frac{p}{Rt'}, \tag{6}$$

где ρ—плотность воздуха на высоте z, получаем

$$\frac{dt'}{dz} = -g\frac{A}{C_p}. \tag{7}$$

Величина $\frac{gA}{C_p} = k_1$ называется сухоадиабатическим градиентом и имеет значение 9.72° С на 1 км. Таким образом, сухой воздух, поднимающийся на 100 м (в атмосфере при $t' = t$), будет охлаждаться примерно на 1° С. Так как температура самой атмосферы с увеличением высоты на 1 км уменьшается на 5—7° С, то с у х о й воздух при подъеме на 1 км охлаждается относительно окружающей атмосферы всего на 3—5° С. Это показывает, что для устойчивого подъема нагретого воздуха величина $t'-t$ должна быть значительной, ибо при начальной разности температур $t'-t = 1°$ С, подъем возможен лишь на 250 м. Конвекция, при этих условиях, не может быть обеспеченной. Однако атмосферный воздух, как правило, содержит влагу, и это имеет в данном случае решающее значение.

Изменение температуры влажного воздуха будет происходить согласно описанным законам лишь до тех пор, пока не начнется конденсация находящихся в нем водяных паров. Выделяющаяся при конденсации теплота будет замедлять падение температуры воздуха при его подъеме. Коэффициент k_1 характеризующий спад температуры с высотой, при этих условиях, по аналогии с коэффициентом k, введенным выше, называется влажноадиабатическим градиентом и имеет значение, меньшее 1° на 100 м. Если температура поднимающегося насыщенного водяными парами воздуха будет снижаться медленнее,

ЭБ "Научное наследие России"

чем температура в атмосфере, то начавшееся восходящее движение будет ускоряться. Описанный процесс протекает особенно бурно при так называемой неустойчивой стратификации атмосферы. Под этим термином имеется в виду уменьшение вертикального температурного градиента атмосферы больше 1° С на 100 м. В этом случае разность $t'—t$ между движущимся по вертикали воздухом и окружающей средой возрастает, благодаря чему подъем ускоряется. Такое состояние атмосферы называется влажноустойчивым. Из изложенного видно, что степенью влажноустойчивости обусловливается развитие грозовых процессов.

В соответствии с причинами, вызывающими грозы, строится их классификация. Различаются:

1. Грозы фронтальные, основной причиной которых являются процессы, происходящие на поверхностях раздела воздушных масс различного происхождения.

2. Грозы внутримассовые, возникающие в результате конвекции, бурно развивающейся вследствие неравномерного нагревания и неустойчиво стратифицированной массы: эти грозы можно также назвать «грозами неустойчивости» или «тепловыми». Чисто фронтальные и чисто массовые грозы, по крайней мере в Европейской части СССР, особенно в его западной половине, составляют исключение, преобладают грозы смешанные, фронтально-термические, возникающие при термических и фронтальных воздействиях. В табл. 1 приведены некоторые типовые характеристики высот отдельных частей тучи и скорости ветровых потоков.

Таблица 1

Тип облачности	Высота по Ганну, в км		Веркальные скорости по Хартману, в м/сек		
	нормальн.	максим.	высота в км	средн.	максим.
Слой Cirrus	6	13	5.2	3.3	56 вверх
Верхний слой Cumulus	4	10			25 вниз
» » »	—	—	3.5	1.3	42 вверх
					36 вниз
» » »	—	—	2.5	1.0	16 вверх
					6 вниз
Нижний слой Cumulus	1.8	4	—	—	—

Из гроз, которые можно отнести к типу фронтальных, наиболее известны и наиболее распространены грозы холодного фронта. В этом случае холодные массы воздуха при поступательном движении подтекают, в виде так называемой шкваловой головы, под находящийся впереди теплый воздух и вызывают его подъем.

Если теплый воздух стратифицирован влажноустойчиво, то для нарушения равновесия достаточно небольшого повода, если же стратификация его устойчива, то нарушение равновесия возможно только тогда, когда конденсация внутри теплых масс наступает на высоте, расположенной ниже границы холодного воздуха. Обычно в непосредственной близости к фронту грозы, несколько впереди его, имеется сравнительно узкая полоса мощных восходящих токов, нередко простирающаяся вдоль всего фронта на сотни километров. Условия в этой полосе благоприятны для развития ливней, шквалов и гроз, причем à priori можно полагать, что последние будут развиваться в тех местах, где температура или орографические условия (перегрев отдельных участков или общий перегрев нижних слоев атмосферы) будут этому способствовать. Таким образом, вдоль линии фронта мы будем иметь в отдельных его участках грозы, перемещающиеся вместе с фронтом. Очевидно, рельеф местности обусловливает неправильный вид линии фронта.

К фронтальным грозам могут быть отнесены и так называемые грозы теплого фронта, которые в некоторых случаях могут образоваться при восходящем скольжении теплого воздуха по поверхности теплого фронта.

ЭБ "Научное наследие России"

2. ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ГРОЗОВЫХ ТУЧ

Для объяснения образования заряженных объемов в грозовых тучах разработано большое количество теорий. В краткой форме напомним содержание основных теорий, рассматривая их по возможности в хронологическом порядке.

В 1885 г. Эльстер и Гейтель предложили теорию электризации атмосферных осадков, основанную на явлении индукции зарядов на водяных каплях, падающих в электрическом поле земли. Каждая капля в верхней и нижней частях имеет индуцированные заряды противоположного знака. Так как ненарушенное электрическое поле земли направлено сверху вниз (земля отрицательна), в верхней части капель наводится отрицательный заряд, а в нижней—положительный. Если быстрее падающая большая капля нагоняет малую и сталкивается с ней, то, по исследованиям Шумана, может произойти либо слияние капель (при условии, что настигнутая капля имеет диаметр меньше 0.5 мм) без какого-либо электрического эффекта, либо, при больших размерах догоняемой капли, отделение от верхней половины большой капли значительного числа мельчайших капель, захватывающих с собой наведенный на верхней половине большой капли заряд. В результате этого остаток большой капли при положительном градиенте поля будет заряжен положительно, а при отрицательном—отрицательно. Подобное разбрызгивание капель при обложных дождях наблюдал Махе.

Так как в первоначальном виде эта теория давала расхождение с наблюдениями, авторы (1913) видоизменили ее, приняв, что при столкновении капель происходит не скольжение мелких капель вокруг крупных, а их отскакивание. В случае нормального электрического поля маленькие капли получают при этом положительный заряд, а большая—отрицательный, ибо при падении капель их встреча наиболее вероятна в нижней половине крупной капли. Но в таком виде эта теория вызывает ряд возражений, из которых основным является то, что в действительности у мелких капель преобладает отрицательный заряд.

Более распространена теория Симпсона, разработанная им в 1909 г. и развитая в последующие годы. В нашей литературе она неоднократно рассматривалась и поэтому хорошо известна. Согласно этой теории электрические заряды разделяются, когда происходит разрушение водяной капли на ряд мелких брызг (эффект Ленарда), при этом вода заряжается положительно, а воздух отрицательно. Отрицательные заряды осаждаются на частичках тучи, которые уносятся вверх восходящими струями воздуха, а положительные связываются с более крупными каплями, выпадающими в виде дождя. Получающееся разделение электричества ведет к концентрации положительных зарядов вблизи основания тучи, где поднимающиеся токи могут удерживать большие количества воды во взвешенном состоянии, и распределению отрицательного электричества в средних и высоких частях тучи.

В стилизованном виде схема распределения зарядов в туче, согласно теории Симпсона, показана на рис. 1. На этом же рисунке приведен ряд других схем распределений зарядов, предложенных различными исследователями.

В Германии распространена теория грозы Теплера, разработанная им в 1926 г. на основе теории Эльстера и Гейтеля. Согласно схеме Теплера, в результате контакта между маленькой каплей и настигающей ее большой, заряженной благодаря индукции нормального электрического поля в верхней части отрицательно, а в нижней положительно, маленькая капля уносит с собой положительный заряд. В результате этого происходит возрастание градиента потенциала. Таким образом, грозовая туча состоит из двух слоев: нижнего, заряженного положительно, и верхнего, несущего отрицательный заряд.

Очевидно, преобладающее большинство разрядов, достигающих земли при такой схеме, должно быть положительной полярности и развиваться от тучи к земле.

Для объяснения противоречия между своей теорией и результатами определения полярности разрядов, производившихся магнитным методом, Теплер выдвигает соображение о том, что вследствие ветвистости положительных раз-

ЭБ "Научное наследие России"

рядов, ток в них был ниже пределов регистрации. Нельзя не отметить значительной натяжки этого объяснения.

Оригинальную и хорошо разработанную теорию грозы дал Вильсон (1916 и 1920). Базируясь на изучении поля грозовой тучи и его изменении при разрядах, Вильсон пришел к заключению, что тучи биполярны, причем в большинстве случаев (около 60%) нижний слой тучи, в противоположность теории Теплера, отрицателен. В 1929 г. Вильсон, несколько видоизменив теорию Эльстера и Гейтеля, сделал из нее выводы, обратные выводам Келера. Согласно Вильсону, вследствие индукции нормального электрического поля земли, капля получает отрицательный заряд в верхней и положительный в нижней части. При падении или при омывании ее воздухом отрицательные ионы притягиваются к нижней части капли, которая их адсорбирует. Подвижность положительных ионов в воздухе слишком мала, чтобы они могли притягиваться падающими каплями. Таким образом, капли будут получать отрицательный заряд, а воздух положительный.

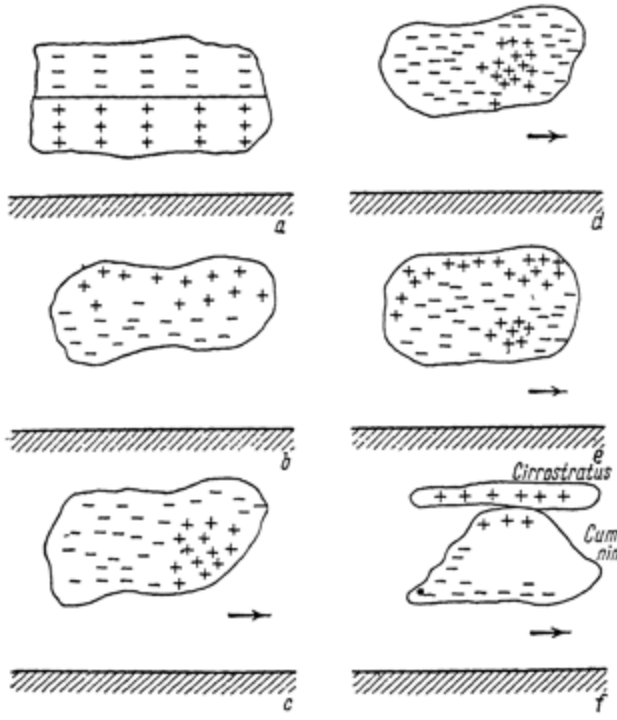


Рис. 1. Схемы распределения зарядов в туче по представлению различных авторов:
a—Теплер, *b*—Вильсон, *c*—Симпсон, *d*—Банерьи, *e*—Симпсон и Скрезе, *f*—Довер

Согласно этой точке зрения, верхний слой тучи оказывается заряженным положительно, а нижний отрицательно (рис. 1,b). Заключение Вильсона, что нижний слой тучи заряжен отрицательно, объясняет большое преимущество отрицательных разрядов над положительными. Однако действительная картина распределения зарядов в туче, повидимому, более сложна.

Теория Вильсона интересна еще и тем, что она объясняет перенесение на землю отрицательного заряда, необходимого для баланса отрицательного заряда земли, обусловливающего ее нормальное поле. Вильсон предполагает, что в удержании отрицательного заряда землей существенным фактором является обмен зарядов, происходящий между грозовыми тучами и поверхностью земли. Он различает три пути, по которым может происходить восполнение убыли отрицательного заряда земли, обусловливаемой током «ясной погоды»:

1) разряды молнии,

2) дождь, несущий заряды того или иного знака,

3) истечение зарядов из различных объектов, возвышающихся над поверхностью земли, и в частности из травы и деревьев.

В целях более подробного рассмотрения электрических процессов, происходящих при наличии тучи, обратимся к рис. 2. Между поверхностью земли и верхним проводящим слоем находится биполярная туча, верх которой *A* заряжен положительно. Благодаря тому, что атмосфера обладает электрической проводимостью, сильно возрастающей с высотой, между «обкладками» тучи *A* и *B* и с этих обкладок на ионосферу и землю будут течь токи. В силу того, что в самой туче, где заряды абсорбированы на каплях воды и частицах снега и пара, проводимость мала, ток утечки между обкладками *A* и *B* мал.

ЭБ "Научное наследие России"

Исходя из значений проводимости атмосферы в области верха тучи и величины заряда обкладки A, можно полагать, что ток между ионосферой и тучей достигает нескольких ампер. В области между B и землей проводимость воздуха невелика, однако и здесь могут возникать значительные токи за счет большого выделения зарядов с поверхности земли (истечения с остриев). Этот разряд тучи компенсируется аэро-термодинамическим процессом, разделяющим заряды в области тучи. Этот процесс является как бы генератором, обкладками которого служат верх и низ тучи.

Этот генератор через проводимости слоев атмосферы, лежащих под и над тучей, как бы включается между ионосферой и землей и способствует переходу в слой Хивисайда зарядов из земли, перенесенных туда током «ясной погоды».

То, что этот генератор может давать ток в несколько ампер, будет показано на основании анализа кривых восстановления поля (стр. 54).

Добавлением к этому перераспределению зарядов являются молнии, которые при знаках A и B, показанных на рис. 2, несут на землю отрицательные, а в ионосферу положительные заряды. Дождь, проходя слой атмосферы между тучей и землей, впитывает в себя заряды, находящиеся в воздухе, и может поэтому изменить величину заряда своих капель, иногда даже меняя их знак. В силу этого заряд дождя и его знак не являются единственными показателями процессов распределения зарядов в туче.

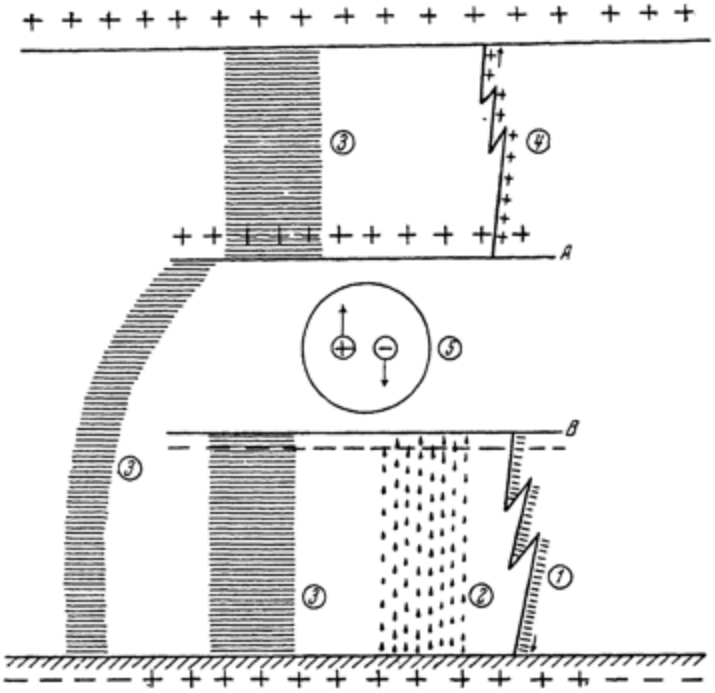


Рис. 2. Стилизованная электрическая схема тучевого генератора:

1—молнии, несущие отрицательные заряды; *2*—дождь, несущий отрицательные заряды; *3*—проводимость и конвекция; *4*—молнии, несущие положительные заряды; *5*—тучевой генератор, переносящий в среднем 3 ампера

Опираясь на ряд экспериментальных исследований, Шонланд предположил, что низ тучи заряжен отрицательно, вследствие чего молнии несут на землю отрицательный заряд. Это же предположение, указывающее на то, что электрическое поле в данном случае направлено от земли к туче, означает, что с остриев, соединенных электрически с землей, произойдет истечение положительных зарядов, что также ведет к увеличению отрицательного заряда земли. При значительных истечениях положительных зарядов в атмосферу капли дождя, захватывая положительные ионы, будут сообщать земле положительный заряд.

Баланс зарядов, сообщаемых земле этими тремя процессами, обусловит увеличение отрицательного заряда земли.

Экспериментальные исследования, проведенные в Южной Африке, и весьма приближенные подсчеты, сделанные на их основании, показывают, что в удержании отрицательного заряда земли третий фактор играет наиболее существенную роль. Для некоторых средних условий местной грозы Шонланд дает для трех упомянутых факторов следующие количественные определения:

Разряды молний (эквивалентный ток)	0.1 А
Заряды дождя	—0.02 »
Истечение с остриев (эквивалентный ток)	2.1 »

ЭБ "Научное наследие России"

Эти данные показывают, что гроза при принятых условиях сообщает ежесекундно земле около 2.2 С отрицательного электричества. Таким образом, весь заряд, подводимый к земле, согласно этой гипотезе, требует одновременного существования в среднем около 700 гроз. В действительности число ежесекундных гроз достигает 1 800.

Из изложенного видно, что молнии играют лишь незначительную роль в удержании отрицательного заряда земли. Распространено мнение, что отрицательные грозовые разряды сами по себе могут обеспечить компенсацию противотока «ясной погоды». Недостаточность наших сведений в этой области и условность производимых расчетов не дают возможности разрешить этот вопрос.

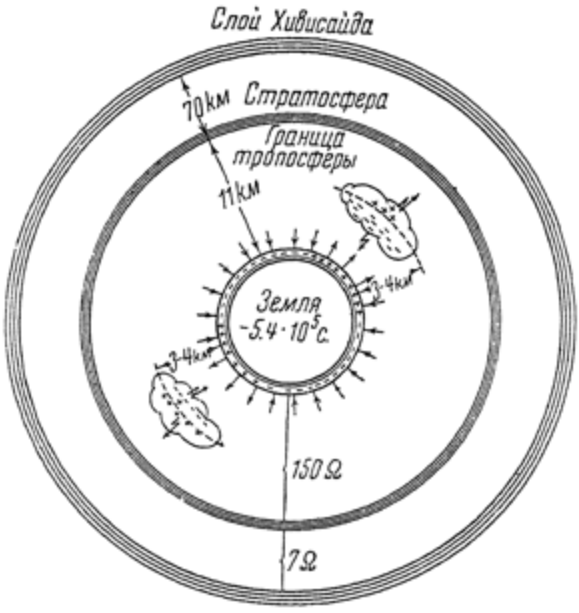


Рис. 3. Схема равновесия атмосферного электрического поля

Характеристические данные: плотность тока на земле $j=2.7\cdot10^{-16}$ А/см². Весь ток $J=Fi=5\cdot10^{18}\cdot2.7\cdot10^{-16}=1\,360$ А (в сек. к земле подводится нормальным током около 1 400 кулонов). Общий стационарный заряд земли равен $5.4\cdot10^{5}$ кулонов. Потенциал слоя Хивисайда равен 213 000 V. Общее сопротивление воздуха между землей и слоем Хивисайда—157Ω. Энергия переноса зарядов на землю равна $200\cdot1\,400=2.8\cdot10^{5}$ Kw. Общее ежесекундное число молний на земном шаре—100. Общее ежесекундное число гроз на земном шаре—1 800

Схема равновесия атмосферного электрического поля с некоторыми средними количественными характеристиками показана на рис. 3.

За последнее время предложено еще несколько схем, рисующих распределение зарядов в грозовой туче. На основании весьма многочисленных измерений электрического поля Банерьи, работая в Бомбее, дал полную картину развития грозы; распределение зарядов в туче, образующееся при тепловой грозе, иллюстрируется рис. 1,*d*. От симпсоновской диаграммы эта схема отличается лишь тем, что она имеет отрицательный заряд значительной интенсивности в передней, в верхней и задней частях тучи. Рис. 1,*d* представляет репродукцию диаграммы Банерьи так называемой ливневой грозы, в которой направление восходящих токов воздуха и распределение зарядов могут быть связаны с механизмом электризации, открытым Ленардом. Обширные исследовательские работы Иенсена в Линкольне (Небраска) позволяют заключить, что метеорологические и электрические характеристики грозы соответствуют схеме Банерьи.

Факты, на которых базируются современные теории механизма грозы, получены из наблюдений на поверхности земли; во многих случаях эти факты различно толкуются и служат основанием для создания противоположных теорий. Это сделается понятным, если учесть, что изучение электрического поля у земли не дает адекватного указания о расположении зарядов в туче.

Остановимся здесь кратко на рассмотрении электрических полей туч с различным распределением зарядов.

3. НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ ПРИ ТУЧАХ СМЕШАННОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Повидимому, одноименно заряженные тучи могут существовать лишь как исключение. Обычно анализ измерений напряженности поля, проделанный у поверхности земли, производится исходя из биполярных туч. Простейшая схема расположения двух разноименно заряженных шаровых объемов в вертикальной плоскости изображена на рис. 4. При этом возможны два варианта расположения зарядов:

ЭБ "Научное наследие России"

1) верхний шар имеет положительный заряд, нижний отрицательный — случай так называемой положительной тучи;

2) верхний шар имеет отрицательный заряд, нижний положительный — случай так называемой отрицательной тучи.

Определение напряженности поля в точке P, лежащей от поверхности земли (или вблизи нее) на расстоянии L от вертикали, проходящей через центры шаров, может быть произведено методом суперпозиции полей, создаваемых каждым зарядом. Поле одного из зарядов определяется на основании формулы:

$$E = \frac{2Q_2H}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}}, \tag{8}$$

где Q_2—заряд второго шара, H_2—высота его центра над землей, L—расстояние проекции центра шара от места регистрации.

Суммарная напряженность в точке P определяется на основании изложенного следующей формулой:

$$E_0 = \frac{2Q_2H_2}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}} - \frac{2Q_1H_1}{(H_1^2 + L^2)^{3/2}}. \tag{9}$$

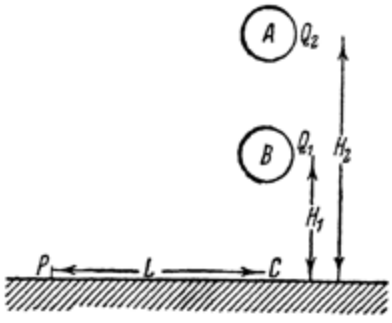


Рис. 4. Схематическое изображение биполярной тучи

Это выражение показывает, что, для того чтобы под тучей ($L=0$) знак поля определялся знаком заряда нижнего слоя (в данном случае отрицательно заряженного шара), необходимо, чтобы Q_1 было больше $\frac{H_1^2}{H_2^2} Q_2$. С увеличением L роль второго члена уменьшается быстрее, чем первого, и если $Q_1 < \frac{H_2}{H_1} Q_2$, на некотором расстоянии L_k поле меняет свой знак на обратный. Критическое расстояние, при котором происходит изменение знака поля, определяется из условия, что $E_0 = 0$. Следовательно,

$$\frac{Q_2H_2}{(H_2^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{Q_1H_1}{(H_1^2 + L^2)^{3/2}}.$$

Решение этого уравнения приводит к следующему выражению для L_k:

$$L_k = \sqrt{\frac{H_2^{2/3} H_1^2 - H_1^{2/3} H_2^2 m}{H_1^{2/3} m - H_2^{2/3}}}, \tag{10}$$

где

$$m = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{2/3}.$$

Для примера рассмотрим случай, когда $Q_1 = -Q_2$, $H_2 = 4$ км, $H_1 = 3$ км, по формуле (10) находим $L_k = 4.9$ км.

На рис. 5 показано изменение величины напряженности поля у поверхности земли для зарядов, расположенных согласно рис. 4. На основании сделанного анализа видно, что регистрация напряженности поля катодным осциллографом дает результаты различные (по знаку), в зависимости от удаленности места регистрации от основания тучи. Это обстоятельство необходимо иметь в виду при анализе результатов, сделанных катодным осциллографом, присоединенным к антенне.

Все изложенное относилось к случаю, когда туча заменялась заряженным шарообразным телом. Однако наши современные представления о механизме развития молнии, как это будет изложено ниже, показывают, что распределение зарядов в процессе формирования молнии претерпевает весьма существенное изменение. При этом начальное распределение заряда заменяется постепенно новым, резко отличающимся от шарообразного. Учет этого обстоятельства приводит к необходимости использования других математических выражений для определения напряженности поля.

ЭБ "Научное наследие России"

Подробнее этот вопрос рассматривается в главе III.

При регистрации напряжения на коротких антеннах клидонографами регистрируется изменение напряженности поля, происходящее благодаря полной или частичной нейтрализации заряда в туче.

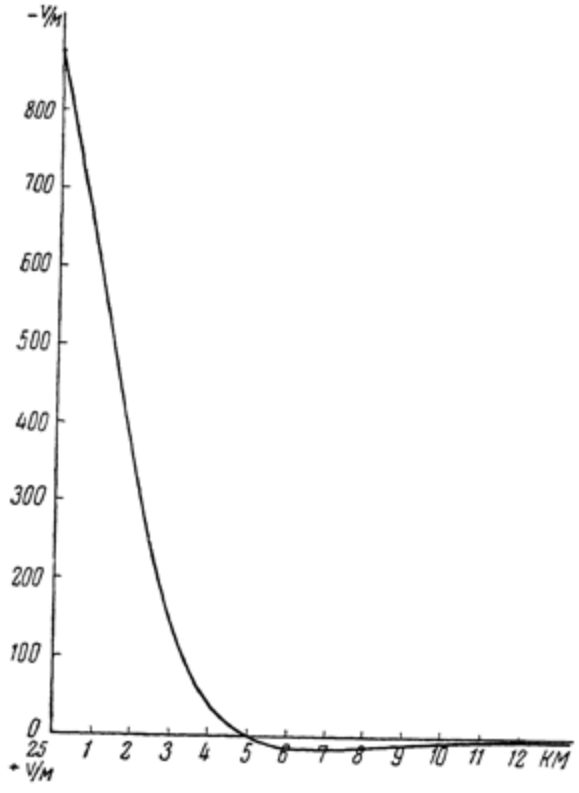


Рис. 5. Изменение величины напряженности поля — поверхности земли, в зависимости от удаленности от центра тучи

Когда происходит нейтрализация отрицательного заряда Q_1, расположенного так, как указано на рис. 4, изменение поля выразится разностью между начальным значением E_0 и новым значением E', определяемым оставшимся распределением зарядов. Из рис. 5 видно, что изменение потенциала в этом случае будет положительным (поле получит положительное приращение), а при нейтрализации положительного заряда поле получит отрицательное приращение. При этом знак этих изменений не зависит от расстояния L.

Несколько иначе обстоит дело при соединении зарядов Q_2 и Q_1. При этом знак изменения напряженности поля зависит от L.

В табл. 2 приведены знаки возможных случаев изменения поля при разрядах: между верхним полюсом и землей (тип AC), между нижним полюсом и землей (тип BC) и между полюсами (тип AB).

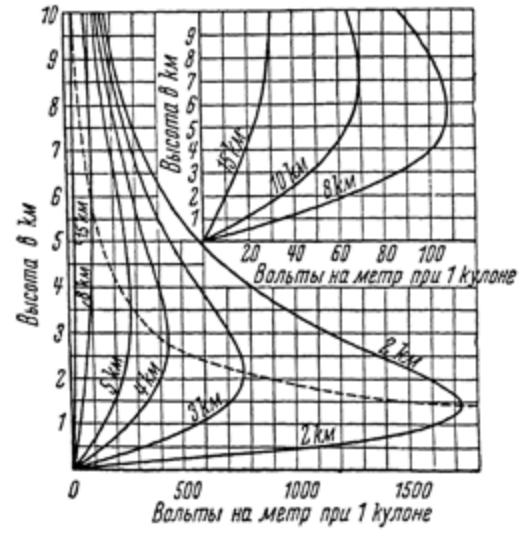


Рис. 6. Зависимости напряженности поля от высоты расположения заряда, равного одному кулону

Помимо рассмотренных, существует еще один вид разрядов, которые могут давать различные знаки изменения электрического поля. Это разряды незавершенные, т. е. не достигшие земли. Их можно представлять себе как перемещение заряда с одной высоты на другую. Перемена знака изменения поля при различных условиях незавершенных молний иллюстрируется на рис. 6, на котором показана зависимость напряженности поля E от высоты H заряда при различных расстояниях.

Пусть, например, разряд начинается в положительной области тучи на высоте 4 км и доходит до высоты 6 км, что эквивалентно переносу заряда с высоты 4 км на высоту 6 км. При $L=15$ км изменение поля, соответствующее перемещению одного кулона на 2 км, будет происходить от 19 до 26 V/м, т. е. будет положительным. При $L=5$ км, однако, изменение произойдет с 270 до 230 V/м, что означает отрицательный скачок напряженности.

Таким образом, произведенный анализ показывает, что регистрация изме-

ЭБ "Научное наследие России"

Таблица 2

Тип разряда	Туча биполярная положительная, удалена на расстояние		Туча биполярная отрицательная, удалена на расстояние	
	больше L_k	меньше L_k	больше L_k	меньше L_k
AB	Отрицательный	Положительный	Положительный	Отрицательный
BC	Положительный	»	Отрицательный	»
AC	Отрицательный	Отрицательный	Положительный	Положительный

нения поля без определения соответствующих расстояний от места разряда до места регистрации и вида молнии не определяет знака заряда тучи. Но даже знание этих величин в ряде более сложных случаев регистрации все же может повести к существенным ошибкам при определении знаков зарядов тучи. Единственным надежным методом решения вопроса о распределении знаков зарядов в туче является непосредственное измерение.

Еще более сложным изменение электрического поля получается при наличии в туче трех объемов, расположенных так, как это указано на рис. 7*a*. Здесь для расчета взят пример, когда в верхнем шаровом объеме сосредоточен положительный заряд в 24 кулона, в среднем отрицательный заряд, равный 20 кулонам, и в нижнем положительный заряд, равный 4 кулонам.

На рис. 7*a* показано распределение изоградиентных линий, а на рис. 7*b* изменение градиентов у поверхности земли под тучей.

Как видно, градиент у земли меняет знак дважды.

Невозможность однозначного решения задачи о распределении зарядов в туче по наземным измерениям электрического поля делает определение этого распределения непосредственным методом особенно важным. Такого рода исследования были проведены в течение 1934 — 1936 гг. Симпсоном и Скрезе в Англии, а затем продолжены в 1937 — 1939 гг. Симпсоном и Робинзоном. Задача их состояла в записях изменений знака градиента потенциала от поверхности земли до вершины тучи. Для регистрации применялся прибор—альтиэлектрограф, основанный на том принципе, что если заостренный проводник

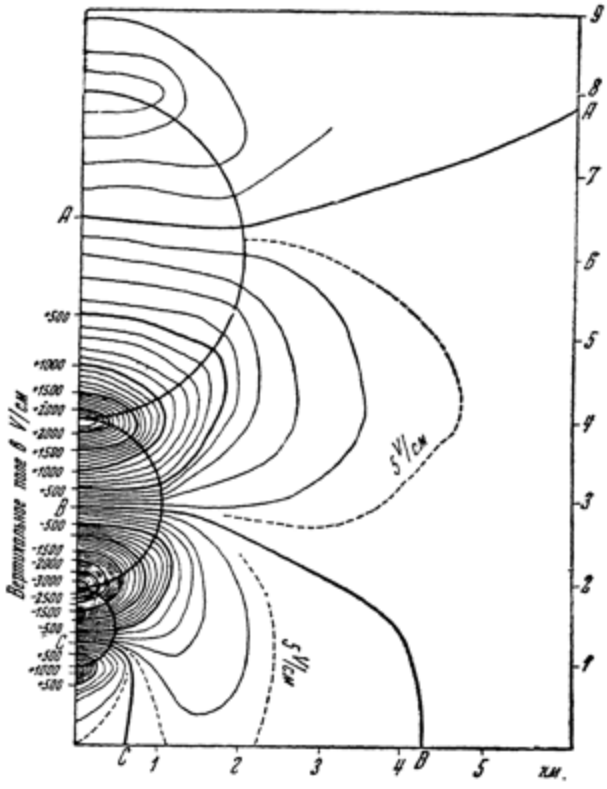


Рис. 7*a*. Изоградиентные линии в электрическом поле 3 шаровых зарядов. В центре сферы *A* сосредоточено +24 кулона, в центре *B* сосредоточено 20 кулонов, в центре *C* +4 кулона

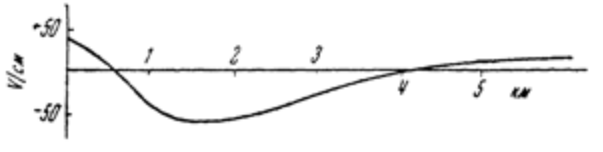


Рис. 7*b*. Вертикальные градиенты у поверхности земли

ЭБ "Научное наследие России"

поместить в сильное электрическое поле, то на его концах возникнет местный разряд и от одного конца к другому потечет ток, увеличивающийся с усилением поля; отношение этих величин не линейно. Прибор устроен так. На алюминиевой раме укреплен часовой механизм, приводящий во вращение два регистрирующих диска, укрепленных на оси. Нижний диск—закопченная алюминиевая пластинка, на которой записываются давление и относительная влажность. Верхний алюминиевый диск, изолированный от нижнего и от оси, имеет выступ, останавливающий его вращение после одного оборота (один оборот происходит в течение одного часа). На этот диск накладывается круглый кусок бумаги, пропитанный особым составом (Potassium ferrocyanide—5 g, Amonium nitrate—100 g, глицерин—60 g, вода—300 g) и служащий для определения полярности. На бумагу опираются с легким нажимом две заостренные железные иглы, укрепленные в двух держателях из фосфористой бронзы. Один держатель соединен с изолированным проводником, выходящим из прибора, а другой с металлической рамой прибора. На пропитанной раствором бумаге, у анода, происходит выделение синей краски; процесс окрашивания требует нескольких минут.

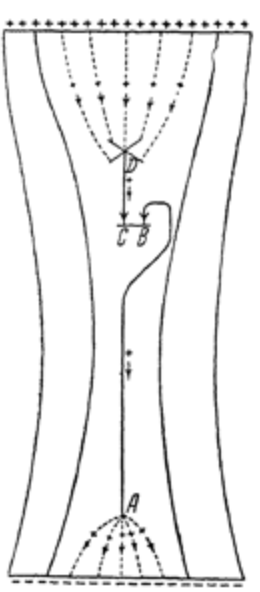


Рис. 8. Электрическая схема прибора Симпсона и Скрезе

Во время опытов прибор помещался в бамбуковой раме и затем включался по схеме рис. 8, на котором *A*—нижний конец системы, представляющий собой медную проволоку длиной 20 м, *B* и *C*—железные игольчатые электроды, *D*—провод, соединяющий *C* с бамбуковой рамой. При положительном градиенте потенциала притекание положительного электричества происходит в точке *D*, а вытекание из точки *A*; при этом электрод *C* является анодом, у которого бумага окрашивается в синий цвет, под электродом *B* бумага остается неокрашенной. При изменении знака поля направление тока в системе меняется, и бумага окрашивается под электродом *B*, ставшим анодом.

Бамбуковая рама укреплялась к шару-зонду. Для уменьшения риска потери аппарата применялось устройство, ограничивающее высоту подъема путем отделения от шара рамы, спускавшейся на парашюте. Вес всего устройства 795 г. Полная подъемная сила баллона (диаметром около 1.5 м)—1.8 кг. Это давало скорость подъема около 5 м/сек. Скорость опускания рамы на парашюте 10 м/сек.; полное время зондирования устанавливалось в 45 мин. При установке электродов на расстоянии 3 см от центра записывающего диска временная развертка равнялась 3 мм в 1 минуту.

Было произведено много зондирований, из которых несколько десятков оказались вполне удачными.

На основании произведенных экспериментов Симпсон и Скрезе получили возможность дать картину распределения зарядов в тучах (рис. 1,*e*).

По мнению авторов, при помощи зондирования теория разбрызгивания капель подтверждается в следующих деталях: а) области концентрации положительного электричества находятся в нижней части тучи; б) эти области положительного электричества тесно связаны с активными областями грозы, в которых интенсивно образуются восходящие потоки и имеются наибольшие осадки в жидкой форме; в) аккумуляции положительного заряда находятся в частях тучи, где температура выше точки замерзания.

Таким образом, теория образования капель объясняет существование положительного электричества в основании тучи и отрицательного в верхних частях ее. Следовательно, по крайней мере часть отрицательного электричества в теле тучи объяснима, однако из приведенной диаграммы ясно, что эта теория не может объяснить существования всего отрицательного электричества в туче. Она не дает также объяснения и положительному электричеству, наблюдаемому в вершинах туч всех исследованных гроз.

ЭБ "Научное наследие России"

Наблюдения Симпсона и Скрезе показали, что на границе между положительным электричеством в верхней части тучи и отрицательным в нижней температура значительно ниже точки замерзания и вообще ниже—10° С. В этой части тучи капли не могут существовать. Капли могут быть переохлаждены, но при сращивании они должны немедленно замерзать. Осадки в верхней части тучи образуются либо в форме кристаллов, либо в форме игл или пластинок, которые падают весьма медленно путем горизонтальных движений сначала в одном направлении, потом в другом. Эти кристаллы не могут играть роль капель в вильсоновской теории: во-первых, они почти совершенно не проводящи и потому не могут быть электрически поляризованы, к тому же их форма и ориентация неблагоприятны для образования индуцированных зарядов, и, во-вторых, скорость их падения относительно воздуха очень мала. Ясно, таким образом, что индукционная теория Вильсона не может объяснить разделение зарядов в верхней части грозовой тучи. Если вместо капель дождя по вильсоновской теории использовать градины, ее позиция все же не улучшается. Заряды образуются во всех частях туч, в то время как град локализован. Град может усилить электрический эффект, но он не главная причина широко распространенной электризации. Нет оснований считать, что град имеет существенное значение в развитии грозы. Известно, что во время снежных бурь в полярных районах, сопровождающихся обильным снегом, очень сильные электрические поля возникают у поверхности земли. За редким исключением эти поля—положительного направления, так же как и поля верхней части тучи. Симпсон из наблюдений, сделанных им в Антарктике, заключает, что соединение ледяных кристаллов дает лед, отрицательно заряженный. Общее выпадение отрицательно заряженных ледяных кристаллов относительно положительно заряженного воздуха приводит к разделению электричества, при этом положительное электричество располагается над отрицательным. Это объяснение пока еще не подтверждено удовлетворительными лабораторными экспериментами. Но каковы бы ни были физические объяснения, несомненно, что разделение зарядов тучи связано с наличием ледяных кристаллов.

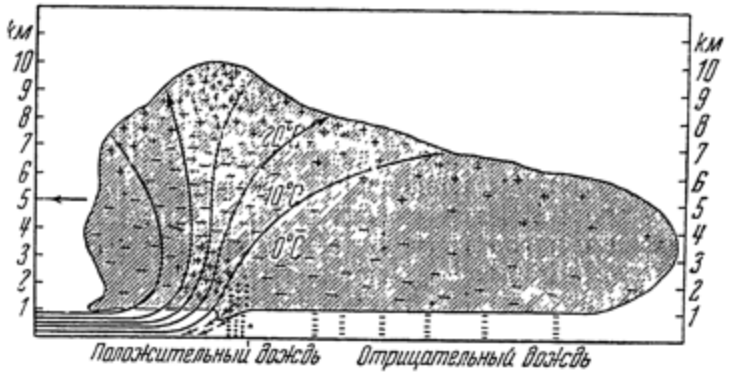


Рис. 9. Распределение зарядов в грозовой туче, согласно Симпсону и Скрезе

Таким образом, при образовании электрических зарядов, повидимому, существует два физических процесса: один связан с верхней частью тучи, где температура ниже точки замерзания, а другой—с нижней, где температура выше точки замерзания. Можно предполагать, что первый связан с существованием ледяных кристаллов, а второй с водяными каплями (повидимому, в форме, описанной Симпсоном в его теории разбрызгивания капель).

Рис. 9 схематически дает изображение новых представлений о метеорологических и электрических условиях в туче.

Линии указывают направление воздушных потоков, расстояние между ними пропорционально скорости ветра. Нижняя область положительного заряда расположена в голове сильного потока, поднимающегося вверх. В вершине области вертикальные токи слабее, и сильный дождь заряжен положительно. За исключением некоторой небольшой положительной области нижняя часть тучи заряжена отрицательно. Раньше предполагалось, что этот отрицательный заряд простирается кверху, но, согласно новым данным, верх тучи заряжен положительно.

ЭБ "Научное наследие России"

Таким образом, гипотеза о распределении зарядов, предложенная Вильсоном, повидимому, наиболее вероятна. Область разделения между отрицательными зарядами и положительными лежит на уровне, где температура колеблется между —10° и —20° С.

Экспериментально определялась высота нижней границы тучи и, где возможно, ее вершины. По температуре воздуха на поверхности земли и известной величине адиабатического градиента устанавливались также высоты, на которых температура имела 0° и—10° С. При этом для высоты от земли до нижней границы тучи принималось значение градиента, равное среднему между сухоадиабатическим и влажноадиабатическим градиентами, а дальше расчет велся по влажноадиабатическому градиенту.

Эти подсчеты, по заявлению авторов, давали результаты, весьма близкие (до 0.2 км) с результатами замеров, производившихся с аэроплана. Определения температур показали, что температура 0° С имела место на высоте 0.8—3.8 км, а —10° С на высоте 2.2—5.5 км.

Распределению температур в туче справедливо придается огромное значение, поэтому определение ее указанным косвенным путем недостаточно убедительно. Если учесть, что, согласно данным многих исследований, температура в грозовых тучах лежит выше точки замерзания воды, результаты, полученные Симпсоном и Скрезе, внушают сомнение. Аналогичное суждение высказал Вальтер. В доказательство возможности такого распределения температуры в туче, при котором вся вода находится в жидком состоянии, он рассуждает так. Водяные пары, конденсирующиеся в туче, при испарении поглощают солнечные лучи в течение значительной части летнего дня. Этот запас тепла при конденсации паров в туче отдается окружающему воздуху, и его температура повышается. Повышение тем значительнее, чем выше лежит слой воздуха, в котором начинается конденсация паров в туче, ибо и масса нагреваемого воздуха по мере возрастания высоты уменьшается. Определение температуры может быть произведено следующим образом. В густой Cumulus туче в 1 м³ содержится 5 г воды, а испарение воды освобождает 537 калорий тепла. Поэтому при конденсации паров в грозовой туче в каждом кубическом метре освобождается 2.7 больших калорий. Так как 1 м³ воздуха при нормальном давлении весит 1.3 кг, а давление воздуха на высоте 4 и 10 км равно соответственно 461 и 198 мм Hg, то с учетом удельной теплоемкости воздуха, равной 0.238, температурное повышение будет соответственно 14.5 и 33.5° С. Расчет, таким образом, показывает, что в тучах, даже на высоте до 10 км, вода может находиться в жидком состоянии. Этим расчетом Вальтер опровергает утверждение Симпсона и Скрезе о несостоятельности индукционной теории Вильсона, требующей для разделения электрических зарядов быстро падающих водяных капель.

В свете изложенного некоторый интерес представляет теория Дозера, дающая картину распределения зарядов, изображенную на рис. 1,*f*. Теория заключается в том, что мощный восходящий поток воздуха поднимает пары воды, которые конденсируются и превращаются на большой высоте в снежинки. На высоте несколько более 10 км эти снежинки и мелкие ледяные кристаллики образуют над Cumulo-Nimbus перистые белые облака, называемые Cirrostratus. Под действием фотоэффекта солнечных лучей происходит выделение электронов с поверхности ледяных кристаллов; часть электронов уносится в верхние слои тропосферы, а часть осаждается на мелких кристалликах, которые нисходящими токами воздуха опускаются на землю в виде дождя. Оставшиеся положительные кристаллы притягивают к себе отрицательно заряженные кристаллики, поднимающиеся снизу, и, сплавляясь с ними, образуют кристаллы больших размеров. Под непрерывным действием фотоэффекта этот процесс продолжается также непрерывно, причем, благодаря увеличенным размерам кристаллов, их положительный заряд увеличивается, что ведет к еще большему собиранию около них отрицательных кристалликов, и т. д. Когда вес падающих кристаллов сможет преодолеть давление восходящих воздушных масс, градины падают и, растаяв в нижних слоях атмосферы, дают осадки в виде крупного положительно заряженного дождя.

ЭБ "Научное наследие России"

Анализ опытов по зондированию туч приводит к ряду вопросов методологического характера. Высказанные в литературе сомнения побудили Симпсона и Робинзона, в предпринятых ими дальнейших опытах по зондированию, специально изучить вопрос о соответствии между показаниями альтиэлектрографа и его возможными траекториями в атмосфере.

Принимая распределение зарядов туч в трех шаровых объемах A, B, C, центры которых расположены в одной вертикальной плоскости (рис. 7а), Симпсон и Робинзон расчетным путем строят поле этих зарядов и определяют для разных возможных траекторий зонда ожидаемые регистрации альтиэлектрографа. Учет реально возможных траекторий полета зонда привел авторов к заключению о возможности адекватной расшифровки показаний прибора, на основании чего они заключили, что все полученные ими за 6 лет исследований материалы приводят к картине распределения зарядов в туче, уже намеченной в работе Симпсона и Скрезе (рис. 1,*е*).

Резюмируя рассмотрение ряда теорий образования грозовых туч, следует признать, что хотя условия образования туч и распределение в них зарядов известны, но полной метеорологической картины грозы, хорошо увязанной с фактами и удовлетворяющей количественным оценкам, до сих пор нет. Возможно, что этот исключительно сложный процесс и не следует пытаться втиснуть в рамки теорий, базирующихся лишь на одном каком-либо эффекте. Различные климатические, орографические и прочие местные условия могут усиливать действие тех или иных факторов в формировании грозовых туч и распределении в них зарядов, и только дальнейшее более детальное изучение вопроса на базе широких экспериментов приведет к выяснению истинной роли отдельных факторов в данной конкретной обстановке. Весьма плодотворной поэтому должна быть в этой области совместная работа метеорологов, физиков и электриков.

4. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРОЗ НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Распределение гроз по поверхности земного шара весьма неоднородно. До настоящего времени нет точных данных о зависимости грозовой деятельности от каких-либо местных условий. В виде общей тенденции можно отметить малое количество гроз в арктических и антарктических областях и бóльшее число гроз в горных районах, чем в прилегающих низменностях.

На рис. 10 приведена карта земной поверхности с изображенными на ней изобронтами (линиями, соединяющими места с одинаковым числом дней в году, в течение которых гремит гром). Цифры, стоящие на отдельных линиях, дают число дней в процентах от числа дней в году. При составлении карты принималось, что гром слышен в пределах радиуса около 10 км, т. е. на площади около 315 км^2. Сведения по отдельным областям неравноценны. Так, над океанами определение изобронт базировалось на изучении давления и направления ветров. Эти изобронты обозначены пунктиром. На карте отмечены 6 областей с исключительно частыми грозами: Южная Мексика (142 грозовых дня в году), Панама (135), Центральная Бразилия (106), Центральная Африка (150), Мадагаскар (95) и Ява (220). Последняя область является, повидимому, областью наиболее частых гроз.

Общее число гроз в году на всем земном шаре оценивается Бруксом в 16 млн., т. е. 44 тыс., гроз ежедневно. Этот же автор принимает среднюю продолжительность грозы в один час, или 1 800 гроз в любой момент. Принимая, согласно Бруксу, 200 молний в один час, получаем на земной поверхности 360 тыс. разрядов в час, или 100 молний ежесекундно.

Помимо общей оценки грозовой деятельности на всем земном шаре, в ряде стран проведены большие работы по составлению карт распределения среднего годового числа гроз по отдельным территориям. Так, на основании весьма тщательно разработанных статистических данных многих метеорологических станций за время с 1904 по 1923 г. построена карта распределения грозовых дней в США (рис. 11). Цифры, стоящие на кривых, представляющих собой изоцераничесские линии (линии равного числа гроз), означают среднее число гроз в данной местности за указанный промежуток времени.

ЭБ "Научное наследие России"

ЭБ "Научное наследие России"

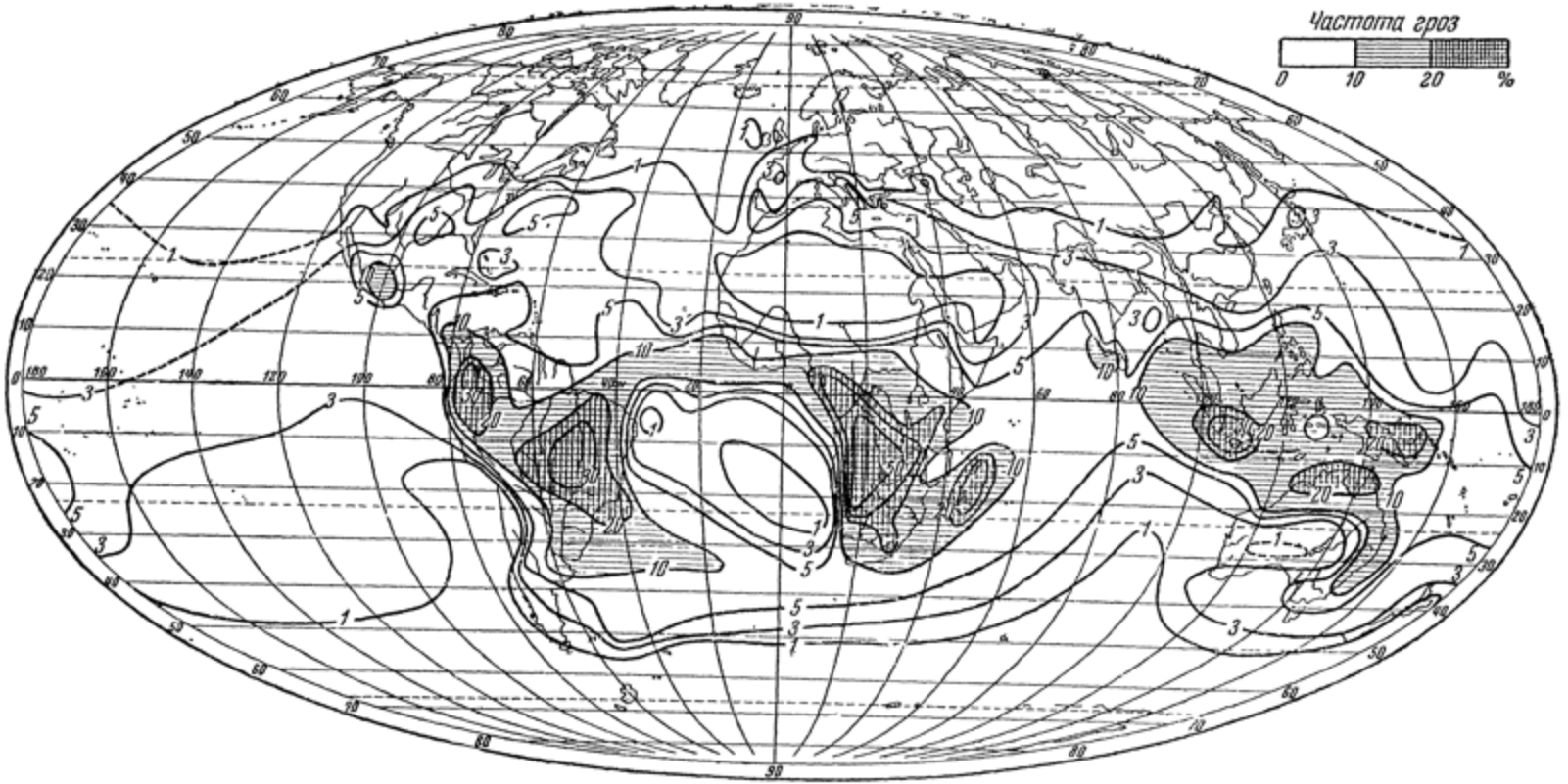


Рис. 10. Карта распределения гроз на земном шаре (по Бруксу)

Следует подчеркнуть, что приведенная карта не дает указаний об интенсивности, длительности, протяженности или действительном числе гроз в данном районе.

В России попытки составления таких карт делались давно. Первая карта распределения грозовой деятельности составлена Клоссовским на основании 20-летних систематических наблюдений наших метеорологических станций. Им же были сделаны широкие теоретические выводы о связи между общим состоянием атмосферы, движением воздушных масс и образованием гроз.

Позднее отдельными организациями делались попытки уточнить карту Клоссовского. В 1936 г. Энергетическим институтом АН СССР была начата работа по составлению новой грозовой карты, базирующейся на данных метеорологических станций о грозовой деятельности. Работа была выполнена под

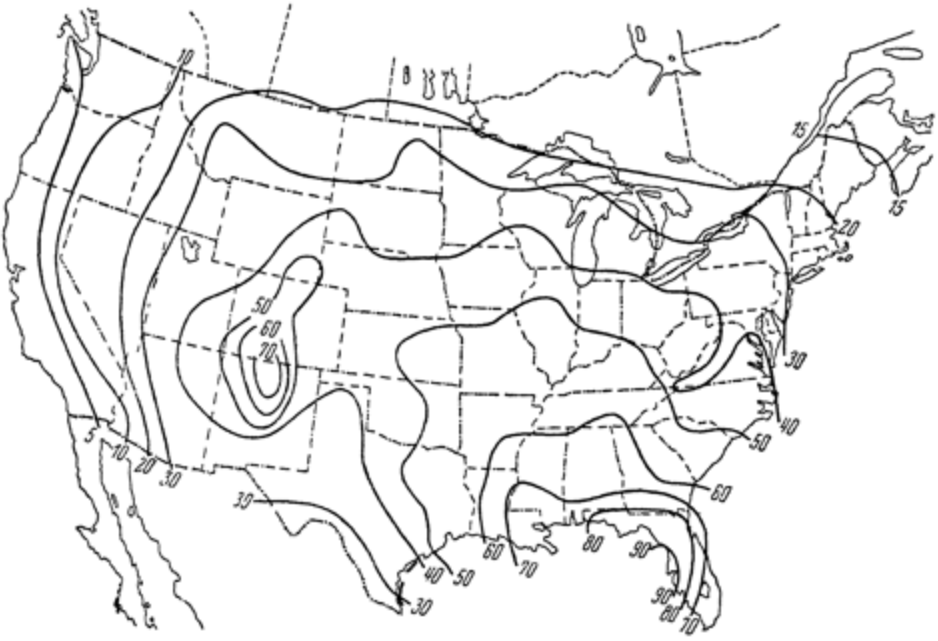


Рис. 11. Карта распределения гроз в США с 1904 по 1923 г. (по Андерсену)

руководством проф. П. Н. Тверского и оформлена в виде карты распределения среднего числа гроз по Европейской части СССР.

При составлении этой карты был использован довольно богатый материал, ценность которого, однако, снижалась тем, что по различным метеорологическим станциям наблюдения проводились в течение различного числа лет (от 3 до 20), и, кроме того, использовались данные регистрации гроз без разделения их на близкие и дальние.

В дальнейшем, при активной помощи и поддержке Главного управления гидрометслужбы СССР, ЭНИН проведена работа по собиранию материалов нужного качества, использовавшихся затем В. В. Соколовым при составлении новой карты грозовой деятельности на территории Европейской части СССР. При составлении этой карты использованы результаты визуальных наблюдений 640 метеорологических станций за период с 1920 по 1940 г. и частично карта Тверского. Собранный материал был классифицирован по признакам: 1) число лет наблюдений, 2) регистрации ближних и дальних гроз, 3) начало и конец грозы в каждом пункте, 4) максимум и минимум ближних и дальних гроз. За основную величину, характеризующую грозовую деятельность в районе, было принято среднее значение суммы ближних и дальних гроз.

Распределение грозовой деятельности при составлении карт характеризуется двумя способами:

1) построением изоцераничесних линий, охватывающих части территории, грозовая деятельность на которых находится в пределах данного количества

ЭБ "Научное наследие России"

гроз. На карте, составленной по этому способу (рис. 12[1]), дополнительно нанесены отдельные точки с указанием зарегистрированного для них числа грозовых дней в году;

2) заштриховкой территорий, заключенных между смежными изоцераническими линиями (рис. 13).

Как видно, наиболее сложный ход изоцераних линий имеет место в горных районах Кавказа. На рис. 14[1] карта распределения гроз на Кавказе представлена в более подробном виде[2].

Рельеф местности и общий характер воздушных течений обусловливают значительное различие в среднегодовом числе гроз не только в пределах территорий, охватывающих миллионы квадратных километров, но и в пределах значительно более ограниченных территорий в сотни и даже десятки тысяч квадратных километров.

Среднегодовое количество гроз в одной и той же точке земной поверхности за достаточно большой промежуток времени, охватывающий несколько грозовых сезонов, остается довольно постоянным. Однако в отдельные годы наблюдаются значительные отклонения в ту или иную сторону, не всегда стоящие в связи с общей интенсивностью грозовой деятельности в данном году. Поэтому, если оценка грозовой характеристики местности производится на основании статистики числа гроз, то статистика эта должна охватывать достаточно большой промежуток времени, порядка 10 лет, так как в противном случае неизбежны ошибки.

Однако среднегодовое количество гроз—слишком грубый и несовершенный критерий грозовой характеристики района. Не нужно забывать, что среднегодовое число грозовых разрядов, которое определяет вероятность поражения линии, пропорционально среднегодовому числу гроз в данной точке земной поверхности.

Удельное число разрядов в одну грозу также сильно колеблется, изменяясь от единичных разрядов до многих сотен и даже тысяч. Так, в течение некоторых гроз в районе Бакуриани разряды наблюдались через каждые 2—3 сек., что продолжалось часами. Большинство разрядов происходило между тучами.

Интересна статистика об изменении частоты гроз, приводимая Руппелем по городу Цюриху в Швейцарии за время с 1550 по 1918 г. (табл. 3).

Как видно, среднее число гроз в течение четырех веков изменилось мало. Аналогичный вывод можно сделать и по другим статистическим материалам.

Таблица 3

Время регистрации (годы)	Число гроз за период регистрации	Среднее число гроз в год за период регистрации
1550—1576	177	6.6
1683—1718	530	14.8
1821—1840	302	15.1
1841—1860	337	16.8
1861—1880	329	16.4
1881—1900	446	22.3
1901—1918	330	18.3

Изучив на основании литературных источников вопрос об изменении интенсивности гроз, Араго заключил (оговорив, впрочем, свое мнение), что с древнейших времен грозы утратили некоторую часть своей силы.

Произведенное Л. Ф. Суходольской в лаборатории ЭНИН сопоставление грозовой деятельности по среднему числу грозовых дней в году и по грозовой эффективности (под которой понималось число вызванных молниями пожаров, количественные характеристики грозовых разрядов, их структуры и распределение числа разрядов на межтучевые и поражающие землю) подтвердило правильность того, что оценка грозовой эффективности не может базироваться на среднегодовом числе грозовых дней. Это необходимо иметь в виду при проек-

[1] См. вклейку в конце книги.

[2] Для Северного Кавказа и Закавказья были использованы данные наблюдений 220 метеорологических станций за период с 1935 по 1939 г., обработанные ТНИС ГЭИ.

ЭБ "Научное наследие России"

тировании грозозащитных устройств в целях избежания нерациональных или недостаточных мер защиты сооружений от молний. Выбор системы грозозащитных устройств должен базироваться

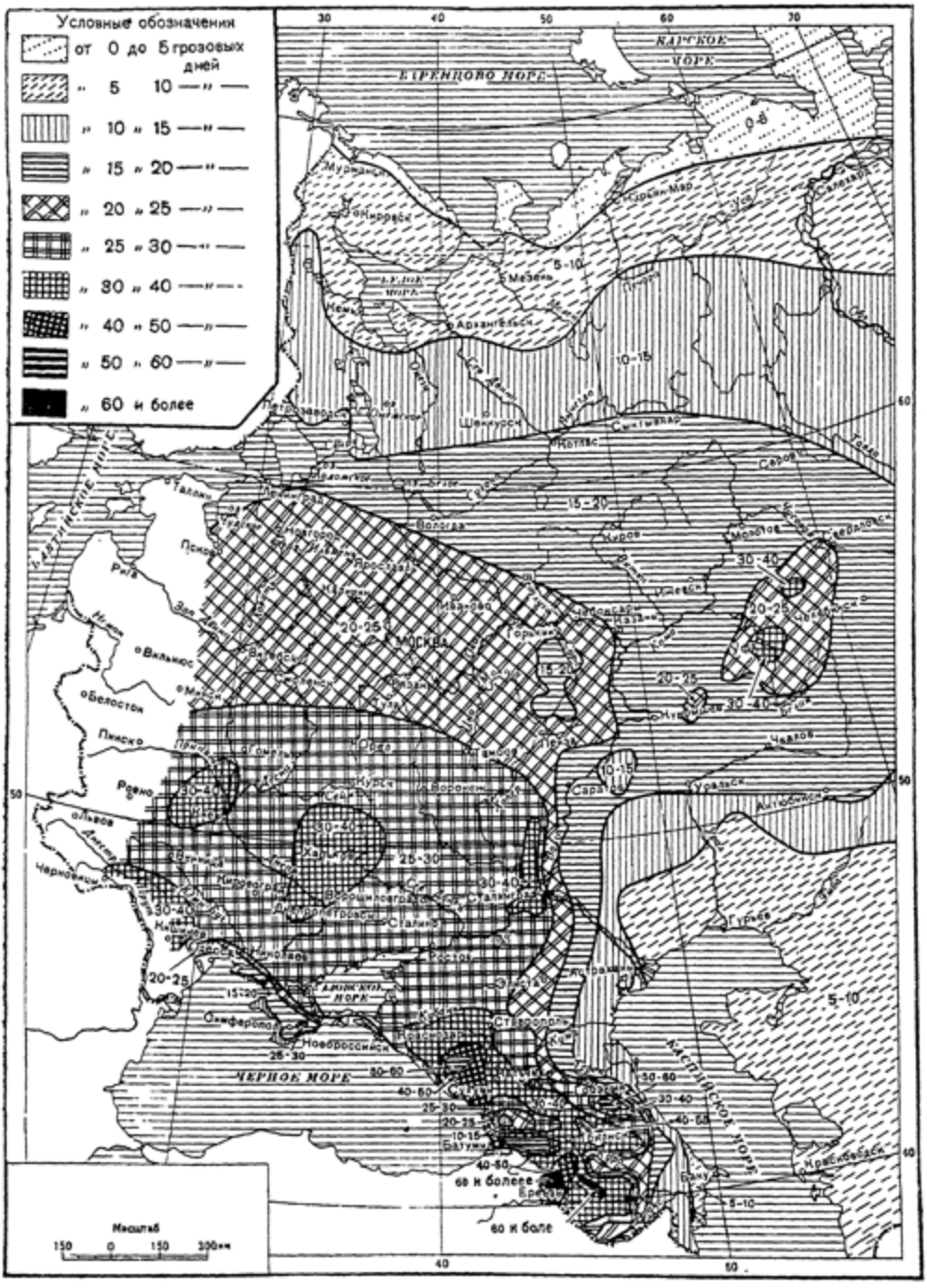


Рис. 13. То же, что на рис. 12, с заштриховкой районов между изоцераническими линиями

на совокупной оценке вероятности появления молнии в данном районе и на ее возможных электрических характеристиках.

Параметры молнии в свою очередь связаны с геофизическими факторами местности (подробнее этот вопрос рассмотрен в главе III). На рис. 15 изображена

Рис. 15. Карта распределения одинакового процентного числа молний на землю (от общего числа разрядов)

карта с нанесенными на ней линиями равного процента молний от общего числа разрядов в данных районах (составлена Л. А. Кузьминым). Такие карты имеют весьма важное значение.

ЭБ "Научное наследие России"

II. МЕТОДЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МОЛНИИ

Исключительно быстрое протекание процесса грозового разряда и внезапность его появления заставляют при изучении молнии использовать приборы с предельно малой инерцией действия и с высокой степенью автоматичности. В результате длительной и кропотливой разработки различных принципов регистрации явлений молнии было сконструировано большое количество приборов, в бо́льшей или меньшей степени удовлетворяющих поставленной задаче. Существующую в настоящее время аппаратуру, большинство которой уже освещалось ранее, удобно описать совместно с результатами, полученными с применением этих приборов в практических условиях.

Для удобства анализа результатов расклассифицируем всю известную нам аппаратуру по принципам, лежащим в основе измерений. С этой точки зрения будем различать приборы оптические, электрические и ферромагнитные. В свою очередь электрические приборы разделяем на клидонографические и катодно-осциллографические. В названном выше порядке и рассмотрим методы измерений и полученные с их помощью результаты.

А. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИИ

РАЗВИТИЕ АППАРАТУРЫ

Исследования образования разряда молнии при помощи фотографии требуют специальной аппаратуры. Съемка простым фотографическим аппаратом дает лишь изображение молнии в ее вполне развившемся состоянии. Картины развития отдельных частей молнии такого рода фотографии не дают. Более ясное представление получается из снимка, сделанного фотографическим аппаратом, пластинка которого во время экспозиции двигалась. При помощи таких фотографий удалось установить, что разряд молнии, кажущийся непрерывным, нередко представляет собой систему последовательных разрядов, происходящих один за другим с интервалами в десятые и сотые доли секунды. Анализ механизма развития отдельных импульсов, и особенно интересного первого в разряде, требует весьма быстрого перемещения фотоэмульсии. Для получения возможности анализа образования отдельных элементов молнии в начале этого века Бойс предложил новый вид фотографической камеры.

Камера Бойса—это аппарат, снабженный двумя объективами, укрепленными в диаметрально противоположных точках диска, приводимого во вращение. Вследствие указанного перемещения линз, на неподвижно стоящей пластинке производится съемка явления с разверткой его в двух взаимно противоположных направлениях. Ввиду того что аппарат Бойса получил уже значительное распространение, остановимся несколько на рассмотрении его конструкции и принципов его работы.

а. Принцип работы камеры Бойса

Чтобы облегчить дальнейшее рассмотрение работы камеры Бойса, проанализируем, пользуясь рядом примеров, метод расшифровки изображений, полученных при вращении объективов аппарата (или соответственно фотопластин-

ЭБ "Научное наследие России"

ки). Рассмотрим сначала случай, когда аппаратом Бойса фотографируется молния, прорастающая с равномерной скоростью от плоскости AB вниз (рис. 16, *a*).

Если бы развитие молнии снималось при помощи двух аппаратов, имеющих взаимно противоположное и достаточно быстрое движение ленты, мы получили бы ряд изображений молнии, представленных на рис. 16, *b*, на котором показано 18 снимков, сделанных через равные промежутки времени. Условием четкого (неразмытого) изображения каждого положения канала молнии является такая малая экспозиция при съемке каждого кадра, при которой канал молнии не успевал бы заметно продвинуться. Необычайные трудности такой съемки очевидны, если принять во внимание скорость развития молнии. Снимки 1—14 показывают рост молнии от края тучи AB до земли, а снимки 14—18 сделаны с уже существующей молнии, которая продолжает излучать свет в течение определенного времени.

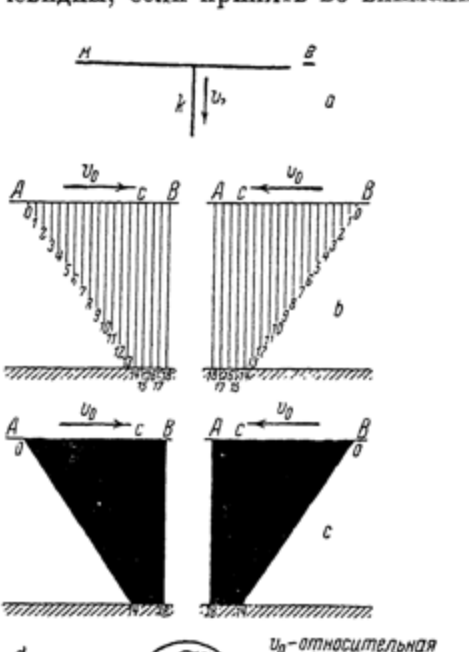


Рис. 16. Схема фотографии молнии камерой Бойса при вертикальном расположении объективов

При съемке молнии с помощью камеры Бойса при начальном положении объективов (рис. 16, *d*) получаются изображения, показанные на рис. 16, *c*. Снимки, получающиеся при фотографировании двумя объективами, помещены рядом. Приближенная расшифровка двух фотографий может быть произведена следующим образом (более общий способ количественной расшифровки был указан раньше).

Прямые линии 0—14 показывают, что скорость движения головки молнии постоянна. Одинаковый наклон линии 0—14 на обоих снимках означает, что молния развивалась в вертикальном направлении. Скорость движения головки молнии может быть определена, если известна длина молнии L из соотношения $\frac{L}{T}$, где T — время, в течение которого происходило прорастание молнии от тучи до земли. Время находится из отношения $\frac{OC}{v_0}$ (рис. 16). Полоса, занимающая интервал времени 14 — 18, означает, что все элементы молнии сохраняют свечение.

Из снимков видно, что развитие молнии идет в направлении от тучи к земле. Если бы объективы камеры в момент съемки были расположены горизонтально, то получились бы фотографии без временной развертки и судить о характере разряда было бы невозможно.

b. Конструкция фотокамер с временной разверткой

Фотокамеры, применяемые для изучения механизма развития грозовых разрядов, в зависимости от поставленных целей, могут обладать различными способами развертки изображения.

В оригинальной конструкции Бойса развертка осуществлялась вращением объективов от руки, с числом оборотов до 2400 в минуту. За последние годы камера Бойса была усовершенствована Шонландом и Колленсом. В камере два объектива Тессар-Цейсса, специально подобранных фирмой, с апертурой 6.3 и фокусным расстоянием 15 см. Объективы расположены на оси, приводимой во вращение от руки с числом оборотов до 1500 в минуту. Расстояние между центрами объективов 10.1 см.

Снимки делаются на сверхбыстрой пленке Кодак, а измерения производятся на матовой пленке. На общей подставке с камерой Бойса располагается малень-

ЭБ "Научное наследие России"

кая фиксированная камера, облегчающая центрировку аппарата Бойса, и с помощью которой дается неподвижное изображение молнии в центре снимка, сделанного вращающимися объективами. Благодаря применению ручного вращения камеру можно использовать в полевых условиях при отсутствии электроэнергии.

В значительно измененном виде камера Бойса была построена в 1934 г. в Америке. Конструкция имеет довольно сложный вид (рис. 17). Изображение молнии, преломленное двумя призмами *2—2*, проходит через две линзы и падает на пленку, вращающуюся вместе с барабаном.

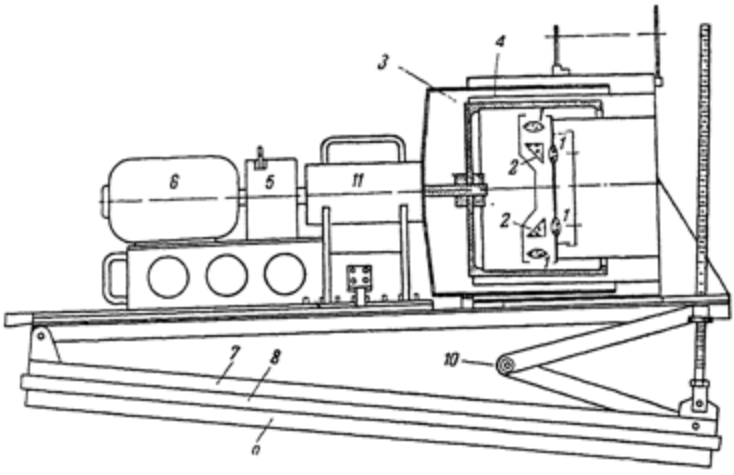


Рис. 17. Фотокамера для съемки молнии:
1—линзы; *2*—призмы; *3*—вращающийся барабан; *4*—световой экран; *5*—муфта; *6*—мотор; *7*—стальная рама; *8*—деревянная подставка; *9*—резиновая подкладка; *10*—поднимающий механизм; *11*—подшипник

На рис. 17 показан продольный разрез камеры, с двумя парами объективов, $F = 2.8 \div 2.3$, и одной парой призм. При помощи такой оптической системы можно получить два изображения молнии на пленку, укрепленную на внутренней стороне вращающегося барабана из металла весьма малого удельного веса. Механическая система камеры позволяет при вращении барабана изменять его положение на оси (семь раз) и таким образом производить съемки разрядов

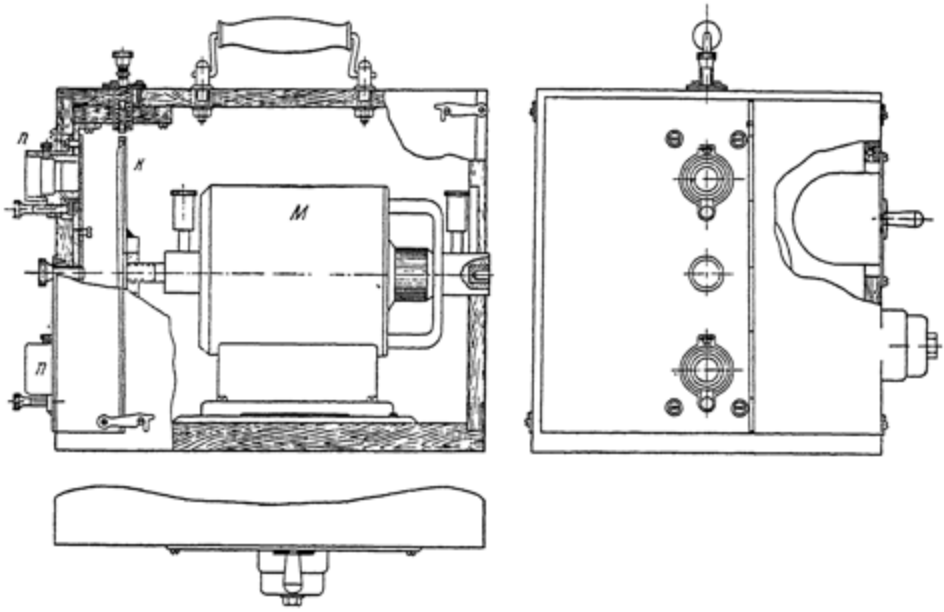


Рис. 18. Схематический вид двухлинзовой фотокамеры

на неэкспонированных участках пленки. Рабочая скорость развертки камеры 1 мм в 22 μS, максимальная 1 мм в 8μS. Ширина фильма 15 см. Система крепления камеры на подставке дает возможность устанавливать аппарат так, чтобы плоскость линз составляла с вертикалью угол до 30°, благодаря чему можно снимать молнии, ударяющие в высокие объекты.

ЭБ "Научное наследие России"

В ВЭИ в 1935 г. под руководством автора была разработана фотокамера, схематический вид которой изображен на рис. 18. Мотор M приводит во вращение диск K, на котором укрепляется фотопленка. Съемка производится при помощи двух объективов, укрепленных в передней стенке прибора. Большое преимущество этой камеры перед другими аппаратами, существовавшими к моменту ее создания,—это возможность быстрой перезарядки благодаря применению специальных касет. Касета вставляется через прорез в стенке и укрепляется на ней при помощи зажимов. После того как боковые крышки закрыты, из касеты вынимается шторка, и мотор приводится в действие. Можно производить снимки и без касет, укрепляя пленку непосредственно на диск. Система хорошо сбалансирована и позволяет доводить число оборотов до 10 000 в минуту. Окружная скорость диска, радиусом 10.3 см, приблизительно 100 м/сек. Общий вес фотокамеры 10 кг.

Этот прибор нашел широкое применение и в лабораториях при исследовании искрового разряда и в полевых лабораториях по изучению молнии.

с. Многолинзовые фотокамеры

При создании фотоаппарата для изучения молнии необходимо иметь в виду: 1) относительную редкость ночных гроз в районе радиусом 1—3 км, 2) неопределенность места появления молнии при относительно широком фронте грозы.

Первое условие требует от камеры возможности фотографирования большинства разрядов, второе—наибольшего угла охвата горизонта.

Фотографирование молнии производится с открытой вышки в ночное время, в наихудших атмосферных условиях (ветер, дождь, град и пр.), поэтому вопрос о легкой перезарядке камеры и о работе с нею в таких условиях имеет исключительно важное значение.

Под моим руководством в ЭНИН был построен ряд многолинзовых камер, применявшихся в течение ряда лет в экспедициях и давших весьма ценные материалы. Ниже описывается модель многоскоростной многолинзовой фотокамеры, сконструированной и выполненной в 1940 г. в лаборатории по изучению молнии.

Назначение камеры—получение снимков, представляющих последовательно во времени все процессы, происходящие при развитии молнии, поэтому вопрос, какие снимки дают возможность определить нужные величины, имеет первостепенное значение. Наиболее полно изучаемые процессы дают три фотоснимка, из которых два получаются при движении пленки относительно объективов во взаимно противоположные стороны, а один—на неподвижной пленке. Такие снимки дают возможность полной расшифровки всего процесса. Из обработки двух фотоснимков, один из которых снят на движущуюся пленку (кинематический снимок), а другой на неподвижную (статический снимок), направление прорастания главного канала молнии в некоторых случаях определить затруднительно. Учитывая, что последнее обстоятельство не является значительным недостатком камеры, было решено принять схему прибора, в котором временная развертка осуществляется движением пленки лишь в одну сторону и который, помимо этого, имеет устройство для получения статических снимков молнии; конструкция прибора при этом значительно упрощается.

Для того чтобы достаточно хорошо раздвинуть по времени изображение процесса образования молнии, необходимо быстрое перемещение фотопленки. Но чтобы установить последовательность отдельных элементов разряда и воспрепятствовать их смешению на эмульсии, при фотографировании на барабане необходимо медленное его вращение. Эти требования могут быть осуществлены применением либо двух камер с различным числом оборотов барабана, либо одной камеры с несколькими барабанами, вращающимися с различной скоростью. Последний принцип положен в основу конструкции, разработанной в лаборатории ЭНИН С. П. Владимировым. Камера состоит из трех барабанов, расположенных один над другим так, как это показано на рис. 19. Нижний барабан II имеет наибольшую окружную скорость (12—15 м/сек.), средний

ЭБ "Научное наследие России"

барабан I имеет скорость в 16 раз меньшую, а верхний барабан неподвижен. Вращение барабанов производится электродвигателем M, связанным непосредственно с нижним барабаном, и через зубчатую передачу с отношением числа зубцов 1 : 16, с верхним барабаном.

Пленка шириной 4.5 см наматывается на катушки: B_1 — камеры с медленно вращающимся барабаном, B_2 — камеры с быстро вращающимся барабаном и B_0 — статической камеры. Камеры с вращающимися барабанами снабжены 6 объективами ФЭД (светосилой 1 : 2 и 1 : 3.5 и фокусным расстоянием 50 мм) каждая, а статическая камера имеет 4 линзы. Угол охвата горизонта объективами камер с вращающимися барабанами равен 210°. Смена пленки на барабане после экспонирования осуществляется перемоткой ее на катушки. Перезарядка камеры с медленно вращающимся барабаном производится при его вращении посредством торможения рукояткой, смена же экспонированной пленки на быстро вращающемся барабане требует кратковременной остановки моторчика.

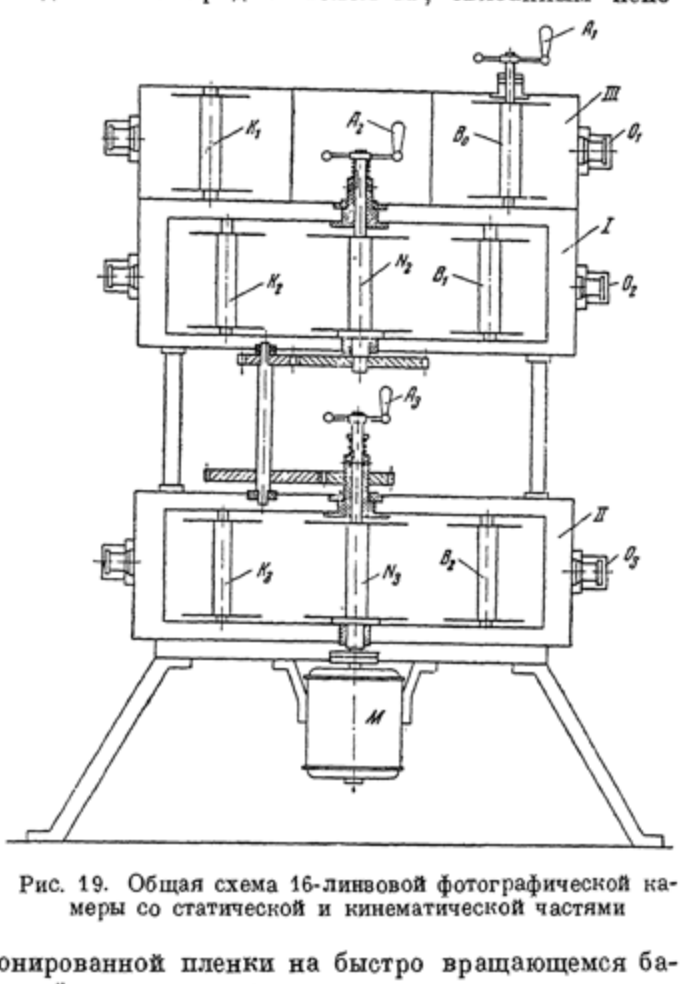


Рис. 19. Общая схема 16-линзовой фотографической камеры со статической и кинематической частями

В. ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИИ

Наглядные изображения электрических явлений получаются с помощью осциллографов: электромагнитного шлейфового и катодного.

1. ПРИМЕНЕНИЕ ШЛЕЙФОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Изобретенный около 45 лет назад электромагнитный шлейфовый осциллограф достиг в настоящее время значительного совершенства. Записывающая система осциллографа—шлейф, обладая сравнительно малой массой, регистрирует относительно кратковременные явления. Современными хорошими осциллографами можно без заметных искажений записывать гармонические колебания 10—15 kHz. Более высокие частоты и резкие (негармонические) изменения напряжений и токов не могут быть правильно записаны шлейфовым осциллографом.

Большую роль в изучении прямых ударов молнии играет кратерный шлейфовый осциллограф, получивший такое название потому, что в качестве источника света в нем применяется газонаполненная неоновая лампа, имеющая конструкцию электродов в виде кратера. Время, в течение которого происходит зажигание лампы после приложения импульса, меньше 20 μS. Применяемый в осциллографе гальванометр имеет собственный период колебаний в 10 kHz, он позволяет производить точную запись по истечении 25 μS после приложения регистрируемого импульса. Регистрация производится на барабане диаметром около 75 см, окружная скорость вращения которого позволяет производить временную раз-

ЭБ "Научное наследие России"

вертку в 440 μS/мм. Для предупреждения наложения записи от повторных разрядов молнии гальванометр укреплен на перемещающейся подставке, связанной через винтовую передачу с телехронным мотором. Обычно мотор находится в покое, но при включении кратерной лампы приводится в действие временное реле, и мотор включается на 30 сек., благодаря чему световой зайчик гальванометра получает смещение на барабане на 10 мм при одном обороте. Ширина фотофильма, укрепляемого на барабане, равна 25 см и рассчитана на получение 15 регистраций. Для включения источника света (неоновой лампы) применяется схема, изображенная на рис. 20. Действие схемы заключается в следующем. Источник постоянного напряжения (слева внизу) сообщает пластинам тиратрона T_1 600 V. Сетка тиратрона имеет отрицательный относительно нити потенциал, сообщаемый выпрямительной трубкой T_3 при открытых реле *1* и *2*. В рабочем положении выключателя емкость C_1 заряжается через тиратрон T_1. После полного заряда T_1 ток через T_2 прекращается (тиратрон включается время от времени как утечка, уменьшающая напряжение на C_1, благодаря чему положительный потенциал подводится к пластинам T_2).

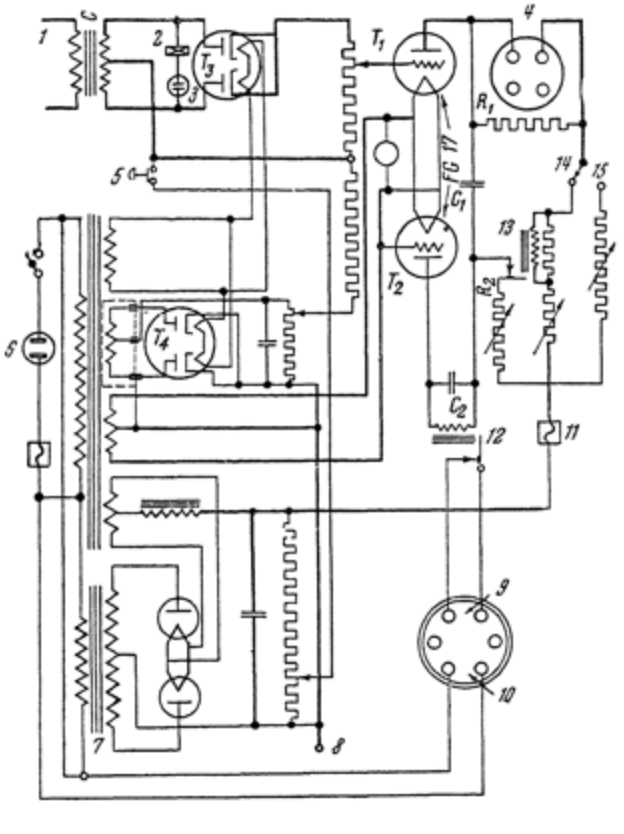


Рис. 20. Электрическая схема соединений кратерного осциллографа:

1—питающие концы (Current terminals); *2*—тирит; *3*—неоновая лампа; *4*—к кратерной лампе; *5*—испытательная кнопка; *6*—питание; *7*—силовой трансформатор; *8*—заземляющий конец; *9*—к реле контроля времени; *10*—к мотору, вращающему фильм; *11*—предохранитель; *12*—реле № 2; *13*—реле № 1; *14*—положение регистрации; *15*—положение испытаний; T_1 и T_2—тиратроны типа Fg=17; T_3 и T_4—выпрямители типа 25 Z 5.

При таких условиях контрольное устройство готово для мгновенного действия. Тиратрон T_1 включается приложением положительного напряжения между его сеткой и нитью. Этот положительный импульс получается от регистрируемого явления через трансформатор тока (коэффициент 400/1) и выпрямителя T_4, соединенных таким образом, что и положительный и отрицательный импульсы дают на сетку положительное напряжение. Тиритовый диск, включенный последовательно с неоновой лампой, подсоединен ко вторичной обмотке трансформатора тока для предупреждения перенапряжений. При зажигании T_1 полный анодный потенциал прикладывается к сопротивлению R, и кратерная лампа, включенная параллельно этому сопротивлению, зажигается (запаздывание 10—20 μS). При протекании через кратерную лампу тока (около 450 mA) действует реле *1*. Одновременно с зажиганием T_1 потенциал на C_1 меняет знак, что означает приложение отрицательной полярности на электроды T_2, предотвращающие проводимость тиратрона. C_1 заряжается теперь положительно в точке соединения с C_2 через реле *1* и переменное сопротивление, равное $2.10^5\ \Omega$, до тех пор, пока потенциал на T_2 достигнет величины положительного потенциала, достаточного для создания проводимости. В этот момент через реле *2* проходит ток, необходимый для мгновенного контакта, которым включается цепь реле контроля времени, служащего для сдвига светового луча гальванометра. Одновременно ток через T_1 реверсирует вслед-

ЭБ "Научное наследие России"

ствие разряда C_1 через T_2; T_1 делается непроводящим, C_1 заряжается до начального напряжения, и контрольная цепь готова для следующей операции. Путем заряда конденсатора C_1 через различные сопротивления достигается удобный и относительно точный контроль длительности операций от нескольких миллисекунд до нескольких секунд.

2. КАТОДНО-ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД

Инерционность, присущая шлейфу электромагнитного осциллографа, не дает возможности широко использовать этот прибор при регистрации грозовых разрядов. Идеальным решением вопроса о регистрации кратковременных быстропротекающих электрических явлений было создание катодного осциллографа (1897 г.). После длительного конструктивного развития и научного совершенствования, идея применения для целей регистрации электронного луча получила блестящее техническое разрешение. Современные катодные осциллографы позволяют детально изучать электрические явления, протекающие в 10^{-8}—10^{-9}сек. С помощью этих приборов изучение целого ряда областей техники, и в первую очередь электротехники, получило необычайно быстрое развитие. С усовершенствованием катодных осциллографов область их применения все расширяется.

По способу получения электронов в разрядной трубке различают осциллографы с холодным и горячим катодом. Скорость записи осциллографа обусловлена при прочих равных условиях мощностью катодного луча. Чувствительность луча к отклонениям определяется, при данных геометрических размерах, напряжением, ускоряющим электроны пучка. До последнего времени получение годного для работы с большими скоростями записи электронного пучка с холодного катода могло производиться лишь при достаточно больших напряжениях (30—100 kV). Чувствительность осциллографа с холодным катодом в пределах этого напряжения относительно мала (в современных конструкциях порядка десятков вольт на 1 мм смещения). Это обстоятельство не препятствует применению осциллографа при высоковольтных измерениях, однако лимитирует его распространение в технике слабых токов. В этой области поэтому наибольшее распространение получил осциллограф с горячим катодом, образование луча в котором возможно уже при нескольких сотнях вольт.

Механизм образования электронного луча в осциллографе с горячим катодом существенно отличен от механизма возникновения его в разрядных трубках с холодным катодом. Благодаря тому, что процесс образования луча имеет чисто электронный характер, присутствие газа в осциллографе излишне, и приборы строятся запаянными. Относительно низкое катодное напряжение и отсутствие насоса делают осциллограф с горячим катодом более портативным и дешевым. Однако скорость записи аппаратов с горячим катодом значительно меньше, чем у высоковольтных осциллографов (несколько километров в секунду).

Осциллографы с горячим катодом разделяются на газонаполненные и высоковакуумные. В газонаполненных осциллографах введенный в трубку инертный газ служит для фокусировки электронного пучка. Газонаполненные трубки, однако, обладают двумя крупными недостатками: 1) искажением записи и 2) потерей фокуса при частотах свыше 50 kHz.

Высоковакуумные трубки, первоначально разработанные для телевидения, не имеют отмеченных недостатков. Преимуществом таких трубок является также их долговечность благодаря тому, что катод не подвержен бомбардировке положительно заряженными газовыми ионами. Огромные успехи в конструкции высоковакуумных запаянных трубок с горячим катодом и электростатической системой фокусировки резко увеличили скорость записи осциллографа последнего типа и дали возможность использовать его при регистрации атмосферных разрядов.

Большое достоинство высоковакуумных осциллографов—это возможность регулировать интенсивность катодного луча изменением потенциала управляющей электронно-оптической системы. Благодаря этому можно «тушить» луч в нерабочее время и, наоборот, увеличивать интенсивность пучка в рабочий период.

ЭБ "Научное наследие России"

В СССР изготовляются трубки с горячим катодом различных систем и на разные напряжения.

Методы осциллографирования, применяемые при работе с катодным осциллографом, зависят от характера возникновения и протекания изучаемых процессов. Сообразно с этим все явления могут быть разбиты на две группы: к первой относятся все те, возникновение которых может быть вызвано произвольно, по желанию экспериментатора (например, разряд заряженного конденсатора на сопротивление, включение линии на напряжение и т. п.); ко второй—те, момент возникновения которых неизвестен (например, появление перенапряжения атмосферного происхождения на линии передач).

К какому бы виду ни относилось изучаемое явление, для его записи на неподвижной фотографической пластинке необходимо вызвать перемещение катодного луча в двух направлениях. В одном направлении луч получает отклонения, пропорциональные изменениям напряжения или тока, а в другом движение луча является функцией времени. Это последнее движение луча мы называем отклонением по времени.

В принципе получение осциллограммы сводится к тому, чтобы определенным образом синхронизировать момент начала движения луча от отклонения по времени и от изучаемого явления. Одно чрезвычайно существенное обстоятельство налагает дополнительные условия на применяемые методы осциллографирования, именно: катодный луч не должен действовать на светочувствительную эмульсию ни до начала осциллографирования, ни после него. В целях этого разработаны различные схемы включения. По принципу действия эти схемы могут быть двух видов:

1. Напряжение на разрядную трубку включается на время, значительно более длительное, чем то, которое требуется для записи осциллограммы, а катодный луч тем или иным способом отбрасывается за пределы пластинки. Этот способ называется способом д л и т е л ь н о г о в к л ю ч е н и я. Отклонение катодного луча от фотографической эмульсии, при его наличии в разрядной трубке осциллографа, будем называть з а п и р а н и е м л у ч а. Конструктивно запирание луча может быть осуществлено различными способами. Наиболее полное запирание луча должно быть при съемке атмосферных явлений, когда время ожидания может быть длительным.

2. Напряжение на разрядную трубку включается только на время, необходимое для осциллографирования. Этот способ называется способом м г н о в е н н о г о в к л ю ч е н и я.

Схемы длительного включения луча могут быть разделены на: а) схемы, в которых освобождение луча из запирающей его камеры и начало развертки по времени производятся по желанию экспериментатора; их называют регулируемыми схемами; б) схемы, в которых эти включения производятся автоматически при помощи специальных реле (автоматические).

Схемы мгновенного включения также могут быть разделены на: а) схемы, в которых включение напряжения, питающего разрядную трубку, производится каким-либо механическим способом; их называют неавтоматическими, или регулируемыми схемами мгновенного действия; б) схемы, в которых включение напряжения на разрядную трубку происходит при помощи электрического реле,— это схемы автоматические, или мгновенно действующие.

Первая группа схем может применяться либо для явлений, произвольно вызываемых, либо для явлений периодических, длящихся достаточно долгое время, в течение которого могут быть осуществлены необходимые перемещения замыкающих контактов. Вторая группа схем может быть применена для осциллографирования единичных электромагнитных волн, момент действия которых на осциллограф заранее не известен. Мгновенно действующие схемы служат для регистрации перенапряжений, вызываемых атмосферными явлениями. Автоматические схемы мгновенного действия находят широкое применение при лабораторных исследованиях с высоковольтными генераторами импульсов.

Останавливаться на описании многообразных реле, выполняющих роль синхронизатора отдельных контуров, здесь невозможно. Некоторые из этих реле будут описаны ниже, в схемах, иллюстрирующих применение осциллографов.

ЭБ "Научное наследие России"

Из громадного количества конструкций катодных осциллографов, построенных для самых разнообразных условий работы, здесь мы остановимся лишь на нескольких типах приборов, применение которых дало возможность получить ценные для исследований молнии материалы.

а. Конструкция катодных осциллографов и схемы к ним

Мгновенно действующий катодный осциллограф. Под руководством и по схеме автора в ВЭИ разработан и сконструирован перевозной автоматический катодный осциллограф мгновенного действия (ПАКО-8), общий вид которого изображен на рис. 21. Так как аппарат мгновенно действующий, то он не имеет запирающей камеры и его устройство вообще значительно проще, чем прибора, работающего с длительно включенным катодным лучом. Весьма упрощена конструкция разрядной трубки, ибо не приходится учитывать ее нагревание. Вакуумная установка имеет лишь один ртутный насос, так как при работе с импульсным напряжением условия откачки воздуха из разрядной трубки облегчаются. Предусмотрена возможность внутривакуумного и контактного фотографирования. Для этого дно осциллографа соединено с корпусом при помощи болтов и может, следовательно, легко заменяться. Имеются два фланца, в одном устроено окно для контактной съемки, в другом — фотографическая касета. В последнее время автор применил весьма удобный и дающий хорошие результаты способ фотографирования изображения на экране «лейкой».

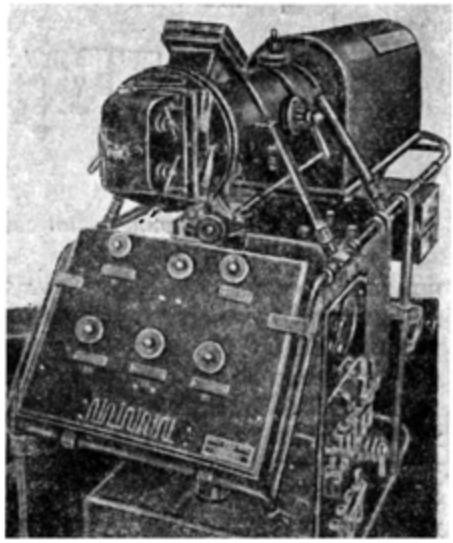


Рис. 21. Общий вид осциллографа ПАКО-8 (система автора)

Смотровое окно в корпусе, закрытое красным стеклом, позволяет одновременно с осциллографированием производить наблюдения на флуоресцирующем экране.

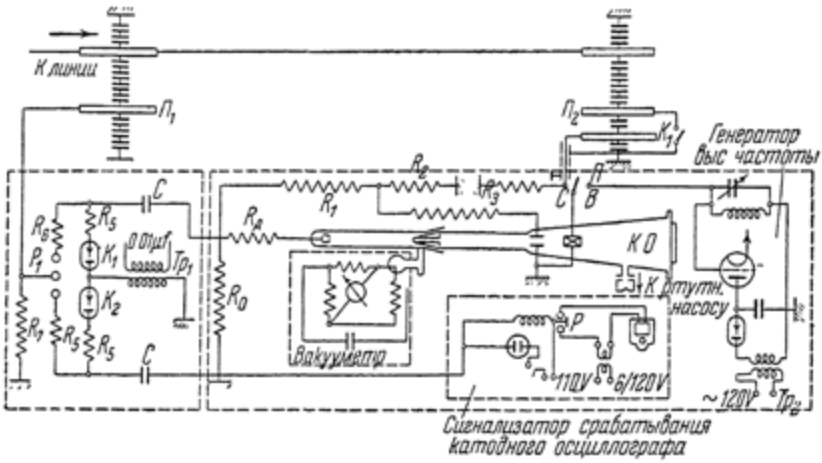


Рис. 22. Общая схема включения осциллографа в полевой лаборатории

Принципиальная схема, применявшаяся в первой в СССР (организованной ВЭИ по проекту и под руководством автора) полевой лаборатории при исследовании атмосферных перенапряжений, показана на рис. 22.

ЭБ "Научное наследие России"

Пробой промежутка P_1, питающего осциллограф контура, достигается подведение потенциала к дополнительному (третьему) электроду, введенному между двумя основными. Возбуждающее разряд напряжение подводится через делитель от высоковольтной линии, по которой распространяется импульс, подлежащий изучению.

Синхронизация работы высоковольтных контуров при осциллографировании решается различными схемами; при этом могут быть применены различные типы включающих реле.

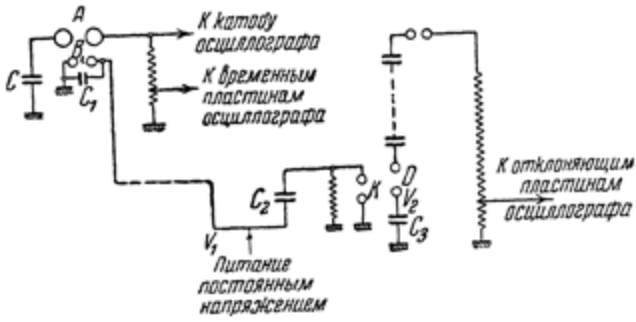


Рис. 23а. Схема включения светового реле

На рис. 23а изображена разработанная автором схема, в которой применена чисто световая синхронизация. Принцип работы ее заключается в следующем.

При постепенном повышении напряжения на емкости C происходит пробой искрового промежутка A, включающего напряжение на разрядную трубку и временные пластины осциллографа. Свет искры вызывает пробой в разряднике B промежуточного контура. Замыкание промежутка B вызывает пробой в разряднике K, а это в свою очередь, благодаря фотоэффекту, вызывает разряд в D, вследствие чего происходит включение ударного контура.

На рис. 23 b дана разработанная автором схема, которая может быть применена в тех случаях, когда по каким-либо соображениям желательно использовать для приведения в действие осциллографа ток в заземляющем проводе. Магнитное поле тока, проходящего в проводнике a, наводит в катушке электродвижущую силу, вызывающую разряд между электродами *1—1* четырехэлектродного искрового промежутка. Благодаря появляющейся искре происходит разряд между электродами *2—2*, и начинается разряд в искровом промежутке B. Свет искры в промежутке B освещает недовозбужденный промежуток K контура, питающего разрядную трубку осциллографа, и его временную развертку. Такого рода схема может быть применена для регистрации тока прямого удара молнии. Описанная схема включения катодного осциллографа с некоторой модификацией возбуждения промежутка A применялась при регистрации прямых ударов молнии в подмосковной полевой лаборатории. Возбуждение искрового промежутка производилось путем разряда на вспомогательных электродах *1—1*, получавших напряжение от шунта молниеприемника.

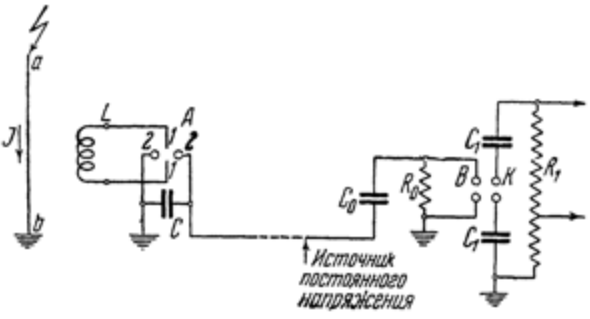


Рис. 23b. Индуктивно-световая схема возбуждения осциллографа

Световое реле требует источника постоянного напряжения достаточной стабильности. В условиях полевой лаборатории это может встретить трудности. В 1937 г. автором было сконструировано значительно более простое реле, по принципу действия названное искровым. Конструкция этого автомата (рис. 24) заключается в следующем.

Одна из полусфер искрового промежутка имеет в центре вырез, в который вставлен алюминиевый стержень, от нее изолированный. Конец стержня находится на поверхности полусферы. Между стержнем и полусферой проложено слюдяное кольцо, назначение которого—облегчать начальный разряд между двумя названными электродами.

ЭБ "Научное наследие России"

Искровое реле включается в цепь, которая должна быть замкнута в определенный момент времени (например, в цепь импульсного контура, питающего разрядную трубку); между полусферами реле устанавливается напряжение, близкое к пробивному, благодаря чему состояние «ожидания» схемы может длиться неопределенно долго. Под действием синхронизирующего импульса напряжения в промежутке между стержневым электродом и полусферой происходит разряд, весьма быстро (доли микросекунды) возбуждающий разряд между полусферами искрового реле, что приводит в действие управляемую этим автоматом цепь.

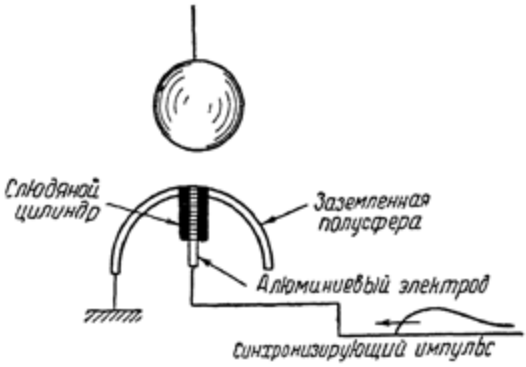


Рис. 24. Схема искрового реле

Другой метод регистрации грозовых явлений, применявшийся Нориндером в Швеции, заключается в том, что электронный пучок в состоянии ожидания находится на специальной пластинке, не допускающей луч падать на экран и вуалировать его. При появлении импульса напряжения, подлежащего регистрации, напряжение его подводится к двум парам отклоняющих пластин, благодаря чему луч огибает пластинку и падает на экран (или фотопластинку). Временная развертка луча при этом может производиться либо электрическим путем, для чего Нориндер применял синусоидальное напряжение высокой частоты, либо механической разверткой путем вращения барабана с фотоэмульсией.

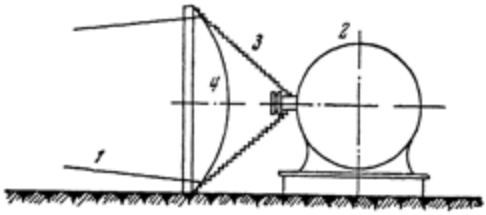


Рис. 25а. Схема камеры временной развертки катодного осциллографа
1—трубка; *2*—фотокамера; *3*—затемнение, *4*—экран

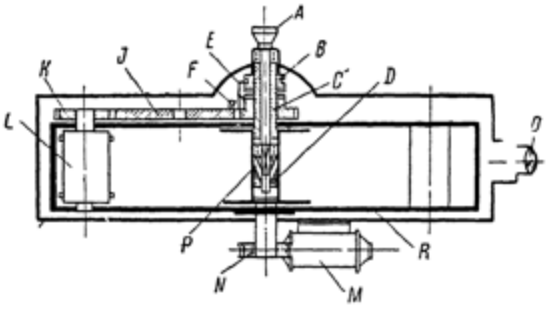


Рис. 25с. Фотокамера

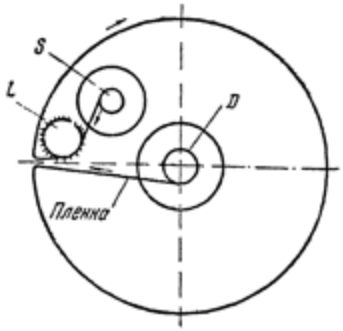


Рис. 25b. Схема движения пленки в фотокамере

Запаянный осциллограф с горячим катодом. Для исследований, проводившихся в Бакурианской горной лаборатории в 1939 г., под руководством автора был разработан аппарат, состоящий из запаянного осциллографа с горячим катодом (напряжение на катоде около 5 kV) с электростатическим отклонением и специальной фотокамеры.

Работа аппарата поясняется рис. 25 а. Напряжение от измерительной антенны подводится к отклоняющим пластинкам трубки, одна из которых заземлена

ЭБ "Научное наследие России"

лена. Съемка явления происходит на вращающийся барабан (рис. 25 b), покрытый кинопленкой. Благодаря вращению барабана, диаметром около 28 см, с числом оборотов до 500 в минуту, осуществляется временная развертка с окружной скоростью до 7.4 м/сек.

Мотор M (рис. 25 c) через червячную передачу N приводит во вращение барабан R. Кинопленка намотана на катушку S, с которой она по барабанчику L, имеющему зубцы, входящие в перфорацию пленки, выходит через щель, огибает барабан R и наматывается на катушку D. Нормально пленка на периферии барабана остается относительно него неподвижной. При необходимости сменить экспонированную пленку нажимается кнопка A, которой производится сцепление барабана D с вращающейся осью. Одновременно происходит прекращение вращения шестеренки C, благодаря чему приводятся в движение шестеренки J и K, и барабан L, сматывающий пленку с катушки S. Пленка начинает перематываться на катушку D. Сцепление осуществляется до тех пор, пока кнопка F, находящаяся на шестеренке J, после десяти ее оборотов ударом по собачке E не произведет расцепления оси червяка от шестеренки и катушки. Схема движения пленки показана на рис. 25 c.

Так как переключение производится без остановки барабана R, смена пленки осуществляется весьма быстро (в 4—5 сек.). Фотографирование производится

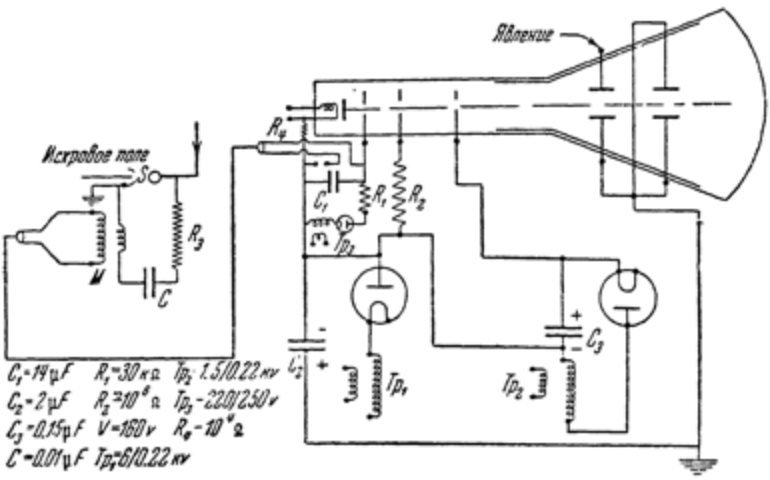


Рис. 26. Принципиальная схема включения КОП-912

через объектив типа ФЭД с светосилой 1 : 2 и фокусным расстоянием 50 мм. Благодаря тому, что объектив удален от экрана осциллографа на 16 см, на кинопленке умещается изображение почти всего экрана осциллографа (диаметром около 12 см).

Электрическая схема питания трубки имеет нормальное выполнение, но вместо сообщения аноду потенциала от постороннего источника этот электрод соединен через большое сопротивление с катодом. В общем виде схема изображена на рис. 26. Специальной разработки потребовало реле для «отпирания» катодного луча, существующего в трубке в течение всей грозовой деятельности.

Предложенное автором реле оказалось весьма удовлетворительным и использовалось для регистрации грозовых явлений. Механизм работы этого нового типа реле, схема которого видна на рис. 26, заключается в следующем. Параллельно искровому реле ПАКО-8 включена цепь, состоящая из сопротивления R_3, конденсатора C и небольшого воздушного трансформатора M. Трансформатор состоит из двух катушек, намотанных на бакелитовый цилиндр и изолированных друг от друга на 50 kV. При работе искрового реле S (например, от грозового импульса) конденсатор C разряжается, и разрядный ток индуцирует в обмотке трансформатора импульс напряжения, который подводится к модуляторной цепи трубки. Цепь состоит из трех ветвей: в одной через большое сопротивление включен источник питания постоянного напряжения 350 V, в другой включены

ЭБ "Научное наследие России"

конденсаторы, емкостью 14 μF, и в третьей—шаровой искровой промежуток. Общий конец всех трех ветвей присоединен через сопротивление к катоду трубки, другой конец реле приключен к модуляторному электроду. Импульс напряжения, идущий из трансформатора, заставляет пробиться искровой промежуток, благодаря чему отрицательное напряжение на модуляторе, запиравшее электронный луч в шейке трубки, исчезает, и луч проходит на экран. Через некоторое время, определяемое константами R_1 и C_1, напряжение на разрядившихся через искровой промежуток конденсаторах восстанавливается, и происходит новое запирание луча.

В промежутке времени, в течение которого луч был открыт, может происходить запись явления. В описанной схеме отпирание луча производилось на время от 0.2 до 1.5 сек. Так как действие искрового промежутка вызывает срабатывание осциллографа (в данном случае ПАКО-8), то запись изучаемого явления производится строго синхронно двумя осциллографами.

При изучении атмосфериков и для регистрации развития грозовых разрядов английскими исследователями применялся запаянный осциллограф Cossor с газовой фокусировкой и ускоряющим напряжением 2 000 V, получаемым от сухой

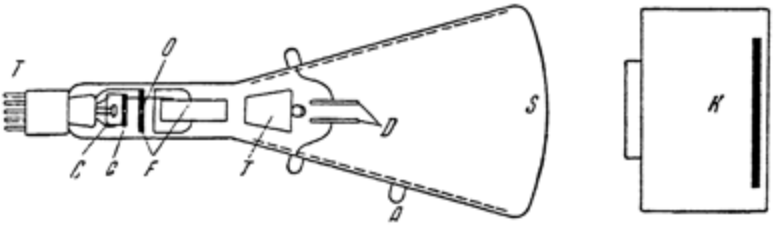


Рис. 27. Схематическое изображение катодного осциллографа с горячим катодом:
T—осциллограф; K—фотокамера

батареи. Развертка производится на вращающемся барабане через объектив со светосилой 1 : 1.5 и фокусным расстоянием 5 см. Регистрирующий фильм имеет длину 102 см и помещается на барабане, который, помимо вращательного, имеет поступательное движение вдоль оси, благодаря чему луч может записывать явление на винтообразной линии с шагом в 0.6 мм, при полной длине развертки около 170 м. При 80 об/мин. длительность полного пробега луча равняется 120 сек.

Катодный луч во избежание вуалирования фотоэмульсии запирается у нулевой линии, падая на специальный экранчик.

Напряжение для отклонения луча индуцировалось на антенне, соединенной с землей через сопротивление, величина которого подбиралась из расчета демпфирования собственных колебаний. Антенна присоединена к потенциометру с определенным шунтирующим сопротивлением. Емкостноомический усилитель включен между антенной и осциллографными пластинками. При соответствующих сопротивлениях и емкостях напряжение на выходе усилителя прямо пропорционально электрическому полю антенны.

Усилитель имеет константу времени 0.03—0.01 сек. Медленные изменения поля, имеющие длительность порядка тоже 0.03—0.01 сек., не могут давать регистраций. Более быстрые изменения поля регистрируются неискаженно. Величина усиления 260. Длина антенны, приподнятой на 33 см над крышей грузовика, в котором помещается лаборатория, имеет длину 240 см. Радиус действия такой системы—около 20 км.

Для регистрации токов молнии, поражающих высочайшее здание мира в Нью-Йорке, американцы применили установку, состоящую из двух запаянных катодных осциллографов, один из которых схематически изображен на рис. 27.

Косвенно подогреваемый катод C имитирует катодный луч, который проходит через отрицательную контрольную сетку G, положительную ускоряющую сетку O и через фокусирующий цилиндр F. Осциллограф имеет две пары отклоняющих пластин. Пластины служат для осуществляемого электрическим полем

ЭБ "Научное наследие России"

временного отклонения, а пластины D служат для смещения луча регистрируемым явлением в направлении, перпендикулярном к первому смещению. Катодный луч регистрирует явления на флуоресцирующем экране S. Внутреннее проводящее покрытие, присоединенное к аноду A, сделано с целью нивеллировки потенциалов экрана и анода для защиты отклоняющих пластин от внешних полей и предупреждения аккумулирования зарядов на стеклянной колбе. Снимок с экрана делается фотоаппаратом, установленным перед осциллографом. При 10—11 kV на катоде луч имеет достаточную яркость для регистрации волны с разверткой 100 μS на экран. Питание катода происходит от 2-волнового выпрямителя, показанного в верхнем левом углу рис. 28.

Омический делитель, шунтирующий емкость выпрямителя, служит для удобного подбора управляющих сеток и фокусирующего цилиндра. Для развертки применялись два метода: при первом единичный импульс должен быть растянут

Рис. 28. Схема включения катодного осциллографа для регистрации токов прямых ударов молнии:

1—фокусирующий цилиндр; *2*—кабель замедления; *3*—молниеприемник; *4*—шунт; *5*—тиритовый шунт; *6*—питающая схема; *7*—развертка; *8*—питание развертки; *9*—контроль сетки; *10*—управление пленкой

за данное время, например за 100 μS на экране. Развертка должна быть готова для регистрации следующего импульса в разряде не больше чем через 1000 μS. Для предупреждения наложения регистрируемых при этом импульсов осуществляется вращение катодного луча с помощью поля постоянных магнитов. Этот метод, однако, приводит к искажениям волны магнитным полем, что крайне затрудняет временную и ординатную расшифровку осциллограммы. В силу этого применялся другой метод: 35 мм фильм двигался с постоянной скоростью (17 мм в сек.). Одновременно ось линзы фотоаппарата вращалась со скоростью 4 об/сек., описывая окружность диаметром 3.8 см. Траектория луча на фильме при этом описывает непрерывную спираль, начинающуюся в момент открытия луча контрольной сеткой. Импульсы молнии записываются в этом случае так, как это показано на рис. 29.

Быстрая развертка осуществляется тиратроном, коммутирующим цепь, состоящую из тиратронов T_1, T_2 и T_3 (рис. 28). Напряжение, появляющееся между анодом и катодом T_1, используется для временной развертки катодного луча. Сетка тиратрона T_1 имеет такой потенциал, что нормально через трубку течет ток. Падение напряжения на тиратроне равно приблизительно 150 V.

ЭБ "Научное наследие России"

Трубка T_2 нормально ток не проводит, и емкости C_1 и C_2 заряжены до полного анодного потенциала 2 500 V. Если теперь к сетке T_2 прикладывается импульс достаточной амплитуды для отпирания тиратрона, потенциал на пластине и сетке T_1 сделается отрицательным, под влиянием изменения знака потенциала емкостей C_1 и C_2. Амплитуда отрицательного напряжения, появляющегося на A, зависит от отношения C_1: C_4. Ток, текущий через T_1, прекращается. Отрицательный потенциал на пластине T_1 служит для отклонения луча. Когда T_2 начинает проводить ток, полюс A конденсатора C_1 начинает заряжаться положительным потенциалом.

Отрицательный потенциал на сетке T_1 спадает до 0 с постоянной C_2R_2. В момент ($t_2=5.C_2R_2$), когда потенциал на пластине T_1 приобретает достаточную положительную величину, а отрицательный потенциал сетки достаточно снижается, T_1 делается проводящим, при этом меняется знак потенциала на пластине тиратрона T_2, который делается непроводящим. Потенциал пластины T_2 затем снова достигает положительной величины, и временная цепь готова для записи следующего импульса. Нормальная работа схемы требует соблюдения целого ряда условий.

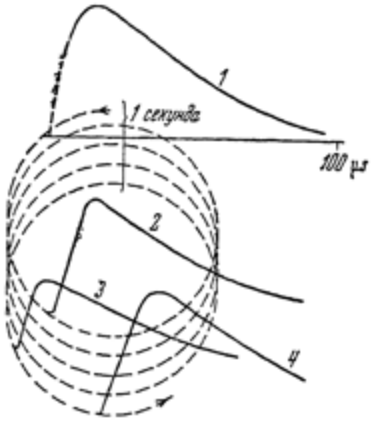


Рис. 29. Временная развертка тока молнии. Вращательное движение осуществляется поворотом линз, а продольное движение перемещением фотоэмульсии. *1, 2, 3, 4*—осциллограммы отдельных импульсов

Для того чтобы не потерять части фронта регистрируемого импульса в условиях схемы, включение которой производится самой исследуемой волной, необходимо применять искусственное задержание волны, направляющейся к отклоняющим пластинам. В настоящей схеме таким «замедляющим» проводником служит специально выполненный кабель с воздушной изоляцией. Электрическая длина кабеля 1.95 μS, а его импеданц равен 118 Ω. С целью регистрации токов в диапазоне от 10 до 200 kA применялся особый шунт, состоявший из параллельно соединенных металлического сопротивления и тиритового сопротивления с нелинейной характеристикой. Выполненный практически шунт давал на своих зажимах при 10 kA около 150 V, а при 200 kA около 1 200 V.

C. КЛИДОНОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИИ

1. РАЗВИТИЕ ПРИБОРА

В 1777 г. Лихтенберг опубликовал работу, в которой описывал наблюденный им интересный факт: при разряде электрофора на его диске осаждалась пыль в виде определенных своеобразных фигур. Физики уделили много внимания изучению этих фигур. После открытия дагерротипии в 1851 г. Пино были получены аналогичные явления на пластинках, а Дюкретэ показал в 1884 г. впервые, что лихтенберговские фигуры образуются при приложении напряжения к светочувствительной эмульсии фотопластинки.

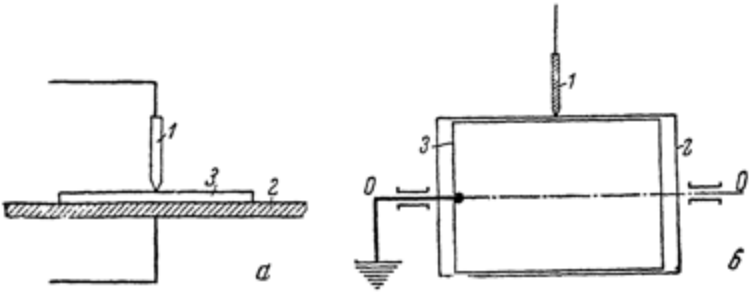


Рис. 30. Принцип действия клидонографа

Способность этих фигур, называемых теперь фигурами Лихтенберга, регистрировать кратковременные электрические явления обусловлена большой скоростью распространения разряда на эмульсии, достигающей при быстром

ЭБ "Научное наследие России"

подъеме напряжения многих сот километров в секунду. Таким образом, были измерены напряжения, длительность существования которых около 3.10^{-8} сек., а подъем напряжения до максимума 10^{-8} сек.

На рис. 30, *а* изображена схема клидонографа. На металлической подкладке находится фотографическая пластинка с эмульсией, обращенной вверх к электроду заостренной формы. Приложение разности потенциалов между электродами вызывает образование на эмульсии латентного (скрытого) изображения лихтенберговской фигуры, форма которой определяется знаком потенциала, подведенного к верхнему (стержневому) электроду. Видимое изображение фигуры получается после обычной обработки фотопластинки (проявление и фиксация).

В 1924 г. Петерс дал техническое решение использования лихтенберговских фигур, построив клидонограф (записыватель) волн.

Вслед за работой Петерса появляется ряд работ различных авторов, посвященных вопросам конструкции, градуировки и теории действия клидонографа. У нас вопросы о клидонографе наиболее полно разрабатывались автором и его сотрудниками в ВЭИ и ЭНИН. Обстоятельная работа по клидонографии проведена Е. В. Калининым.

2. ОБРАЗОВАНИЕ ФИГУР ЛИХТЕНБЕРГА И ИХ ФОРМЫ

Если между иглой и пластинкой создать напряжение 1.5—18 kV, то в слое воздуха у светочувствительной эмульсии фотопластинки, помещенной между электродами, проявляется, вследствие ионизации толчком, красноватое свечение. На проявленной пластинке видна лихтенберговская фигура, которая, в зависимости от полярности иглы по отношению к плоскости, имеет совершенно различный вид. При положительной игле (положительная фигура), при прочих равных условиях, получается фигура бóльшая, чем при отрицательной.

Положительные фигуры состоят из отдельных более или менее разветвляющихся ветвей, резко ограниченных на концах. Отрицательные фигуры состоят по преимуществу из широких (полосообразных секторов) с размытыми краями.

Образование положительных и отрицательных фигур происходит вследствие движения электронов, а не положительных зарядов (ионов или протонов). Различие в форме положительных и отрицательных фигур обусловлено различной ионизирующей способностью положительного иона и электрона. Механизм образования поверхностных фигур наиболее обстоятельно описал Э. Маркс.

По исследованиям Магнуссона, непосредственным фактором, обусловливающим образование фигур Лихтенберга, является свечение, возникающее при распространении электрического импульса по поверхности эмульсии.

Автором был поставлен ряд опытов, дополнительных к опытам Магнуссона. Клидонограф помещался в сосуд, из которого откачивался воздух. При постепенном разрежении воздуха фигуры Лихтенберга делались сначала более туманными, а затем, при дальнейшем выкачивании газа, совершенно исчезали. Оптимальным давлением, при котором величина фигур получается наибольшая, а очертания еще достаточно контрастны, является 20 мм Hg.

На основании имеющегося опытного материала можно считать установленным следующее положение: фигуры, получающиеся на фотопластинках и называемые лихтенберговскими, являются световыми отпечатками процессов ионизации, происходящих в слое воздуха, непосредственно прилегающим к эмульсии. При образовании положительных фигур электроны движутся к острию, в область повышенных градиентов электрического поля, а оставляемый ими объемный положительный заряд несколько усиливает электрическое поле у краев фигуры, способствуя увеличению радиусов ветвей. При образовании отрицательных фигур электроны движутся от острия в поле с уменьшающимися градиентами. Объемный заряд усиливает поле лишь в области, пройденной электронными лавинами. Исходя из этого, можно объяснить различие радиусов фигур и скоростей их образования.

Форма фигур Лихтенберга, получающихся на фотографической пластинке в результате воздействия напряжения, зависит, вообще говоря, от различных факторов. При прочих равных условиях строение фигуры зависит от амплитуды

ЭБ "Научное наследие России"

импульса напряжения и вида его фронта. Амплитуда волны влияет главным образом на размеры фигуры, и при увеличении напряжения на электродах клидонографа всегда наблюдается закономерное увеличение диаметра фигуры. При напряжении 18—30 kV максимальный радиус (без следов разрушения эмульсии) для положительных фигур равен 3—4 см, а для отрицательных 1.5 см (для пластинок толщиною 1.3—1.5 мм).

Специальными исследованиями установлена зависимость диаметра фигуры от амплитуды волны и от ее фронта. Результаты исследования были представлены в виде кривых. Сложный характер градуировочных кривых и зависимость их от местных условий не позволяют непосредственно применять их для целей расшифровки регистраций. С увеличением длины фронта фигура при том же напряжении уменьшается. На размеры фигур Лихтенберга оказывает значительное влияние (по крайней мере для крутых волн) и толщина диэлектрика (толщина фотографической пластинки). Влияние на размеры получаемой фигуры диэлектрической постоянной фотографической пластинки и диэлектрика клидонографа, так же как и влияние давления окружающего воздуха, в пределах 1—2 см Hg, практически роли не играет. Влияние диэлектрика сказывается лишь в изменении формы лихтенберговских фигур.

3. КОНСТРУКЦИЯ КЛИДОНОГРАФА

В настоящее время применяются четыре основных типа конструкций клидонографа, отличающихся между собой скоростями перемещения фотоматериала: 1) клидонограф стационарный, 2) клидонограф, медленно вращающийся, 3) клидонограф, быстро вращающийся, 4) клидонограф, передвигающийся толчками.

а. Стационарный клидонограф

Стационарный клидонограф обычно представляет собой круглую коробочку из изолирующего материала, через крышки которой проходят вводы к электродам—стержню и плоскости, между которыми помещается фотопластинка. Две половины прибора свинчиваются нарезкой. Прибор часто используется в лабораторной обстановке, где смена фотоматериала может производиться не автоматически.

Первоначально стационарные клидонографы нашли применение при регистрации прямых ударов молнии в опоры линии электропередач и определений величины токов молнии, протекавших через пораженные опоры. В СССР эти приборы, разработанные в ВЭИ, ЭНИН и других организациях (под названием РПУМ—регистраторы прямых ударов молнии), были выполнены в различных конструктивных формах. Ввиду развития способа магнитозаписи (см. ниже), позволяющего производить измерения амплитуды тока молнии более просто, применение РПУМ стало нерациональным, и подробное рассмотрение вопроса об их использовании здесь излишне.

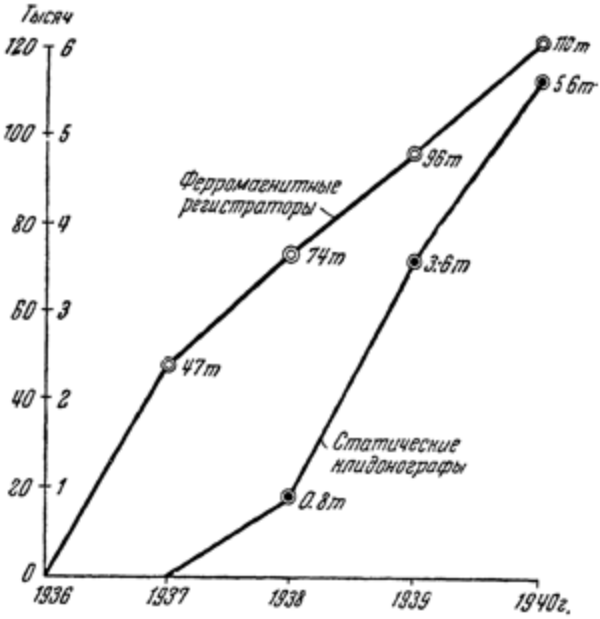


Рис. 31. Рост числа регистраторов по годам в СССР

Вскоре, однако, стационарный клидонограф нашел свое применение при измерении максимальной крутизны токовых волн. В СССР этот метод (предло-

ЭБ "Научное наследие России"

женный Бергером) нашел весьма широкое развитие и применение. Количество изготовленных регистраторов крутизны достигало 5 600 штук [рост числа внедренных регистраторов крутизны по годам иллюстрируется кривой (рис. 31)]. Принцип измерения поясняется рис. 32. Ток молнии, проходящий по токоотводу деревянной опоры, создает переменный магнитный поток, проходящий в петле и индуктирующий в ней электродвижущую силу e_s, равную

$$e_s = \frac{dI}{dt} \cdot M,$$

где M—коэффициент взаимной индукции между токоотводом AB и петлей C. Размагничивающим действием обратного тока, текущем в виде тока смещения между землей и тучей, пренебрегаем ввиду больших размеров тучи (подробнее об этом см. в главе VII). Коэффициент M определяется (рис. 32) по формуле:

$$M = 2l \ln\frac{b}{a} 10^{-9} H.$$

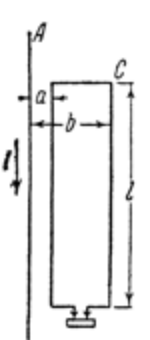


Рис. 32. Схема измерения максимальной крутизны волны тока молнии при помощи РПУМ

Клидонограф, приключенный к концам петли, регистрирует максимальное значение e_s, что соответствует максимальной крутизне волны тока

$$\left|\frac{\partial I}{\partial t}\right|_{\max}.$$

Таким образом,

$$\left|\frac{dI}{dt}\right|_{\max} = \frac{e_{s\max}}{M}.$$

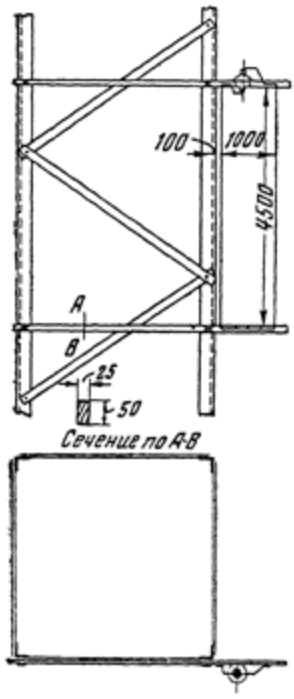
Если на опоре имеется несколько токоотводов (например, металлическая опора с несколькими уголками), то приходится учитывать токи во всех элементах, могущих оказывать влияние на величину магнитного потока в измерительной петле. Учитывая усложнение расчетов и их малую точность при более или менее сложных конфигурациях опор, следует по возможности избегать установки рамок на опорах с многократными путями для отвода тока молнии в землю.

Рис. 33. Зависимость радиусов положительных и отрицательных фигур от амплитуды напряжения

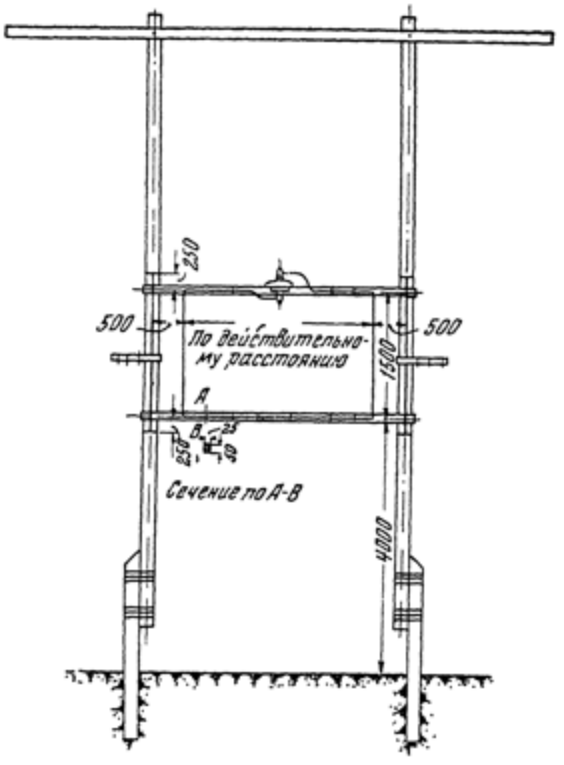
При определении по клидонограмме величины e_s следует иметь в виду все изложенное относительно влияния крутизны на радиус фигуры.

Ввиду некоторой неопределенности при расшифровке фигур вследствие влияния нескольких параметров волны напряжения на ее радиус и ряда местных факторов на максимальную крутизну волны (форма опоры, условия заземлений и пр.), этот метод нельзя признать очень удачным. Однако применение его

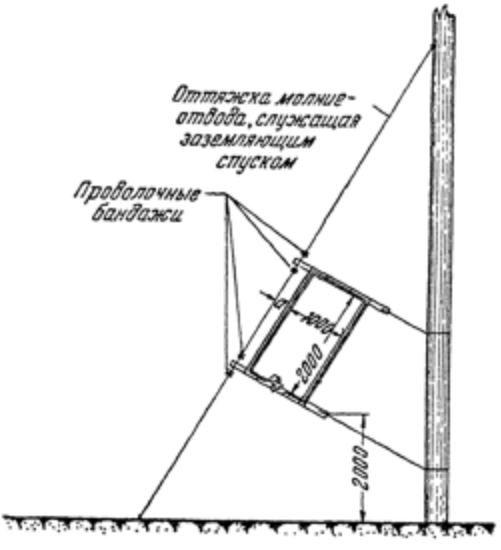
ЭБ "Научное наследие России"



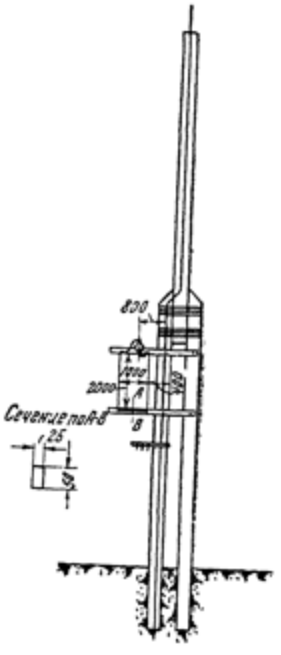
a



b



c



d

Рис. 34. Расположение рамок и статических клидонографов при различных системах опор:

a—установка рамки и клидонографа на металлической опоре; *b*—установка рамки и клидонографа на деревянной опоре без заземляющих спусков; *c*—установка рамки и клидонографа на заземленных оттяжках стержневых и антенных молниеотводов; *d*—установка клидонографа на деревянном стержневом молниеотводе

ЭБ "Научное наследие России"

оправдывается почти полным отсутствием у нас сведений о важнейшей характеристике волны тока—ее максимальной крутизне.

Детальные исследования электрических характеристик клидонографа, применяемого в СССР, и получение градуировочных кривых в условиях, сходных с полевыми (осуществленное В. С. Комельковым), позволили уточнить влияние различных факторов (давление атмосферного воздуха, его влажность, влияние качества эмульсии фотопластин и их обработки) на работу прибора. На рис. 33 даны зависимости $R=f(U)$, используемые при расшифровке полевых регистраций, сделанных при нормальном давлении и любой влажности.

Исходя из скорости образования фигур Лихтенберга, можно заключить, что клидонограф зарегистрирует процесс, длящийся даже сотые доли μS, и, следовательно, если на фронте токовой волны есть элемент максимальной крутизны, длящийся $(1 \div 2) \cdot 10^{-8}$ сек., он будет отмечен прибором.

Так как для образования лихтенберговской фигуры нужна определенная мощность, регистрация клидонографом крутизны возможна лишь до некоторых значений нижнего предела тока. Приближенные расчеты В. Комелькова показали, что при $I_m < 5$kA в регистрациях возможны искажения, а при $I_m < 0.4$kA клидонограф вообще не дает записи крутизны.

Точность метода определения максимальной крутизны токовой волны, при учете возможных источников погрешностей и при записи отрицательными фигурами Лихтенберга, колеблется в пределах $\pm 15 \div 20\%$. На рис. 34 показаны примеры рекомендуемого ЭНИН расположения рамки и клидонографа на опорах линий электропередач и на молниеотводах.

b. Медленно вращающийся клидонограф

Широкое распространение в высоковольтных электрических системах для целей измерения перенапряжений (атмосферных и внутренних) получил клидонограф с медленно вращающимся (с помощью часового механизма) барабаном. Этот прибор применяется для указанных целей с 1924 г., и его различные конструкции могут считаться достаточно широко известными.

На основании записей прибора определяются амплитуда перенапряжений, полярность волны (при апериодическом импульсе), а также получаются некоторые сведения о форме волны (очень приближенно крутизна волны, длительность импульса и пр.).

Существенное значение в этих исследованиях получает вопрос о присоединении приборов к высоковольтным линиям и учет применяемых для этого делителей напряжения при расшифровке показаний приборов.

Ввиду того, что максимальное напряжение, при котором происходит образование фигур Лихтенберга в клидонографе обычного типа без ее повреждения поверхностным разрядом, не превышает 18—20 kV, прибор не может быть подключен непосредственно к линии высокого напряжения. Для получения на зажимах прибора необходимой разности потенциалов в этом случае необходимо прибегать к делению напряжений.

Вопрос о правильном делении напряжений при любых условиях изменения напряжения весьма сложен, и решению его посвящена обширная литература, в которой эта задача получила различное более или менее удовлетворительное решение. Ввиду большого числа факторов, совместно влияющих на градуировку приборов, ее необходимо производить в точно таких же условиях, в каких данный клидонограф будет эксплоатироваться.

c. Быстро вращающийся клидонограф

Для получения развертки грозового разряда по времени (по типу фотокамеры с временной разверткой) автором разработан быстро вращающийся клидонограф. Барабан, на котором укрепляется фотобумага, приводится во вращение мотором и может делать от 40 до 250 об/мин. Окружная скорость барабана изменяется в пределах 525—3 280 мм/сек. Благодаря такой скорости возможна раздельная регистрация повторных импульсов разряда, с расстоянием между ними на фотоленте в 1 мм, при промежутках времени около 300 μS.

ЭБ "Научное наследие России"

Для получения еще бо́льших скоростей временной развертки, по предложению автора, в ЭНИН был сконструирован и построен сверхбыстро вращающийся клидонограф. Отличительной особенностью этого прибора, помимо того, что он допускает число оборотов барабана до 600—700 в минуту, является непрерывное перемещение электрода вдоль поверхности барабана, параллельно его оси. Благодаря комбинированному движению барабана и электрода на фотобумаге получается винтовая линия с шагом около 1 мм. Этот прибор позволяет производить регистрацию всего разряда, давая вместе с тем некоторое представление о характере протекания отдельных импульсов.

Электрод, присоединенный к линии (или антенне), после каждой регистрации передвигается вдоль барабана на определенное расстояние. Передвижение может производиться вручную или автоматически.

Измерение быстро вращающимся клидонографом принципиально может быть произведено в схемах, аналогичных описанным выше. Быстро вращающиеся клидонографы нашли применение при исследованиях, проводимых на антеннах и молниеприемниках.

В первом случае назначение прибора заключается в регистрации индуцированных напряжений. Благодаря быстрой развертке возможно выявление в сложном грозовом разряде (состоящем из нескольких импульсов) его основных элементов. В большинстве случаев при исследованиях, проводившихся в полевых лабораториях, клидонографы подключались к антеннам непосредственно или с помощью переменного потенциометра повышенной емкости.

Анализ записей клидонографов, приключенных к антенне, легко произвести на основании рассмотрения общего процесса действия индуцированного напряжения на антенну (он будет сделан ниже в связи с рассмотрением схемы включения катодного осциллографа).

Для регистрации параметров прямого удара клидонограф присоединяется к сопротивлению, включенному в нижнюю часть молниеприемника, воспринимающего грозовой разряд и отводящего его в землю. Шунтом служит сопротивление, выполненное с уменьшенной индуктивностью

$$\frac{R}{L} < 0.3\,\mu S^{-1};$$

Клидонограф здесь подключен к шунту кабелем (длиной 50—100 м). Сопротивление Z, равное волновому сопротивлению кабеля, предупреждает появление отражений в нем и не допускает ответвления к клидонографу значительного тока при перекрытии прибора. Определение величины амплитуды тока производится делением измеренного клидонографом напряжения на величину сопротивления шунта.

d. Клидонограф с толчкообразным перемещением электрода

Среди различных других конструкций клидонографов отметим прибор, разработанный ХЭТИ. В этом аппарате фотопленка до регистрации неподвижна. Напряжение, попадающее на клидонограф, действует на специальное волновое реле, которое заставляет работать электромагнитный спусковой механизм, передвигающий фотопленку на следующую позицию.

Ценой усложнения и удержания конструкции здесь экономится фотобумага, идущая для регистрации.

D. МАГНИТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛНИИ

1. ПРИНЦИП МЕТОДА ФЕРРОМАГНИТНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ

Ферромагнитный материал, находящийся в магнитном поле, созданном волной тока, приобретает некоторую остаточную намагниченность B_0. При определенных условиях эксперимента по значению B_0 можно судить о максимальной величине волны тока и ее полярности. Метод регистрации амплитудных значений импульсных токов, называемый в дальнейшем магнитозаписью, получил широкое применение при измерениях токов молнии. В современном виде аппа-

ЭБ "Научное наследие России"

ратура магнитозаписи состоит в основном из ферромагнитных стержней—регистраторов и прибора для определения в условных единицах остаточной намагниченности—магнитометра. Кроме того, применяется ряд вспомогательных приборов для обнаружения намагниченных регистраторов и градуировки магнитометра. Для практической реализации метода необходимо разрешить ряд существенных вопросов, касающихся как подбора самого ферромагнитного материала, так и разработки измерительной схемы.

Основными принципами измерения амплитуды импульсных токов при помощи остаточной намагниченности ферромагнитного материала являются:

а) Малая (в пределе нулевая) разница в величинах остаточной индукции B_0 при намагничении регистратора постоянным током и импульсным током с амплитудным значением, равным величине постоянного тока. Разница значений B_0 обусловливается действием вихревых токов, возникающих в теле регистратора при изменениях магнитного потока [зависимость $B_0 = f(I_0)$].

Требуемый эффект может быть в той или иной мере достигнут либо подразделением тела регистратора на возможно тонкие нити, направление которых совпадает с силовыми линиями магнитного поля, либо применением материала, содержащего в непроводящей массе зерна магнитного вещества.

Материал, применяемый для изготовления регистраторов, должен обладать достаточной коэрцитивной силой для того, чтобы обеспечить сохранение остаточной намагниченности на долгое время [$B_0 = f(t)$]. Этими же соображениями нужно руководствоваться при выборе размеров регистраторов.

При осуществлении такого типа порошкообразных стерженьков приходится считаться с их малой эффективной магнитной проницаемостью относительно проволочных регистраторов.

Влияние на B_0 формы импульса может быть выявлено различными способами. У идеального регистратора $\frac{B_0 \text{ пост.}}{B_0 \text{ имп.}} = 1$.

б) Небольшое возрастание B_0 при намагничениях повторными импульсами одинаковой формы и знака [зависимость $B_0 = f(n)$]. В действительности B_0 изменяется в зависимости от числа намагничивающих импульсов одинаковой формы и направления и при большом n результативная остаточная намагниченность стремится к некоторому пределу. То же относится к размагничиванию предварительно намагниченного стержня. Чем ближе подходят друг к другу кривые $B_0 = f(n)$, полученные при постоянном токе и импульсах, тем лучше качество регистраторов.

Действительно, если B_0 зависит от n, то в расшифровку показаний регистратора вводится неопределенность, так как число импульсов, из которых состоял зарегистрированный разряд молнии, неизвестно.

в) Небольшая потеря намагниченности с течением времени [зависимость $B_0 = f(t)$]. Это свойство—основное при использовании регистраторов в полевых условиях, где быстрый контроль невозможен.

г) Достаточная чувствительность регистратора в отношении сравнительно большого диапазона изменений напряженности магнитного поля.

д) Небольшой разброс магнитных характеристик серийных регистраторов и малое влияние атмосферных факторов (температуры, влажности и пр.).

Практически при массовых измерениях точность метода магнитозаписи колеблется в пределах от ± 5 до $\pm 20\%$.

Для наглядного представления метода магнитозаписи на рис. 35 схематически показаны отдельные стадии его осуществления: *а*—момент удара молнии в опору, на которой установлен держатель с двумя регистраторами; *b*—способ отыскивания опоры, по заземляющему спуску которой прошел ток молнии (стрелка компаса притянулась к намагниченному импульсом гвоздю, вбитому у основания опоры—метод И. Стекольникова); *с*—регистратор, уложенный в гнездо измерительного прибора (магнитометра) и вызывающий отклонение стрелки прибора на угол α. По найденной величине α на градуировочной кривой определяется ток I, создававший в намагничивающей катушке *е* то же B_0, что и ток молнии.

ЭБ "Научное наследие России"

Последняя стадия осуществления метода заключается в применении формулы, позволяющей по току I_k, учитывая конфигурацию опоры и расположение регистратора, найти амплитуду тока молнии. При этом, по возможности, учитываются упомянутые выше факторы, влияющие на результаты измерений.

Наиболее точным методом определения тока молнии I_k является градуировка регистратора в условиях, тождественных с условиями его работы в полевой обстановке. К сожалению, создание подобных условий сопряжено подчас с непреодолимыми техническими трудностями. Приходится поэтому прибегать к моделям. Исходя из условия малого влияния регистратора на магнитное поле, создаваемое током, протекающим по линейному проводнику, градуировку его производят в соленоиде, обтекаемом током, по величине значительно меньшим $I_м$.

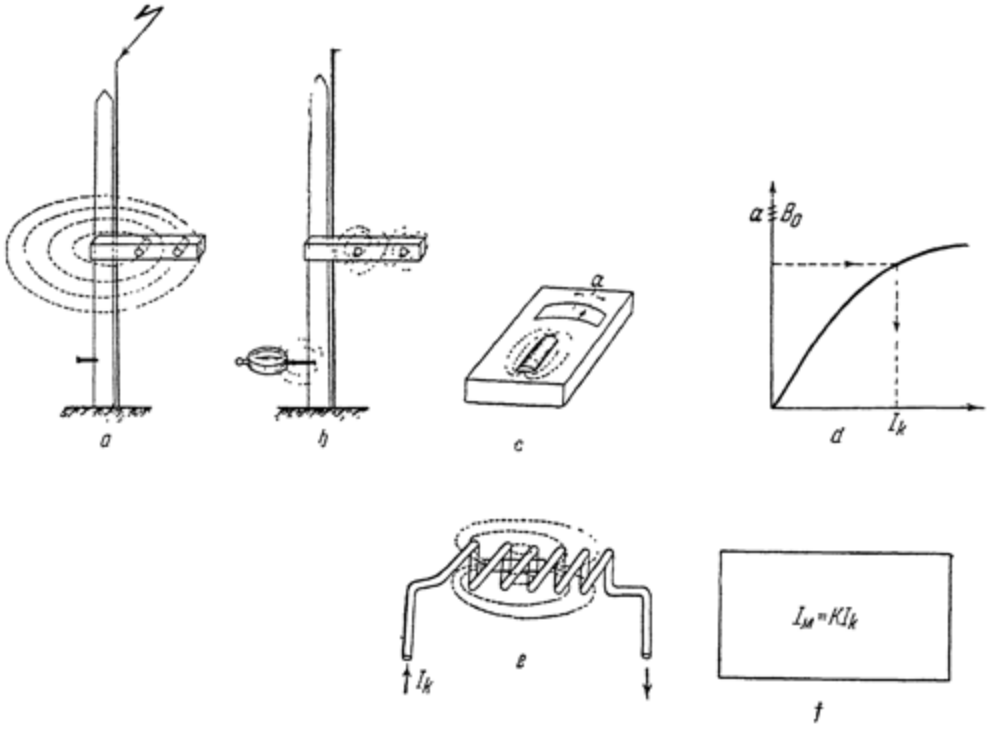


Рис. 35. Принцип регистрации амплитудных значений токов молнии ферромагнитными регистраторами:

a—намагниченность регистраторов в момент удара; *b*—нахождение намагниченных регистраторов; *c*—определение остаточной намагниченности регистратора; *d*—определение тока I_k (ток катушки); *e*—лабораторная градуировка регистратора; *f*—установление амплитуды тока молнии

При этом пересчет ведется по формуле:

$$I_м = \frac{2\pi n}{\sqrt{a^2 + d^2}} RI_k,$$

где n—число витков цилиндрической катушки, a—длина катушки в см, d—диаметр катушки в см, R—расстояние регистратора от середины проводника, по которому протекал ток молнии.

При протекании тока молнии по более сложному пути переходная формула хотя и будет иметь принципиально тот же характер, но может иметь значительно более сложный вид.

Измерения параметров грозовых разрядов (амплитуды, полярности и процента колебательности разряда) методом магнитозаписи, помимо большого научного интереса, имеют исключительно большое практическое значение. При помощи этого метода определяются расчетные токи молнии для отдельных районов СССР, что необходимо при проектировании новых грозоупорных линий передач и для защиты существующих.

ЭБ "Научное наследие России"

Магнитозапись токов молнии позволяет также вывести для отдельных районов СССР действительное соотношение между числом гроз и их интенсивностью, так как почти все разряды в элементы линии передач, а также величины токов будут регистрироваться независимо от того, произошло ли выключение линии передач или нет.

Естественно, определяемые параметры молнии могут служить исходным материалом для анализа грозовых аварий в высоковольтных системах.

Магнитозапись впервые была применена Покельсом в 1898 г. Для измерений амплитудных значений токов молнии Покельс использовал свойство нефелиновых базальтов намагничиваться под действием импульсных токов с практически исчезающей малой инерцией. Прошло, однако, около четверти века, прежде чем методом Покельса заинтересовались электротехники. В 1925 г. Теплер указал на желательность применения этого метода для измерения токов грозовых разрядов, поражающих различные молниеприемники.

В появившейся в 1932 г. американской статье метод магнитозаписи был разработан в плане широкого применения. В 1934 г. Грюневальд сообщил, что он применяет ферромагнитные регистраторы уже с 1926 г.

Широкое развитие магнитозапись приобретает с 1933 г.

2. КОНСТРУКЦИЯ РЕГИСТРАТОРОВ

Для первых измерений токов молний, проведенных в Германии (1926), были применены стальные стерженьки сплошного сечения (без подразделений на отдельные нити), сделанные из коэрцита. При воздействии на такие регистраторы импульсных магнитных полей остаточная намагниченность определяется, в силу влияния вихревых токов, не только напряженностью поля, но также и характером его изменения по времени. Для определения тока молнии по остаточной намагниченности регистратора необходимо знание формы импульса тока; поэтому применялись два регистратора различных сечений (с диаметром 2 и 6 мм). Градуировка комбинации этих регистраторов различными по форме и амплитуде импульсами тока позволяла судить об амплитуде тока молнии неизвестной формы. Сложность этого метода очевидна. Позднее (1933) в Германии начали применяться регистраторы диаметром 5 мм и длиною 60 мм, составленные из очень тонких проволок (диаметром 0.2 мм) хром-углеродистой стали (3% хрома). Собранный из проволочек стерженек заливался парафином и помещался в стеклянную трубку.

Несколько отлично от этого сделан регистратор, применяющийся в Америке. Регистратор выполнен из тонких пластинок кобальтовой стали, специально обработанных термически для получения значительной коэрцитивной силы. Пакетик стали плотно упакован в маленькую изолирующую коробочку.

В 1934 г. Фауст и Гарднер описали аналогичную конструкцию регистратора, состоящего из короткого изолирующего цилиндра, в который помещен пучок полосок стали от постоянных магнитов. Один конец цилиндра заполнен черным, а другой красным компаундом. На одном конце регистратора укреплен латунный стерженек, облегчающий определение нужного конца регистратора и помогающий фиксации регистратора в держателе. Магнитные характеристики отдельных регистраторов имеют значительный разброс. Описанные регистраторы хотя и подразделены на весьма тонкие нити или слои, тем не менее должны обладать при весьма быстрых изменениях магнитного поля (определяемого встречающимся в практике измерений значениями $\frac{dI}{dt}$ порядка 10—40 kA/μS) заметным влиянием вихревых токов. Об основных характеристиках регистраторов авторы не сообщили.

В 1932 г. (в лаборатории перенапряжений ВЭИ) в связи с работами по измерению параметров атмосферных разрядов автором были начаты исследования ферромагнитных регистраторов. Дальнейшие исследования моих сотрудников привели к разработке измерительной аппаратуры и созданию методики определения амплитудных значений импульсных токов.

ЭБ "Научное наследие России"

Большая работа, проведенная под руководством автора сотрудниками лаборатории перенапряжений ВЭИ и лабораторией по изучению молнии ЭНИН совместно с исследовательской лабораторией опытного завода пластмасс имени Фрунзе, позволила в дальнейшем освоить тип прессованных регистраторов и организовать их массовый выпуск (1936). До настоящего времени прессованные регистраторы—единственные из применяемых в практических измерениях в СССР.

В качестве магнитных материалов используются окись железа с кобальтом и порошок высококоэрцитивного сплава алюминия с никелем, полученный после раздробления и размола его в шаровых мельницах, тонкостью в 100—200 меш. Прессованные регистраторы механически прочны и удобны для массового производства. Но наряду с достоинствами эти регистраторы имеют и некоторые недостатки, полностью, однако, устранимые выбором в качестве наполнителя соответствующего ферромагнитного материала.

Уменьшение размеров зерен стали и увеличение объема изолирующего материала (что уменьшает реакцию регистраторов на быстрые изменения поля) ведут к уменьшению эффективной магнитной проницаемости, что снижает чувствительность регистратора.

Регистратор представляет собой цилиндрический стержень с диаметром $d = 15$ мм и длиной $l = 50$ мм. Диаметр при установленной длине взят по соображениям прессовки. Естественно, что увеличение отношения $\frac{l}{d}$ отражается благоприятно на качествах регистратора. Детальные исследования свойств регистраторов, произведенные в лаборатории по изучению молнии ЭНИН, позволили получить удовлетворительные характеристики их в отношении основных требований.

3. КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТОМЕТРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ B_0

Для определения B_0 регистратора с 1938 г., по предложению лаборатории по изучению молнии, в Союзе применяется баллистический гальванометр. Этот прибор измеряет количество электричества, протекающее в цепи катушки, включенной в цепь гальванометра, при изменении магнитного потока, сцепляющегося с этой катушкой.

Для определения намагниченности регистратора последний вкладывается в катушку так, чтобы она охватывала некоторую часть регистратора. При быстром выдергивании регистратора из катушки магнитный поток, сцепленный с ее витками, изменяется, что создает в витках катушки электродвижущую силу и импульс тока в цепи гальванометра. Этот импульс тока вызывает кратковременное (баллистическое) отклонение гальванометра, пропорциональное количеству электричества, протекшего в цепи. Количество электричества пропорционально величине магнитного потока испытуемого регистратора. Таким образом, баллистическое отклонение гальванометра (т. е. максимальный отброс зайчика при выдергивании регистратора из катушки) пропорционально величине магнитного потока регистратора.

4. МЕТОДИКА ПОДСЧЕТА И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

а. Апериодические импульсы

В общем случае ось регистратора составляет некоторый угол φ с касательной к окружности радиуса r, проведенной из центра обтекаемого током проводника через регистратор. Тогда напряженность поля

$$H = \frac{I \cos \varphi}{2\pi r} \text{ А/см},$$

или

$$I = \frac{2\pi r H}{\cos \varphi} \text{ А}.$$

ЭБ "Научное наследие России"

Для учета неравномерного распределения поля около проводников (особенно около металлических уголков) и влияния конечных размеров регистраторов на магнитное поле необходимо вводить в формулу поправочные коэффициенты для всех регистраторов, расположенных на различных расстояниях от пути тока молнии. Определять эти коэффициенты лучше всего в лабораторной обстановке, производя испытания большими токами, по амплитуде приближающимися к действительным токам молнии. К сожалению, это не всегда возможно по техническим условиям, и тогда приходится применять модели, более или менее полно отображающие естественные условия. При расположении регистратора вблизи металлического уголка, служащего токоотводом, расстояние R от оси регистратора до оси тока было определено опытным путем в лаборатории при работе с токами до 18.4 kA. Оказалось, что эффективное расстояние R, по которому следует вести расчет, определяется из условия, что весь ток, текущий по уголку, проходит по оси, проходящей через центр тяжести этого уголка. При показаниях магнитометра, пропорциональных величине намагниченности регистратора (что достигается специальной градуировкой его шкалы), между амплитудным значением измеряемого тока, расстоянием R и величиной отклонения может быть установлена зависимость, с помощью которой для заданного диапазона измерений токов легко найти расстояние регистраторов от уголка.

b. Колебательные импульсы

При измерении токов молнии необходимо учитывать возможность действия на регистраторы повторных импульсов разной полярности.

Для анализа влияния на ферромагнитный регистратор различных колебательных импульсов существуют специально разработанные номограммы, построенные в лаборатории для наших регистраторов. Эти данные были использованы при расшифровке всех сделанных в Союзе регистраций токов молнии с разнополярными импульсами.

5. МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕГИСТРАТОРОВ

В последнее время ферромагнитные регистраторы применяются не только для определения амплитудных значений токов молнии, но и служат в качестве регистрирующих элементов в приборах, имеющих назначение фиксировать всю волну тока (фульхронографы) и фронт импульсов тока. Здесь мы рассмотрим все существующие методы.

a. Регистрация амплитудных значений токов молнии

Для установки ферромагнитных регистраторов на линиях передач применяются различного вида устройства, называемые держателями.

Держатели для регистраторов. С целью увеличения диапазона измеряемых токов и возможности расшифровки колебательных разрядов в держателе укрепляются два или три регистратора. Держатель должен давать возможность надежно закреплять в нем регистратор, удобно и быстро производить его монтаж и демонтаж, по возможности предохранять его от атмосферных воздействий и пр. (рис. 36).

Методы отысканий намагниченных токами молнии регистраторов. В Америке для отыскания намагниченных токами молнии регистраторов применяется компас, укрепленный в специальной пластинке, имеющей паз. При обходе линии после грозы регистраторы вынимаются из держателей и вкладываются в паз компасной пластинки. Намагниченный регистратор вызовет отклонение стрелки компаса от ее нормального положения.

В Германии применяется способ, позволяющий установить намагниченность регистратора без снятия его с держателя с помощью установки около регистратора в трех различных положениях компаса, показанием которого выявляется

ЭБ "Научное наследие России"

намагниченность. Здесь также для обнаружения намагниченного регистратора нужно влезать на каждую опору.

Новый метод, значительно упрощающий эксплоатацию регистраторов, был предложен автором. Сущность его заключается в использовании для обнаружения пораженных разрядами опор остаточной намагниченности, возникающей при прохождении тока молнии в железных гвоздях, забиваемых у основания деревянных опор, или в витках железной проволоки, наматываемой вокруг уголков металлических мачт. При этом нет необходимости влезать на опоры.

Проверка намагниченности гвоздей производится поднесением к шляпке гвоздя компаса в двух или трех положениях. Если гвоздь намагничен, то один конец стрелки компаса в зависимости от полярности разряда при всех его положениях будет притянут к шляпке гвоздя. Проверка намагниченности проволоки производится поочередным поднесением компаса к обоим выступающим концам ее.

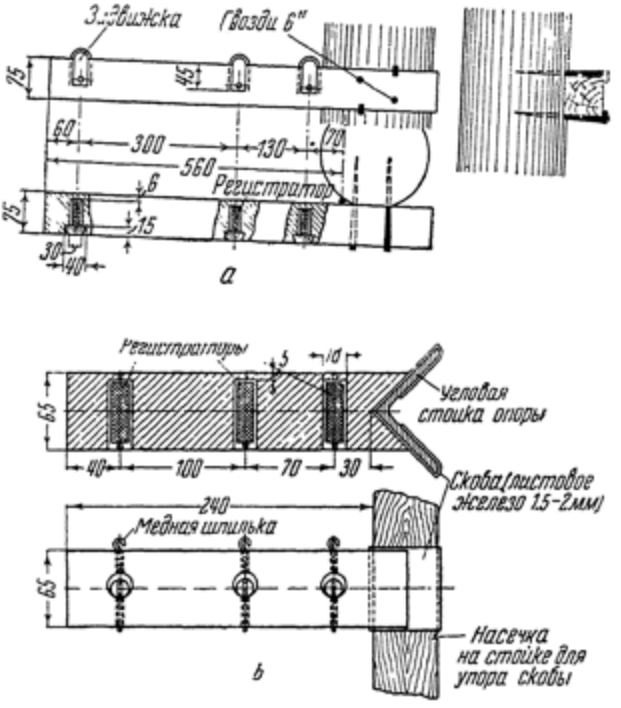


Рис. 36. Держатели, применяемые в СССР:
a—для деревянных опор; *b*—для металлических опор

Установка и эксплоатация регистраторов в СССР. Измерение амплитудных значений токов молнии было начато под руководством автора в ВЭИ и ЭНИН, где в широком масштабе продолжалось А. А. Ламдоном. Большинство опор высоковольтных электропередач и стержневых молниеотводов на подстанциях и линиях было снабжено держателями с тремя регистраторами в каждом. Рост количества внедренных в энергообъединения регистраторов по годам (начиная с 1935 г.) показан на рис. 31.

Весьма интересна установка ферромагнитных регистраторов и статических клидонографов, произведенная группой альпинистов под руководством инж. А. Э. Дольникова на вершинах гор, поднимающихся над уровнем моря на 3500 и до 4400 метров. Впервые среди величественной панорамы гор (рис. 37) появились установки, фиксировавшие разряды молнии в покрытые льдами вершины Главного Кавказского хребта.

b. Фульхронограф

В 1940 г. в Америке был описан новый прибор для приближенной записи формы волны тока молнии. Прибор состоит из алюминиевого диска, на периферии которого имеются пазы. В пазы вкладываются ферромагнитные регистраторы. Диск приводится во вращение моторчиком, при этом укрепленные в пазах магнитики проходят поочередно через магнитное поле, создаваемое двумя катушками, расположенными по обеим сторонам диска и обтекаемыми током молнии. Величина намагниченности пропорциональна силе тока, благодаря чему анализ регистраторов, намагниченных при вращении, дает возможность построить кривую изменения тока по времени.

На периферии диска установлено 400 регистраторов, число оборотов диска равно 3 400 в минуту, в силу чего интервал времени между двумя последователь-

ЭБ "Научное наследие России"

ными заменами регистраторов в поле катушки равен 40 μ S. Применяя одновременно несколько таких приборов, но с различной скоростью вращения дисков, можно получить достаточно полные данные о токовой структуре молнии. Недостаток прибора—сложность расшифровки большого количества ферромагнитных регистраторов.

Рис. 37. Вершины гор Главного Кавказского хребта, на которых производились измерения параметров молнии (стрелки на фотографии указывают на местоположение мачт с расположенными на них приборами). Горы: Кигнидар (слева), Юном-гора (в средине), Ору-Баша (справа). с вершинами, возвышающимися над уровнем моря на ~4360 м. Стрелки указывают на места установки регистрирующих приборов. (Из отчета А. Э. Дольникова).

с. Ферромагнитный метод определения фронта волны

Для измерения длительности фронта токовой волны Вагнер, Мак Канн и Бек предложили использовать ферромагнитные регистраторы, которые при этом используются следующим образом: рамка по типу той, какая применяется для регистрации максимальной крутизны, замеряемой статическим клидонографом, включается на контур, состоящий из трех параллельных цепей. Каждая цепь содержит омическое сопротивление R и катушку с самоиндукцией L. Максимальный ток, фиксируемый регистратором в определенном диапазоне, пропорционален с р е д н е й крутизне нарастания токовой волны. Разные отношения R/L, подобранные в трех цепях, позволяют получать максимальное намагничение регистраторов, помещаемых в катушки, за разное время T, и по результатам намагниченности судить о длительности фронта волны тока. Метод этот дает лишь весьма ориентировочные результаты и с теоретической стороны мало освещен. Применение описанного регистратора длин фронта дало пока очень мало замеров, отличающихся к тому же малой точностью.

Е. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ

1. РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ

Измерение градиентов электрического поля атмосферы и их изменений весьма важно для изучения механизма грозовых разрядов и их воздействия на сооружения.

ЭБ "Научное наследие России"

Измерение градиентов производится различными методами, среди которых основными являются следующие.

1. Применение различного вида коллекторов для определения потенциала в определенной точке, находящейся на некоторой высоте над землей. Обычно измерение производится электростатическим вольтметром, один полюс которого заземлен. Делением замеренной разности потенциалов на высоту устанавливается средний градиент электрического поля.

В зависимости от типа коллектора скорость приобретения импотенциала данной точки пространства варьирует в пределах от нескольких секунд до нескольких минут. Таким образом, эти устройства могут служить лишь для регистрации весьма медленных измерений электрического поля атмосферы.

2. Измерение количества электричества, индуцированного на проводнике (в качестве которого, например, Вильсон применял шар, поднятый над землей), находящемся в электрическом поле. Прибором для измерения протекающего при изменении поля заряда служит капиллярный электрометр. Один конец электрометра, представляющего собой капиллярную стеклянную трубку, заполненную ртутью и спиртом с небольшой примесью серной кислоты, присоединен к шару, радиусом R, поднятому над землей на высоту h, в см. Другой конец капилляра заземлен. Величина заряда Q, индуцируемого на шаре, определяется по формуле

$$Q = Eh4\pi R\varepsilon_0,$$

где E—величина градиента электрического поля, ε_0—диэлектрическая постоянная воздуха, равная $\frac{1 \cdot 10^{-11}}{36\pi} \frac{\text{A sec}}{\text{V cm}}$.

При изменении напряженности поля через электрометр протекает некоторое пропорциональное количество электричества. Под действием протекающих через капилляр зарядов мениск ртути смещается; это смещение регистрируется при помощи фотографической установки на ленте.

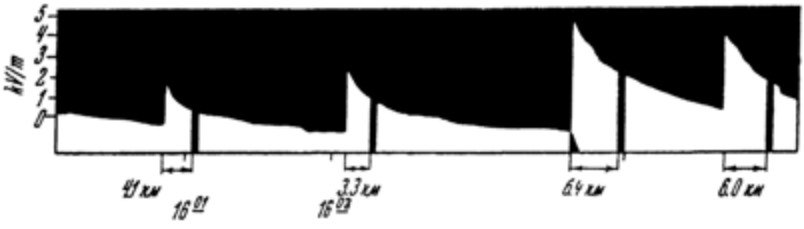


Рис. 38. Типовая регистрация изменений градиентов электрического поля капиллярным электрометром

Ввиду того что изменения мениска имеют весьма малую величину, для их регистрации применяется микроскоп.

Опускание шара на землю и его экранирование от поля тучи дают возможность контролировать нулевое положение мениска, которое может получать некоторое смещение за счет электрического тока в воздухе, сообщающего шару заряды.

В установке для измерения градиентов поля, примененной Шонландом и Крайбом, высота подъема шара 5 м, диаметр шара 30.6 см. Чувствительность установки позволяет получать смещение на фотобумаге на 1 мм при изменении градиента поля на 127/V м (что соответствует $1.03 \cdot 10^{-8}$ С, протекающих через капилляр).

На рис. 38 изображена типичная запись на фотобумаге, полученная (Вормелль) от капиллярного электрометра. Регистрация изменений градиентов электрического поля производилась при грозе, удаленной на расстояние 3—6 км.

Как видно, предразрядные градиенты поля имели все (за исключением одного последнего разряда) отрицательную величину около 1 000 V/м. Происшедший около 16.01 разряд дал положительное изменение градиента (примерно до 2000V/м). Черные вертикальные полосы на белом фоне соответствуют моменту

ЭБ "Научное наследие России"

прихода к месту регистрации грома. Кроме основных четырех сильных изменений поля во время регистрации имел место ряд слабых изменений, отмеченных прибором в виде отдельных горбинок на плавных кривых восстановления поля. Восстановление электрического поля тучи после разряда занимает доли минуты.

Описанный метод позволил накопить значительное количество материала, на основании которого сделаны заключения о распределении зарядов в тучах.

Кривая восстановления потенциала тучи представляет собой хорошо известную функцию увеличения напряжения или заряда на конденсаторе, приключенного в момент $t=0$ к источнику постоянного напряжения через сопротивление, а именно:

$$Q = Q_0 (1 - e^{-at}).$$

Процессами, замедляющими заряд тучи, могут быть:

1. Уменьшение скорости разделения противоположно заряженных капель дождя и частиц тучи, влекомых ветром к одноименно заряженным областям.

2. Появление ионизационного тока, стремящегося нейтрализовать заряды тучи. Оба фактора возрастают при усилении поля между отдельными областями тучи. Наибольшая скорость заряда тучи будет тотчас же после окончания разряда молнии. В это время ($t=0$) указанные факторы еще не действуют, и скорость восстановления поля тучи указывает на величину зарядного тока $I_з$, развиваемого «тучевым генератором», т. е. процессами разделения зарядов. Анализ сделанных Вильсоном регистраций показал, что $I_з$ ток достигает в среднем нескольких ампер. В отдельных случаях ток заряда, по данным регистраций восстановления поля, может быть оценен в несколько раз большей величиной, достигая в пределе десятков ампер. Полный ток в туче должен быть больше за счет других электрических процессов.

Ввиду весьма сложного электрического строения тучи метод электрометра может давать более или менее надежные результаты лишь при одновременной регистрации изменения градиентов в двух или трех достаточно удаленных друг от друга местах. Регистрация быстрых изменений электрического поля, сопутствующих грозовому разряду, требует соответствующей аппаратуры. Наибольшее распространение для этой цели получили клидонографы и катодный осциллограф. При изменениях в распределении зарядов в туче индуцированные заряды на антенне, соединенной с землей через сопротивление, проявляются в виде изменяющихся напряжений, регистрация которых производится названными приборами.

3. В Англии применяется прибор, который можно назвать коронным разрядником. Принцип его действия заключается в том, что металлическое острие, установленное на высоте 9—11 м и соединенное электрически с землей, под действием атмосферного поля коронирует. Ток (i) короны, величина которого меняется в зависимости от напряженности поля (E), регистрируется шлейфовым осциллографом. Таким путем устанавливается связь $i=f(E)$.

Хотя прибор в последние годы получил хорошее конструктивное оформление, теория его действия мало изучена, и не установлена надежная градуировка, что особенно важно ввиду сложности явления коронного разряда.

4. Регистрация индуцированных напряжений производится еще таким образом. Горизонтально подвешенный над землей провод соединен с землей через некоторый импеданц, с которого напряжение подводится к регистрирующему прибору (например, к отклоняющим пластинам осциллографа). Характер импеданца и его величина определяют связь между регистрируемым напряжением и видом получаемой записи.

При условии, что антенна A (рис. 39) изолирована от земли (импеданц $Z=\infty$), прибор (катодный осциллограф) будет регистрировать потенциал, создаваемый в атмосфере грозовой тучей. На практике импеданцем обычно служат омические сопротивления, включаемые между антенной и землей, и емкости, шунтирующие сопротивления. При отсутствии изменений напряженности поля потенциал антенны, благодаря стеканию с нее зарядов, приводится к нулю.

При нарушении равновесия электрического поля на антенне появляется некоторый потенциал.

ЭБ "Научное наследие России"

В общем виде потенциал U_A горизонтальной антенны, подвешенной на высоте h и находящейся в электрическом поле тучи напряженности g, относительно земли определится соотношением

$$U_A = gh + \frac{Q}{C}, \tag{1}$$

где Q—заряд, индуцированный на антенне, а C—емкость антенны (см. подробнее главу VII об индуцированных напряжениях).

Изменение напряженности атмосферного поля g влечет за собой изменение зарядов Q на антенне, ввиду чего схему замещения, приводящую к уравнению (1), можно представить как последовательное включение емкости C и импеданца Z на напряжение gh.

Схема импеданца приемного конца антенны при включении емкостной нагрузки, например отклоняющих пластин катодного осциллографа или клидонографа, показана на рис. 40. Сопротивление R_1 выполняет роль демпфера высокочастотных колебаний, которые могли бы находить себе путь на землю через конденсатор C_0 и тем самым искажать запись основного явления. Практически величина демпфирующего сопротивления определяется величиной волнового сопротивления антенны. Согласно схеме рис. 40, потенциал U_0 (или, вернее, напряжение на импеданце Z) определяется формулой

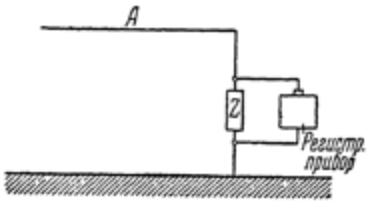


Рис. 39. Схема измерения с антенной A

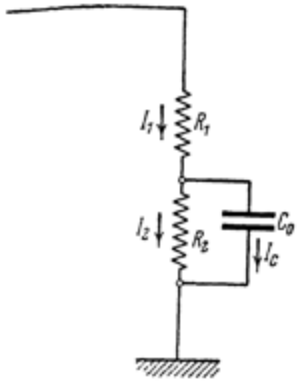


Рис. 40. Схема импеданца приемного конца антенны

$$U_A = I_1R_1 + I_2R_2 = I_1R_1 + \frac{1}{C_0}\int I_c\,dt = I_1R_1 + \frac{U_0}{C_0}. \tag{2}$$

Искомой зависимостью будет изменение напряжения на конденсаторе C_0 (которым могут быть, например, отклоняющие пластины катодного осциллографа) $U_0 = f(t)$ от изменения напряженности электрического поля $g = \varphi(t)$. Совместное решение уравнений (1) и (2) приводит к формуле

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{h}\left\{R_1C_0\frac{d^2U_0}{dt^2} + \left(\frac{C_0 + C}{C} + \frac{R_1}{R_2}\right)\frac{dU_0}{dt} + \frac{1}{CR_2}U_0\right\}. \tag{3}$$

Катодный осциллограф записывает изменение $U = f(t)$. Как видно из уравнения (3), для определения изменения напряженности поля по времени в общем нужна сложная обработка полученной записи, которая заключается в следующем. Из осциллограммы графическим построением определяются величины $\frac{dU_0}{dt}$ и $\frac{d^2U_0}{dt^2}$ в функции времени. По умножении полученных функций на их коэффициенты из уравнения (3) и добавления члена $\frac{U_0}{R_2C}$ получается кривая $\frac{dg}{dt} = f(t)$, следовательно, для определения $g = f(t)$ необходимо произвести интегрирование полученной графической зависимости.

Здесь следует отметить, что получающееся путем интегрирования решение для $g = f(t)$ определяет функцию g с точностью до некоторой постоянной; другими словами, положение нулевой линии осциллограммы остается неопределенным.

Так как в действительности величина C_0 значительно меньше C, а сопротивление $R_2 \ll R_1$, уравнение (3) может быть переписано таким образом:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{h}\left(R_1C_0\frac{d^2U_0}{dt^2} + \frac{dU_0}{dt} + \frac{1}{CR_2}U_0\right). \tag{4}$$

ЭБ "Научное наследие России"

Ввиду малой абсолютной величины C_0 при относительно пологих волнах, с которыми приходится иметь дело при регистрации атмосферных разрядов, членом $R_1 C_0 \frac{d^2U_0}{dt^2}$ можно пренебречь, и уравнение (4) принимает вид:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{h}\left(\frac{dU_0}{dt} + \frac{1}{CR_2}U_0\right). \qquad (5)$$

Для наглядного представления о связи между формой изменения E и U_0 рассмотрим два примера.

1. Пусть напряженность электрического поля развивающейся молнии изменяется по закону

$$g = E = E_0(1 - e^{-\alpha t}). \qquad (6)$$

Зависимость $E=f(t)$, выраженная уравнением (6), показана на рис. 41 кривой a.

Подстановка (6) в (5) дает

$$hE_0\alpha e^{-\alpha t} = \frac{dU_0}{dt} + \frac{U_0}{CR_2}.$$

Решение этого дифференциального уравнения относительно U_0 приводит к уравнению

$$U_0 = \frac{hE_0\alpha}{p-\alpha}e^{-\alpha t} + Ke^{-pt}, \qquad (7)$$

где $p = \frac{1}{R_2C}$. При $t=0$, $U_0=0$ определяем константу K:

$$0 = \frac{hE_0\alpha}{p-\alpha} + K;$$

$$K = -\frac{hE_0\alpha}{p-\alpha}.$$

Уравнение (7) принимает вид:

$$U_0 = \frac{hE_0\alpha}{p-\alpha}(e^{-\alpha t} - e^{-pt}). \qquad (8)$$

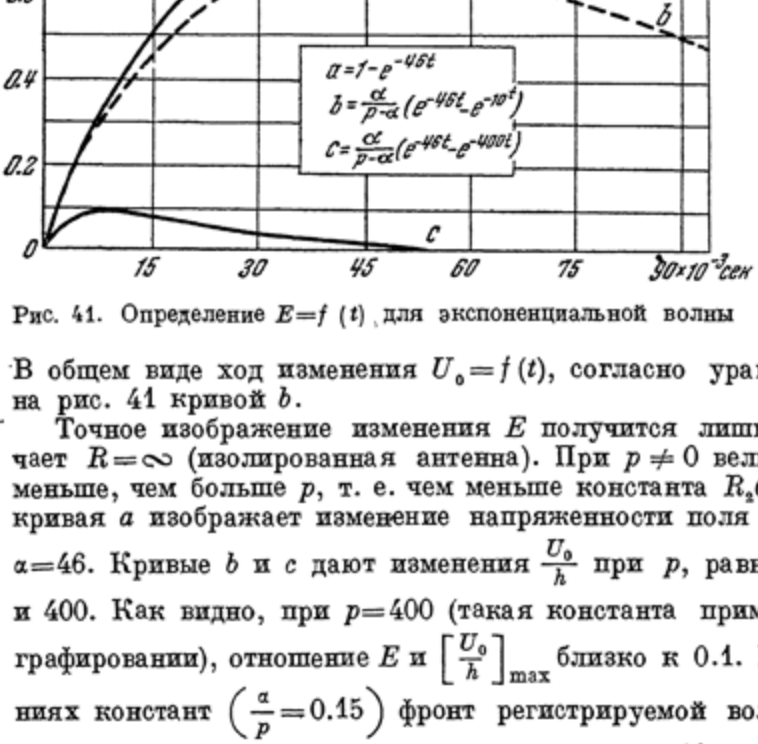


Рис. 41. Определение $E=f(t)$ для экспоненциальной волны

В общем виде ход изменения $U_0=f(t)$, согласно уравнению (8), изображен на рис. 41 кривой b.

Точное изображение изменения E получится лишь при $p=0$, что означает $R=\infty$ (изолированная антенна). При $p \neq 0$ величина U_{max} будет тем меньше, чем больше p, т. е. чем меньше константа R_2C антенны. На рис. 41 кривая a изображает изменение напряженности поля по уравнению (6) при $\alpha=46$. Кривые b и c дают изменения $\frac{U_0}{h}$ при p, равных соответственно 10 и 400. Как видно, при $p=400$ (такая константа применялась при осциллографировании), отношение E и $\left[\frac{U_0}{h}\right]_{max}$ близко к 0.1. При данных соотношениях констант $\left(\frac{\alpha}{p}=0.15\right)$ фронт регистрируемой волны напряжения значительно сглажен, а амплитуда составляет лишь 10% от происшедшего изменения напряженности. Эти соображения имеют место при неблагоприятных, с точки зрения регистрации условиях.

Дифференцирование U_0, сложение U_0 с ее производной и последующая интеграция образовавшейся суммы приведут к выражению E, взятому в качестве исходного.

ЭБ "Научное наследие России"

2. Пусть напряженность нарастает равномерно (рис. 42).

$$E = t \cdot \operatorname{tg}\varphi = at. \tag{9}$$

Подстановка (9) в (5) приводит к выражению для U_0.

$$U_0 = \frac{\operatorname{tg}\varphi \cdot h}{p}(1 - e^{-pt}). \tag{10}$$

На рис. 42 изображены кривые b и c, которые регистрируются осциллографом при константах антенны p, соответственно равных 10 и 400.

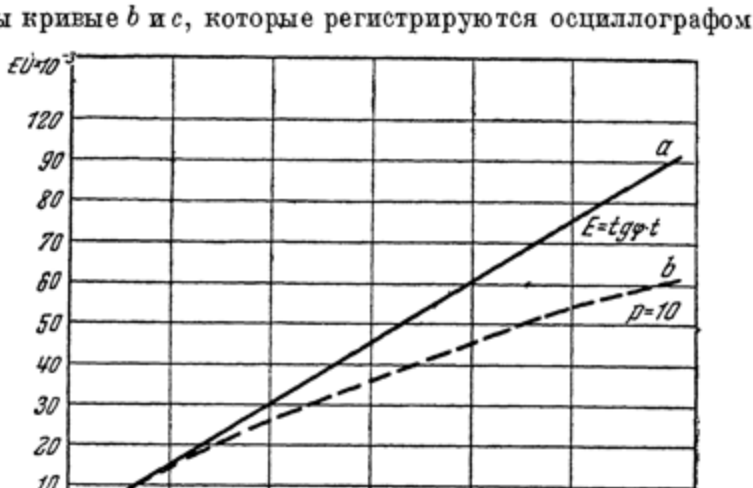


Рис. 42. Определение $E=f(t)$ для косоугольной волны

В общем случае для получения кривой $E=f(t)$ по осциллограмме при условиях, выраженных уравнением (5), необходимо произвести следующие действия:

1) продифференцировать графически кривую U_0, учтя при этом множитель $\frac{1}{h}$;

2) сложить полученную кривую с кривой (осциллограммой) $U_0=\varphi(t)$, учтя множитель U_0 в уравнении (5);

3) произвести интегрирование полученной суммы.

2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПРИ УДАЛЕНИИ ИХ ОТ МЕСТА ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Рассмотрение вопроса о форме волн, индуцируемых на антенне разрядами, различно удаленными от места регистрации, показывает, что с изменением расстояния молнии от антенны формы кривых напряжений изменяются. Действительно, сложный процесс развития молнии должен обусловливать весьма различные электромагнитные процессы в окружающем пространстве. Возникающие поля, трансформируясь при движении к приемнику (в данном случае к антеннам), будут давать записи, из которых только путем специального анализа могут быть получены данные о первичном процессе.

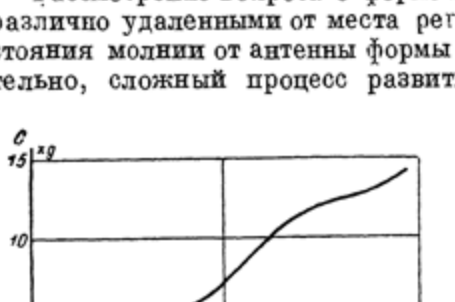


Рис. 43а. Изменение $Q=f(t)$, положенное в основу расчета кривых на рис. 43

В литературе известны многие попытки анализа зарегистрированных явлений на основе тех или иных экспериментальных возможностей исследователя и его теоретических представлений о механизме грозового разряда.

Согласно современным представлениям, по достижении лидером земли начинается более интенсивный и бурный процесс, связанный с большими токами и быстрыми их изменениями. Для ориентировки в вопросе об образовании электромагнитных полей в этой второй части процесса разряда (главный канал, см. главу V) можно воспользоваться теорией диполя. Анализ задачи

ЭБ "Научное наследие России"

при этом предположении приводит к уравнению, которое в электромагнитных единицах напишется в следующем виде[1]:

$$-E_z = E_0 = 2h\left[\frac{9\cdot 10^{10}Q}{R^3} + \frac{3\cdot 10^5}{R^2}\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{R}\frac{d^2Q}{dt^2}\right]10^{-7}. \qquad (11)$$

Здесь R—расстояние от молнии до рассматриваемой точки пространства.

Для анализа уравнения приведем один из графиков, построенных Нориндером. Полагая в основу расчетов кривую изменения $Q = f(t)$ (рис. 43 а), в свою очередь построенную интегрированием осциллограмм тока, измеренного в рамках катодным осциллографом, Нориндер, пользуясь уравнением (11), получил кривые, изображенные на рис. 43. Пунктирные кривые выражают отдельные члены уравнения, а сплошная кривая Σ получается суммированием трех кривых *1*, *2* и *3* [цифры соответствуют порядку членов в (11)].

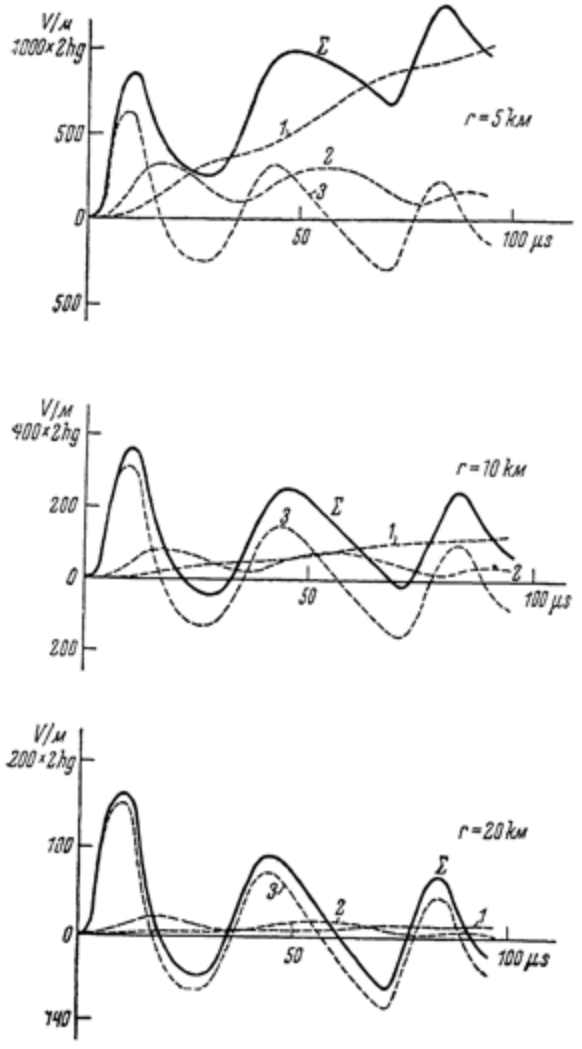


Рис. 43. Изменения напряженности электрического поля в зависимости от расстояния регистрирующего прибора от места разряда

Как видно, с увеличением R меняется форма волны напряженности. Из квазистационарной формы электромагнитный импульс трансформируется в колебательный. Аналогичная картина получается и при другом принятом законе изменения $Q = f(t)$.

В качестве усредненной кривой $Q = f(t)$ Нориндер берет изменение количества электричества, происходящее в течение времени порядка 100 μS.

3. РАСШИФРОВКА КАТОДНЫХ ОСЦИЛЛОГРАММ И КЛИДОНОГРАММ

Для иллюстрации методов расшифровки полученных регистраций рассмотрим стилизованную осциллограмму рис. 44 и регистрацию, сделанную быстро вращающимся клидонографом (рис. 45).

Записанный разряд произошел на расстоянии L км от лаборатории, длина канала молнии не превышала H км, причем $L > H$, и при анализе осциллограммы, следовательно, можно ориентироваться на рассмотренный выше анализ. Включение осциллографа произошло в момент t_1 при некоторой конечной напряженности поля E (и соответствующем ей потенциале U_1) на возбуждающей искровое реле антенне. Анализ осциллограмм, записанных одновременно тремя осциллографами, и изучение схемы регистрации показывают, что время t_0—t_1, соответствующее подъему напряжения на антенне от 0 до U_1, обычно не превышает 1 000—1 500 μS.

Увеличение потенциала в течение времени t_0—t_2 указывает на развитие лидера. В момент t_2 начинается спад потенциала, однако более замедленный, чем это имело бы место при полном прекращении нарастания поля. В этом слу-

[1] В такой форме уравнение рассматривалось Нориндером.

ЭБ "Научное наследие России"

чае спад потенциала происходил бы со скоростью, определяемой константой антенны. Кривой спада служила бы линия, проведенная на рис. 44 пунктиром. После замедленного роста напряженности с момента t_3 наступает быстрый подъем потенциала, что соответствует еще более быстрому росту напряженности. Последнее обстоятельство может быть объяснено быстрым приближением лидера к земле; это подтверждается тем, что плавный рост потенциала переходит в скачок (момент, который приписывается нами образованию главного канала). Длительность главного канала может быть измерена лишь приближенно ввиду малости промежутка t_4—t_5 при принятой в осциллографе временной развертке (приблизительно 500 μS/мм). Вслед за развитием главного канала происходит дальнейшее увеличение напряженности поля, до момента t_5, которое может быть обусловлено вытеканием остаточных зарядов разрядившегося объема тучи в сформировавшийся канал молнии. Начиная с

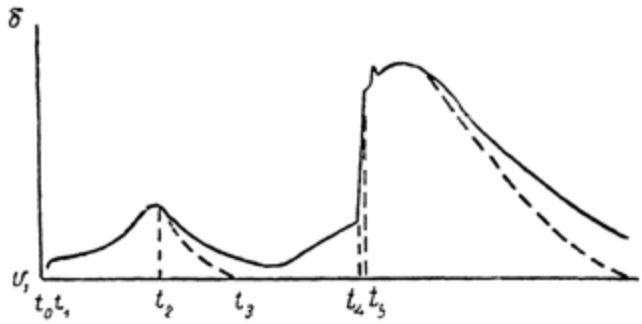
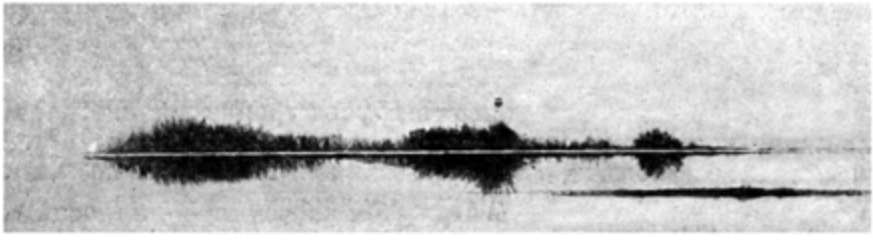
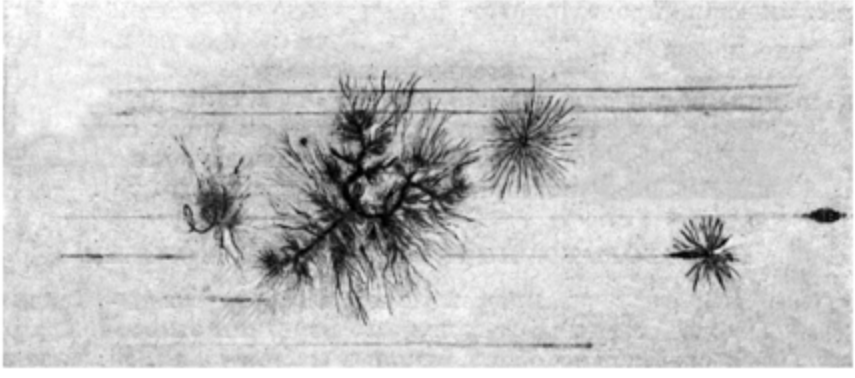


Рис. 44. Типовая запись осциллографа с горячим катодо-изменением потенциала на антенне



a



b

Рис. 45. Типовые клидонограммы от волн, индуцированных на антеннах молнией

момента t_5 рост напряженности прекращается, ибо спад потенциала на осциллограмме идет по экспоненциальному закону с константой, определяемой величиной $R_0 C_0$, где R_0 — сопротивление, через которое заземлена антенна, имеющая емкость C^0.

Полная запись разряда показана на рис. 44а (см. вклейку).

На клидонограмме, изображенной на рис. 45, имеется несколько отдельных лихтенберговских фигур, имеющих четко выраженные центры, вокруг которых располагаются ветки, а одна фигура имеет удлиненный вид.

ЭБ "Научное наследие России"

Клидонограф, подключенный к антенне, заземленной через сопротивление, регистрирует, так же как и катодный осциллограф, лишь относительно быстрые изменения электрического поля. Клидонограф имеет меньшую «начальную чувствительность» (под которой здесь понимается число kV, необходимых для образования видимой фигуры). Сопротивление, заземляющее антенну, к которой присоединялся клидонограф, меньше сопротивления антенны, питающей осциллограф. Ввиду этого предел скорости изменений поля $\frac{\Delta E}{\Delta t}$, еще улавливаемых клидонографом, лежит выше, чем у осциллографа.

Определить $\left[\frac{\Delta E}{\Delta t}\right]_{\max}$ можно таким образом.

При равномерном нарастании напряженности, т. е. при $E=at$, изменение потенциала на антенне (с высотой подвеса h) определяется по формуле

$$U_0=\frac{ah}{p_0}(1-e^{-p_0t}),$$

где $p_0=\frac{1}{R_0C_0}$.

При достаточно большом t_1,

$$U_0=\frac{ah}{p_0}(1-e^{-p_0t_1})\approx\frac{ah}{p_0}.$$

Подставляя в полученное выражение $h=15$ м, $p_0=\frac{9\cdot10^{11}}{10^6\cdot500}=1\,800$ и принимая для U_0 значение начальной чувствительности клидонографа, равное 3 kV, найдем

$$a=\frac{\Delta E}{\Delta t}=\frac{3\cdot1800}{15}=360\ \text{kV/сек.}^{-1}.$$

Аналогично определяется, что для начала регистрации осциллографом необходимо изменение напряженности поля со скоростью 3.2 kV в секунду. Другими словами, клидонограф может дать запись, если напряженность поля изменилась не меньше, чем на 0.2 kV в 600 μS. При этом значении $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ на осциллограмме получаются весьма крутые взбросы, приписываемые нами главным каналам.

Таким образом, как и предполагалось ранее, отдельные фигуры на клидонограмме отображают самостоятельные импульсы.

Фигуры, имеющие продолговатую форму, вроде отмеченной на рис. 45 буквой C, очевидно, помимо части, соответствующей главному каналу, имеют элементы, указывающие на более длительные, но вместе с тем достаточно быстрые (для регистрации) изменения поля. В ряде случаев такие быстрые изменения напряженности поля регистрируются клидонографом перед главным каналом. Такая регистрация описывает процессы восстановления поля тучи аналогично тому, как это отмечается капиллярным электрометром (стр. 53).

F. ЛАБОРАТОРИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ МОЛНИИ

По мере совершенствования измерительной аппаратуры в различных странах, с целью наиболее систематического и полного изучения атмосферных разрядов, стали создаваться специально оборудованные лаборатории. Вначале эти лаборатории делались в вагонах или особых фургонах и потому могли перевозиться в различные места.

Первая лаборатория, оборудованная специально для систематического изучения молнии, была устроена в Швеции в 1925 г. Норндером, применявшим для этих целей регистрации катодный осциллограф. Ему же, повидимому, принадлежит и первая запись атмосферных волн напряжений, зарегистрированных на конце 20 kV линии передач. Несколько позднее специальные исследовательские лаборатории были построены в Америке, где они в течение ряда лет эксплоатировались в различных электросистемах. Вскоре полевые лаборатории по изучению молнии начали организовываться и в других странах, и в настоящее время во всем мире существует большое количество прекрасно оборудованных и интенсивно работающих лабораторий.

ЭБ "Научное наследие России"

В СССР первые полевые лаборатории были организованы в 1932 г. ВЭИ по проекту и под руководством автора. Лаборатории имели целью изучение в линиях электропередач действий перенапряжений атмосферного происхождения и внутренних (коммутационных и дуговых). Опыты позволили получить ряд данных об индуцированных перенапряжениях, вызванных грозовыми разрядами. Клидонографы, установленные на линиях электропередач 35 kV, дали материал о величине коммутационных и прочих внутренних перенапряжений. Наиболее подробное и систематическое изучение молнии начинается в СССР с 1935—1936 гг. ЭНИН совместно с ВЭИ. Организуется ряд полевых, а позднее горных лабораторий, оснащенных наиболее современной аппаратурой. В 1935 г. (впервые в истории исследований молнии) автором разрабатывается, а в 1936 г. осуществляется схема для у л а в л и в а н и я прямых ударов молнии.

1. ПОДМОСКОВНАЯ ПОЛЕВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ

В 1936 г. под Москвой автором была организована полевая лаборатория, основной особенностью которой было наличие молниеотвода с высотой, доходившей до 1 000 м.

В основу схемы измерения грозовых явлений были положены следующие принципы:

1) регистрация каждого разряда должна производиться несколькими различными аппаратами с целью полного описания происходящего явления;

2) производится регистрация всех разрядов, происходящих в зоне приема существующих в лаборатории приборов;

3) схема выполняется с расчетом регистрации как индуцированных напряжений, так и прямых ударов;

4) аппаратура должна регистрировать все наиболее важные параметры грозового разряда.

Основными измерительными приборами и аппаратами в лаборатории были: два катодных осциллографа системы ПАКО-8, два быстро вращающихся клидонографа, одна камера типа Бойса, оригинальной конструкции, фотоаппараты системы «лейка», ряд реле и вспомогательных схем.

Кроме приборов, предназначенных для непосредственного исследования молнии, имелись еще барограф, барометр-анероид, гигрограф и термометры. Показания аппаратов фиксировались ежесуточно по три раза в особом дневнике.

Катодные осциллографы питались от одной высоковольтной установки и имели различные временные развертки. Один осциллограф имел развертку около 180, а другой 65 μS. Приборы имели также различную чувствительность: один 62, а другой 78 V/мм.

Для синхронного включения катодных осциллографов с осциллографируемыми явлениями во время грозы применялось световое реле.

Все установки полевой лаборатории были размещены в трех передвижных фургонах, размерами примерно $4 \times 2 \times 3$ м³ каждый. Общий вид полевой лаборатории изображен на рис. 46. Фургоны обиты листовым железом в целях устранения влияния электростатических и быстро меняющихся электромагнитных полей и предотвращения опасности для жизни сотрудников, работающих внутри фургонов во время грозы.

Измерительные приборы и аппаратура размещены в двух фургонах, соединенных между собой тамбуром. В одном из них находилась высоковольтная установка для питания разрядных трубок катодных осциллографов, два катодных осциллографа, быстро вращающийся клидонограф, зажигающее световое реле, распределительный щиток от передвижной электрической станции, переключательный щиток для переключения осциллографов от антенны к молниеприемнику и сигнальные устройства от центрального поста, где помещался диспетчер и откуда производились наблюдения во время грозы и делались распоряжения о необходимости соответствующих манипуляций с аппаратурой. В другом фургоне была устроена фотокомната со всем необходимым

ЭБ "Научное наследие России"

оборудованием. Кроме того, в этом же помещении был установлен второй быстро вращающийся клидонограф. В третьем фургоне помещалась специальная передвижная электрическая станция. Передвижная электрическая станция снабжала энергией все приборы и давала возможность бесперебойной эксплоатации аппаратуры при грозах.

Для снабжения водой на специальной вышке высотой в 6 м, вблизи фургонов, были установлены баки общей емкостью около 100 ведер. Вода накачивалась из реки центробежным насосом.

На водонапорной вышке помещались вращающиеся фотокамеры с фотографом и диспетчерский пост, с которого во время грозы производилось управление всем оборудованием.

С целью улучшения распределения потенциала по поверхности земли при ударе молнии на территории лагеря было устроено специальное заземление. Все фургоны и водонапорная вышка помещались внутри заземленного кольца.

Рис. 46. Общий вид полевой лаборатории под Москвой

Металлические обшивки помещений и водонапорной башни были многократно присоединены к заземляющему устройству. Молниеприемник, находящийся на расстоянии 50 м от фургонов, имеет собственное заземляющее устройство в виде труб и протяженных заземлителей, соединяющих эти трубы с общим заземлителем. Эта система способствовала отводу молнии в землю и возможному уменьшению потенциала в месте перехода тока в почву. Благоприятные условия грунта (глинистая почва и близость реки) облегчили создание малых сопротивлений.

Для защиты полевой лаборатории от прямых ударов молнии были установлены четыре стержневых молниеотвода, высотой 15 м, токоотводы которых присоединялись к общему заземлению.

Естественно, что наиболее полную защиту давал хорошо заземленный молниеприемник, высотой 500—800 м. Установка же молниеотводов обеспечивала защиту и при отсутствии этого специального очень высокого молниеприемника. Для увеличения вероятности ударов молнии в определенную точку надлежало соорудить молниеприемник очень большой высоты. Наиболее целесообразным в этом смысле был бы змей, примененный еще Франклином для изучения атмосферного электричества, либо шары-зонды, поднятые на металлических тросах. Близкое знакомство с условиями запуска змея показало, что ввиду большой зависимости подъема змея от силы ветра для наших целей он мало пригоден. Кроме того, недостаточность его подъемной силы не дает

ЭБ "Научное наследие России"

возможности поднимать трос нужного сечения, а тонкие тросы после каждого удара молнии должны сгорать. Подъем же новых змеев во время грозы опасен для жизни.

Наиболее удобными поэтому оказались шары-зонды. Ток молнии от троса идет к земле через безиндукционный шунт, служащий для получения напряжения, подводимого подземным кабелем к отклоняющим пластинам катодных осциллографов и клидонографа.

Шунт—один из наиболее ответственных элементов полевой лаборатории. Для того чтобы передать осциллографируемое явление в неискаженном виде, шунт должен иметь чисто омическое сопротивление или, вернее, минимально возможное индуктивное сопротивление.

Шунт состоял из 20 константановых, бифилярно свитых проводников, концы которых были припаяны к двум латунным шайбам, изолированным тонкими эбонитовыми пластинками.

Расчет шунта производился для условий измерения токов с амплитудным значением 100 000 А и длительностью в 100 μS.

Омическое сопротивление шунта было равно 0.03 Ω, при весьма малой индуктивности. Напряжение от шунта, как указывалось раньше, посредством заземленного двужильного кабеля длиной 170 м подводилось к отклоняющим пластинам осциллографов. Для отвода напряжения к клидонографу последовательно с этим шунтом соединен другой, сопротивление которого 0.3 Ω. Таким образом, при токах молнии порядка 100 000 А напряжение на клидонографе должно было достигать 30 kV. От этого шунта напряжение подводилось к лаборатории также при помощи заземленного двужильного кабеля длиной 50 м, причем по одной жиле напряжение подавалось к клидонографу, а другая жила служила для возбуждения светового реле в момент прохождения тока по шунтам молниеприемника.

Чтобы устранить колебания в кабеле, вызываемые отраженными волнами, на конце каждой жилы включалось сопротивление, равное волновому сопротивлению кабеля. Для увеличения диапазона токов, регистрируемых катодным осциллографом, можно применять шунты с зависимой от протекающего через них тока характеристикой. Материалом для таких шунтов служит тирит.

Практическая реализация измерительной схемы связана с целым рядом трудностей, из которых важнейшие таковы.

1. Громадный диапазон изменений электрических характеристик изучаемого явления; так, амплитуда тока может колебаться минимум в 400÷500 раз, а длительность всего разряда превышает длительность важнейших его элементов — отдельных импульсов тока — в $10^4 \div 10^5$ раз.

При таких условиях регистрации естественным решением задачи является одновременное применение нескольких (чаще двух) приборов с различными характеристиками. Обычно один осциллограф регистрирует с медленной временной разверткой небольшие сравнительно токи, а другой, дающий быструю развертку, предназначен для записи наибольших токов, появляющихся в течение разряда. Опыт оправдал применение такой схемы.

2. Влияние на записываемый импульс и катодный луч электромагнитных полей, возникающих при близких ударах молнии. Очищение осциллограммы от паразитных влияний требует много внимания и умения экспериментатора.

3. Создание шунта для пропуска тока молнии, с которого напряжение подводится к пластинам осциллографа. Шунт должен обладать достаточно солидными размерами и вместе с тем быть по возможности мало индуктивным.

4. Полная автоматизация процесса регистрации разряда и быстрая подготовка к следующей записи.

Создание высочайшего молниеприемника и разработка схемы регистрации позволили впервые в истории исследования молнии получить катодно-осциллографические записи токов прямых ударов молнии в 1936 г.

ЭБ "Научное наследие России"

Для измерения напряженности поля и величины индуцированных напряжений во время отдаленных гроз были использованы антенны, одна высотой 15 м и другая 10 м. Обе антенны укреплялись на одних и тех же мачтах. Кроме того, для зажиганий светового реле при дальних грозах на высоте 10 м устанавливалась третья антенна. Длина первых двух антенн равнялась 100 м, длина третьей 50 м. Общая схема измерений приведена на рис. 47.

К верхней антенне (т. е. к антенне высотой 15 м) включался быстро вращающийся клидонограф, который записывал величину индуктированного напряжения, число последовательных импульсов, полярность, время полного разряда и время между отдельными импульсами. К нижней антенне (высотой 10 м) включались катодные осциллографы (рис. 47).

Схема регистрации индуцированных на антенне напряжений катодным осциллографом применялась для аналогичных целей Нориндером, анализировавшим в своих исследованиях различные условия ее работы. При помощи этих антенн, в зависимости от величины измерительного сопротивления и емкости антенн, может быть измерено либо изменение напряженности поля по времени $\left[\frac{dE}{dt} = f(t)\right]$, путем интегрирования полученных осциллограмм, либо напряженность поля в зависимости от времени $\left[\frac{dE}{dt} = f(t)\right]$.

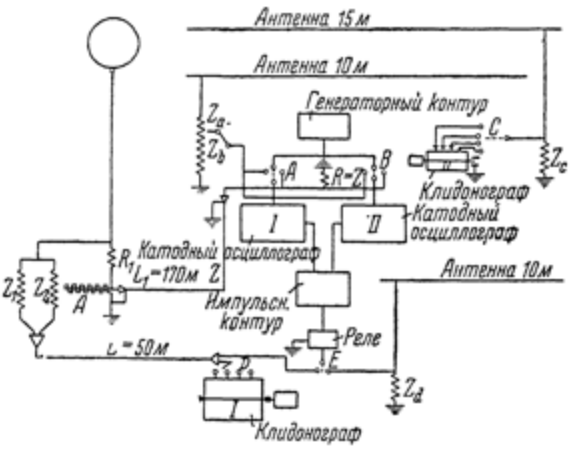


Рис. 47. Общая схема включения регистрирующей аппаратуры в подмосковной лаборатории

В последнем случае полученные осциллограммы дают непосредственно изменения напряженности поля в функции времени.

В наших исследованиях применялись оба метода. В качестве демпфирующего сопротивления принималось 500 Ω, а в качестве измерительного сопротивления, при одном методе регистрации $\left[\frac{dE}{dt} = f(t)\right]$, 1840, а при другом методе регистрации $[E = f(t)]$, 20 000 Ω.

Следует иметь в виду, что при измерениях этими методами приведенные формулы учитывают лишь напряженности поля, вызванные электростатической индукцией; изменения потенциалов, вызванные электромагнитной индукцией, не учитываются. При очень близком от антенны ударе молнии, в зависимости от величины тока и его крутизны, напряжения и градиенты могут быть значительными. Пластины катодных осциллографов могли присоединяться либо к антенне, подвешенной на высоте 10 м, либо к токоприемному устройству (к шунту молниеприемника), либо, наконец, к колебательному контуру, позволяющему наносить на осциллограммах высокочастотные колебания, служащие для градуировки временной развертки.

Переключатель дает возможность включать возбуждающий световое реле электромагнитный импульс альтернативно—или от токоприемника, или от антенны.

В 1938 г. мною и моими сотрудниками были созданы две лаборатории в горной местности: одна, с наиболее полным оборудованием, на Северном Кавказе, в районе Бакуриани, и другая, имевшая вспомогательное значение,—в Армении, около озера Севан. В 1939 и 1940 гг. были организованы еще две лаборатории в Азербайджане: одна в районе Човдар-Даг (1 700 м над уровнем моря), а другая в Закаталлах и, кроме того, продолжала функционировать и лаборатория в Грузии.

ЭБ "Научное наследие России"

Большое значение горных лабораторий заключается в возможности сопоставления полученных в них данных с данными лабораторий в равнинной части Союза ССР.

Принципы работы подмосковной лаборатории остались неизменными в основных чертах и при исследованиях в других лабораториях. Однако условия горной местности наложили отпечаток на конструктивное оформление схем и помещений.

2. ГОРНЫЕ ЛАБОРАТОРИИ НА КАВКАЗЕ

Самой грозоносной областью в СССР является Кавказ, некоторые районы которого имеют в среднем 50—70 грозовых дней в году. Одним из таких районов является местность вблизи Бакуриани. Учитывая это, здесь была создана наиболее оснащенная и продолжительно работавшая горная лаборатория.

Схематический вид выбранного места изображен на рис. 48. Около горы C, на вершине которой размещена полевая лаборатория, находятся горы A и B, превышающие C соответственно на 200 и на 180 м.

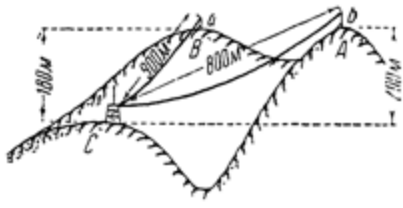


Рис. 48. Схематический вид места горной лаборатории (Бакуриани)

Размещение сооружений полевой лаборатории было таким.

1. Все сооружения (лаборатория, электростанция, основная вышка молниеприемника, несколько антенн длиною по 120—200 м) размещаются на вершине горы C.

2. На вершинах гор A и B ставятся деревянные опоры, от которых натягиваются длинные антенны (длиной 800—900 м) к вышке молниеприемника.

3. Жилые домики располагаются ниже вершины (метров на 20) на небольшой площадке, у опушки леса, покрывающего склоны гор.

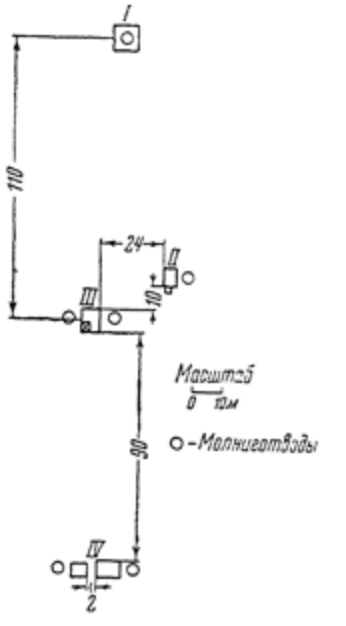


Рис. 49. Расположение основных сооружений бакурианской лаборатории

К числу основных сооружений относятся: 1) лаборатория с диспетчерской вышкой, балконом для фотокамер и площадкой для водопровода, 2) молниеприемник с длинными антеннами, 3) небольшие антенны, 4) помещение электростанции, 5) жилые помещения, 6) система заземления, 7) грозозащита помещений.

Хотя все сооружения имели временный характер, они все же должны были обладать достаточной прочностью, так как по данным метеорологической станции, в течение всего года в районе Бакуриани, и особенно на вершинах гор, дуют сильные ветры, а в летнее время часто выпадает крупный град.

Общий вид застроенной площадки горной лаборатории показан на рис. 49.

Здание лаборатории включало комнату для приборов, фотокомнату, вышку для 17-линзовой фотокамеры, будку для диспетчера и вышку для водопровода.

В комнате для приборов были установлены два катодных осциллографа ПАКО-8 с высоковольтной установкой для них, восемь быстро вращающихся клидонографов, необходимые переключающие и питающие щитки и пульты их управления.

Будка диспетчера выше всех зданий на площадке, следовательно диспетчеру удобно наблюдать за всеми грозовыми разрядами в районе видимости. При помощи сигнализации и разговорных труб диспетчер может передавать необходимые распоряжения в лабораторию и производить соответствующие записи в дневнике.

ЭБ "Научное наследие России"

На расстоянии 120 м от лаборатории был осуществлен молниеприёмник высотою около 50 м.

Нижняя часть молниеприемника деревянная; эта часть воспринимает на себя всю механическую нагрузку от верхней металлической части и натяжения антенн. Верхняя часть молниеприемника, высотой около 30 м, сделана из труб.

Для увеличения шансов попадания разрядов в молниеприемник от него на соседние горы протянуты две длинные антенны (которые в дальнейшем именуются антеннами *I* и *II*). Профиль гор, на которые натянуты антенны I и II, показан на рис. 48. Как видно из рисунка, антенна *I*, длиной 800 м, имеет точку подвеса на горе выше точки подвеса и на молниеприемнике на 200 м. Антенна *II*, длиной 900 м, и точка подвеса ее на горе соответственно выше на 180 м.

Антенны *I* и *II* из стального каната диаметром 5 мм присоединены к проводу, идущему от труб к системе шунтов. Опоры антенн, стоящих на вершинах гор *A* и *B*, имеют высоту 10 м. У вышки молниеприемника обе антенны могут

Рис. 50. Общая схема включения регистрирующей аппаратуры бакурианской лаборатории

быть присоединены к заземляющему спуску, идущему от труб. Таким образом, антенны и молниеприемник представляют собой одну электрически связанную систему, простирающуюся над большой территорией. Расстояние *a*—*b* между концами антенны *I* и *II* около 1300 м. У опор *A* и *B* антенны имеют, помимо изоляции самих столбов, еще дополнительную изоляцию в виде веревки, длиною у каждой опоры около 45 м. Благодаря веревкам концы антенн сдвигаются от вершин гор и находятся выше над землей, что также улучшает их изоляцию.

При таком устройстве антенны могут удержать высокий потенциал, возникающий на них при прямых ударах молнии с относительно большой силой тока даже вблизи вершин гор.

Измерение индуцированных напряжений катодными осциллографами и быстро вращающимися клидонографами производилось обычно при помощи пяти антенн.

Между лабораторией и молниеприемником были натянуты четыре антенны, длиной по 110 м, из которых три, на высоте 4, 10 и 15 м, присоединялись по соответствующей схеме к быстро вращающимся клидонографам, а четвертая, на высоте 15 м, служила для зажигания высоковольтной установки катодных осциллографов.

ЭБ "Научное наследие России"

Пятая антенна, длиной 90 м, натянутая на высоте 10 м между опорами, стоящими у жилых домиков и лаборатории, подсоединялась к пластинам катодных осциллографов.

Опорами для антенн служили молниеотводы у лаборатории и жилых домиков, а также деревянная часть молниеприемника.

Общая схема измерений показана на рис. 50.

Для регистрации изменений электрического поля при разрядах служили пять антенн, из которых три питали группу клидонографов, одна присоединялась к катодным осциллографам, а одна служила для возбуждения искрового реле, включающего импульсную схему осциллографов. Антенна соединялась с землей через омические сопротивления, величина которых подбиралась из условий необходимости регистрации процессов изменения напряженности поля по времени $[E=f(t)]$. Только в некоторых случаях сопротивление в цепи антенны, соединенной с отклоняющими пластинами катодных осциллографов, уменьшалось настолько, что регистрировалась скорость изменения напряженности электрического поля по времени

$$\left[\frac{dE}{dt}=f(t)\right].$$

Величина сопротивления, соединяющего с землей антенну, служившую для включения искрового реле, подбиралась с таким расчетом, чтобы катодным осциллографом можно было регистрировать лидерный процесс и не производя включения осциллографов от случайных небольших повышений потенциалов, возникающих на антенне при медленных изменениях поля. Для увеличения радиуса действия аппаратуры при более далеких грозах имелась возможность к антеннам A и D присоединять длинные антенны I и II.

В вертикальной плоскости, проходящей через заземляющий провод, установлена специальная рамка из проволоки—трансформатор молнии. Это устройство, напряжение от которого подводится к сверхбыстро вращающемуся клидонографу (СБАК), имеет назначение регистрировать изменение тока по времени в виде фигур Лихтенберга.

Размеры рамки (площадь ее, приведенная к одному витку, равна приблизительно 320 м²) и ее расположение относительно заземляющего спуска подобраны так, чтобы уже при $\frac{dI}{dt}=25\div 50$ A/μS клидонограф мог начать регистрацию. СБАК, находящийся около рамки (в будке), у основания вышки, предохраняется от перекрытия специальным искро-тиритовым шунтом. При превышении напряжения искровой промежуток пробивается, и напряжение на рамке ограничивается тиритовым диском. Благодаря этому прибор регистрирует некоторое остаточное напряжение, что исключает возможность при анализе записи клидонографа принять момент действия искрового промежутка за конец развития процесса. Пуск и остановка СБАК производились с пульта управления лаборатории.

Помимо перечисленной аппаратуры ночные грозы регистрировались при помощи двух фотоаппаратов, которыми служили 2- и 17-линзовые камеры.

Управление приборами велось специальными лицами, а централизация всех включений, переключений и прочих операций, необходимых при регистрации, производилась диспетчером с наблюдательной вышки, оборудованной, как указывалось, электрической сигнализацией и переговорными трубами.

Переговорные трубы размещены таким образом, что сотрудники могут сноситься с диспетчером, не сходя с рабочих мест. Гибкие шланги позволяли диспетчеру вызывать сотрудника лаборатории при любом повороте головы, что дает возможность, не отрываясь, следить за молниями.

Во время грозы диспетчером велся дневник, являвшийся основным материалом для записей и для расшифровки различного рода заметок, делаемых сотрудниками у приборов. Контролем правильности регистрации диспетчера служит совпадение записей в отдельных дневниках сотрудников.

ЭБ "Научное наследие России"

Весьма обильные и ценные материалы были получены лабораторией в Закаталах.

Лаборатории, расположенные в других районах, помогли накоплению статистических материалов, ценных тем, что они дают сравнительные сведения о грозовых разрядах, происходящих в разных орографических и почвенных условиях.

3. ЛАБОРАТОРИЯ НА АМЕРИКАНСКОМ НЕБОСКРЕБЕ

Аналогично тому как нами для улавливания прямых ударов молнии был применен под Москвой высочайший молниеприемник, в Нью-Йорке был использован наиболее высокий небоскреб Empire State Building. Это здание возвышается над поверхностью земли на 380 м. На вершине его была установлена металлическая штанга, и ток разряда, поражавший этот молниеприемник, проходил через шунты. Падение напряжения на шунтах регистрировалось осциллографами.

В этой лаборатории установлены и успешно функционируют описанные выше кратерный осциллограф и запаянный катодный осциллограф.

Оборудование лаборатории из года в год совершенствовалось, и регистрации разрядов делались все полнее. За последние годы лабораторией получено много интересных и важных результатов, которые обсуждаются в III главе.

ЭБ "Научное наследие России"

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МОЛНИИ

Применение описанных приборов, схем и методов анализа к исследованию грозовых разрядов дало возможность получить значительное количество материалов о разных стадиях и различных сторонах электромагнитного сложнейшего процесса.

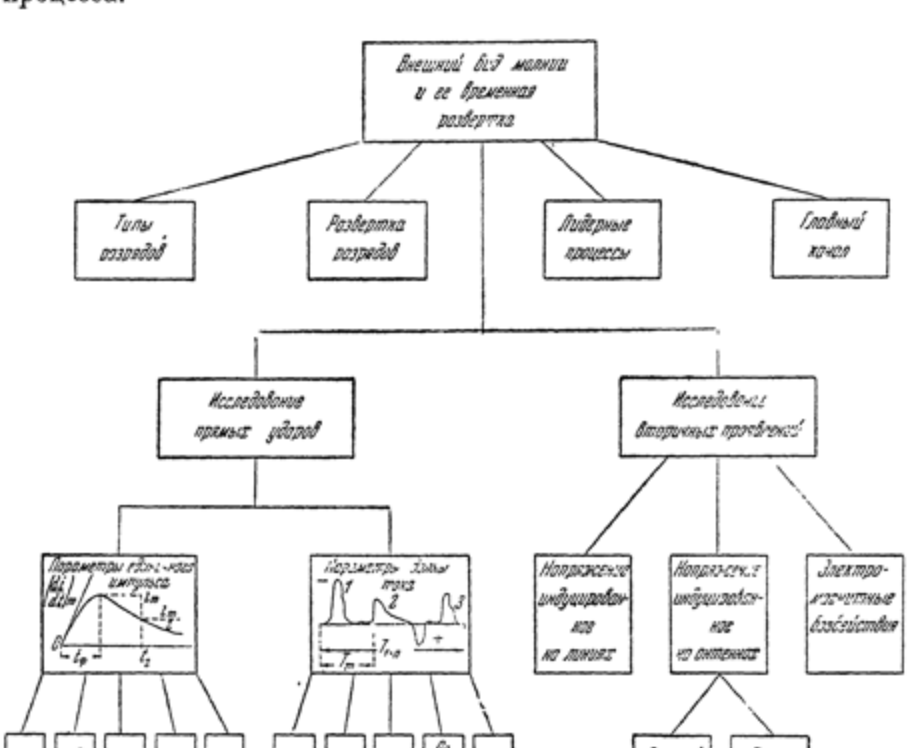


Рис. 51. Схема изучения грозового разряда

Автору представляется, что если расположить имеющиеся в распоряжении материалы, руководствуясь системой, изображенной на рис. 51, то их описание и обсуждение дадут наиболее полную и естественную картину грозового разряда.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОЛНИИ И ИСКРОВОГО РАЗРЯДА

а. Типы разрядов молнии

Грозовые разряды могут быть разделены по внешнему виду на несколько типов. Обычный вид—линейная молния, с разновидностями: ленточная, ракетообразная, четочная, зигзагообразная и разветвленная. Наиболее редкий вид

ЭБ "Научное наследие России"

разрядов—шаровая молния. Известны грозовые разряды, носящие название «огней св. Эльма» и «свечений Анд».

Линейная молния. Невооруженному глазу линейная молния представляется в виде яркой узкой полосы белого, светлоголубого или яркорозового цвета, относительно малого диаметра, длиной от сотен метров до многих километров. Путь молнии обычно зигзагообразен. Часто молния имеет много разветвлений и кажется мерцающей. Разряды могут происходить между тучами и землей и между тучами и окружающим их воздухом. Обычно, хотя и не всегда, молнии сопровождаются громом.

На рис. 52 изображены фотографии нескольких линейных молний. Следует обратить внимание на сильную ветвистость разрядов и большие отклонения от кратчайшего или вертикального пути.

Ленточная молния. Иногда грозовой разряд имеет вид нескольких более или менее параллельных линейных молний. В этом случае ему присваивается название ленточной молнии. Повидимому, это образование вызывается сдвигом пути повторных разрядов молнии ветром.

Ракетообразная молния получила свое название благодаря относительно медленному развитию разряда. Такую молнию можно наблюдать при разрядах между тучами. Характерные молнии этого типа отмечались неоднократно автором в районе Бакуриани (Северный Кавказ).

Четочные молнии. Типичный вид четочной молнии: 20—30 шаров диаметром около 8 см, расположенных на расстоянии друг от друга около трех четвертей метра и видимых в течение 0.5 сек. и после интенсивного разряда.

Огни св. Эльма появляются чаще всего в горах, иногда на кораблях в море, в некоторых низменных местах. Явление это заключается в том, что при выпадении осадков (дождь, снег, град) у поверхности земли образуются сильные электрические разряды, принесенные осадками, вследствие чего (когда напряжение поля в атмосфере получается достаточным) на остриях, у конца травы, листьев, шестов, мачт кораблей, подвешенных проводов и т. д. образуется свечение в виде кистей и султанов (в зависимости от знака электризации).

Свечение Анд состоит из быстро следующих один за другим разрядов, производящих впечатление зарниц. Они часто наблюдаются в Андах (горы Южной Америки), иногда в Швейцарии.

Черные молнии. Известны снимки молнии, на которых, в отличие от обычных белых изображений на темном фоне неба, разряды получаются в виде темных полос. Молнии, давшие эти изображения, называются «черными» или «темными». По всей вероятности, это объясняется соляризацией эмульсии на пластинке или каким-либо аналогичным эффектом, но не самостоятельным существованием таких разрядов. Темные молнии воспроизводились в лаборатории путем последовательного действия на эмульсию искрой и рассеянным светом менее сильным, но более продолжительным (эффект Клайдена).

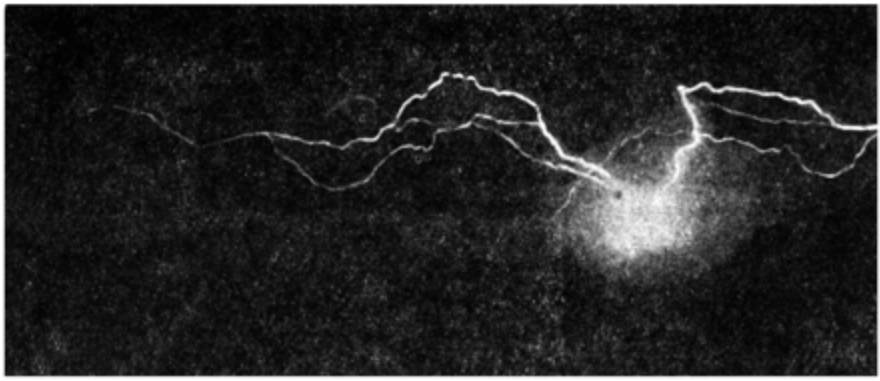
Шаровая молния. Подробное описание этого исключительно интересного вида молнии дается в главе V.

Методом, позволившим получить объективно ценный и бесспорный материал о процессе развития молнии, был оптический. Первые снимки молнии повидимому, восходят ко временам зарождения фотографии. Снимки, сделанные на неподвижную пластинку (или вообще без развертки явления по времени), не дают полного представления о разряде. Характерно, что получению временной развертки способствовала сама природа. В 1884 г. Кайзер получил снимок разряда, растянутого по времени ветром, благодаря чему была видна многократность молнии. Разряд имеет вид пучка параллельных линейных молний (ленточной молнии).

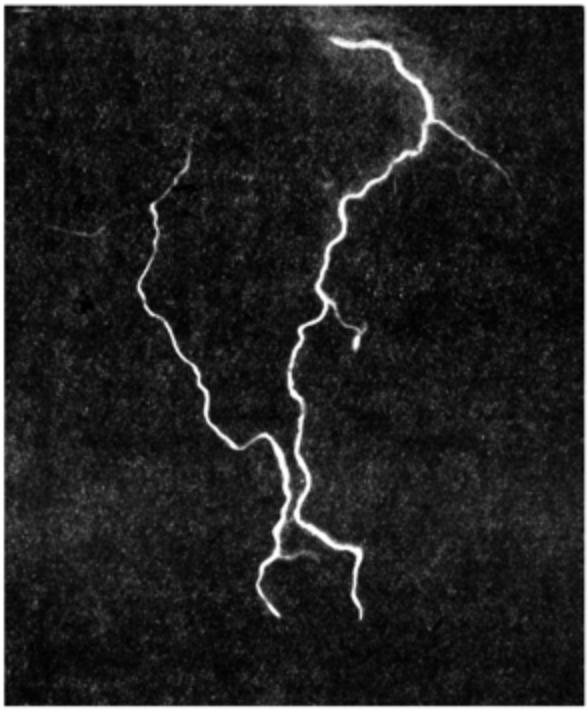
О том, что молнии представляют собой прерывистый разряд, писал еще в 1835 г. Дове.

В 1889 г. Хофферт в Лондоне сделал снимок фотоаппаратом, который он двигал руками, благодаря чему на пластинке получился процесс разряда молнии, растянутый по времени. Уже на этом хорошо известном в литературе снимке можно отчетливо видеть основные элементы разряда, а именно:

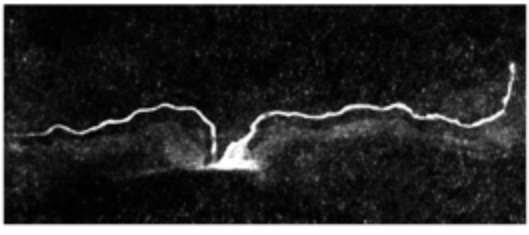
ЭБ "Научное наследие России"



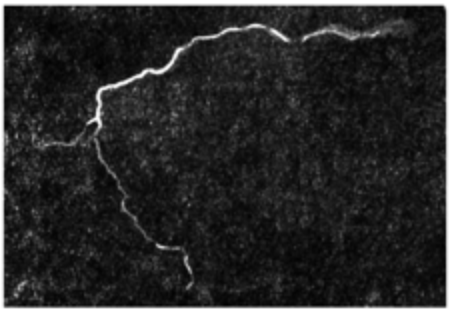
a



b



c



d

Рис. 52. Фотография линейных молний (статические снимки)

ЭБ "Научное наследие России"

лидер, представляющий собой начальную стадию явления, прокладывающий путь молнии в атмосфере, и главный канал,—фаза наиболее интересная с энергетической точки зрения. Однако прошло около полустолетия, прежде чем заговорили об открытии лидера. На одном снимке Вальтера, опубликованном в 1903 г., также виден лидерный процесс.

Вальтер производил исследования (делавшиеся задолго до него другими учеными, см. главу IV) искры и в лаборатории. Он показал, что в некоторых случаях разряд развивается толчкообразно.

Дальнейшие успехи в области изучения молнии и особенно количественной стороны явления связаны с разработкой и применением фотоаппаратов типа Бойса.

b. Развитие разряда

В 1928 г. Бойс сделал при помощи своей камеры один снимок молнии, происшедшей на расстоянии 16 км. Снимок представляет слабый разряд, состоявший из одного импульса.

В 1933 г. Халлидей снял бойсовским аппаратом (системы 1900 г.) три разряда. Два из них начинались над землей и развивались в обе стороны, к туче и к земле. Третий, имевший ветви, направленные вниз, развивался вверх от земли (аналогичный разряд был сфотографирован в 1937 г. под Москвой).

В 1934 г. Шонланд и Колленс описали сделанные ими снимки 11 разрядов (происшедших на расстоянии от 9 до 18 км). Эти фотографии, а равно и целый ряд других материалов, полученных в более ранних исследованиях, дали возможность представить механизм развития грозового разряда в следующем виде.

Большинство грозовых разрядов состоит из серии отдельных импульсов. Интервалы между отдельными импульсами сильно варируют (от нескольких десятитысячных до десятых долей секунды). Первый импульс каждой серии отличается от последующих той же серии двумя характерными чертами: он значительно интенсивнее, чем последующие, и более ветвист. Каждый импульс в свою очередь имеет сложный характер и состоит обычно из предварительного, относительно слабого, разряда (как указывалось, называемого лидером), идущего от тучи к земле, и главного канала, более сильного и развивающегося с значительной скоростью. Главный канал имеет большую яркость и движется в обратном направлении. Однако не все снятые фотографической камерой с быстрой разверткой фотографии показали наличие лидера. Возможно, что на этих фотографиях лидер не виден из-за его недостаточной яркости. Скорости отдельных лидеров колебались в пределах $1.1 \cdot 10^8 \div 27.1 \cdot 10^8$ см/сек. при среднем значении $7.0 \cdot 10^8$ см/сек.

Исходя из постоянной ширины лидера, можно было, как это сделал Бойс, принять, что разряд распространяется в виде ограниченного светящегося элемента, по типу огненной стрелы.

Видимо, не имея достаточно хороших фотографий для того, чтобы судить о лидерном процессе первого импульса, авторы сделали безосновательную экстраполяцию своих наблюдений и приписали первому импульсу лидер, распространяющийся с такой же скоростью, с какой распространяются лидеры повторных импульсов.

В 1935 г. Шонланд, Малан и Колленс проанализировали 41 фотографию, на которых получено 95 разрядов, состоящих из 200 импульсов (фотографии сняты в течение трех лет). Авторы считают, что их интерпретация полученных результатов приложима к грозовым разрядам как в странах с умеренным климатом, так и в тропических, допуская лишь, что в странах с умеренным климатом могут иметь место более частые разряды из положительно заряженных областей тучи. (Это утверждение противоречит заключению Шонланда о полярности молний, сделанному им раньше.) Теперь авторы обнаружили у первого импульса лидерный процесс, принципиально отличный в своем развитии от лидерных процессов повторных импульсов тем, что он распространяется в атмосфере толчкообразно. Авторы полагают, что найденный ими процесс ступенчатого прорастания лидера есть фундаментальный физический процесс, без которого немыслимо развитие разряда в неионизированном (девственном) воздухе.

ЭБ "Научное наследие России"

Численные характеристики скоростей продвижения отдельных элементов разряда, установленные авторами в этой работе, таковы: эффективная скорость ступенчатого лидера $1.0 \cdot 10^8 - 2 \cdot 10^8$ см/сек., скорость стрелообразного лидера $1.0 \cdot 10^8 - 2.3 \cdot 10^9$ см/сек., скорость главного канала $2.0 \cdot 10^9 - 1.4 \cdot 10^{10}$ см/сек. Наиболее часто встречающиеся значения скоростей перечисленных элементов разряда равны соответственно $1.5 \cdot 10^7$, $2 \cdot 10^8$, $3.5 \cdot 10^9$ см/сек.

В СССР первые снимки с временной разверткой молнии были сделаны в 1937 г. экспедицией, работавшей под Москвой. В 1938 г. существенные результаты были получены бакурианской экспедицией. Определенные этими исследованиями с р е д н и е скорости прорастания лидеров повторных импульсов равны $1.08 \cdot 10^8$—$1.6 \cdot 10^9$ см/сек., скорости главных каналов $4.5 \cdot 10^8$—$6.6 \cdot 10^8$ см/сек. Как видно, эти значения скоростей находятся в согласии с приведенными выше данными.

Высказывавшееся в литературе мнение о существовании различных типов линейных молний не соответствует экспериментальным данным о механизме протекания разрядов. Также совершенно необоснованным является допущение, делаемое иногда о существовании электронных лавин, движущихся со скоростью, близкой к 3.10^{10} см/сек., и о достижении ими земли за время $5 \div 10$ μS. Организованные Энергетическим институтом Академии Наук совместно с Азербайджанским филиалом Академии Наук СССР экспедиции дали возможность получить фотографические снимки с временными развертками 132 разрядов на землю, состоявших из 341 импульса. Многие разряды были сняты одновременно несколькими камерами, барабаны которых вращались с различными временными развертками. Снимки показали, что лидерный процесс был уловлен лишь у 48 повторных импульсов и только у 5 первых имульсов. При этом лишь у нескольких лидеров первых импульсов обнаружена ступенчатость. Характерные снимки и срисовки молний, полученные в закатальской экспедиции (руководитель А. С. Ализаде), даны на рис. 53—56.

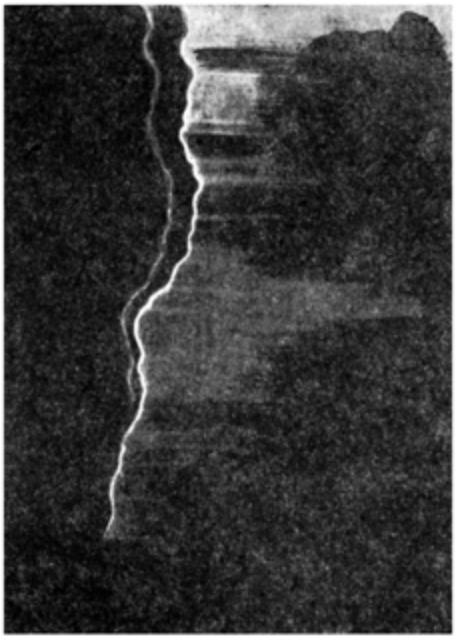
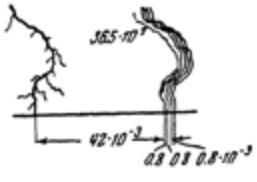


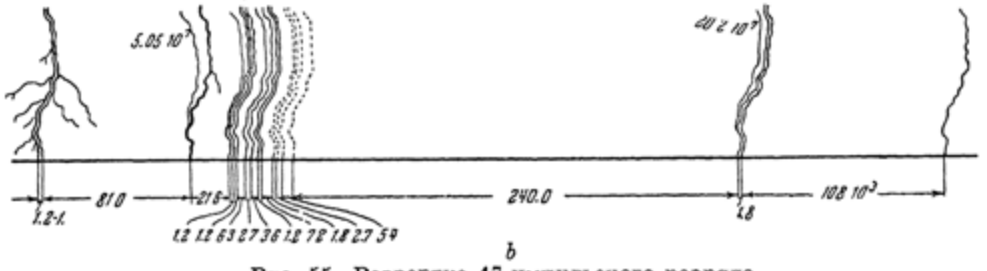
Рис. 53*b*. Фотография импульса № 12 разряда, изображенного на рис. 53, *a*



c

Рис. 54. Развертка 5-импульсного разряда

Разряд № 15 от 20 июня 1940 г. (рис. 53*a*). Этот разряд является наиболее



b

Рис. 55. Развертка 17-импульсного разряда

близким из числа снятых молний. Удаленность его около 200 м от лаборатории. Разряд имел 33 ясно зафиксированных импульса; продолжительность

ЭБ "Научное наследие России"

полного разряда[1] 1.45 сек. Интервалы между импульсами: минимальный—$1.28 \cdot 10^{-3}$ сек., максимальный—$157 \cdot 10^{-3}$ сек. Следует отметить, что из общего числа импульсов только четыре импульса (№ 8, 9, 12 и 21) имеют видимые на оригинале лидеры. На рис. 53,*а*[1] воспроизведен снимок импульса № 12 с хорошо видимым лидером. Как видно из снимка, лидерные импульсы получаются после продолжительного интервала. Освещенность отдельных импульсов меняется в широких пределах. Степень освещенности вдоль канала в некоторых случаях меняется незначительно. Такое положение объясняется тем, что на пленке получена только часть канала разряда, и потому дать окончательное суждение по этому поводу не представляется возможным.

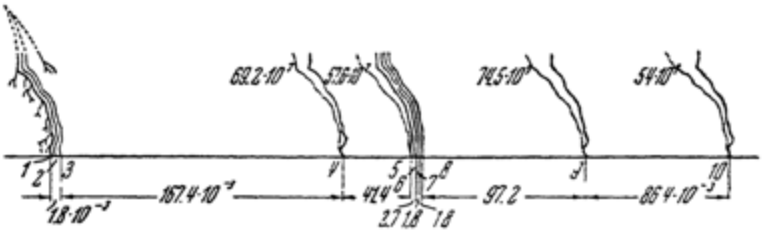


Рис. 56,*а*. Развертка 10-импульсного разряда

Главный канал первого импульса по своей интенсивности и разветвленности является наиболее мощным. Изменение освещенности после ответвлений не наблюдается[2]. По данным клидонограмм, этот разряд имел меняющуюся полярность.

Разряд № 34 от 28 июня 1940 г. (рис. 54). Удаленность разряда 8.7 км, число импульсов 5. Имеется всего один импульс (№ 2) с видимым лидером. Первый импульс также разветвлен и интенсивен.

Освещенность вдоль канала не меняется как для первого импульса, где имеются ответвления, так и для последующих импульсов.

Разряд № 38 от 29—30 мая 1940 г. (рис. 55). Удаленность разряда 4 км.

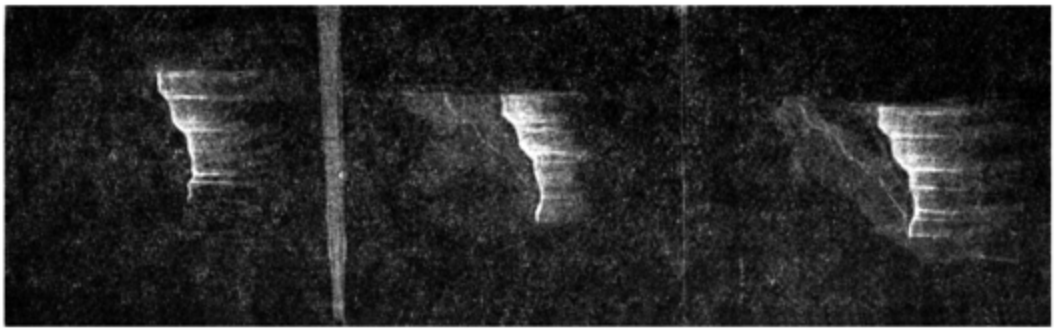


Рис. 56,*b*. Фотографии импульсов 4, 9 и 10 разряда, изображенного на рис. 56,*а*

Число импульсов, ясно зафиксированных на фотопленке,—13; кроме того, имеются еще 4 слабых импульса, показанных на фото пунктиром. Полное время разряда 0.513 сек. Интенсивность отдельных импульсов сильно меняется. Вдоль канала для отдельных импульсов изменение освещенности не найдено. Первый импульс разветвленный, однако изменение освещенности как после каждой точки ответвления, так и вдоль всего канала, не обнаружено. Лидерных импульсов, снятых на пленке, всего три. Здесь, как было указано выше, наиболее явно видно соотношение между лидерностью импульсов и интервалами между импульсами, меняющимися от $12 \cdot 10^{-3}$ до $240 \cdot 10^{-3}$ сек. Скорости прорастания лидеров указаны на рис. 57.

---

[1] См. вклейку в конце книги.

[2] По данным других исследователей всегда имеется ослабление яркости канала после каждого ответвления.

ЭБ "Научное наследие России"

Разряд 48 от 29—30 июня 1940 г. (рис. 56). Этот разряд представляет собой один из наиболее отдаленных ударов молнии, зафиксированных экспедицией. Удаленность разряда 16 км. Число импульсов 10. Продолжительность полного разряда 0.397 сек. Первый импульс имеет разветвления и интенсивен. Лидерных импульсов всего 4. Скорость прорастания лидеров указана на рис. 56. Освещенность вдоль канала не меняется.

Освещенность вдоль канала не меняется также для первого импульса, где имеются разветвления.

Отметим, что полная длительность разряда № 15 равна 1.45 сек., в то время как разряд, состоящий из 17 импульсов, длился лишь около $45 \cdot 10^{-2}$ сек.

Первые импульсы, как правило, ветвисты. Обычно сильно разветвленные интенсивные разряды одноимпульсны. Ни один из повторных импульсов не имел ветвей. По внешнему виду все фотографии главных каналов можно разбить на две категории: 1) у первых яркость не меняется по длине, 2) у вторых яркость уменьшается по мере удаления от земли. При анализе степени освещенности необходимо также учитывать, что по достижении некоторой предельной

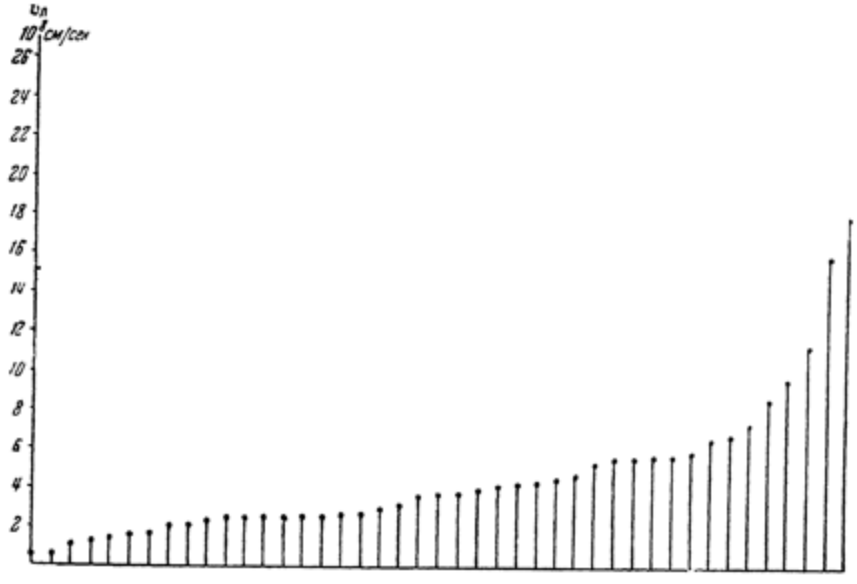


Рис. 57. Средние скорости лидеров повторных импульсов

яркости канала его изображение на фотопленке не будет зависеть от дальнейшего возрастания яркости. Учет этого обстоятельства все же позволяет установить существование двух отмеченных видов разрядов. В отличие от высказанного английскими физиками мнения, следует признать, что уменьшение яркости главного канала по высоте определяется не только наличием ветвей, но, видимо, вызывается физическими процессами в самом газовом канале или в непосредственно примыкающей к нему атмосфере.

Все разряды, имеющие лидеры, были обработаны, и в каждом отдельном импульсе была определена скорость прорастания его лидера. Этому предшествовало определение длины канала молнии по ее удаленности, длине изображения на пленке и фокусному расстоянию объективов.

На основании измерения по фотографии максимального смещения между изображением лидера и главного канала импульса с учетом скорости временной развертки камеры определялась средняя скорость прорастания лидера на всем пути разряда.

При этом время прорастания главного канала импульса в тех случаях, когда пренебрежение им давало погрешность, меньшую 10%, не учитывалось.

На рис. 57 приведены данные о средних скоростях 43 лидеров повторных

ЭБ "Научное наследие России"

импульсов. Минимальная скорость равна $0.5 \cdot 10^7$ см/сек., а максимальная $16 \cdot 10^8 — 18 \cdot 10^8$ см/сек.

Интересно, определяется ли, как это предполагалось некоторыми исследователями, скорость прорастания лидера лишь интервалом времени между лидерным импульсом и ему предшествующим? На рис. 58 показаны скорости $V_л$ прорастания лидеров повторных импульсов в зависимости от интервалов времени t, отделяющих лидерные импульсы от им предшествующих. Анализ приведенных цифр показывает, что, в отличие от заключения английских исследователей, следует полагать, что не существует однозначной зависимости между $V_л$ и t. Скорее напрашивается вывод, что $V_л$ зависит как от t, так и от интенсивности предыдущего импульса.

Рис. 58. Данные о средних скоростях лидерных процессов повторных импульсов и интервалах времени, отделяющих рассматриваемый лидерный импульс от предшествующего импульса

Определение скорости лидерного процесса первого импульса может быть сделано лишь ориентировочно по записям катодного осциллографа. Можно считать, что средние скорости лидерных процессов первых импульсов колеблются в пределах $1 \cdot 10^7 — 5 \cdot 10^7$ см/сек., что также близко к данным, сообщаемым другими исследователями.

Снимки пяти первых импульсов недостаточно четки, чтобы можно было с уверенностью определить $V_л$. Все же можно считать, что средняя скорость одного ступенчатого лидера равна $3.7 \cdot 10^6$ см/сек., что в несколько раз меньше скорости $V_л$, установленной южноафриканскими исследованиями в качестве нижнего предела средней скорости лидера. Полярность тучи при разрядах, удаленных на расстояние 6—7 км, определялась быстро вращающимся клидонографом и катодным осциллографом. При более удаленных разрядах определить полярность тучи не представлялось возможным из-за недостаточной чувствительности клидонографных и осциллографных установок.

Определение полярности разряда, произведенное (Бакуриани, 1938 г.) в одном случае при помощи приборов, показало, что полярность тучи была положительной. Знак зарегистрирован одновременно катодным осциллографом и быстро вращающимся клидонографом. Это был первый случай, когда сфотографированный камерой с временной разверткой разряд имел зарегистрированную положительную полярность.

ЭБ "Научное наследие России"

ЭБ "Научное наследие России"

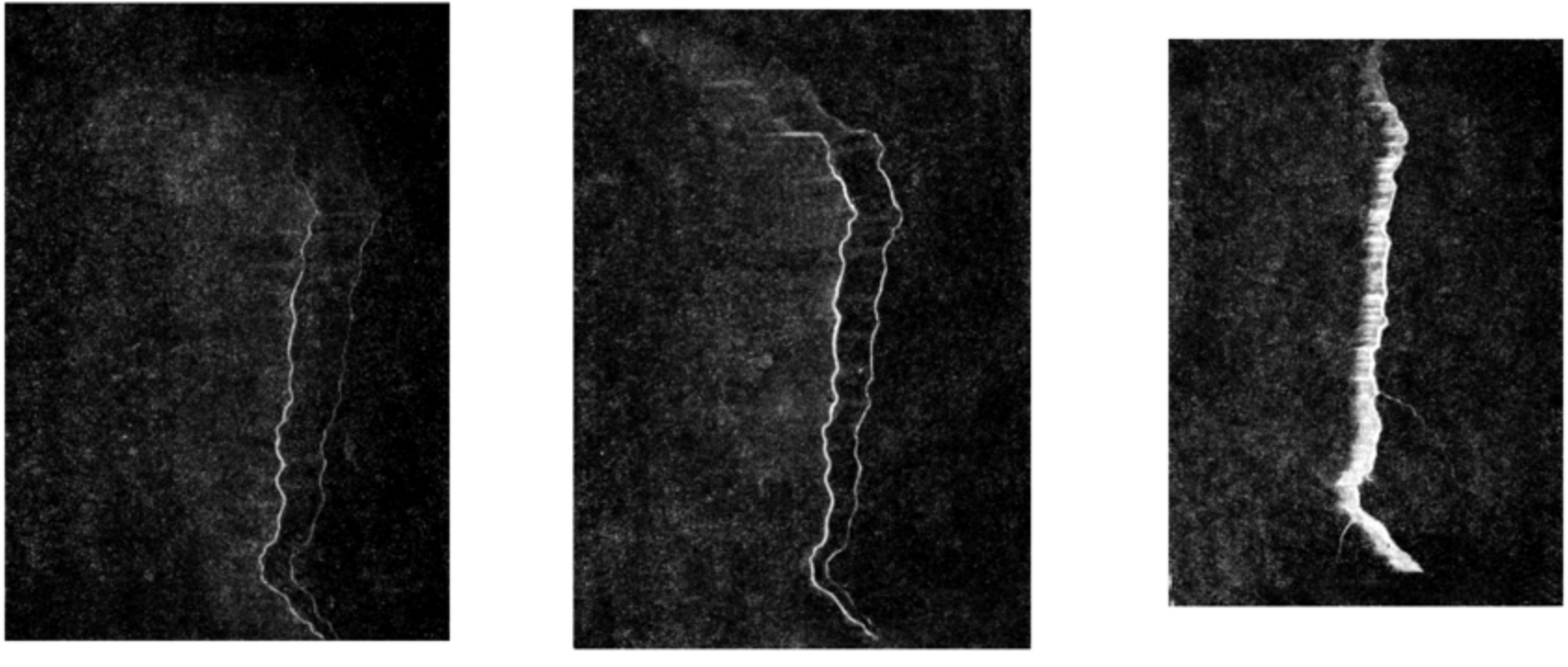


Рис. 59. Положительный разряд молнии, зарегистрированной в бакурианской лаборатории

Как видно из рис. 59, разряд состоит из 5 импульсов. Лидеры видны у всех импульсов, кроме первого. Осциллограмма этого разряда показывает лидерный процесс у первого импульса, клидонограмма имеет большее число импульсов, величина которых, уменьшаясь, сходит на-нет. Это показывает, что число импульсов, регистрируемых в разряде оптическим методом, меньше, чем отмечаемых электрическим методом.

Существование лидерного процесса у первого импульса, отмеченное осциллограммой, подтверждается многочисленными катодными осциллограммами других разрядов.

На одном из снимков зарядов между тучами отмечены повторные процессы (рис. 60). Фотография этой молнии сделана 17-линзовой камерой. Видны многократные импульсы в верхней вилке, уходящей в тучи, причем в левой части вилки на оригинале видны четыре повторных импульса. Бесспорно, что и нижняя часть разряда состоит из нескольких импульсов, видимость которых хуже вследствие горизонтальности ветвей. Интересно отметить малые интервалы между повторными импульсами (порядка 100 μS).

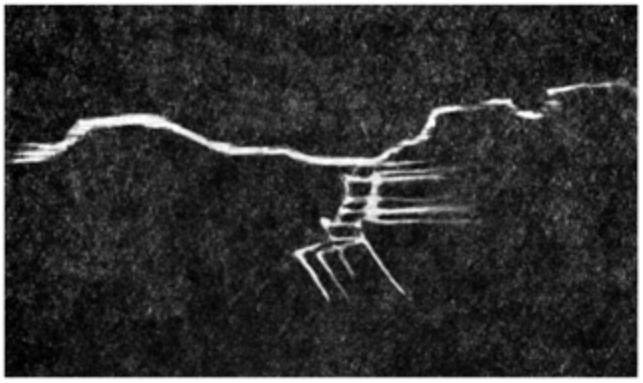


Рис. 60. Фотография многократного междутучевого разряда

Таким образом, повторность разрядов между тучами в нашем исследовании установлена оптическим методом.

При ударе молнии в высокие объекты можно предполагать (исследования, произведенные с искровым разрядом, это подтверждают), наряду с развитием лидера от тучи, лидерный процесс в направлении от поражаемого объекта к туче. Фактический материал по этому вопросу получен при исследовании, проведенном в Нью-Йорке. Приведем некоторые результаты этого исследования.

Были сфотографированы поднимающиеся вверх от здания ступенчатые лидеры, возбуждающие непрерывные молнии, и определены их скорости. Под непрерывной молнией имеется в виду дуга постоянного тока между тучей и землей, с наложенными на нее пиками или без них, продолжающаяся, как показали измерения, до 0.4 сек. Представление о непрерывных молниях существует давно, упоминание о них в литературе можно найти уже в 1873 г. Если ток прекращается полностью на время 0.02 сек. или больше, а затем имеет место новый разряд по тому же пути, разряд называют многократным. Это определение, однако, недостаточно обще. Лучше считать за непрерывную молнию такую, у которой течение измеряемого тока не прекращается с момента ее возникновения до окончания[1]. Скорости вверх растущего лидера колеблются в пределах $5 \cdot 10^6 - 6.3 \cdot 10^7$ см/сек. при средней величине $2.5 \cdot 10^7$ см/сек. Токи, измеренные в токоотводе во время образования вверх растущих лидеров, колеблются в пределах 50—650 А. Разветвления идут в направлении хода начального лидера. Все разряды в здания произошли при отрицательных тучах. Три молнии изменили полярность в конце разряда. Около 3% всех измеренных разрядов были связаны с положительными частями молнии. Идущие вниз ступенчатые лидеры наблюдались лишь в одном разряде и имели скорость $4.2 \cdot 10$ см/сек.

---

[1] Возможно, что при достаточно малой величине регистрируемого тока большинство молний можно будет отнести к непрерывным.

ЭБ "Научное наследие России"

Молния, ударившая в здание высотой 60 м, имела ступенчатый лидер идущий вниз со скоростью $1.5 \cdot 10^7$ см/сек.

Лидеры всех импульсов (разрядов), после первого, всегда направлены вниз, независимо от направления развития первого лидера. Такие растущие вниз лидеры имеют скорости прорастания в пределах $5.7 \cdot 10^7$—$384 \cdot 10^7$ см/сек., при средней величине $42 \cdot 10^7$ см/сек.

Скорость обратного канала, следующего за первым ступенчатым вниз растущим лидером, в двух зарегистрированных случаях колеблется в пределах $1.02 \cdot 10^{10}$—$0.45 \cdot 10^{10}$ см/сек., в то время как скорости главных каналов, следующих за непрерывными лидерами, колеблются в пределах $3 \cdot 10^9$—$8.4 \cdot 10^9$ см/сек, в среднем имея значения $5.9 \cdot 10^{10}$ см/сек.

Мак Икрон полагает, что удары в небоскреб из положительной тучи вряд ли вообще возможны. Однако среди молний, поразивших молниеотводы подмосковной лаборатории, по высоте значительно превышавшие это здание, положительные разряды были отмечены.

Данных о спускающихся навстречу лидеру, идущему от здания, ступенчатых лидерах нет, повидимому, из-за дефектов съемки. Всем последующим разрядам, идущим по пути первоначального разряда, предшествует непрерывный вниз идущий лидер.

Так как при отрицательной туче наблюдался рост лидеров от здания вверх и к зданию вниз, можно заключить, что направление развития начального лидера не зависит от полярности, а в основном определяется конфигурацией двух электродов (туча—рельеф земли).

Вниз идущие лидеры, ступенчатые или непрерывные, всегда сопровождаются обратным разрядом, образующимся от земли по существующему каналу.

При вверх растущем ступенчатом лидере обратных каналов не найдено; растущий снизу стример встречает либо вниз идущий лидер, либо стример, уже развившийся из этого лидера.

Отсутствие обратного канала при развитии разряда от земли к туче повидимому объясняется отсутствием достаточного заряда в туче, могущего немедленно стать источником для формирования обратного процесса, с одной стороны, и большим удельным сопротивлением ее объемов—с другой.

с. Модель молнии — искровой разряд

Еще в середине XVII в. англичанин Уолл, получив искру натиранием янтаря, высказал гипотезу о том, что она и легкий треск, ею порождаемый, по природе своей тождественны величественному явлению молнии и грома.

Через столетия Франклин извлек искру из мокрого шнурка поднятого змея, и современники уверовали в то, что было провозглашено в 1650 г. С тех пор нет сомнения в идентичности природы искры и молнии. Новейшие исследования позволили расширить признаки подобия и углубить анализ отдельных элементов явления.

Уже хорошо изучены структура искры и молнии, ряд количественных характеристик, показана полная одинаковость спектральной картины обоих явлений. Поэтому при создании теории молнии, т. е. при установлении количественных законов развития разряда, со всеми его элементами, и нахождения связей, определяющих параметры молнии с внешними факторами, необходимо учитывать не только материалы по изучению грозовых разрядов, но и обширный экспериментальный и теоретический материал, полученный при исследовании искровых разрядов. Это тем более важно, что искровой разряд, создаваемый в лаборатории, легко доступен для экспериментирования и выявления различных закономерностей; в то же время исследование разряда с помощью катодного осциллографа при современной аппаратуре и методах не вызывает больших трудностей.

Изучение процесса формирования искрового разряда при помощи фотографирования аппаратами с временной разверткой долгое время не давало удовле-

ЭБ "Научное наследие России"

творительных результатов из-за невозможности получения необходимых скоростей разверток.

Новые возможности были получены в связи с применением метода автора, заключающегося в введении в цепь импульсного разряда больших омических сопротивлений. Включение сопротивления последовательно с искрой тормозит развитие разряда—уменьшает скорость движения лидера и главного канала. Помимо этого, интенсивность свечения главного канала уменьшается, что благоприятно отражается на качестве фотографии. Основная причина уменьшения скорости прорастания разрядов заключается в том, что токи разряда вызывают в сопротивлении потерю напряжения, благодаря чему напряжение на искровом промежутке уменьшается и развитие искры замедляется.

В начале 1937 г. автором и его сотрудниками были опубликованы первые результаты изучения искровых процессов. Впервые был наглядно показан положительный лидерный процесс, пронизывающий весь промежуток, и получены снимки повторных разрядов от импульсного генератора.

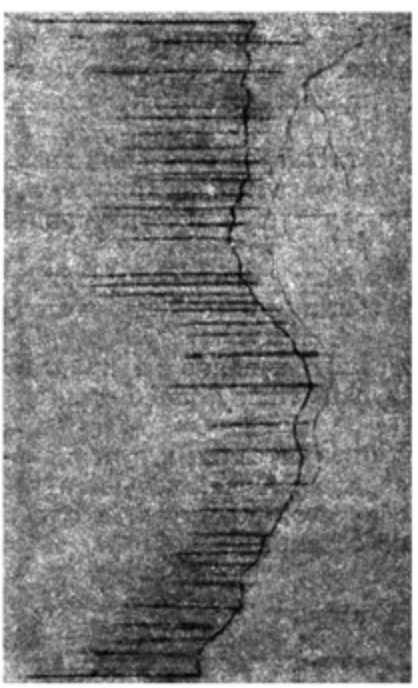


Рис. 61. Развернутая фотография искрового разряда между положительным стержнем и плоскостью

В 1938 г., в результате дальнейших исследований, удалось установить основные детали развития искрового разряда, происходящего в различной формы промежутках. Несколько позднее при помощи разработанного автором метода торможения искрового разряда были проведены аналогичные исследования в Англии.

Благодаря применению кварцевого объектива удалось выявить ряд новых деталей, уточнивших процессы образования искры в длинных промежутках при различных давлениях воздуха.

Для сравнения механизма развития искры и молнии целесообразно рассмотреть процессы, протекающие в случаях приложения напряжения к двум типам искровых промежутков:

1) один электрод стержневой или игольчатый (к этому электроду подводится высокий потенциал), другой электрод—плоскость и служит «землей»; 2) оба электрода—стержни (или иглы). Разряд искрового промежутка первого типа протекает различно при разной полярности потенциала, подведенного к стержневому электроду. Внешне это различие проявляется, например, в том, что при одной и той же длине искрового промежутка его пробивное напряжение при положительном потенциале меньше (почти вдвое), чем при отрицательном. Это обстоятельство заставляет подразделять первый тип искрового промежутка на два, в зависимости от знака потенциала стержневого электрода.

Рассмотрим процессы разряда для трех искровых промежутков:

1. Искровой промежуток: положительный стержень—плоскость. При малых значениях сопротивления R, включенного перед верхним электродом, оптическое изображение искрового разряда весьма интенсивно, яркость главного канала весьма велика по сравнению с яркостью лидера. По мере увеличения сопротивления яркость главного канала уменьшается, и при $R = 250\,000$ Ω канал и лидер имеют отпечатки примерно одинаковой интенсивности. По мере увеличения R уменьшается также интенсивность и длительность послесвечения, и при $R = 250\,000$ Ω послесвечение на пленке практически незаметно. Лидер начинает расти с положительного острия и развивается к отрицательной плоскости (рис. 61). Подчеркнем, что

ЭБ "Научное наследие России"

развитие лидера идет на выбранной модели так, как будто бы положительный электрод предетавляет отрицательно заряженную тучу.

Следует обратить внимание на весьма важное обстоятельство, которое удается открыть благодаря большому интервалу между лидером и главным каналом: послесвечение, которое обычно приписывается главному каналу, оказывается, образуется уже после прохождения лидера, и вблизи верхнего электрода оно появляется спустя некоторое время после прохождения лидера. По мере приближения лидера к плоскости, интервал времени между его прохождением через данную точку и моментом образования послесвечения уменьшается, и приблизительно с половины длины искры послесвечение практически возникает тотчас же после прохождения лидера. Интересно, что интенсивность послесвечения практически не изменяется вслед за прохождением главного канала. Еще одна характерная особенность: интенсивность изображения лидера возрастает по мере его движения вперед, а интенсивность главного канала уменьшается по мере его роста в сторону, обратную направлению прорастания лидера. Разница в интенсивности свечения главного канала молнии по мере удаления от земли некоторыми исследователями объясняется различной удаленностью нижней и верхней части молнии от фотоаппарата.

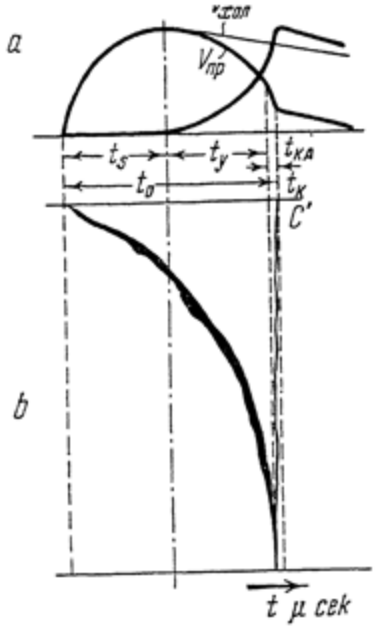


Рис. 62. Анализ искрового разряда
a—типовая осциллограмма напряжений и тока, снятая при образовании разряда двухлучевым катодным осциллографом; *b*—схематическое изображение картины развития разряда (фотография с временной разверткой)

Полученные снимки показывают, что явление изменения интенсивности свечения канала по высоте связано с процессами в самом канале вблизи плоскости.

Рассматривая послесвечение, прежде всего следует обратить внимание на характерные полосы, свойственные снимкам молнии и искрового разряда при малых R. Чаще всего светящиеся центры появляются на местах изгибов пути разряда.

Определение скоростей главного канала (W) обнаружило, что при изменении R от 4 800 Ω до 216 000 Ω среднее значение $W_{ср}$ менялось от $4.23 \cdot 10^8$ до $1.03 \cdot 10^9$ см/сек. при длине искрового промежутка, равной 384 см. Средняя скорость лидера в этом промежутке при 32 500 Ω равна $27 \cdot 10^8$ см/сек., что почти в 10 раз меньше $W_{ср}$.

Экстраполяция по кривой $W_{ср} = f(R)$ до значений $R = 0$ дает среднюю скорость главного канала, равную $5.7 \cdot 10^9$ см/сек.

Анализ фотографий показывает, что скорость лидера в различных точках искрового промежутка различна и имеет тенденцию к возрастанию по мере приближения лидера к плоскости.

Сравнение средних скоростей $V_{ср}$ лидеров в искровых промежутках различной длины L, заторможенных одним и тем же сопротивлением, показывает некоторую зависимость $V_{ср}$ от L. Исследования этого вопроса, произведенные в Англии, для меньшего диапазона длин промежутков не выявили какой-либо определенной тенденции изменения $V_{ср}$ от L.

Известно, однако, что при малых сопротивлениях R время t увеличивается с возрастанием L.

Несколько условно можно характеризовать развитие лидера в искровом промежутке его «начальной» и «конечной» скоростью движения.

По Алибоне и Мик, для промежутка в 76 см конечная скорость устанавливалась на последней четверти пути лидера, считая от плоскости. Скорости лидера уменьшаются при увеличении тормозящего сопротивления, и повидимому, увеличивая сопротивление, можно снизить скорость движения лидера вблизи стержня до значений, меньших $1 \cdot 10^5$—$2 \cdot 10^5$ см/сек.

ЭБ "Научное наследие России"

Примененная автором методика исследования развития разряда при помощи катодного осциллографа и фотоаппарата с временной разверткой дала весьма интересные результаты.

На рис. 62,*а* показана типичная осциллограмма (снятая в схеме, изображенной на рис. 63) напряжения тока, а на рис. 62,*б* в схематическом виде изображена картина развития разряда, получаемая на фотографии с временной разверткой. Совмещение по времени процессов, зарегистрированных фотоаппаратом и катодным осциллографом, сделано таким образом, что момент t_{hk} на осциллограмме, характеризующей окончание резких изменений токов, принят за момент окончания прорастания главного канала искры на фотографии. Как видно из сопоставления рис. 62,*а* и 62,*б*, начало интенсивного образования видимого на фотографии лидера происходит вблизи максимума напряжения и сопровождается относительно весьма слабыми, но быстро нарастающими по времени токами. Средние величины t_y, t_s и t_h, определенные из осциллограмм, близки к средним значениям интервалов времени, в течение которых происходит прорастание лидера и главного канала.

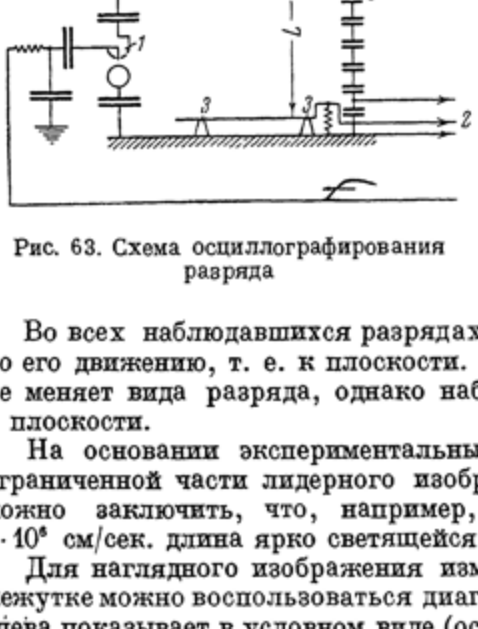


Рис. 63. Схема осциллографирования разряда

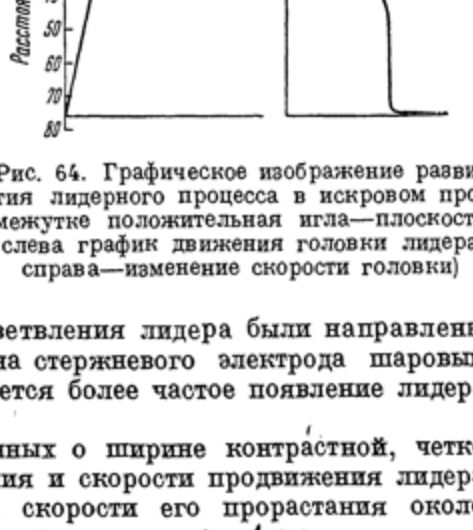


Рис. 64. Графическое изображение развития лидерного процесса в искровом промежутке положительная игла—плоскость (слева график движения головки лидера, справа—изменение скорости головки)

Во всех наблюдавшихся разрядах разветвления лидера были направлены по его движению, т. е. к плоскости. Замена стержневого электрода шаровым не меняет вида разряда, однако наблюдается более частое появление лидера с плоскости.

На основании экспериментальных данных о ширине контрастной, четко ограниченной части лидерного изображения и скорости продвижения лидера можно заключить, что, например, при скорости его прорастания около $2 \cdot 10^6$ см/сек. длина ярко светящейся «стрелы» не превышает 1 см.

Для наглядного изображения изменений скорости лидера в искровом промежутке можно воспользоваться диаграммой, изображенной на рис. 64. График слева показывает в условном виде (осью абсцисс служит время) движение головок лидеров. Кривые дают возможность определить истинную скорость продвижения лидера в любом месте искрового промежутка. Результаты подсчетов скоростей графически изображены в правой части рисунка (по Алибоне).

При некоторых условиях эксперимента, пока точно не определенных, возникает ступенчато прорастающий лидер. Ступени лидера, т. е. толчкообразно распространяющиеся его элементы, проходят отрезок длины искрового промежутка по пути, проложенному предыдущим элементом лидера, с большой скоростью. По прохождении ионизированного пути свечение стрелы лидера весьма быстро прекращается, отчего на фотографии он отмечается в виде тонкой, едва заметной линии. Достигнув места, в котором остановился предшествующий элемент, лидер продвигается дальше с замедленной скоростью, при этом его свечение резко усиливается. Число ступеней лидера весьма различно даже при одних и тех же условиях эксперимента. Полное время между

ЭБ "Научное наследие России"

началом лидера и началом главного канала также меняется в широких пределах. Наблюдается все же тенденция к увеличению числа ступеней при возрастании общего времени образования лидера. Увеличение произведения RC за счет увеличения тормозящего сопротивления R или емкости C, параллельной искровому промежутку, вызывает увеличение числа ступеней разряда. При этом увеличение емкости вызывает увеличение тока главного канала разряда.

При разрядах с заземленной плоскости иногда (не систематично) появляется встречный отрицательный лидер, достигающий одной пятой длины искрового промежутка.

2. Искровой промежуток: стержень—стержень. При электродах, установленных вертикально, лидеры растут навстречу друг другу. Этот случай на модели должен отображать явления, происходящие при разряде тучи на высокий заземленный объект. Скорость прорастания положительного лидера, т. е. стримера, развивающегося с положительного стержня, больше скорости отрицательного. Характерно, что положительный лидер значительно слабее отрицательного.

Скорости лидеров, растущих с обоих электродов, вариируют в значительных пределах. Вблизи катода отрицательный лидер имеет скорость, превышающую скорость положительного лидера, которой последний обладает вблизи анода. По мере удаления от катода скорость отрицательного лидера падает и делается меньше скорости анодного лидера. К месту встречи скорости обоих лидеров резко возрастают.

Разветвления, образуемые обоими лидерами, направлены в сторону продвижения каждого из них.

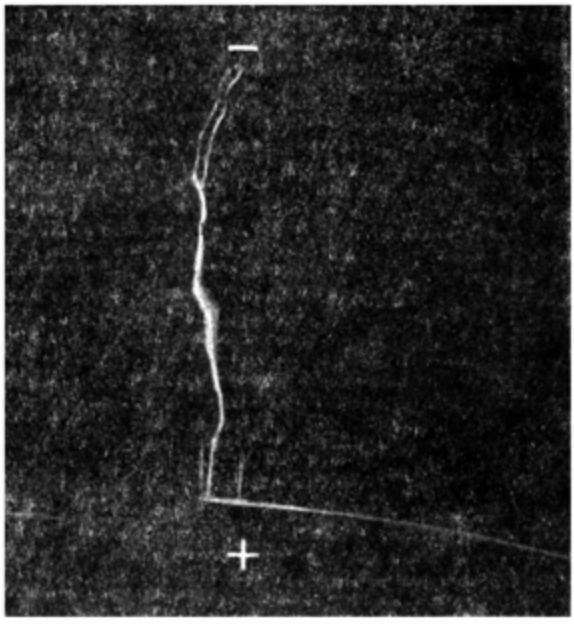


Рис. 65. Фотография разряда, развивающегося в промежутке отрицательный стержень — плоскость

3. Искровой промежуток: отрицательный стержень—плоскость. Получаемые при таком расположении электродов (рис. 65) снимки имеют своеобразный характер. Как видно, разряду, перекрывающему весь искровой промежуток, предшествует стример, растущий с такой скоростью, что расстояние между ним и каналом главного разряда остается неизменным. На приведенной фотографии длина стримера равна 12.7 см. Нижний предел скорости движения отрицательного лидера достигает примерно 10^8 см/сек. Одновременно с ростом отрицательного стримера со стороны плоскости наблюдается слабый стример, растущий к игле. Рост его облегчается наличием неоднородностей (швов, заусенцев) в железном листе. Но и при отсутствии каких-либо заметных неоднородностей на заземленной плоскости появляется вверх растущий лидер.

Дальнейший анализ разряда показывает, что точно по тому же пути через промежуток времени, измеряемый несколькими микросекундами, проходит второй стример, который смыкается со стримером, прорастающим из положительной плоскости. В месте смыкания стримеров образуется усиленное свечение. Значительные скорости отрицательного лидера в этом случае находят свое объяснение в больших градиентах поля, получающихся благодаря большим напряжениям.

Позднее Алибоне и Мик дали несколько более подробные сведения о скорости лидеров. Условное графическое изображение разряда показано на рис. 66.

ЭБ "Научное наследие России"

Как видно, на большей части пути отрицательный лидер имеет скорость около $1.5 \cdot 10^6$ см/сек., скорость же положительного лидера на большей части пути равна $2.6 \cdot 10^6$ см/сек. Скорость отрицательного лидера вблизи катода и обоих лидеров вблизи места их встречи резко возрастает. Наблюдающиеся перед развитием положительного лидера отдельные стримеры, повидимому, могут прорастать с очень большой скоростью (превышающей 10^8 см/сек.), хотя и распространяются по путям, предварительно не ионизированным. Появление таких быстро растущих положительных лидеров отмечено либо с плоских, либо сферических (но не стержневых) электродов.

Высота h точки соединения двух лидеров над пластиной, выраженная в процентах от общей длины L искрового промежутка, уменьшается с увеличением L при неизменных условиях цепи; h уменьшается также с уменьшением R. Возможно, что уменьшением h при увеличении L объясняется то, что снимки молний из отрицательных туч обычно не показывают лидеров, идущих от земли.

Согласно исследованиям, интервал времени между началом образования лидера и концом развития главного канала увеличивается при удлинении искрового промежутка и увеличении тормозящего сопротивления R. Скорость отрицательного лидера меняется в весьма широких пределах. Вблизи катода скорость весьма велика и поэтому трудно определима. Здесь лидерный процесс, видимо, идет по уже ионизированному пути. Вслед за быстрым процессом образования лидера идет более медленное его развитие со скоростью в пределах от нескольких километров до нескольких десятков километров в секунду ($0.1 \cdot 10^6 \div 5 \cdot 10^6$ см/сек.).

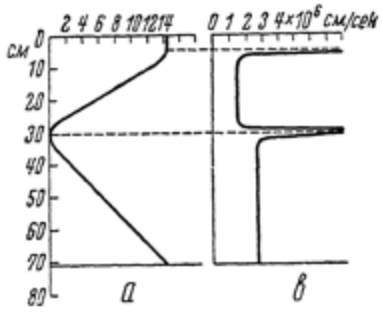


Рис. 66. Графическое изображение разряда в промежутке отрицательный стержень—плоскость
а—график движения головок лидеров, *б*—распределение скоростей головок лидеров

Ступенчатость лидера проявляется лишь при уменьшении давления ниже нормального. При атмосферном давлении ступени отрицательного лидера не имеют столь четко выраженного характера, как при положительном лидере, напоминая скорее стримеры, не повторяющие пути предыдущих разрядов.

Отметим еще, что результаты экспериментальных исследований развития искрового разряда при понижении давления от 76 до 24 см Hg, проделанных Алибоне, показали, что характер разрядов во всем этом диапазоне сохраняется.

Проведенными исследованиями установлено:

а) Каждому разряду в промежутке положительная игла—отрицательная плоскость предшествует лидер, распространяющийся от иглы к плоскости с переменной скоростью, величина которой обычно возрастает по мере приближения к отрицательной пластине. После соприкосновения лидера с плоскостью из последней, по направлению к игле, начинает распространяться главный канал.

Общий вид фотографии и схема развития разряда аналогичны таковым у молнии (см. главу IV).

При некоторых условиях цепи и давления воздуха лидер растет ступенчато. Увеличение сопротивления R ведет к образованию ступеней при давлениях в пределах 76—5 см Hg. При еще более низких давлениях лидерный процесс изучен мало. Повидимому, в этой области давлений существует тенденция к образованию непрерывных лидерных процессов.

б) В промежутке стержень—стержень лидеры растут с обоих электродов навстречу друг другу. Аналогичное явление имеет место при ударах молнии в высокие объекты, а по некоторым данным и в случае поражения ровного места. Это обстоятельство имеет весьма существенное значение при анализе вопроса о поражении сооружений грозовыми разрядами.

в) В промежутке отрицательный стержень—положительная плоскость

ЭБ "Научное наследие России"

образование лидера происходит с обоих электродов. При определенных условиях лидеры имеют ступенчатый характер прорастания.

Повторные разряды. Если в искровом промежутке разряды происходят последовательно через некоторые интервалы времени, можно говорить о повторном виде разряда. При этом траектория каждого последовательного импульса будет зависеть от физических условий, сопровождающих предшествующий импульс. Основную роль при этом играет количество энергии, выделяемое развивающимся импульсом, и интервал времени между двумя смежными импульсами. При обычных конструкциях высоковольтных контуров разряды могут быть даны через такие интервалы (измеряемые десятками секунд), при которых повторность пути отдельными разрядами не имеет места. Вальтер изучал повторность разрядов, питая искровый промежуток напряжением, генерируемым катушкой Румкорфа. Он наблюдал толчкообразно развивающийся разряд, образование которого имело место в случае двух стержней, с обоих электродов.

Многократные импульсы, повторяющие пути первого импульса, были получены автором и его сотрудниками и от импульсной установки. Схема установки такова. Напряжение от заряженного конденсатора C подводится к искровому промежутку через сопротивление R. Параллельно промежутку имеется добавочная емкость C_g, которой может иногда служить собственная емкость искрового промежутка. Развитие лидерного процесса вызывает падение напряжения на электродах разрядника, резко возрастающее при образовании главного канала. Появление и нормальное развитие последнего в значительной мере определяются зарядом, который может быть предоставлен конденсатором C_g. Падение напряжения на сопротивлении R ведет к обрыву разряда, что при соответствующем подборе величины ведет к тому, что конденсатор C остается частично заряженным. Вслед за обрывом главного канала напряжение на искровом промежутке начинает расти, и, если восстановление диэлектрической прочности воздуха идет медленнее, чем повышение напряжения на электродах, и абсолютная величина напряжения конденсатора является достаточной, происходит образование нового импульса. В зависимости от степени деионизации пути, пройденного первым импульсом, путь, прокладываемый лидером второго импульса, будет в той или иной степени отклоняться от траектории своего предшественника. Впервые многократный разряд от импульсного генератора исследован в лаборатории перенапряжений ВЭИ по схеме, аналогичной описанной, при помощи фотокамеры с быстрой временной разверткой и двухлучевым катодным осциллографом; эти эксперименты показали, что повторные импульсы обусловливают пилообразный характер напряжения. Величина напряжения, при котором происходит повторный разряд, зависит от величины интервала времени t между смежными импульсами. Амплитуда напряжения увеличивается с возрастанием t или уменьшением энергии, рассеиваемой в импульсах.

Механизм развития повторных разрядов идентичен для случаев положительной и отрицательной полярности стержневого электрода (промежуток: стержень—плоскость).

Можно à priori утверждать, что при определенном увеличении интервалов между смежными импульсами или уменьшении энергии импульсов траектория разрядов не будет полностью сохраняться. Нам удалось найти условия, при которых можно было произвольно вызывать отклонения траектории повторных импульсов от первоначального пути. Регистрация разряда производилась параллельно при помощи двухлинзовой фотокамеры и катодного осциллографа. Нижним электродом служила хорошо заземленная сетка. Разряд производился от импульсной установки, представляющей собой два последовательно разряжающихся конденсатора, емкостью по 0.15 μS каждый. Вариации величины сопротивления R и длины искрового промежутка давали возможность менять интервалы t между смежными импульсами разряда, а это вело к изменению траектории повторных импульсов.

Развитие такого рода исследований дало бы возможность осветить вопрос о влиянии ионизации воздуха на условия развития разряда.

ЭБ "Научное наследие России"

Заключение

Проделанные опыты показывают, что искровой разряд большой длины в неоднородном поле в широком диапазоне давления воздуха не только в общих чертах, но и во многих деталях своего развития тождественен грозовому разряду. Этот факт весьма облегчает изучение процессов формирования молнии и подводит научную базу под лабораторные эксперименты, имеющие целью установление защитных зон различного типа молниеотводов. Вместе с тем необходимо отметить, что искровой разряд и молния не настолько полно изучены, чтобы уже сейчас можно было делать заключения о строгой идентичности обоих процессов при любом масштабе сравнения. В качестве иллюстрации к сказанному можно привести следующий пример: в течение ряда лет при экспериментах

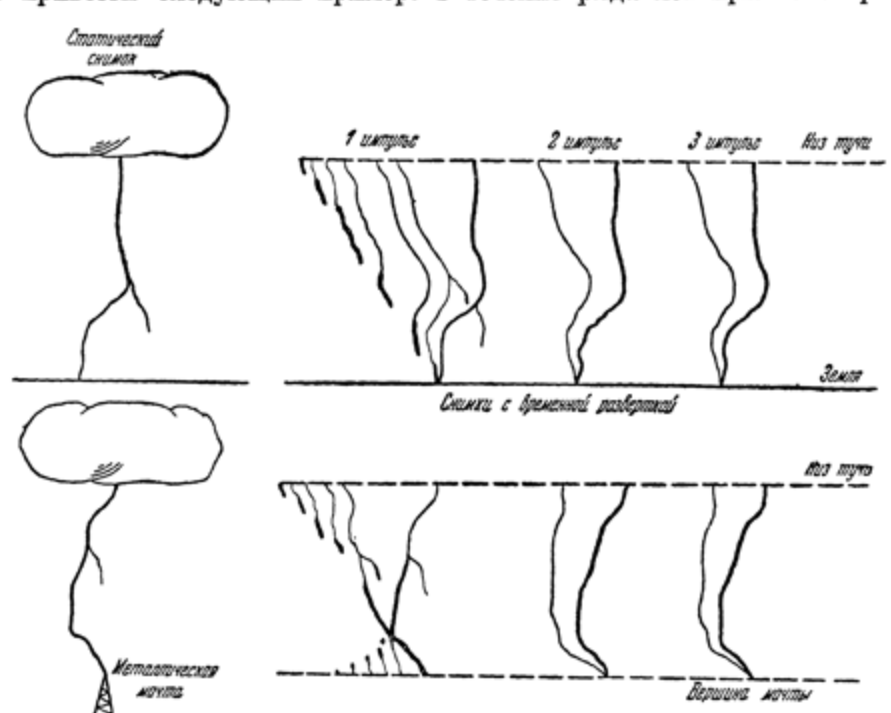


Рис. 67 Общая схема развития грозового разряда:
а—поражающего ровную местность, *b*—высокий объект

по установлению защитных зон молниеотводов на моделях исследования проводились с импульсами отрицательной полярности, что делалось с целью отображения полярности наиболее часто встречающегося типа туч. Изучение развития лидерных процессов искрового разряда в различных промежутках показало, однако, что для имитации условий развития лидера из отрицательно заряженной тучи определение защитных зон на моделях следует вести при положительном знаке стержневого электрода. Эта идея, высказанная автором еще в 1936 г., привела к установлению новой системы защитных зон для разного рода грозозащитных устройств.

На основании описанных результатов имеется возможность набросать общую схему развития грозового разряда, поражающего как ровную горизонтальную местность, так и высокий объект. Такие схемы изображены на рис. 67, подписи на котором делают его достаточно понятным.

Развитие лидера в случае разряда между тучей и относительно ровной поверхностью земли происходит из тучи. При положительном заряде области тучи, из которой образуется молния, это закономерно, ибо вполне соответствует процессу искрового разряда при электродах положительный стержень—отрицательная плоскость. По мере приближения лидера к земле поле у поверх-

ЭБ "Научное наследие России"

ности почвы усиливается, и вероятность роста встречного лидера от земли возрастает. Всякая неоднородность в рельефе земли (возвышающийся объект) или в самой почве (в виде, например, резко очерченных объемов грунта с проводимостью, отличной от проводимости окружающих пород) способствует образованию лидера. При наличии в районе действия грозовой тучи высоких объектов (металлические башни, здания и пр.) развитие лидеров происходит так, как при искровом разряде в промежутке игла—игла.

При отрицательном заряде тучи преимущественный рост лидера сверху указывает на существование каких-то факторов, облегчающих этот рост. Одним из таких факторов, помимо более интенсивного поля вблизи тучи, является пониженное давление в ее области.

2. ЛИДЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Весьма распространенной схемой, применяемой при изучении электрических процессов при разряде, является антенна, от которой напряжение подводится к отклоняющим пластинам катодного осциллографа.

Здесь необходимо остановиться на кратком рассмотрении процессов генерации электромагнитного поля атмосферными разрядами в наиболее интересных, начальных стадиях их развития.

Первая стадия процесса разряда—образование лидеров—связана с малыми токами и медленным относительно скорости света перемещением зарядов.

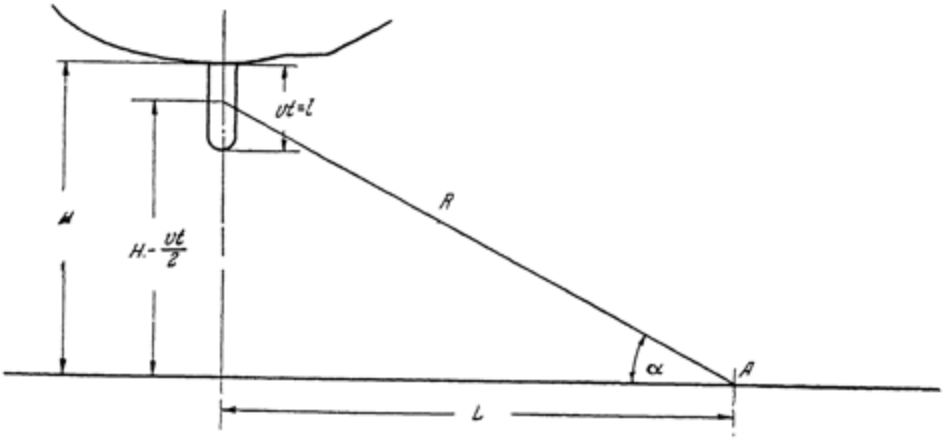


Рис. 68. Расчетная схема для определения изменения напряженности поля при развивающемся лидере

В этой стадии процесс может быть представлен в следующем виде. При прорастании лидера из тучи в канал прорастающего стримера спускается заряд. Для упрощения расчетов принимаем, что заряд q на единицу длины лидера постоянен. Согласно изложенному выше, скорость v продвижения лидера к земле принимается постоянной. За время t лидер удлиняется на vt, и высота его конца над землей (считая движение по вертикали) делается равной $H-vt$, где H—высота тучи (рис. 68). Так как заземленная (через большое сопротивление) антенна не отмечает напряженности поля, создаваемой статическим зарядом тучи, будем учитывать поле E, вызываемое продвигающимся каналом лидера.

Выведем уравнение для вертикальной компоненты напряженности поля в точке A, обусловленной частью канала лидера (рис. 68).

Пишем очевидные соотношения:

$$E_0 = \frac{ql}{R^2}; \qquad \frac{2ql}{R^2}\sin\alpha' = E;$$

$$\sin\alpha' = \frac{H - \frac{vt}{2}}{R};$$

$$R = \sqrt{\left(H - \frac{vt}{2}\right)^2 + L^2}.$$

ЭБ "Научное наследие России"

Таким образом,

$$E = \frac{2qvt\left(H - \frac{vt}{2}\right)}{\left[\left(H - \frac{vt}{2}\right)^2 + L^2\right]^{3/2}}. \quad (1)$$

При $H < L$,

$$E = \frac{2qvt\left(H - \frac{vt}{2}\right)}{L^3}. \quad (2)$$

Начальное поле от заряда тучи Q равно $\frac{2QH}{L^3}$. Изменение заряда Q при развитии лидера будет равно

$$Q = Q_0 - qvt,$$

и поле от этого заряда определяется формулой

$$E_T = \frac{(Q_0 - qvt)\,2H}{L^3}, \quad (3)$$

откуда полная напряженность поля E_n равна:

$$E_n = E + E_T = \text{const} - \frac{qv^2t^2}{L^3}. \quad (4)$$

Так как заземленная антенна не отмечает напряженности поля, то оно нарастает пропорционально квадрату времени (в течение которого лидер приближается к земле). Это справедливо для q и v постоянных. Длительность лидерного процесса, регистрируемого с помощью антенны, может быть не одного порядка с продолжительностью его прорастания до земли, что зависит от произведения сопротивления R заземления антенны на ее емкость C[1].

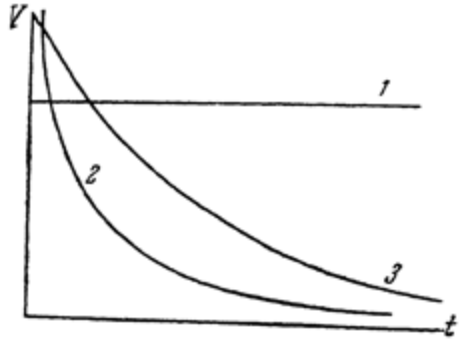


Рис. 69. Различный характер изменений скоростей лидеров по времени

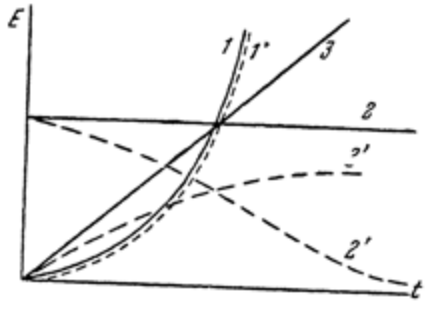


Рис. 70. Различный характер изменений напряженности поля при развитии лидеров

Рассмотрим, как отражается описанное временное изменение напряженности поля в атмосфере на регистрации, сделанной осциллографом, приключенным к антенне. Принимая q и v за постоянные величины (рис. 69, кривая *1*), найдем, что изменение E пропорционально квадрату времени t (рис. 70, кривая *1*). Если предположить, что скорость v уменьшается по мере приближения лидера к земле по закону $v = \frac{\text{const}}{t}$ (рис. 69, кривая *2*), найдем, что $E = \text{const}$ (рис. 70, кривая *2*). Если v меняется по закону $v = v\frac{\text{const}}{\sqrt{t}}$ (рис. 69, кривая *3*), то $E = t.$ const (рис. 70, кривая *3*).

Пунктирные линии на рис. 70 показывают действительные записи, производимые осциллографом при практически применяемых константах R_2C. Теперь

[1] Аналогичный анализ может быть сделан для случая молний между тучами.

ЭБ "Научное наследие России"

произведем анализ уравнения (1) при $H=L$. Пусть q и $v=\text{const}$. Подсчеты E, сделанные по уравнению (1) для $H=L=1$ и $H=1$, $L=0.5$ (при $2q=1$) в условных единицах, приведены в виде кривых $E=f(vt)$ на рис. 71. Произведенный анализ дает возможность расшифровать осциллограммы и клидонограммы и выяснить по ним возможный механизм разряда.

Если бы лидерный процесс имел остановки по типу ступенчатого лидера, на осциллограмме следовало бы ждать колебаний, вызванных как электростатическим полем, так и электромагнитными процессами индукции $\left(\frac{\partial Q}{\partial t}\right)$ и радиации $\left(\frac{\partial^2 Q}{\partial t^2}\right)$ (см. главу II).

Созданные за последние годы в различных странах (СССР, Швеции, Америке, Африке и др.) полевые и горные лаборатории уже дали обширные экспериментальные материалы. Не касаясь здесь ряда имеющих второстепенное значение исследований, рассмотрим лишь две работы, представляющие особенный интерес.

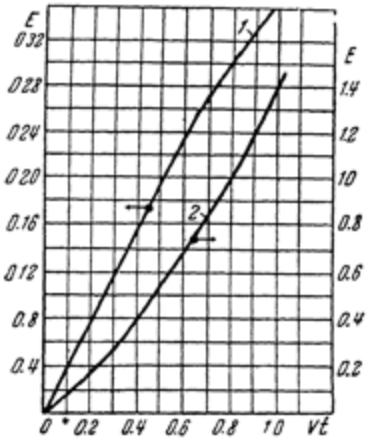


Рис. 71. Изменение напряженности поля при развивающемся лидере

Первая работа (опубликованная в 1937 г.) произведена с целью выяснения некоторых вопросов, связанных с происхождением атмосфериков. Апплтон и Чапмен на основании своих экспериментов дают средние формы волн в зависимости от расстояния разряда до места установки катодного осциллографа. Вид волны (рис. 72) сохраняется в интервале от 3—5 до 20—30 км. При больших расстояниях (45—50 км) в части b волны появляются колебания, по мере удаления разрядов от места регистрации занимающих все бо́льшую часть на фронте волны; при очень значительных расстояниях (300—400 км) процесс делается почти чисто колебательным.

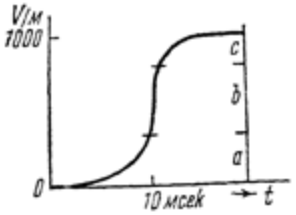


Рис. 72. Вид волны напряжения, зарегистрированной Апплтоном и Чапменом на антенне при удаленности молнии 3—5 км

В другой работе (опубликованной в 1938 г.) Шонланд, Ходжес и Колленс описывают сравнительные исследования молнии, проведенные электрическими и оптическими методами. Регистрация электрических процессов производилась ими при помощи катодного осциллографа, подсоединенного через усилитель к маленькой антенне. Для фотографирования разрядов служили камеры Бойса.

В названных работах разряды на земле (их зарегистрировано 71) разделялись на классы α и β. Вид записей, получаемых осциллографом в примененной схеме от обоих типов разрядов, показан на рис. 73 и 74. Разряды типа α (рис. 73) наиболее многочисленны (65%). Первому импульсу приписывается ступенчатый лидер. На основании этого в лидерной части осциллограммы ожидается появление пульсаций (без указания их относительной величины к главному изменению поля), наблюдавшихся Апплтоном и Чапменом. Пульсации наблюдались на всех частях α — кривой изменений поля. Интервалы между пульсациями колебались от 40 до 65 μS, что находится в удовлетворительном согласии с интервалами между ступенями лидера (от 31 до 91 μS). Характерно, что эти пульсации не наблюдались у лидеров повторных разрядов. Сравнением средних интервалов времени между отдельными элементами разряда (лидер, главный канал, последующие импульсы и пр.), измеренными по фотоснимкам и по осциллограммам, установлено удовлетворительное совпадение этих величин. Все разряды произошли из туч, имевших отрицательную

ЭБ "Научное наследие России"

полярность. Исключительно многочисленные и интересные катодно-осциллографические и клидонографические материалы получены Бакурианской горной лабораторией в 1938—1940 гг.

При близких грозовых разрядах (до 4—5 км) напряжение, подводимое к осциллографам, бралось с делителя, что давало возможность обычно записывать волну полностью, без отброса катодного луча за экран. При отдаленных разрядах (более 5 км) осциллографы присоединялись к антенне непосредственно после волнового сопротивления. Как правило, каждая волна напряжения запи-

Рис. 73. Типовая схема изменения напряжения на антенне от разрядов типа α

сывалась осциллографами с различными временными развертками (происходившими по экспоненциальному закону), что дает возможность рассматривать записи, сделанные одним прибором, как бы лупой времени, используя для этого записи другого прибора с более быстрой разверткой. За грозовые сезоны 1938—1939 гг. тремя осциллографами было записано свыше 3 000 разрядов, происшедших на расстоянии от 0.8 до 70—80 км от лаборатории.

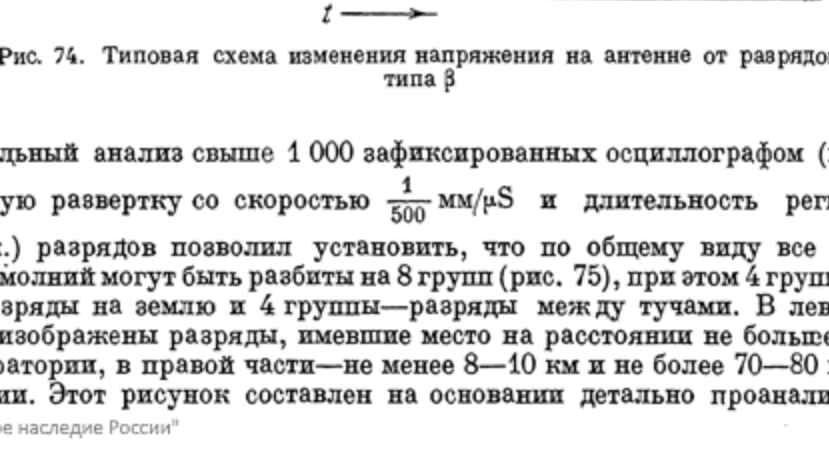
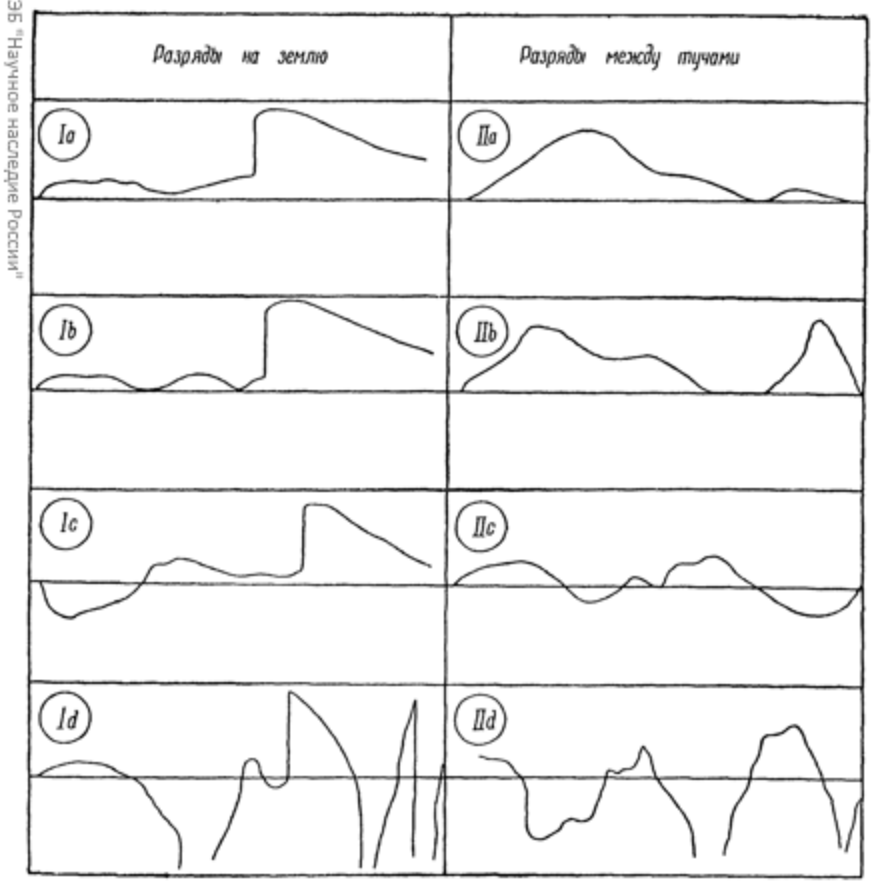


Рис. 74. Типовая схема изменения напряжения на антенне от разрядов типа β

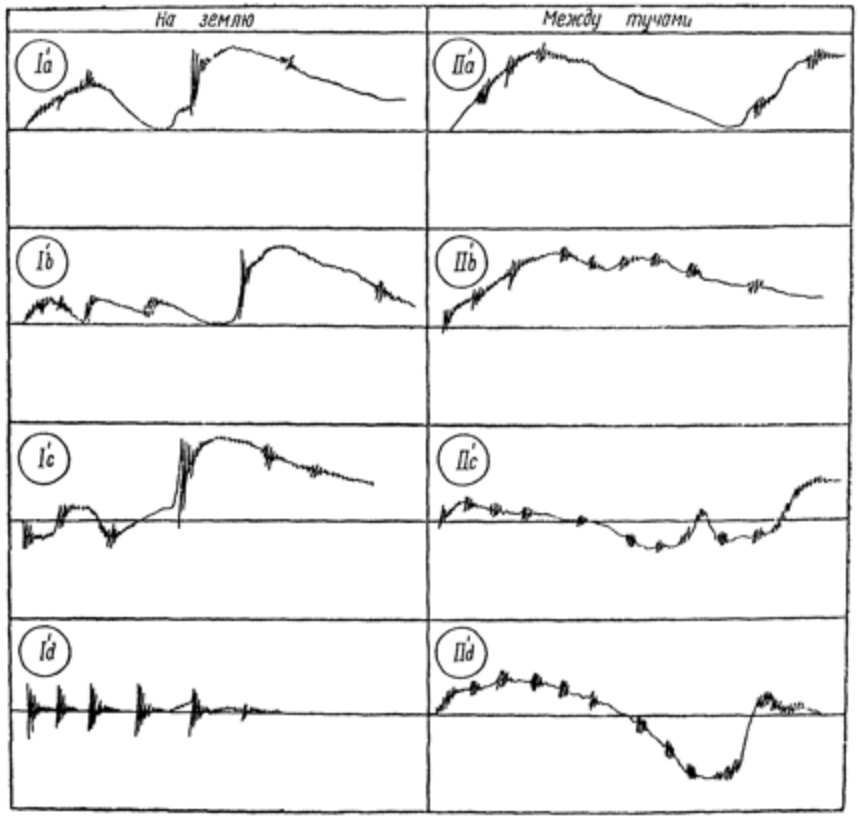
Детальный анализ свыше 1 000 зафиксированных осциллографом (имевшим временную развертку со скоростью $\frac{1}{500}$ мм/μS и длительность регистрации 2—3 сек.) разрядов позволил установить, что по общему виду все осциллограммы молний могут быть разбиты на 8 групп (рис. 75), при этом 4 группы включают разряды на землю и 4 группы—разряды между тучами. В левой части рис. 75 изображены разряды, имевшие место на расстоянии не больше 7—8 км от лаборатории, в правой части—не менее 8—10 км и не более 70—80 км от лаборатории. Этот рисунок составлен на основании детально проанализирован-

ЭБ "Научное наследие России"

ЭБ "Научное наследие России"



a



b

Рис. 75. Типы осциллограмм индуцированных напряжений, полученных в 1939 г. бакурианской лабораторией:
a—при близких разрядах; b—при дальних разрядах

ных 399 осциллограмм. В табл. 4* приведено число осциллограмм в каждой группе, указанных на рис. 75. Группы разрядов I′*b*, I′ *c* и II′ *c* среди обработанных указанным путем осциллограмм не имели своих представителей, однако среди общего числа зарегистрированных разрядов имеются молнии, которые могут быть отнесены к названным группам, но их записи имеют некоторые дефекты (выход за пределы значительной части осциллограммы, малая амплитуда кривой и пр.).

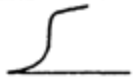
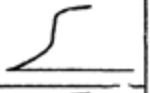
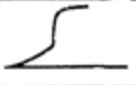
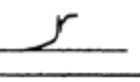
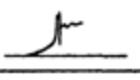
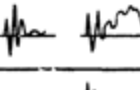
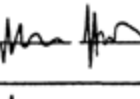
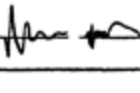
Таблица 4

Тип осциллограммы	Число осциллограмм	Тип осциллограммы	Число осциллограмм
I*a* α	7	I′*a* α	17
I*a* β	30	I′*a* β	15
I*b*	29	I′*b*	—
I*c*	32	I′*c*	—
I*d*	15	I′*d*	5
II*a*	53	II′*a*	41
II*b*	32	II′*b*	24
II*c*	54	II′*c*	—
II*d*	21	II′*d*	24

В табл. 5 и 6 приведены попытки систематизации осциллографических снимков молнии, сделанные Аппльтоном и Чапменом (табл. 5) и Шонландом, Ходжесом и Колленсом (табл. 6).

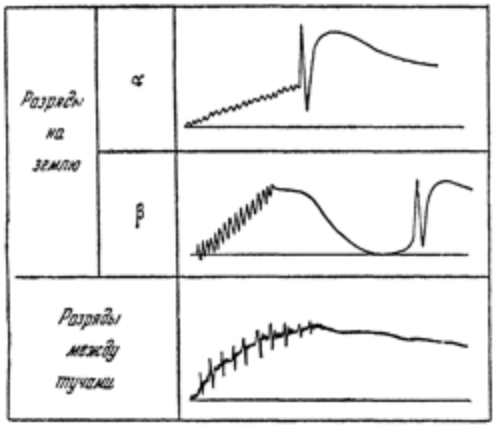
Как видно из табл. 5, осциллограммы систематизированы в зависимости от расстояния разряда до места регистрации по виду лишь только фронтовой части волны. Авторы не связывают вид волны с молниями между тучей и землей или между тучами. Таким образом авторы принимают только один вид волны. Трансформация волны, обнаруживающаяся по мере удаления разрядов от лаборатории, понятна в свете анализа трансформации вида электромагнитного импульса по мере его распространения, произведенного ранее (стр. 57).

Таблица 5

Расстояние в км	Типичная форма волн
3-5	
10	
20-30	
45-50	
60	
100	
150-200	
300-400	

Вторая группа исследователей различает два вида разрядов на землю, названных ими α и β; третий вид осциллограмм приписывается авторами молниям между тучами. Описывая этот последний вид волн, Шонланд и другие

Таблица 6



исследователи указывают, что обычно поле медленно нарастает, достигая максимума. На подъем накладываются высокочастотные колебания (пульсации) того же характера и с теми же интервалами, что и найденные ими для ступенчатого лидера. Характерная кривая изменения поля, вычерченная нами на основании приведенных авторами трех осциллограмм, помещена в табл. 6 в третьей графе.

* По материалам бакурианских экспедиций 1939 и 1940 гг.

ЭБ "Научное наследие России"

Изучение материалов, которыми мы располагаем, позволило выявить среди групп разрядов, помеченных на рис. 75 номерами I*a* и I′*a*, два типа, аналогичных описанным осциллограмм α и β. С другой стороны, сравнение регистраций группы II*a* и II′*a* (рис. 75*a*) и осциллограмм графы третьей табл. 6 показывает, что, будучи идентичными в общих чертах, осциллограммы группы II′*a* нашей классификации имеют более сложную структуру.

Сделанное сопоставление показывает, что полученные в бакурианской лаборатории регистрации охватывают значительно больше типов разрядов, чем это до сих пор было известно. В течение 1939 г. осциллографами типа ПАКО-8 были сделаны регистрации на 680 кадрах, на которых записано около 1 500 волн.

На основании полученных материалов можно проанализировать ряд вопросов и количественных соотношений, связанных с образованием лидера.

а) Является ли лидерный процесс неотъемлемой частью линейной молнии? При рассмотрении оптических материалов можно было бы притти к заключению, что в большинстве случаев линейные молнии не сопровождаются лидерными процессами. Однако анализ осциллограмм показывает обратное. Действительно, 150 зарегистрированных осциллографом разрядов на землю (близких и дальних) имели лидерный процесс в виде сравнительно медленного и часто нерегулярного изменения потенциала на антенне, предшествующего весьма кратковременному крутому взбросу потенциала, приписываемого главному каналу молнии.

Типовые записи волн, приведенные на рис. 75 в группах I и I′, иллюстрируют весьма различные типы лидерных изменений потенциала. Эти изменения, на основании сделанного в главе II анализа, приписываются нами лидерным процессам разрядов. Наиболее просто эти явления протекают в случае разрядов типа I*a*, подразделяемых на основании полученных осциллограмм, как уже упоминалось, на две группы, по внешнему виду аналогичные разрядам типа α и β, изображенным в табл. 6.

Здесь рост лидера может быть достаточно четко сопоставлен с подъемами в кривой потенциала на осциллограмме (см. главу III). Подъем кривой означает быстрый рост лидера, падение кривой по экспоненциальному закону с константой, равной величине антенны, означает остановку лидера. Наконец, падение кривой, более замедленное, чем по экспоненциальной зависимости, с константой R_2C указывает на замедленный рост лидера. На рис. 75 осциллограммы групп I*b* и I′*b* имеют более сложный ход лидерного процесса. Здесь, повидимому, часть процесса развивается в туче, и лишь после некоторой мобилизации зарядов начинается развитие собственно лидерного процесса. Разряды типа I*c* и I′ *c* с наличием в своей начальной стадии биполярного изменения потенциала могут служить подтверждением сказанному. Более бурные предразрядные процессы в туче ведут к появлению колебательных разрядов; этот тип иллюстрируется группой I*d* и I′*d*. Здесь лидерный процесс выявляется менее четко, однако все же с достаточной уверенностью можно считать его существующим.

Таким образом, лидерный процесс существует у каждого первого импульса грозового разряда. При повторных импульсах лидерные процессы более кратковременны, что объясняется быстрым развитием лидеров повторных импульсов, распространяющихся по уже ионизированному первым импульсом пути.

Рассмотрение осциллограмм типа II, особенно группы II*a* и II*b*, показывает, что молния не состоит из двух компонент—лидера и главного канала, как у разрядов на землю. Действительно, на осциллограммах отсутствуют резкие скачки напряженности поля, характерные для быстрого развития главного канала. Причиной этого является то, что разряд одного из заряженных объемов тучи прорастает к другому, также заполненному зарядами, но не имеющему достаточной проводимости для быстрой нейтрализации зарядов лидера. Эта идея о влиянии сопротивления второго «электрода» может быть применена и к случаю разряда на землю с очень большим удельным сопротивлением (ρ). При очень большом ρ можно себе легко представить разряд остановившимся в воздухе. Это подтверждается экспериментами, проделанными в лаборатории по изучению молнии ЭНИН. При введении в цепь разрядного контура тормозящего сопротивления R, лидерный процесс, как будет показано далее, замед-

ЭБ "Научное наследие России"

ляется и наконец делается прерывистым. При этом скачок тока, характеризующий на осциллограмме разряда главный канал, по мере увеличения R постепенно уменьшается и наконец совсем исчезает. Есть основание полагать, что в ряде случаев существуют молнии без главных каналов. Это в первую очередь относится к незавершенным разрядам.

б) Каковы средние времена образования лидерных процессов первых и повторных импульсов молнии? На рис. 76 на основании 61 осциллограммы разрядов на землю, происходивших в большинстве случаев на расстоянии 1—5 км от лаборатории, построена зависимость процентного распределения промежутков времени $T_л$, считаемых от начала записи осциллограммы до начала крутого скачка потенциала. Кривая A построена для положительных лидеров, кривая B—для отрицательных. Как видно, величина $T_л$ меняется в пределах приблизительно $5 \cdot 10^{-3}$—$238 \cdot 10^{-3}$ сек. при положительных лидерах и $6 \cdot 10^{-3}$—$177 \cdot 10^{-3}$ сек. при отрицательных. Если считать, что промежутки $T_л$ соответствуют времени образования лидерных процессов, то делением длины молнии L_0 на $T_л$ получаются средние скорости $v_{ср}$ движения лидеров, предшествующих первым импульсам. При $L_0 = 2$ км средние скорости образования положительных лидеров лежат в пределах $4 \cdot 10^7$—$7.3 \cdot 10^5$ сек., а отрицательных в пределах $3.3 \cdot 10^7$—$1.13 \cdot 10^6$ см/сек. Средние скорости положительных лидеров, по измерениям Мак Икрона, колеблются в пределах $5 \cdot 10^5$—$6 \cdot 10^7$ см/сек.

Рис. 76. Длительность прорастания лидеров разрядов на землю в процентном распределении: A—положительные лидеры, B—отрицательные лидеры

Наименьшие скорости прорастания отрицательного лидера, установленные английскими исследователями, достигают 10^7 см/сек., что почти в 10 раз больше скорости, определенной нами.

Касаясь вопроса о лидерах у повторных импульсов, следует отметить, что, как уже было установлено (стр. 76 и рис. 58), между $v_л$ и t нет однозначной зависимости; v зависит как от t, так и от интенсивности предшествующего импульса. (Это полностью подтверждается экспериментами с искрой.) По своей структуре первые импульсы, как правило, ветвисты. Обычно сильноразветвленные интенсивные разряды одноимпульсны. Ни один из повторных импульсов не имеет ветвей. По внешнему виду все фотографии главных каналов можно разделить на две категории: на первых яркость каналов не меняется с их длиной, на вторых яркость уменьшается по мере удаления от земли.

На рис. 77 построены процентные зависимости (от анализированного числа импульсов) промежутков времени $T_л$ прорастания повторных лидеров. Здесь же для сравнения приведена процентная зависимость (b) промежутков времени T_1 продвижения лидеров первых импульсов, построенная в 1939 г. на основе катодно-осциллографических записей. Как видно, $T_л$ в 250—350 раз менее T_1.

в) О ступенчатом прорастании лидера. На основании регистраций, полученных бакурианской экспедицией в 1938 г., было сделано заключение, что образование лидера может происходить без ступеней. Действительно, скачкообразный процесс продвижения лидера показывал бы на осциллограммах ступенчатый рост потенциала. Величину ожидаемой на осциллограмме ступени можно было бы определить так. При условии, что ступени лидера (согласно Шонланду) имеют среднюю длину 60 м, число ступеней, при длине канала 2 км, равно 30 и, при установленном масштабе осциллограмм, величина ступени на экране осциллографа колебалась бы в пределах 0.3—1 мм, что было бы уже вполне различимо. Благодаря тому, что антенна, на которой регистрировались напряжения при помощи двух ПАКО-8 (№ 1 и 2), была под-

ЭБ "Научное наследие России"

вешена значительно выше, чем антенна, подведенная к отклоняющим пластинкам осциллографа № 3, чувствительность осциллографов № 1 и № 2 была в 5—6 раз больше, чем осциллографа № 3. Таким образом, величина ступени на осциллограммах от ПАКО-8 достигла бы в среднем 1.5—6 мм. Уже отклонения от прямой линии осциллограммы на 0.5 мм можно легко обнаружить, поэтому ступень лидера в 5 м могла бы быть отмечена осциллографически. Однако большинство разрядов и на землю и между тучами дает совершенно гладкий ход кривых изменений потенциала (рис. 78). Следовательно, ступени лидера, о которых говорят английские исследователи, не обязательны. Многие осциллограммы, однако, содержат на быстрых взбросах потенциала высокочастотные колебания, осью которых является плавная кривая изменения потенциала (рис. 79). Это вызывается колебаниями тока в формирующемся канале лидера,

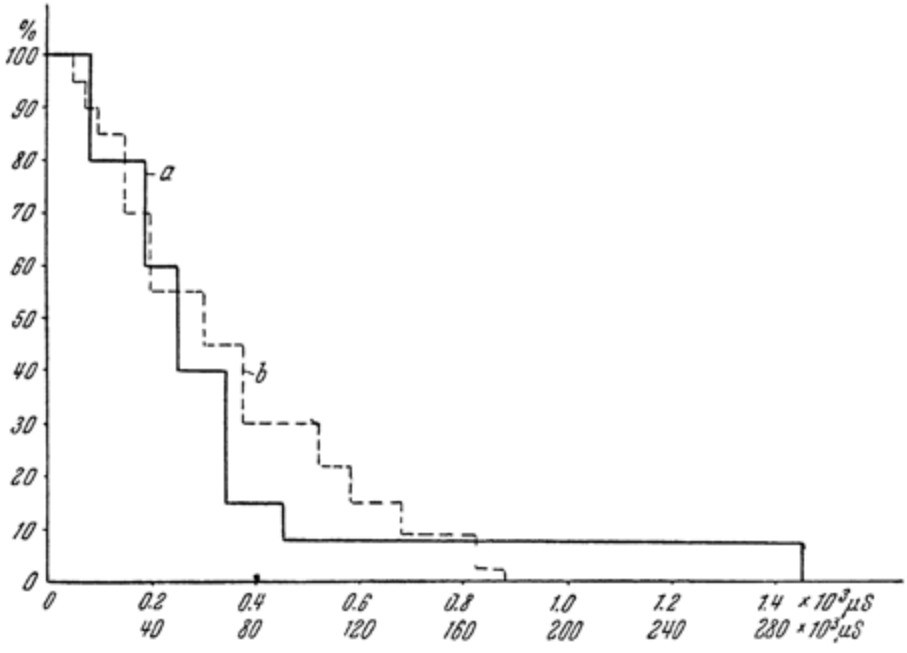


Рис. 77. Длительность прорастания лидеров молнии

а не ступенчатым его продвижением. Наконец, в ряде случаев осциллограммы показывают ступенчатое нарастание потенциала (рис. 80) с длиной ступеней обычно (но не всегда) в сотни микросекунд.

На основании изложенного можно заключить, что ступенчатое распространение лидера—явление незакономерное.

Из сделанных бакурианской экспедицией катодно-осциллографических регистраций (рис. 81) можно видеть, что переход от лидерной части *ab* (рис. 81,*a*) к главному каналу *bc* у отдельных импульсов происходит в разные промежутки времени. Так, у импульса на рис. 81,*b* переход произошел плавно в течение 830 μS, а у импульса на рис. 81,*c* переход имел скачкообразный характер, и время перехода во всяком случае меньше 50 μS.

В ряде случаев наблюдается, что после резкого скачка в точке *O* имеет место сравнительно медленное нарастание потенциала (например, в случае импульса, изображенного на рис. 81,*c*, в течение 300 μS), после чего происходит более быстрое изменение потенциала. Такое изменение потенциала характеризует ступенчатое изменение тока в главном канале, обусловленное, например, существованием ответвлений.

На основании существующих осциллографических данных нельзя сделать заключения о факторах, влияющих на форму переходного элемента лидерного процесса в главный канал. Можно лишь отметить, что характер перехода не зависит от порядкового номера импульса в разряде и условий грунта. Далее,

ЭБ "Научное наследие России"

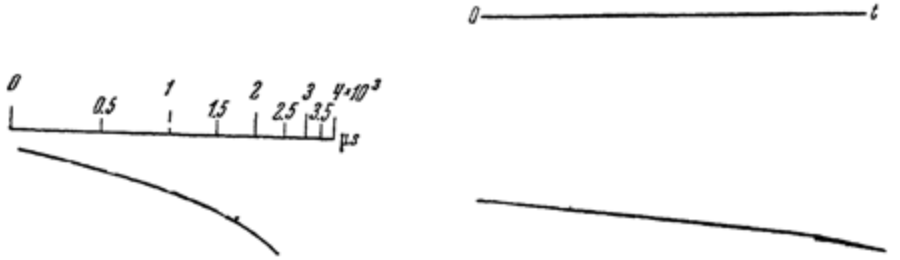


Рис. 78. Осциллограммы индуктированного на антенне грозовыми разрядами напряжения при плавном прорастании первого лидера

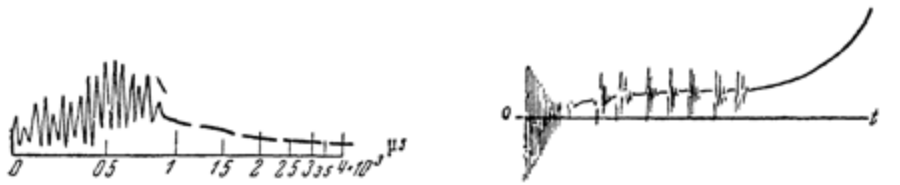


Рис. 79. Осциллограммы индуктированного на антенне грозовыми разрядами напряжения при неравномерно распределенных ступенях

Рис. 80. Осциллограммы индуктированного на антенне грозовыми разрядами напряжения при ступенчатом прорастании первого лидера

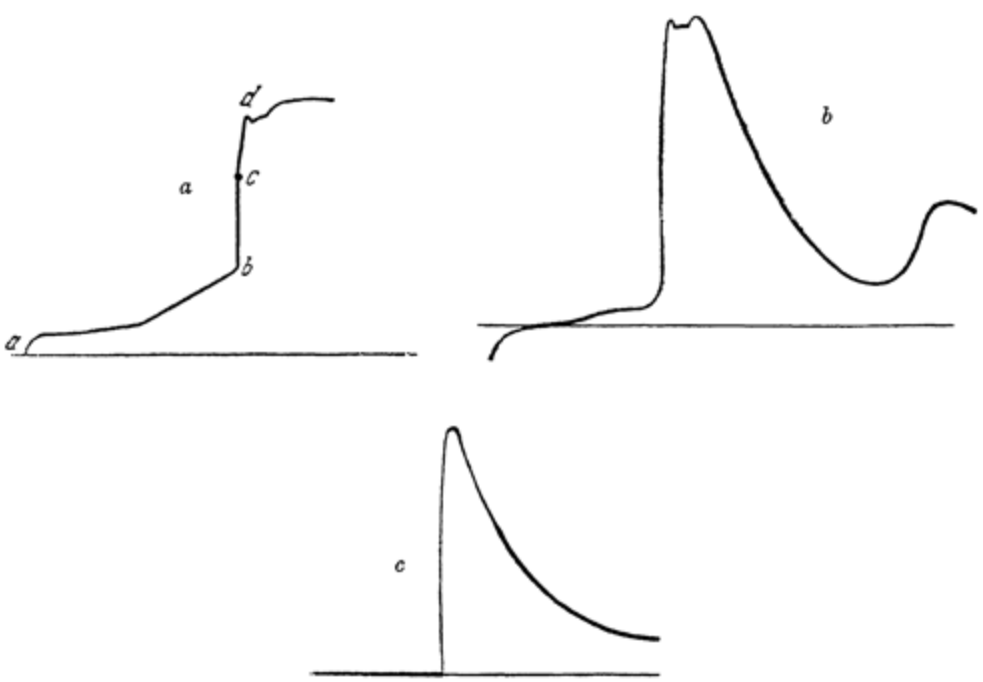


Рис. 81. Осциллограммы индуцированных грозовыми разрядами напряжений, показывающие переход от лидерной части к главному каналу молнии

ЭБ "Научное наследие России"

можно отметить, что длительность существования наиболее крутой части изменения потенциала не превышает 40—80 μS. Вслед за этой наиболее крутой частью, повидимому соответствующей току главного канала, идет более пологая часть, которая должна соответствовать послесвечению, обнаруженному фотографическими снимками. Длительность этой части осциллограмм измеряется в 100—1 000 μS и более.

Полученные здесь материалы являются хорошим дополнением к осциллограммам токов прямых разрядов, о которых речь будет итти ниже.

3. ДИАМЕТР КАНАЛА МОЛНИИ

Одной из количественных характеристик разряда, непосредственно определенной по фотоснимку, является диаметр канала разряда. Однако эта величина условная, так как она зависит от ряда побочных обстоятельств (например, качество и характер оптики). «Диаметр» канала, определенный по снимку, сделанному кварцевым объективом, будет больше, чем по снимку, сделанному обычным объективом той же светосилы, за счет действия излучений и ультрафиолетовой части спектра. Первые определения диаметров молнии сделаны косвенным образом. Так, измерения следов ударов молнии в песок (фульгуриты) показали, что диаметр канала не превышает 40 см. Теплер указывает, что были отмечены следы молнии, прошедшей сквозь оконные ставни и оставившей отверстия всего лишь в несколько миллиметров в диаметре. Конечно, при различных воздействиях молнии следует считаться с разными физическими представлениями о «диаметре» канала молнии.

Рюденберг считает, что диаметр молнии колеблется в пределах от нескольких сантиметров до нескольких дециметров. Бьюли в своих расчетах пользуется для радиуса канала молнии величинами от 3 до 60 см.

Беллаши, измеривший фотографическим путем диаметр канала искры при токе того же порядка, что и ток молнии ($140 \cdot 10^3$ А), дает значения диаметров 10—25 см. По его мнению, однако, эти цифры значительно превышают действительный диаметр канала разряда. При этом он исходит из своих наблюдений, согласно которым при искре той же интенсивности на поверхности полированного электрода образуется пятно диаметром 1.5 см; в то же время искра, проходящая сквозь трубку диаметром 2 см, развивает внутри ее давление взрыва, превышающее 15 000 атм. Как видно, опыты дают противоречивые результаты. Действительно, если диаметр канала искры не превышает 1.5 см, то неясна причина образований огромных давлений в трубке, имеющей диаметр 2 см.

В 1937 г. Шонланд опубликовал сделанный неподвижной камерой снимок молнии, на котором необходимый сдвиг изображений каналов отдельных импульсов разряда осуществлен ветром. Разряд проходил в чистом воздухе (без дождя) на расстоянии 230—280 м от камеры и состоял из 11 импульсов, из которых первый (слева) наиболее широк и разветвлен; импульсы 2, 3, 4 и 8, 9 едва разделены. Изменение петель и изгибов указывает на то, что имели место значительные местные колебания в величине и направлении скорости ветра, средняя величина которого все же оставалась примерно постоянной в пределах 70-метровой части разряда, уместившегося на фотопластинку. Измерив на снимке промежуток между I и II импульсом и зная расстояние до места разряда, легко определить фактическое разделение первого и последнего импульсов; оно оказалось равным 3.7 м по перпендикуляру к линии зрения. Скорость ветра в том же направлении составляет 8 м/сек. Таким образом, весь удар длится 0.46 сек., причем средний интервал времени между ударами составляет 0.046 сек. Эта цифра находится в полном соответствии с установленным ранее для этой местности наиболее вероятным интервалом в 0.03 сек. Самый большой интервал в 0.08 сек. имеет место между двумя последними импульсами. Наиболее короткий интервал 0.02 сек. между 2, 3, 4 и 8, 9 импульсами.

Полученная ширина каналов превышает разрешающую способность линз не более чем в 10 раз. Действительные диаметры каналов, подсчитанные с учетом расстояний от камеры до разряда, равны:

Импульс	1	2	3	4	5	6	7	8—9	10	11	*x*	*y*
Диаметр канала, в *см*	23	20	16	16	16	15	19	19	16	11	13	17

ЭБ "Научное наследие России"

Как видно, диаметр равен в среднем 16 см, несколько увеличиваясь при сильных первых ударах и уменьшаясь у разветвлений.

Аналитически диаметр канала молнии, если определять его сечение как площадь, по которой протекает весь ток I, может быть определен на основании представлений о сохранении энергии. Действительно, мощность, выделяемая током I, протекающим по каналу, определяется произведением I на величину градиента потенциала по длине канала E. Эта энергия в стационарном состоянии канала расходуется на тепловые потери W. Если обозначить радиус канала через R, а его проводимость через x (так что плотность тока $i=Ex$), то баланс энергии выразится уравнением

$$IE=(xE\cdot\pi R^2)\,E=2\pi RW,$$

откуда

$$R=\frac{2W}{xE^2}.$$

С другой стороны, величина градиента может быть, как показал Оллендорф, определена из условий равновесия сил: электромагнитных, стягивающих канал, и газотермодинамических, стремящихся его расширить (см. стр. 122). На основании этого соотношения может быть установлена зависимость между E и температурой канала T (рис. 82).

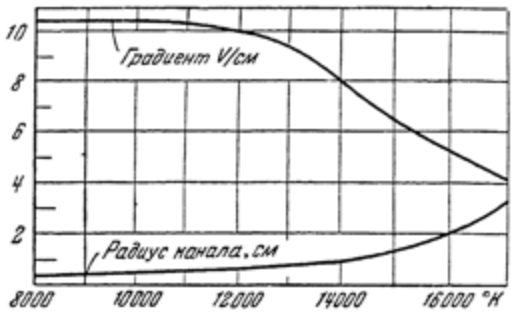


Рис. 82. Зависимости радиуса канала молнии от температуры

Как видно, даже при относительно небольших температурах в канале, градиенты имеют небольшие значения. Величина R может быть определена в зависимости от температуры канала. На рис. 82 дана зависимость $R=f(T)$, вычисленная Оллендорфом, исходя из предположения, что W определяется лишь потерями на конвективный перенос тепла (без учета потерь тепла на излучение). Из сопоставлений значений, даваемых расчетной зависимостью $R=f(T)$, с результатами оптических регистраций можно заключить, что температура в канале молнии превышает 17 000—18 000° К.

Весьма важным дополнением к этим исследованиям являются регистрации, сделанные электрическими методами, среди которых наиболее полные сведения может дать катодный осциллограф.

4. ДЛИНА КАНАЛА МОЛНИИ

Средняя длина видимой части линейной молнии равна 2—3 км. Длина молнии не зависит от высоты района над уровнем моря. Так, в горных местах Кавказа на высоте 1 500—2 000 м средняя длина молнии такая же, как и на равнинах.

Длина канала молнии в самой туче неизвестна, однако по некоторым наблюдениям можно предполагать, что она может достигать значительных размеров. Согласно данным Ханна, наиболее длинные молнии достигали 40 км. По наблюдениям, сделанным автором в бакурианской экспедиции, длина междутучевых молний превышала 10—15 км.

5. ФОРМА ВОЛН ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

а. Осциллографические записи

Наиболее полные сведения об изменениях тока в процессе развития молнии может дать катодный осциллограф. Первые осциллограммы токов прямых ударов молнии, поразивших молниеприемник подмосковной лаборатории (в 1936 г.), изображены на рис. 83.

ЭБ "Научное наследие России"

Записи осциллограмм b, c, d получились местами весьма бледными, получить с них фотографические репродукции было невозможно, поэтому на оригиналах в местах, не вызывающих никаких сомнений, были нанесены пунктирные линии. С таких восстановленных кривых были сняты копии, репродукции которых даны на рис. 83, b, c и d[1]. На том же рисунке (e и f) даны осциллограммы токов двух импульсов молнии, поразившей в 1938 г. Empire State Building в Нью-Йорке. Регистрации представляют изменение токов главных каналов молнии;

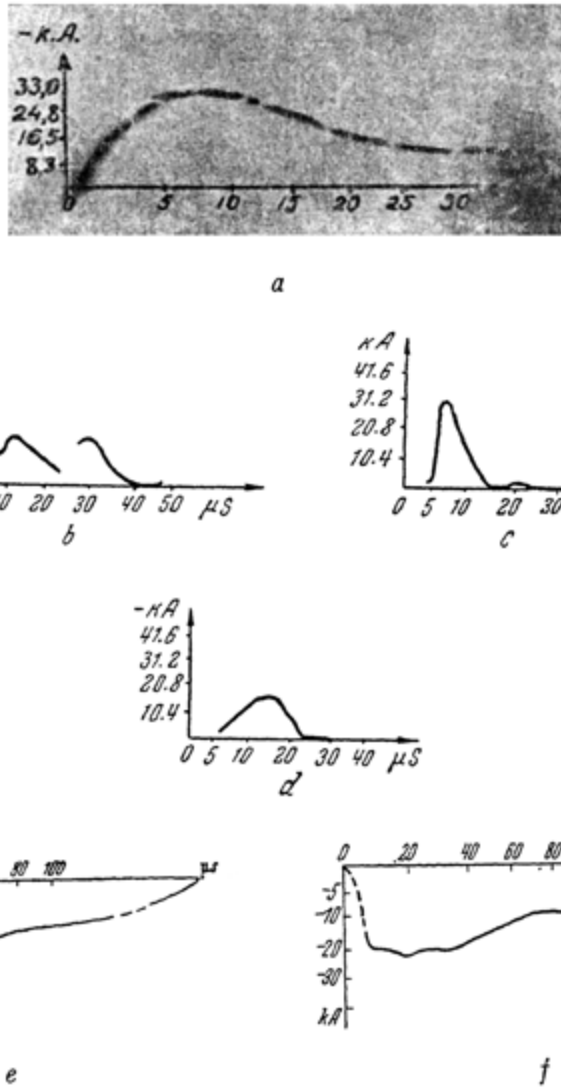


Рис. 83. Катодные осциллограммы прямых ударов молнии, записанных катодным осциллографом:
a—d—в подмосковной лаборатории; e—f—на нью-йоркском небоскребе

лидерный процесс при выбранном сопротивлении шунтов ввиду малой величины токов не мог быть зарегистрирован. Как видно, некоторые записанные в разных местах токи имеют поразительное сходство в характере изменения в параметрах, что показывает на общность процесса формирования токов главного канала по крайней мере при малых сопротивлениях заземления. В табл. 7 приведены некоторые характерные значения токовых волн, полученные на основании анализа осциллограмм.

[1] Помимо этих регистраций были получены еще две, дающие возможность определить лишь некоторые параметры (см. табл. 7).

ЭБ "Научное наследие России"

Таблица 7

Параметры \ Номера осциллограмм	1	2	3	4	5	6	7	8
Амплитудное значение тока, в kA	30	18	31	17	30	13.6	21	19
Фронт волны, в μS	8.5	10	8.5	15	15.2	>20	19	10
Продолжительность t_2 импульса тока от $t=0$ до $J_m/2$, в μS	22	17	10	20	—	—	60	100
Наибольшая крутизна токовой волны $\left[\frac{di}{dt}\right]_{max}$, в kA/μS	6.6	7.6	25	4.0[1]	—	—	8.4	5
Средняя крутизна токовой волны, в kA/μS	3.5	1.8	3.65	1.1	10÷20	<0.68	1.1	1.9
Количество электричества в импульсе тока, в C	0.5	0.22	0.12	0.15	—	—	~2	~2
Полярность импульса	Отрицательная				Колебательный разряд	Отрицательная		

[1] Измерено на хвосте волны.

На рис. 84 приведены перерисовки осциллограмм, записанных шлейфовым (кратерным) осциллографом, приключенным к тиритовому шунту (см. главу II). Ввиду инерционности пишущей системы прибора судить о быстрых изменениях тока нельзя; ценность такого рода осциллограмм заключается в том, что они

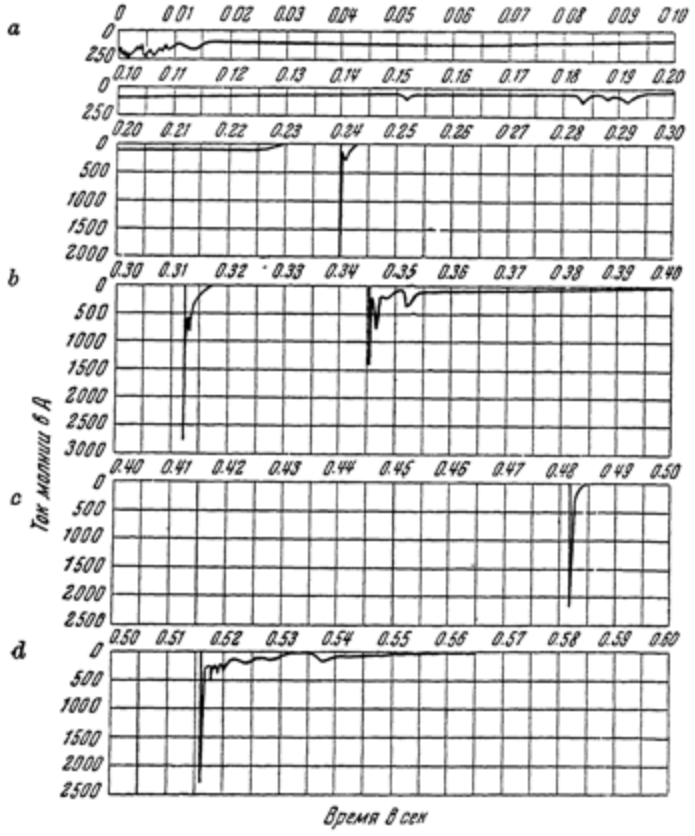
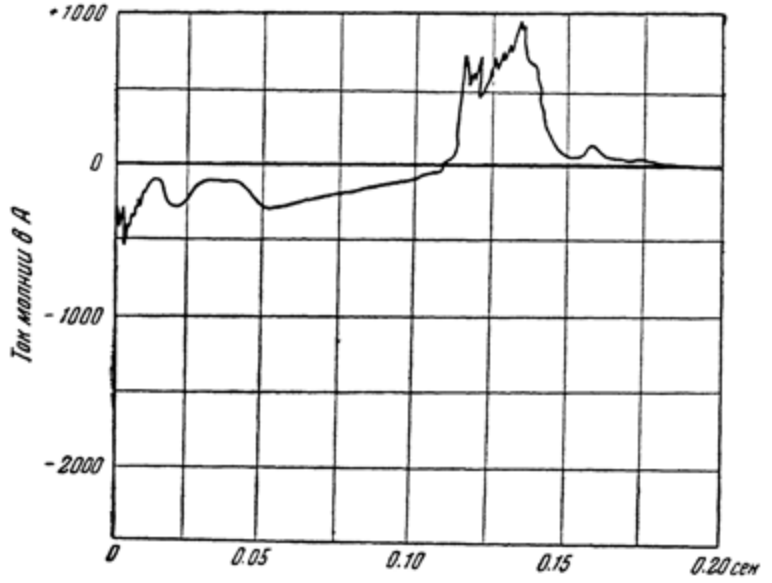
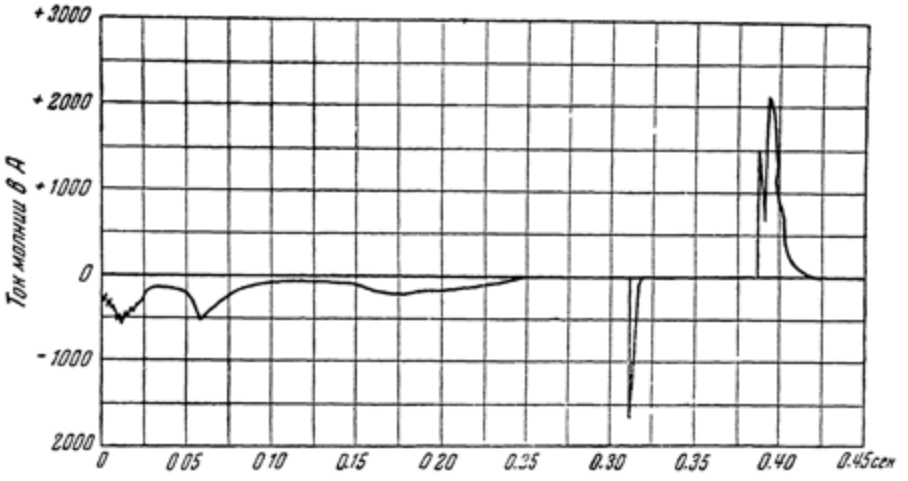


Рис. 84*a*. Осциллограмма прямого удара молнии, длительностью 0,6 сек.

ЭБ "Научное наследие России"





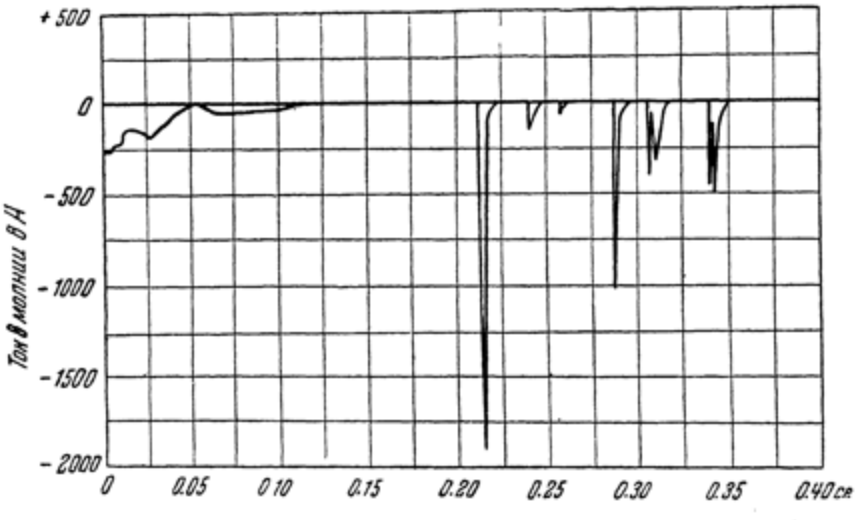


Рис. 84*b*. Три типичных осцилограммы, зарегистрированных шлейфовым осциллографом

ЭБ "Научное наследие России"

показывают процесс изменения тока в течение всего разряда или большей его части, включая и лидерный процесс.

В ряде случаев, когда ток между смежными импульсами не спадает до нулевого значения, мы видим непрерывные разряды.

Непрерывные разряды не есть следствие ударов только в высокие здания, что подтверждено наблюдениями в местностях с ровной поверхностью. Затягивание вытекания зарядов из туч обусловлено их структурой и именно малопроводящим характером объемов тучи. Пики тока могут быть как результатом проникновения разрядов в новые заряженные области туч, разделенные изолирующими слоями, так и разрядом данного объема после паузы. Роль проводимости земли в образовании непрерывных разрядов несущественна.

b. Записи фульхронографом

Вагнер, Мак Канн и Бек опубликовали данные, полученные с помощью фульхронографа при разрядах молнии в объекты высотой от 100 до 200 м. Из 12 полученных регистраций только одна дает указание на то, что разряд был

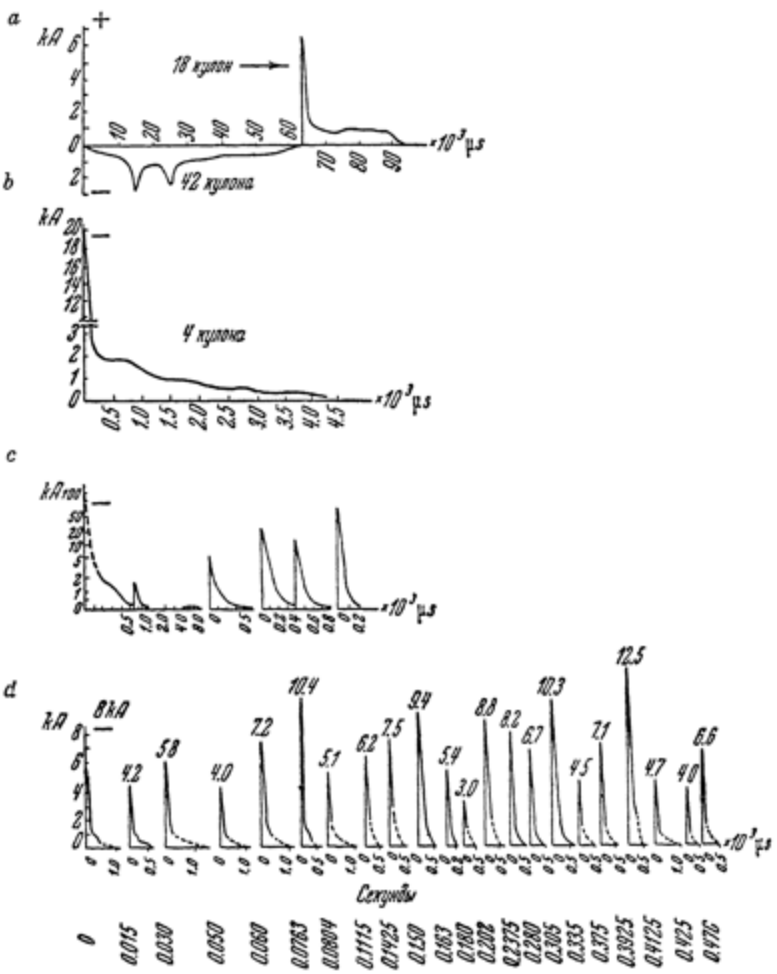


Рис. 85. Волны тока, расшифрованные по записям фульхронографа

возбужден вверх идущим стримером. Эта регистрация показана на рис. 85,*a*. На рис. 85,*c* показан разряд с максимальным током, протекшим через одиночный проводник. На фульхронограмме 85,*d* получено наибольшее число импульсов тока. Эта регистрация показывает также, что импульс с наибольшим током не обязательно находится в начале разряда. Аналогичное соображение было несколько лет назад высказано Стекольниковым и Шонландом.

ЭБ "Научное наследие России"

6. АМПЛИТУДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКОВ МОЛНИИ

Среди массовых измерений токов молнии ферромагнитными регистраторами следует различать два направления: первое—измерение токов в опорах линии электропередач и второе—в защитных разрядниках.

Во всех случаях измерений с точки зрения параметров разряда необходимо учитывать возможные искажения тока молнии при растекании по системе. Естественно, что большое количество данных, полученных в той или иной системе, хорошо характеризует картину токораспределения в ней и наиболее вероятные значения токов молнии.

а. Обработка материалов измерений токов на линиях электропередач

Работы по измерениям параметров токов молнии в СССР проводились в широком масштабе, чем обусловлено быстрое, сравнительно с другими странами, накопление материалов измерений.

Полученный[1] за 1937—1940 гг. большой материал по амплитудным значениям токов позволяет сделать весьма существенные выводы, имеющие решающее значение для проведения расчетов, связанных с грозоупорностью электрических высоковольтных систем и промышленных сооружений.

С целью унификации влияющих на результат измерений условий, в которых производились измерения токов молнии, было сделано приведение всех измеренных токов к токам разрядов на «идеальное заземление». При пересчете токов, измеренных на деревянных незаземленных опорах, учитывалось переходное сопротивление канала молнии на землю. К токам, измеренным на деревянных незаземленных опорах, делалась дополнительная поправка, о которой сказано ниже.

Если, например, сопротивление заземления молниеотвода было равным R, а измеренный в нем ток был равен I, то принималось, что действительное значение тока канала молнии равно $\frac{2I}{\alpha}$, где α—коэффициент преломления в молниеотвод, равный $\frac{2Z_0}{Z_0+R}$. Волновое сопротивление канала молнии Z_0 принималось при этом равным 250÷300 Ω.

В тех случаях, когда были измерены токи молнии на нескольких рядом стоящих заземленных опорах, объединенных общим тросом, принималось, что ток канала молнии был равен сумме измеренных токов в соседних опорах.

Как известно, арифметическое сложение амплитуд токов молнии, измеренных в соседних опорах, относящихся к общему разряду, дает несколько преувеличенное значение тока канала молнии. Поскольку к настоящему времени еще не выработан метод более точного подсчета, мы пренебрегли вносимой при простом суммировании ошибкой.

Значительные трудности вызывает пересчет измеренных токов молнии в деревянных незаземленных опорах на идеальное заземление.

После ряда поисков и анализа различных расчетных методов решено было следовать следующей схеме: при разряде молнии в деревянную опору принимается, что сопротивление растеканию тока молнии у опоры равно сопротивлению металлической трубы длиной в 1.5 м. Переходное сопротивление заземления этой трубы в схеме переносилось к месту поражения. Такое допущение сделано, исходя из того, что ни в одном из известных случаев записей осциллографами волн тока молнии длина фронта записанных волн не была менее 3—4 μS, в силу чего волновые процессы при перераспределении токов на коротких участках линий, между действительным местом поражения и заземлением, успеют в существенной части закончиться до наступления максимума тока.

---

[1] В основу этого раздела положен материал отчета, составленного А. А. Ламдоном, причем для построения графиков были использованы все имевшиеся в лаборатории материалы по магнитозаписи за 1937—1940 гг. включительно.

ЭБ "Научное наследие России"

Принятие переходного сопротивления тока молнии на землю равным соответствующему сопротивлению забитой в землю металлической трубы обосновано тем, что длина обнаруженных в песке фульгуритов часто достигает 1.5 м и более (см. стр. 183).

При анализе измерений принималось, что в среднем сопротивление такой «трубы» равно 50÷100 ом для большинства грунтов, исключая такие, как гранит, базальт и т. п.

Действительно, если учесть влияние искрообразования в земле, доводящего действующий диаметр трубы, например, в песке до 0.5 м (в воздухе при появлении короны «действующий» диаметр достигает нескольких метров), из известной формулы получим:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = 89 \text{ ом},$$

где l—длина трубы, равная 150 см, d—диаметр трубы, с учетом искрообразования равной 50 см, и ρ—удельное сопротивление песка, равное $4 \cdot 10^4$ ом/см.

В других, лучше проводящих грунтах (суглинок, глина и пр.), фульгуриты по понятным причинам могут иметь значительно меньшие длины, но зато и ρ у этих грунтов значительно меньше.

Оба эти фактора несколько компенсируют друг друга, и поэтому переходное сопротивление канала на землю можно считать примерно одинаковым для большинства грунтов. Что же касается размера «действующего» диаметра трубы, то очевидно, что в большинстве случаев он будет определяться процессом искрообразования, так как уже при токе порядка 5—6 kA будет иметь место явление короны.

У грунтов с повышенной проводимостью, по сравнению с песчаным грунтом, «действующий» диаметр короны будет несколько меньше, однако это не окажет большого влияния, так как одновременно с уменьшением знаменателя дроби (d) уменьшится величина, входящая в числитель. Помимо того эта дробь находится под знаком логарифма, и изменения будут иметь относительно малое влияние на R.

При анализе токов молнии, записанных на группе рядом стоящих деревянных заземленных опор, по характеру этих токов, их полярности, наличию или отсутствию расщеплений дерева и перекрытий изоляции, а также по некоторым другим факторам, они относились к одному или нескольким разрядам. В частности, учитывалось также распределение тока по опорам. Принималось, что соседняя от пораженной током молнии опора может оказаться перекрытой лишь в том случае, когда по пораженной опоре потечет ток молнии не менее 20 kA.

Действительно, если принять с запасом, что сопротивление растеканию тока молнии в земле и опоре равно 100 ом, находим, исходя из импульсной прочности деревянной (100 kV) линии передач, равной примерно $(2 \div 3)\ 10^6\ v$ что максимальный ток в опоре, при котором не будет перекрыта соседняя опора, должен быть меньше $\frac{(2 \div 3)\ 10^6}{100} = 20 \div 30$ kA.

b. Полученные результаты и их анализ

В результате анализа измеренные в течение четырех лет токи молнии в 1 068 опорах и молниеотводах были отнесены к 807 разрядам молнии. Отметим, что среди измеренного до 1939 г. (включительно) 551 разряда 326 токов молнии было измерено на заземленных объектах и остальные 225 на незаземленных.

После приведения всех токов к «идеальному заземлению» были построены кривые вероятности появления токов молнии различных амплитудных значений для всей территории СССР (рис. 86).

Кривая *а* построена по токам, измеренным на заземленных объектах, а кривая *б*—по токам, измеренным на незаземленных деревянных опорах.

В другой интерпретации кривые приведены на рис. 87.

ЭБ "Научное наследие России"

ЭБ "Научное наследие России"

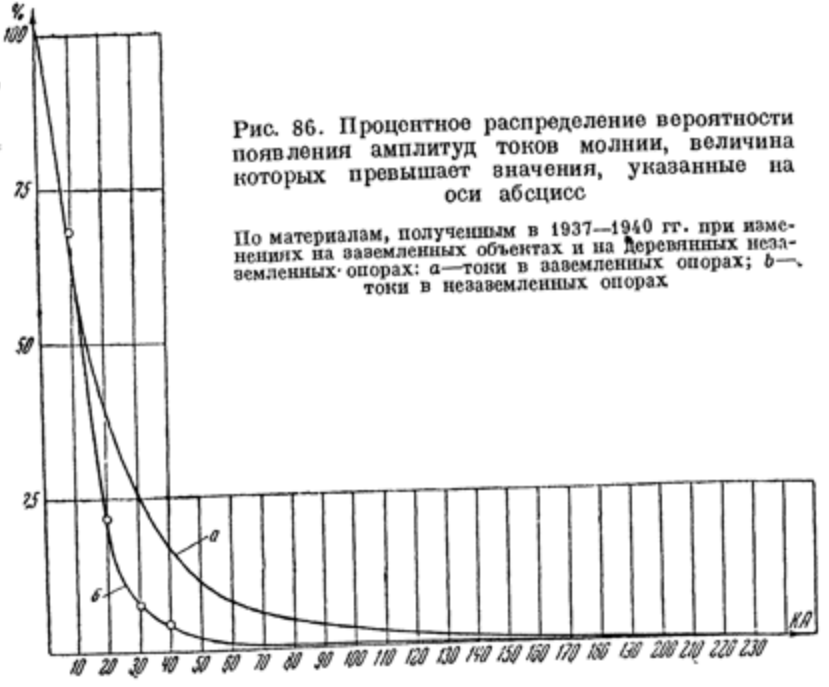


Рис. 86. Процентное распределение вероятности появления амплитуд токов молнии, величина которых превышает значения, указанные на оси абсцисс

По материалам, полученным в 1937—1940 гг. при измерениях на заземленных объектах и на деревянных незаземленных опорах: *а*—токи в заземленных опорах; *б*—токи в незаземленных опорах

Рис. 87. Графики вероятности появления амплитуд токов молнии на заземленных и незаземленных объектах по материалам, полученным с 1937 по 1940 г. включительно:

——— на заземленных объектах, построено по 526 замеров; ····· на незаземленных объектах, построено по 281 замеру

Окончательная поправка к токам, измеренным на деревянных опорах во всех районах СССР, за исключением горных районов Кавказа, вносилась по построенным на рис. 86 кривым.

Поправочный коэффициент находился следующим образом. Если, например, измеренный на незаземленной деревянной опоре ток молнии был равен, после приведения к идеальному заземлителю, 20 kA, то согласно кривой *а* вероятность появления токов с амплитудой выше этого значения будет равна 21% и соответствующий ток на кривой *б* будет равен 35 kA.

Из сопоставления кривых видно, что пересчетный коэффициент меняется от 1 в области малых токов, далее сохраняет значение, близкое к 2 в диапазоне средних токов, и несколько возрастает в области больших токов.

Пересчетные коэффициенты для токов, измеренных на деревянных незаземленных опорах линий передач электроэнергии, расположенных в горных районах Кавказа, определялись по кривым, построенным только по материалам измерений, полученным в этих районах (рис. 88). Это оказалось возможными благодаря почти равноценному распределению количества измеренных токов — на заземленных объектах (98) и на незаземленных деревянных опорах (86).

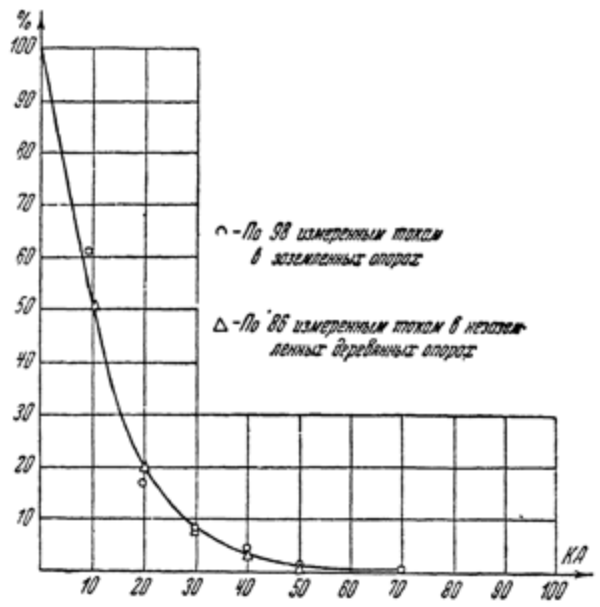


Рис. 88. Кривые вероятности появления амплитуд токов молнии по материалам измерений в горных районах Кавказа 1937—1940 гг. включительно
○—по 98 измеренным токам в заземленных опорах; Δ—по 86 измеренным токам в незаземленных опорах

Весьма характерно, что в отличие от кривых рис. 86, точки на рис. 88 расположены фактически на одной кривой, что, видимо, объясняется большим удельным сопротивлением грунтов.

На базе полученных материалов, соответствующим образом унифицированных, построены кривые вероятности появления токов различных значений со ступенями в 10 kA.

На рис. 89 и 90 приведены общие графики по всем сделанным в СССР за 4 года измерениям. При оценке вероятности появления того или иного тока молнии следует иметь в виду следующее обстоятельство. При 150 замерах крутизны токовых волн на линиях передач ферромагнитные регистраторы, установленные так, что они могли измерять амплитуды от 2 kA, в 80 случаях тока не отметили. Таким образом, примерно в 50% случаев амплитуда тока молнии не достигала предела измеряемых величин. Это обстоятельство указывает на факт, согласно которому вероятность появления данной амплитуды тока будет значительно меньше, чем это указывается графиками 89 и 90.

Для уточнения величины процента случаев токов молнии с амплитудой, меньшей 5 kA, необходим тщательный анализ существующих материалов, и постановка специальных исследований.

На рис. 91 даны кривые для восьми отдельных районов СССР, по которым было получено сравнительно большое число измерений в каждом. Поскольку кривые построены по приведенным к «идеальному заземлению» токам молнии, т. е. как бы приведены к идентичным условиям растекания в земле, эти данные отображают геологическую и метеорологическую особенность районов, для которых они построены.

ЭБ "Научное наследие России"

ЭБ "Научное наследие России"

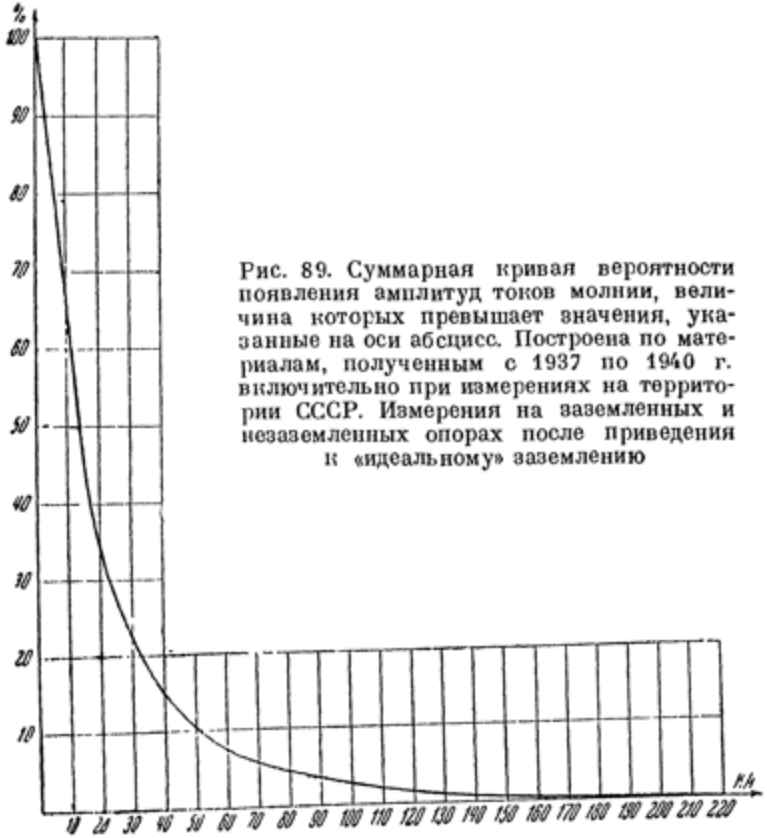


Рис. 89. Суммарная кривая вероятности появления амплитуд токов молнии, величина которых превышает значения, указанные на оси абсцисс. Построена по материалам, полученным с 1937 по 1940 г. включительно при измерениях на территории СССР. Измерения на заземленных и незаземленных опорах после приведения к «идеальному» заземлению

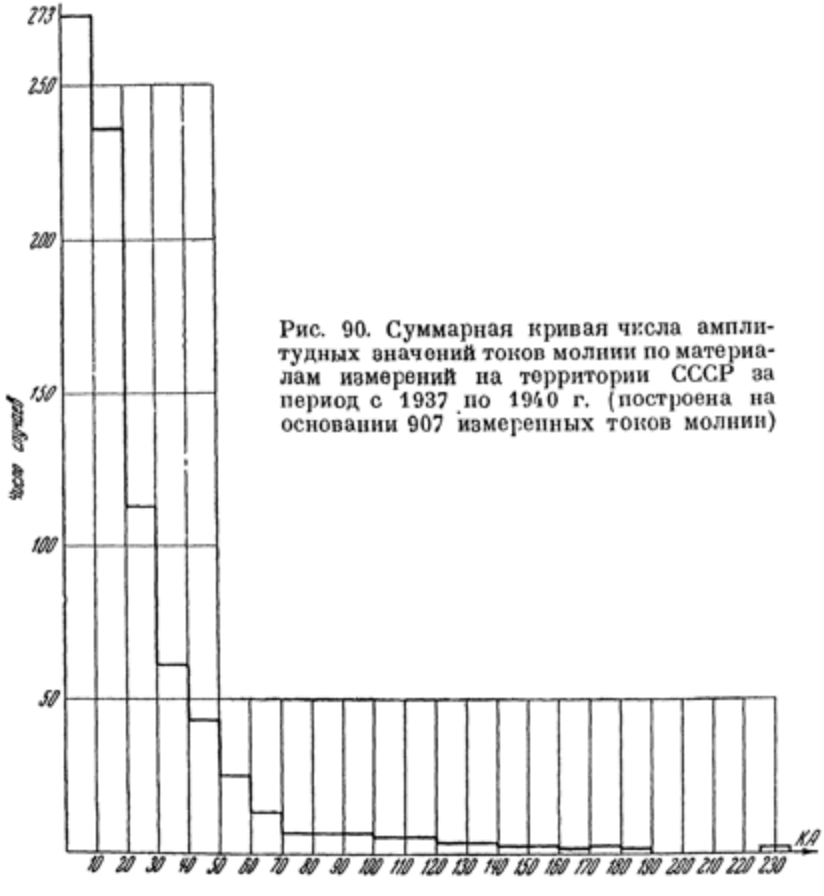


Рис. 90. Суммарная кривая числа амплитудных значений токов молнии по материалам измерений на территории СССР за период с 1937 по 1940 г. (построена на основании 907 измеренных токов молнии)

По ряду других районов недостаточность количества измерений не позволяет пока построить аналогичные кривые. Для некоторых районов кривые позволяют построить достаточно плавную кривую, однако все же материалов для выводов о связи между интенсивностью разрядов и геофизическими характеристиками недостаточно. Естественно, что приводимые порайонные кривые с увеличением количества измеренных токов будут уточняться.

Интересно отметить, что среди нескольких измеренных токов молнии на линии передачи, проходящей от обширной Колхидской низменности, на берегу Черного моря (Абхазская АССР), один измеренный ток превышает 170 kA, в то время как в горных районах Кавказа в течение четырех лет ни в одном из многочисленных случаев измерений (184) амплитуда тока не превышала 70 kA.

Полученные результаты дают возможность отметить различие амплитудных значений токов молнии в разных районах СССР и кладут основу для более подробного изучения вопроса о связи между геофизическими и метеорологическими явлениями.

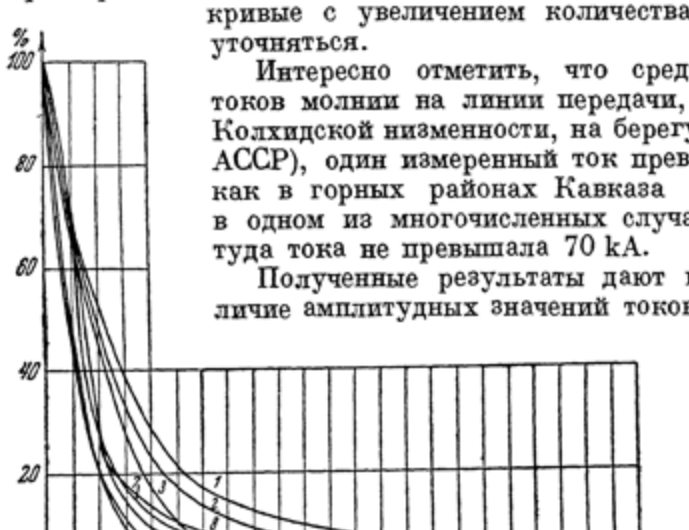


Рис. 91. Процентное распределение вероятности появления амплитуд токов молнии, величина которых превышает значения, указанные на оси абсцисс:

1—Ленэнерго; *2*—Донэнерго и Харэнерго; *3*—Днепроэнерго; *4*—Азчерэнерго; *5*—горные районы Кавказа; *6*—Киевэнерго; *7*—Уралэнерго; *8*—Горькэнерго и Казэнерго. Примечание. Измерения проведены на заземленных и незаземленных опорах после приведения их к «идеальному» заземлению. Это сделано для кривых *1, 2, 3, 4, 6, 7, 8* по данным на рис. 86, а для кривой *5*—по данным на рис. 89

Как видно из кривых, токи молнии, при одной и той же вероятности появления, в районе свирской линии по своей амплитуде сильнее токов, замеренных на линиях днепровской системы, хотя удельное число поражений (число поражений на 1 км) свирской системы меньше, чем днепровской. Еще более резкое различие максимальных значений токов наблюдается у свирской системы, с одной стороны, и кавказской и киевской—с другой.

Сравнение токов, измеренных в условиях примерно одинаковых сопротивлений растекания опор, показывает, что географическое расположение рассматри-

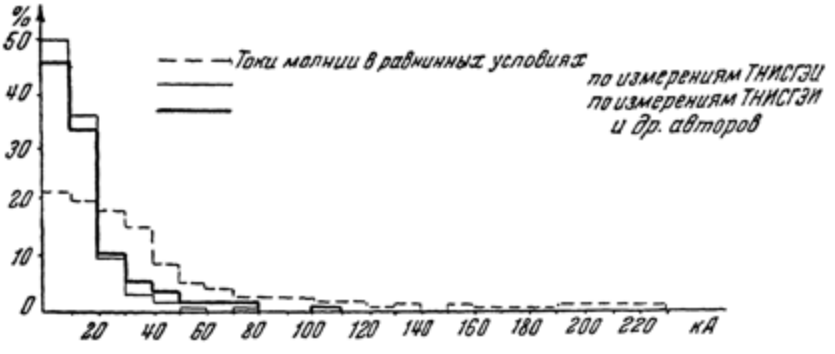


Рис. 92. Сравнение процентного распределения амплитудных значений токов молнии в горных и равнинных районах

ваемых систем не имеет того значения, какое ему обычно приписывают. С другой стороны, наблюдения за эксплоатацией высокогорных систем в весьма грозоносных районах Кавказа показывают, что токи разрядов, поражающих линии (даже на металлических опорах), относительно невелики. Иллюстрацией может служить рис. 92, на котором сопоставлены (В. Бургсдорфом) кривые процент-

ЭБ "Научное наследие России"

ного распределения амплитудных значений токов молнии в горных районах с кривой для равнинных молний. Жирная кривая построена на основании 245 разрядов, зарегистрированных в различных странах с различными климатическими условиями, в силу чего она достаточно показательна. Как видно, максимальные значения молний на равнинах больше, чем в горах, в 2—3 раза. Помимо этого, вообще кривая распределения токов молнии в горах сильно сдвинута в области малых значений. Так, молнии с значениями токов в 60—80 kA в горах так же редки, как и молнии в 150 kA на равнинах. Можно принять, что в горах токи молний имеют вдвое меньшие амплитуды, чем на равнинах.

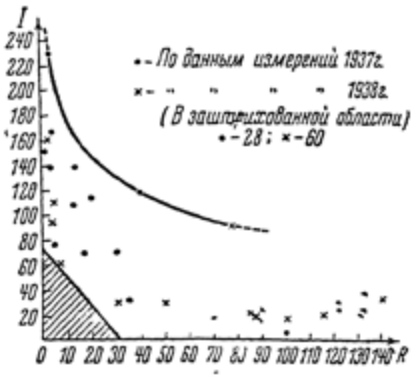


Рис. 93. Зависимость максимальных токов (в kA), измеренных в отдельных опорах, от сопротивления заземлителя

Таким образом, между степенью грозоносности (по числу дней) и силой токов молнии не существует прямой связи. Этот вывод имеет очень большое значение для составления нормативных указаний по проектированию грозоупорных систем. Его практическая интерпретация естественно требует большего количества измерений в самых разнообразных районах СССР. Сделанный вначале на основании измерений лишь одного года, этот вывод полностью подтвердился измерениями последующих лет.

На рис. 93 построена зависимость величины максимальных токов в отдельных опорах от сопротивления заземлителя. Полученная область значений $I=f(R)$ ограничивается кривой, имеющей тенденцию к снижению по мере роста R. Эта зависимость, открытая в 1937 г., объяснима с точки зрения механизма формирования главного канала молнии. Действительно, чем больше сопротивление заземления, тем более затруднен быстрый подсос зарядов к устью канала и тем меньше амплитуда тока главного канала.

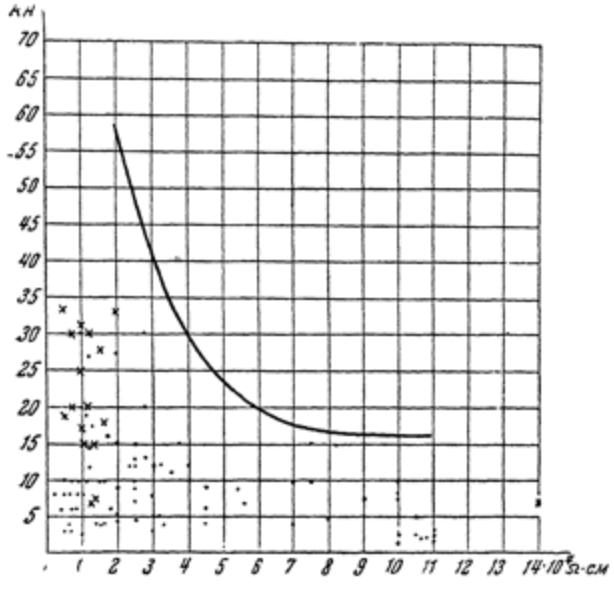


Рис. 94. Токи молнии в канале в зависимости от удельного сопротивления грунта

На графике рис. 93 нанесены точки, собранные путем тщательного анализа существующей литературы по магнитозаписи. Как видно, все точки лежат глубоко в области, ограниченной названной кривой.

На рис. 94 показаны амплитуды токов молнии (в канале) в зависимости от удельного сопротивления грунта в районе пораженной опоры (по измерениям ТНИС ГЭИ). Точки обозначают удельное сопротивление ρ грунта, определенное методом электробурения, а крестики—измерением сопротивления растекания R заземления опор. Здесь, как и на рис. 93, выявляется тенденция снижения максимальных токов с увеличением ρ. Точки в кружках в действительности, видимо, лежат ниже 15 kA, что в еще большей мере подчеркивает тенденцию снижения $I_m=f(\rho)$ с ростом ρ. Уменьшение максимальных значений токов с увеличением R и ρ имеет фундаментальное значение для практики грозо-

защитных мероприятий. Так, при проектировании линий электропередач для территорий с различными геологическими структурами с сильно отличающимися ρ следует учитывать, что в районах с плохо проводящими породами расчетные токи молнии будут иметь меньшие значения. Это соотношение приводит практически к возможности увеличения сопротивления заземлителей с вытекающими отсюда технико-экономическими последствиями.

Хорошим подтверждением слабых токов в горах являются измерения, произведенные в районах главного Кавказского хребта.

В течение грозового сезона 1940 г. было сделано три замера с токами ÷0.117,—0.628,—2.35 kA (с соответственными максимальными крутизнами 23; 9.9 и 4.5 kA/μS).

c. Данные различных исследователей

Токи молнии в опорах линии электропередач. На рис. 95 дан ряд кривых процентного распределения амплитуд токов молний, поразивших линии электропередач, по данным различных исследователей; характер кривых зависит от минимального тока, измеряемого ферромагнитными регистраторами. Минимальное значение, принятое исследователями при построении кривой, влияет на аллюр кривой и на точку 100% на оси ординат.

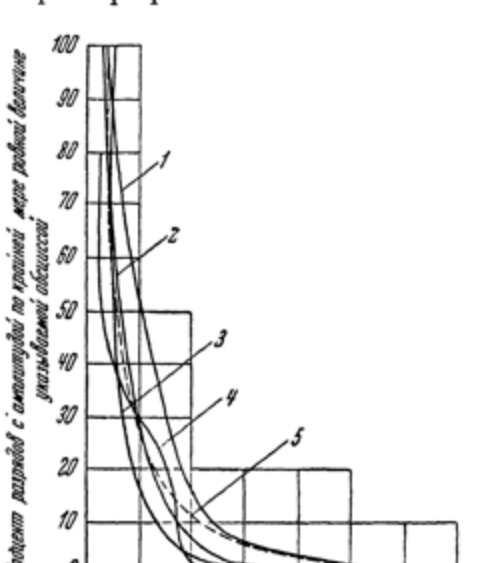


Рис. 95. Кривые процентного распределения токов в опорах линий электропередач:
1—Льюис и Фауст (734 измерения); *2*—Вальдорф (1 201 замер); *3*—Грюневальд (1689 измерений); *4*—Роккаку и Като (60 измерений); *5*—Белл (370 измерений)

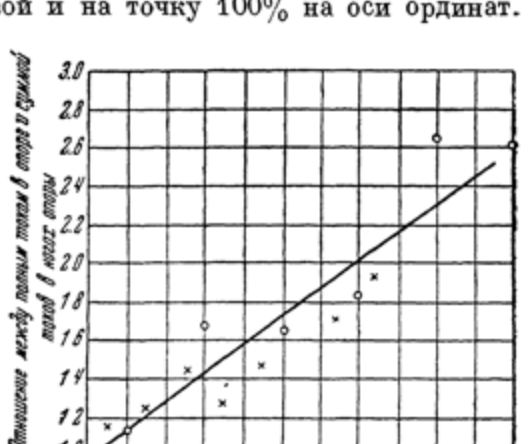


Рис. 96. Отношение между полным током молнии в опоре и суммой токов, замеренных в отдельных ногах металлических опор:
O—Шеффер (24 записи на 132-kV линии в Америке); *X*—Роккаку (30 замеров на 154-kV линии в Японии)

Минимальный ток, принятый Вальдорф, около 2.4 kA, а Белл и Грюневальд—около 5 kA. Кривые Льюис и Фауст содержат данные Вальдорф и Белл плюс данные, полученные на других линиях США; минимальный ток, принятый авторами, 5 kA.

Прежде чем делать выводы о приведенных кривых, следует проанализировать их точность. Наибольшее количество измерений на металлических опорах было сделано при установке ферромагнитных регистраторов на одной из ног мачты; полный ток при этом определялся умножением результата замера на количество ног мачты. Однако, согласно данным Вальдорфа, суммарный ток молнии, поразивший опору, отличается от тока, полученного вышеуказанными методами. Расхождение, видимо, уменьшается с увеличением суммарного тока, достигая при 40 kA 10%. Фактором, влияющим на такое расхождение, может быть несимметрия в противовесах или в других типах заземлителей. Это обстоя-

ЭБ "Научное наследие России"

тельство может также влиять на различие форм волн в компонентах тока. Данные, полученные Беллом, измерившим токи в поперечных элементах опор, показали, что в них текут значительные токи. Его результат указывает на необходимость введения поправочного коэффициента к замерам токов в ногах опоры, равным, в среднем, 2.

Льюис и Фауст указывают, что в поперечных элементах протекает от 30 до 100% тока ноги. Роккаку и Шефер и Кнутц замеряли токи в ногах и разницу в токах, протекающую в тросе по обеим сторонам опоры. Считая эту разницу равной полному току в опоре, они получили указания на расхождение между полным током в опоре и суммой токов в ее ногах. Их результат систематизирован на рис. 96, из которого видно, что поправочный коэффициент возрастает с увеличением тока в опоре; так, при 50 kA суммарного тока оказывается, что сумму токов в ногах опоры необходимо помножить на коэффициент 2.5. Насколько известно, при построении кривых, изображенных на рис. 95, указанного рода поправки не принимались во внимание, и токи в опорах получались простым суммированием токов в 4 ногах.

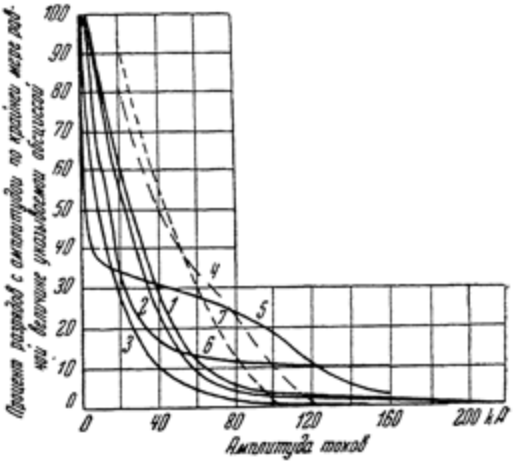


Рис. 97. Процентное распределение токов молнии.

Разряды в линии электропередач:

1—Льюис и Фауст 734 замера; *2*—Грюневальд 654 замера; *3* — Вальдорф 588 замеров; *4* — Роккаку 30 замеров. Разряды в высокие объекты: *5* — Мак Икрон 38 замеров; *6* — Вагнер, Мак Канн, Бек 9 замеров. Подсчитано по регистрациям магнитного поля: *7*—Нориндѐр 204 замера

Токи молнии, определенные суммированием. На рис. 97 даны кривые распределения токов прямых ударов по данным различных исследователей. Кривые от *1* до *3* относятся к линиям передач и были получены сложением токов во всех ногах опор, затронутых разрядом. Ошибки, вводимые при такой процедуре, таковы.

1. Сумма токов в ногах может быть меньше, чем общий ток опоры.

2. При суммировании токов в различных опорах могут быть учтены вместо одного несколько разрядов молнии.

3. Искажение результата, вызываемого отражением токовых волн от соседних опор.

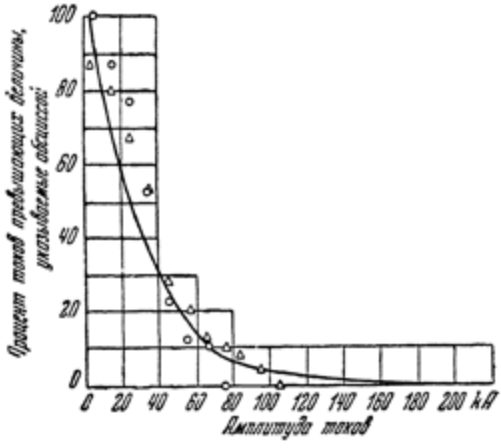


Рис. 98. Кривая *1* с рисунка 97 с нанесенными для сравнения значениями токов в стержневых молниеприемниках (кружочки) и в защитных тросах (треугольники)

Первый фактор ведет к преуменьшению тока молнии, а второй и третий к преувеличению. Роккаку при сравнении результатов измерений токов, полученных суммированием токов в тросе с обеих сторон от места поражения молнией, с результатом, полученным суммированием токов в мачтах, нашел, что результаты совпадают, если учесть поправочный коэффициент, показанный на рис. 96. Кривая у Роккаку на рис. 97 учитывает этот фактор, однако Льюис и Фауст в своих результатах, изображенных на рис. 98, приходят к удовлетворительному совпадению токов молнии и суммы токов в опорах без введения поправочного коэффициента, согласно фиг. 96. Эффект этого фактора характери-

ЭБ "Научное наследие России"

зуется при сравнении кривых *1* и *4* на рис. 97, где у Роккаку он больше, чем у Льюиса и Фауста. Воспроизведенные на рис. 97 результаты Мак Икрона при ударах молнии в здание высотой 380 м и Вагнера, Мак Канн и Бека при ударах в более низкие объекты не содержат погрешностей, отмеченных выше, ибо токи молнии замерены в единичном спуске. Сравнение кривой *5* с кривой *1* для линий передач указывает на значительно больший процент токов малой амплитуды при ударах молнии в высокие объекты; хотя этот факт может быть частично объяснен большей чувствительностью приборов Мак Икрона, все же в основном его следует объяснить различием механизма разряда молнии в весьма высокие объекты. Представленные на рис. 97 результаты Нориндера (кривая 7) подсчитаны им по данным о распределении магнитного поля при ударах молнии в открытое поле. Оценка точности метода затруднительна, ибо он включает ряд предположений о механизме образования разряда, его длины и траектории и удаленности от места регистрации.

Кривая *1* на рис. 99 показывает распределение амплитудных значений от-

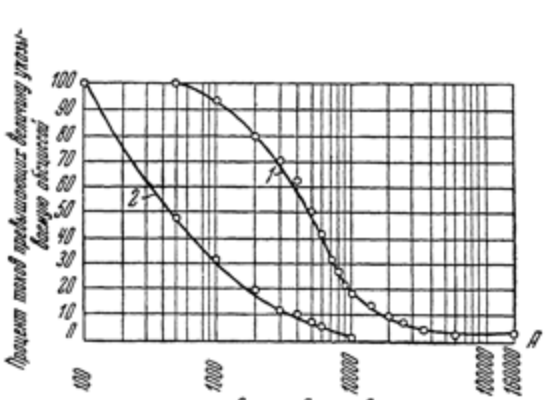


Рис. 99. Кривая процентного распределения амплитуд токов отдельных импульсов в разряде (по данным Вагнера, Мак Канн и Бека): *1*—прямые удары, 57 импульсов; *2*—токи в разрядниках, 78 импульсов

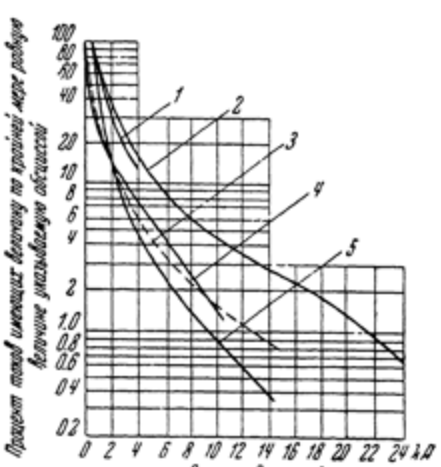


Рис. 100. Кривая процентного распределения токов молний, прошедших через разрядники:

1—Грюневальд (разрядники в Германии—222 регистрации); *2*—Мак Икрон и Мак Моррис (распределительные разрядники—1608 регистраций); *3*—Коллинз (разрядники на 24-kV деревянных линиях—499 регистраций); *4*—Вагнер, Мак Канн и Бек (станционные и распределительные разрядники — 76 регистраций); *5* — Гросс и Мак Моррис (станционные разрядники—459 регистраций)

дельных компонент прямых ударов в объекты с высотой от 100 до 200 м. Сравнение этой кривой с кривой *6* на рис. 97 показывает большой процент маленьких токов в первом случае. Это обусловлено тем, что при построении кривой *6* учитывались только максимальные амплитуды многократных разрядов. Данные рис. 99 (кривая *2*) более полны для оценки работы разрядников и другой линейной аппаратуры.

Больший ток, надежно измеренный, несколько превышает 160 kA, зарегистрирован при ударе в 200-метровую дымовую трубу.

Токи в разрядниках. Амплитудное значение токов, протекающих через разрядники, систематизировано на рис. 100. Как видно, токи здесь значительно меньше, чем в опорах линии передач, при этом в станционных разрядниках токи меньше, чем в разрядниках в распределительных системах.

Эти данные имеют весьма большое значение для расчета разрядников и их конструирования.

7. МАКСИМАЛЬНЫЕ КРУТИЗНЫ ФРОНТА ТОКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Массовые регистрации максимальной крутизны фронта волн токов молнии, основанные на принципе записи амплитуды напряжения в петле, расположенной рядом с токоотводом, начались в СССР в 1939 г. Научное руководство и организация работ осуществлялись лабораторией Энергетического института по изу-

ЭБ "Научное наследие России"

чению молнии, при активном участии и содействии Наркомэлектро. Особенно широко развернулись измерения в 1940 г. и в первую половину 1941 г., когда число охваченных энергообъединений и энергокомбинатов достигло 26, а количество регистрирующих установок превышало 7 000.

a. Общая характеристика полученных записей

За грозовые сезоны 1939 и 1940 гг. на опорах и молниеотводах линий электропередач и подстанций было получено 151 клидонограмма со 189 характерными фигурами Лихтенберга[1].

Из 151 прямого удара 73 поразили молниеотводы, что представляет большую ценность, так как полученные при этом записи параметров молнии без серьезных ошибок могут быть отнесены к каналам молнии. Разряды, поразившие молниеотводы, содержат 97 импульсов, из которых у 86 ток оказался ниже предела чувствительности магниторегистраторов и отмечен ими не был.

Несколько записей, как неудовлетворительные, были исключены из дальнейшего рассмотрения.

Всего за 2 года получено 185 доброкачественных регистраций; из них 86 в 1939 г. и 99 в 1940 г.

Из 185 импульсов 30% (55 случаев) имели положительную и 68% (126 случаев) отрицательную полярность; в 4 случаях (2.15%) полярность разрядов установить не удалось. Сходные результаты дает и магнитозапись.

b. Вероятность появления того или иного значения максимальной крутизны при прямом ударе молнии в объект

Результаты полевых регистраций суммированы и представлены на рис. 101—103.

На рис. 101 построена суммарная кривая вероятности появления крутизны.

Как видно, результаты замеров за 1939 и 1940 гг. сравнительно близки друг к другу и не позволяют пока заключить о какой-либо серьезной вариации значений крутизны в отдельные грозовые сезоны.

Подавляющее большинство разрядов (78.5%) имеет максимальную крутизну K менее 10 kA/μS. Только у одного процента разрядов величина крутизны превышает 35 kA/μS. Наибольшая замеренная величина 44.8 kA/μS зарегистрирована статическим клидонографом в весьма высоком вертикальном тросе во время работ экспедиции ЭНИН.

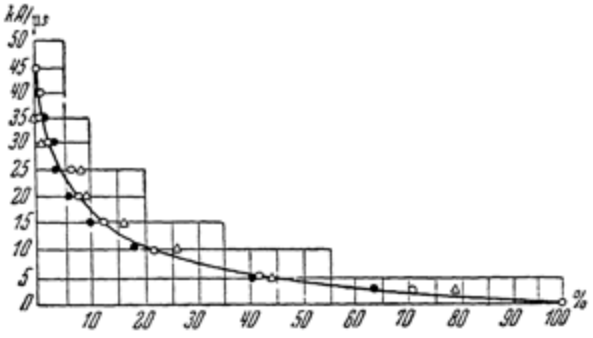


Рис. 101. Вероятность появления крутизны токов молнии в опорах и молниеотводах, превышающей по величине цифру, указываемую ординатой (материалы ЭНИН. Акад. Наук). △—данные за 1939 г., 86 регистраций. ●—данные за 1940 г., 99 регистраций. ○—суммарные данные за 2 года, 185 регистраций

За годы исследования молнии в СССР и за границей накопился некоторый материал по измерению параметров молнии с помощью катодного осциллографа и рамок Бергера. Из этих материалов оказалось возможным использовать для дальнейшего рассмотрения 44 замера максимальной крутизны токов молнии.

На рис. 101 сопоставлены данные ЭНИН и суммарные данные, полученные из всех источников, вместе взятых (229 замеров).

Как видно из рисунка, существенных различий между кривыми не замечается.

[1] Все нижеприведенные материалы по максимальной крутизне, измеренной в СССР, обработаны и систематизированы В. С. Комельковым.

ЭБ "Научное наследие России"

Более основательной, конечно, следует считать обобщенную кривую, из которой видно, что количество импульсов с крутизной менее 10 kA/μS составляет 73.5% от общего числа.

Крутизна свыше 35 kA/μS встречается у 1.6% разрядов. Рассмотренные выше кривые строились на основании измерений, произведенных при установке рамок на конструкциях опор и молниеотводов.

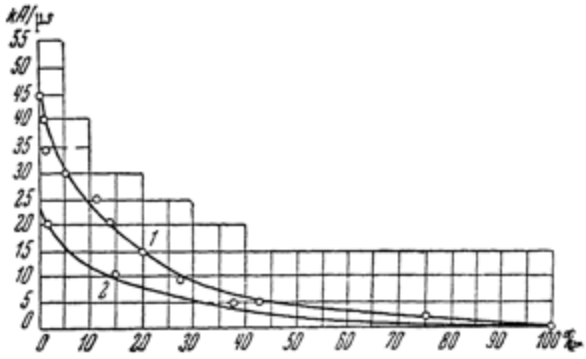


Рис. 102. Вероятность появления крутизны в канале молнии и опорах линий электрических передач, превышающей по величине цифру, указываемую ординатой:

1—записи в стержневых молниеотводах, 105 регистраций (по данным ЭНИН и др.); *2*—записи в опорах линий электрических передач, 81 регистрация (по данным ЭНИН)

Результат измерений тем точнее характеризует разряд, чем на более простой конструкции он получен. Наибольший практический и теоретический интерес поэтому представляют измерения максимальной крутизны фронта в стержневых молниеотводах.

Таких измерений, по данным ЭНИН и указанных выше авторов, имеется 105. Все они показаны на рис. 102. Для сопоставления там же изображена кривая, построенная только по замерам в опорах линий электропередач.

Как и следовало ожидать, последняя кривая расположена ниже первой.

Согласно этим данным, крутизны токов, протекающих в канале молнии, превышающие по величине 35 kA/μS, встречаются у 3.5% разрядов, а крутизна 40 kA/μS—у 1% разрядов.

c. Сочетание максимальной крутизны фронта с амплитудой тока молнии

Совместная регистрация крутизны и амплитуды токов молнии на объектах с помощью статических клидонографов и магнитных регистраторов выявила огромное количество (около 50% всех замеров) значительных по величине крутизн при токах, меньших 5 kA, обычно не улавливаемых **магнитозаписью**.

Полученные материалы показали, что следует, во-первых, отказаться от ранее принятых представлений о том, что малые токи имеют пропорционально меньшую крутизну, сравнительно с высокими значениями токов и, во-вторых, установить, что правильнее вести расчеты грозоупорности не по постоянному фронту волны, одинаковому для всех амплитуд, а по постоянной крутизне.

Анализ материалов показал, что с увеличением амплитуды токов центр тяжести измерений перемещается в сторону больших значений крутизны. Так, при токах 0—5 kA максимальное количество (53 случая) измерений крутизны приходится на интервал 0—2 kA/μS.

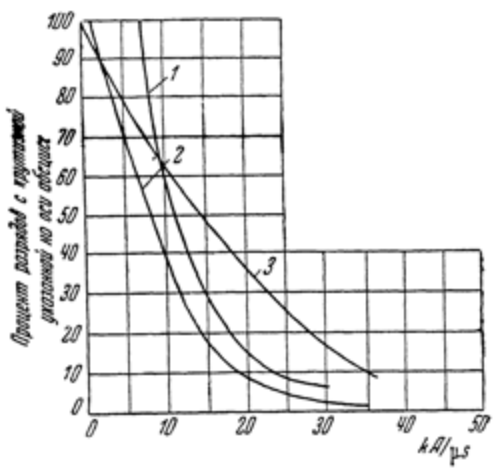


Рис. 103. Кривая процентного распределения величин максимальной крутизны токовых волн

1—Бергер—токи в опорах линий передач (43 регистрации, величина максимального тока не превышала 40 kA); *2*—Нориндер—токи молнии, подсчитанные по измерениям магнитного поля; *3*—Мак Икрон—11 разрядов в небоскреб, зарегистрированных катодным осциллографом

При токах 5—10 kA центр тяжести измерений крутизны лежит в интервале 5—10 kA/μS. При токах 10—20 kA наибольшее количество измерений K падает на 15—20 kA/μS. Дальше проследить эту тенденцию роста не представляется возможным из-за недостатка данных.

ЭБ "Научное наследие России"

Таким образом, бо́льшим токам, повидимому, будет соответствовать и бо́льшая вероятность появления высоких крутизн в то время, как предельные значения крутизн, возможно, окажутся близкими друг к другу у всего диапазона измеряемых токов.

Измерения, сделанные с помощью магнитного регистратора фронта волн, дали для прямых ударов молнии максимальную величину K (из 4 регистраций), равную 7.6 kA/μS при $I_m = 19$ kA. Один удар в линию имел $K = 43.6$ kA/μS при $I_m = 50.4$ kA. К сожалению, разброс величин, при этом методе регистрации доходящий до 40-кратного (от 0.5 до 20 kA/μS), в значительной мере обесценивает результаты.

d. Влияние полярности тока на величину максимальной крутизны

Влияние полярности тока на величину максимальной крутизны, равно как и влияние сопротивления заземления (R) объекта (в пределах $R = 1$—110 ом), из полученных материалов установить нельзя.

На рис. 103 представлены процентные зависимости максимальной скорости нарастания токовой волны, полученной различными методами за границей. Малое число замеров по сравнению с союзными материалами снижает их ценность.

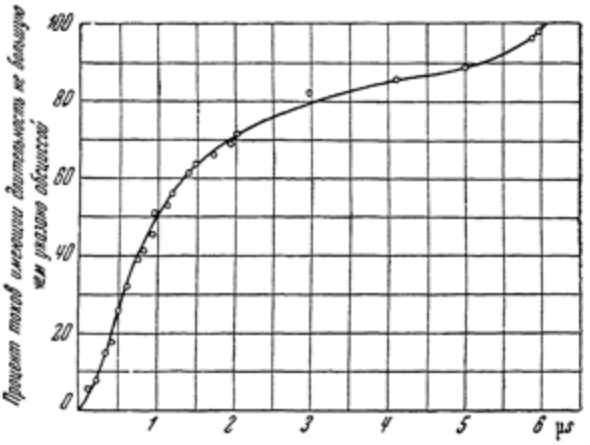


Рис. 104. Кривая процентного распределения значений длительности фронта; по катодным осциллограммам 13 разрядов

8. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ФРОНТА ВОЛНЫ ТОКА

Согласно данным табл. 7, длительность нарастания тока от нулевого значения до максимальной величины (T_Φ) колеблется в пределах от 8.5 до 20 μS.

Аналогичные данные, полученные Мак Икроном с помощью катодного осциллографа, изображены на рис. 104.

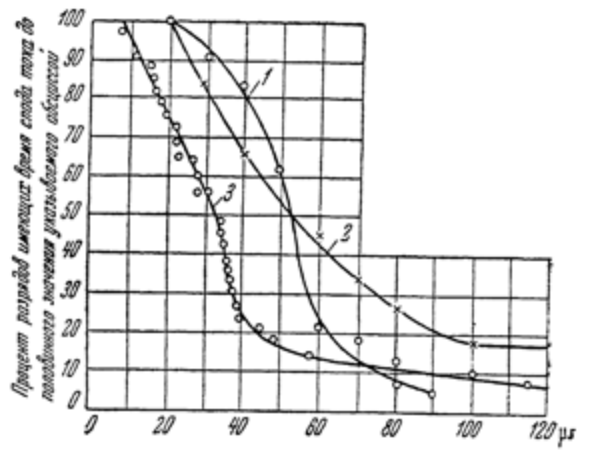


Рис. 105. Кривые процентного распределения времени спада волны тока до $I_m/2$:
1—прямые удары, 57 импульсов; *2*—ток в разрядниках, 18 импульсов; *3*—катодно-осциллографические регистрации, 11 разрядов в небоскреб

9. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА ТОКА

Длительность импульсов определяется либо временем, протекающим от начала фронта волны до спада тока до значения $i = \frac{I_m}{2}$ (это время обозначим через t_2), либо до $i = 0$ (это время обозначим через t_n).

В табл. 7 значения t_2 колеблются в пределах от 10 до 100 μS.

Полученные фульхронограммы в числе 12 разрядов, поразивших молниеприемники высоких объектов, состоявших из 57 импульсов и 60 замеров токов, прошедших через разрядники, состоявших из 78 импульсов, послужили материалом для некоторых важных заключений.

ЭБ "Научное наследие России"

У записи прямых разрядов время спада амплитудного значения первого импульса колеблется в пределах от 25 до 100 μS и равно в среднем 50 μS. Данные об этом параметре представлены на рис. 105.

Разряды, зарегистрированные при ударах в высокие объекты фульхронографом, содержат импульсы с общей длительностью от 50 до 20 000 μS. При этом 93% импульсов имеют длительность, равную 100 μS, 80% соответственно 200 μS и 50% около 450 μS. Значительно более кратковременные импульсы наблюдаются при регистрации токов, прошедших через разрядники.

10. ВЕЛИЧИНА ЗАРЯДА ОТДЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Величина заряда, протекающего через объект при прохождении тока о д н о г о импульса, колеблется в пределах от долей кулона до нескольких десятков кулон (рис. 106).

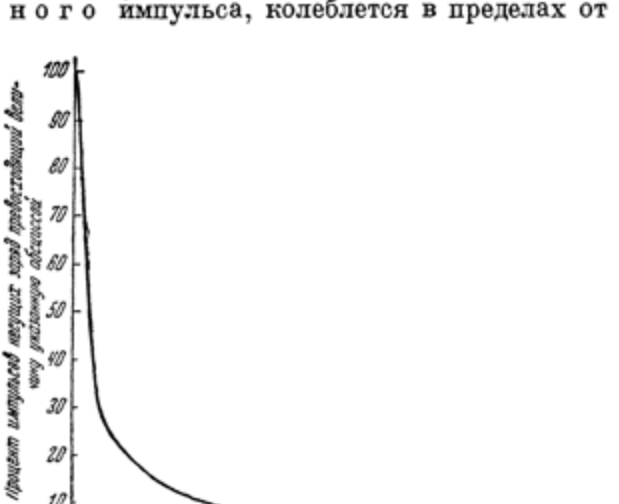


Рис. 106. Кривая процентного распределения зарядов, протекающих в отдельных импульсах (построена на основании данных табл. 7 и приближенной оценки 28 фульхронограмм импульсов, содержавшихся в 4 разрядах, поразивших высокие объекты)

Эти данные получены при анализе регистраций, сделанных с помощью катодного и шлейфового осциллографов и фульхронографа.

11. ПОЛЯРНОСТЬ ОТДЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Полярность отдельных импульсов молнии в подавляющем большинстве случаев отрицательна. Так, среди 53 импульсов, зарегистрированных катодными осциллографами, фульхронографами и кратерными осциллографами, 50 имели отрицательную полярность и лишь 3 положительную.

12. ПОЛЯРНОСТЬ МОЛНИИ

При определении полярности молнии по ферромагнитным регистраторам необходимо иметь в виду, что индуцированные напряжения в линиях, могущих быть источником регистрации токов с малыми амплитудами, дают знак тока, обратный знаку тока молнии. Действительно, в то время как процент положительных молний с большими токами в основном колеблется от 5 до 15, процент положительных токов с амплитудой около 1 kA, согласно данным Вальдорфа, 35, а по данным Грюневальда при 5 kA выше 24.

Исследования Мак Икрона и Мак Морриса показывают, что 63% всех токов в распределительных разрядниках отрицательны и 37% положительны, тогда как Гросс и Мак Моррис нашли, что для станционных разрядников 88% тока были отрицательны и 12% положительны.

Многочисленные данные о полярности молний, полученные различными авторами разными методами, систематизированы в табл. 8.

Из рассмотрения таблицы и анализа материалов, положенных в ее основу, можно сделать следующие выводы.

1. Подавляющий процент молний имеет отрицательную полярность (или молнии содержат отрицательные импульсы).

2. Полярность молний может быть положительной (или молнии могут содержать положительные импульсы) как при разрядах в равнинные места, так и при ударах в высокие объекты.

ЭБ "Научное наследие России"

Таблица 8

Полярность разрядов на землю

Исследователь	Страна, где производились измерения	Год исследований	Метод регистрации	Полное число регистраций	Отношение числа отрицательных к числу положительных разрядов
		Разряды в заземленные объекты			
Стекольников и Ламдон	СССР	1937—39	Магнитозапись	543	3.2 : 1
Бергер	Швейцария	1935	»	12	6 : 1
Льюис и Фауст	США	1933—38	»	734	14 : 1
Мак Икрон	»	1935—37	Кратерн. осц. на небоскребе	49	5 : 1
Роккаку и Като	Япония	1936	Магнитозапись	19	18 : 1
		Разряды в открытое место			
Аппльтон	Египет	1923	Измерен. изменения поля	—	Все отрицательные
Халлидей	Южн. Африка	1929—30	Тот же	283	17 : 1
Шонланд	» »	1926—27	» »	71	17 : 1
Иенсен	США	1929—31	» »	116	4 : 1
Луткин	Великобритания	1936	» »	100	6.5 : 1
Нориндер	Швеция	1936—37	Измерен. напр. на антеннах	51	2.9 : 1
Ватсон, Ватт, Херд, Луткин, Уипль, Скрезе	Великобритация	1931—34	Измерен. изменения поля	605	3.55 : 1
		1932—34	Регистрация истечения тока из острия	562	3.5 : 1
Вильсон[1]	Там же	1914—17	Измерения изменения поля	53	2.1 : 1
Бормель[1]	» »	1926—36	—	137	3.18 : 1
Стекольников	СССР, Кавказ	1938	Измерение напр. на антеннах	24	4.8 : 1

3. Существуют разряды биполярные или, правильнее сказать, с разноименными импульсами. Подавляющий процент импульсов в таких разрядах имеет отрицательный знак.

13. ЧИСЛО ИМПУЛЬСОВ В РАЗРЯДЕ, ИНТЕРВАЛЫ ВРЕМЕНИ МЕЖДУ НИМИ И ПОЛНАЯ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ РАЗРЯДА

В накоплении материала по структуре разряда существенную роль сыграли быстро вращающиеся клидонографы. Полученные этими приборами записи позволяют судить о ряде характерных для разряда величин. Аналогичные данные могут быть получены с помощью катодного осциллографа с постоянным лучом и очень длинной временной разверткой. Однако клидонограф проще по конструкции и удобнее в эксплоатации.

Остановимся на сравнении данных, полученных некоторыми исследователями, применявшими различные методы, о многократности разрядов, об интервалах времени между отдельными импульсами и о длительности полных разрядов.

В течение ряда лет в полевых лабораториях СССР быстро вращающимися клидонографами было получено много регистраций, на основании которых

[1] Эти данные получены при разрядах в тучах и на землю на расстоянии от 3 до 6 км от измерительных приборов.

ЭБ "Научное наследие России"

построены графики, проанализирован ряд зависимостей, дающих возможность судить о структуре разрядов, а также подвергнуты анализу вопросы о полярности молний, о многократности разрядов и о максимальных значениях индуцированных напряжений.

Рис. 107. Кривые процентного распределения числа импульсов в разряде по данным бакурианской лаборатории

Как видно из рис. 107, кривые процентного распределения числа импульсов разрядов на землю и между тучами, построенные по результатам измерений бакурианской экспедиции 1939—1940 гг., относительно близки друг к другу. Изображенные на рис. 107 кривые идентичны данным подмосковной экспедиции. Иногда больше импульсов появляется в разрядах молний между тучами, в других случаях это имеет место у молний, ударяющих в землю. Как видно, на структуру разряда география и орография района влияния не оказывают. Повидимому, основную роль в образовании многократных разрядов играют процессы в туче.

На рис. 108 изображена зависимость процентного распределения многократных разрядов по материалам исследований, производившихся различными методами. При этом нужно отметить, что вообще зарегистрированное число импульсов зависит от метода регистрации и чувствительности применяемой аппаратуры. Естественно, что при уменьшении интенсивности последующих импульсов любым методом регистрации устанавливается лишь минимальное число импульсов в разряде.

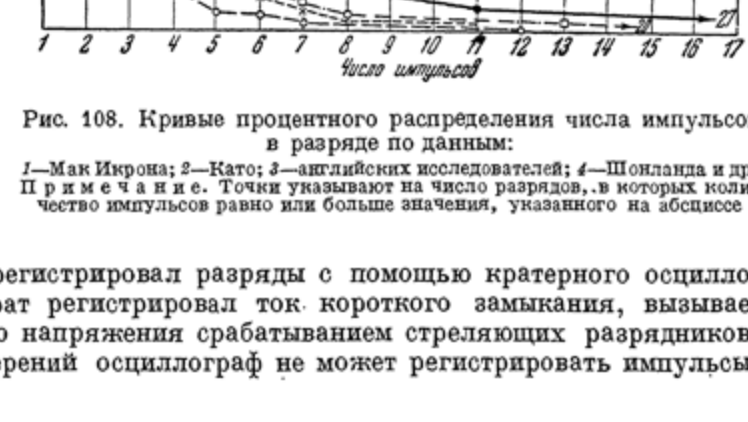



Рис. 108. Кривые процентного распределения числа импульсов в разряде по данным:

1—Мак Икрона; *2*—Като; *3*—английских исследователей; *4*—Шонланда и др. Примечание. Точки указывают на число разрядов, в которых количество импульсов равно или больше значения, указанного на абсциссе

Так, Мак Икрон регистрировал разряды с помощью кратерного осциллографа, причем аппарат регистрировал ток короткого замыкания, вызываемый в линии высокого напряжения срабатыванием стреляющих разрядников. При такой схеме измерений осциллограф не может регистрировать импульсы,

ЭБ "Научное наследие России"

происходящие в течение короткого замыкания в линии. Нижний предел времени регистрации составлял 0.017 сек. С другой стороны, названным методом могут регистрироваться лишь те импульсы, которые вызывают работу разрядников, что также снижает общее число составляющих грозового разряда.

Учитывая, однако, что интервалы t между повторными импульсами меньше 0.017 сек. относительно редки и что при регистрации клидонографами фиксация импульсов с уменьшающимися амплитудами имеет также определенный предел, можно полагать, что сравнение результатов регистрации, выполненной названными методами, допустимо.

Значения t, по данным Мак Икрона, лежат значительно ниже значений, полученных нами.

Более близкие к нашим величины получены Шонландом оптическим методом, однако на основании этого пока нельзя сделать каких-либо выводов, ибо сравнительные «чувствительности» методов клидонографического и оптического неизвестны.

Клидонографические записи за последние годы показывают, что в общих чертах структура разрядов в различных районах СССР одинакова. Сопоставляя абсолютные значения по кривым, построенным для различных разрядов, можно видеть, что половина разрядов содержит от 1 до 5 импульсов.

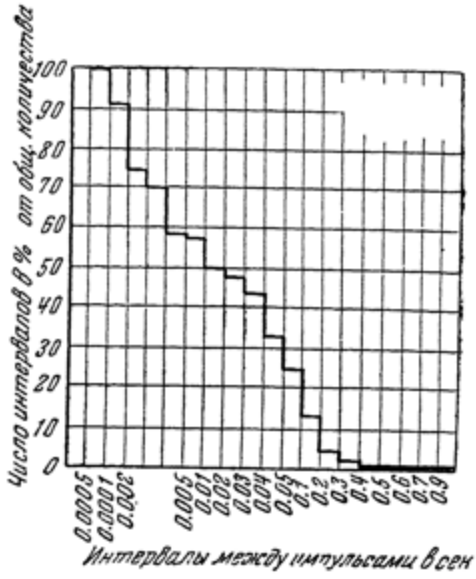


Рис. 109. Кривая процентного распределения интервалов между импульсами по данным закатальской лаборатории

Следующие цифры хорошо характеризуют структуру молний: 908 разрядов содержали 3 062 импульса, т. е. в среднем 3.3 импульса в одной молнии. Из этих 908 разрядов 155 произошли на землю. Они состояли из 554 импульсов,

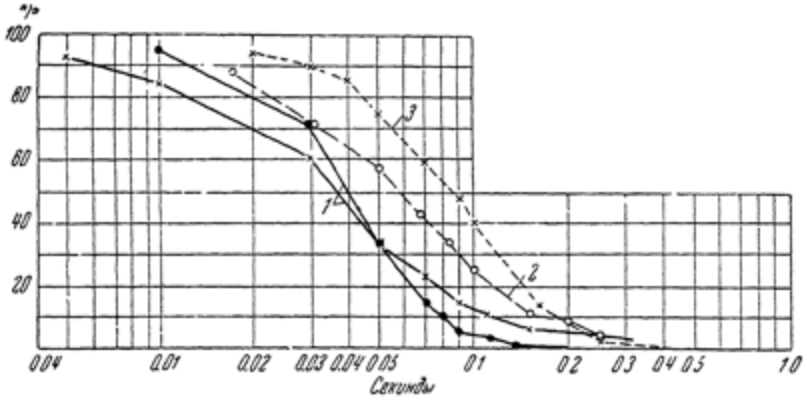


Рис. 110. Кривая процентного распределения интервала времени между импульсами:

1—по данным Шонланда и др.; *2*—по данным Мак Икрона; *3*—английских исследователей. Примечание. Точки указывают на число интервалов, превышающее значение, указываемое абсциссой

т. е. около 3.5 импульса в одной молнии. Зафиксированные 187 молний между тучами дали 3.3 импульса в каждой молнии. В среднем можно принять, что половина молний имеет по три импульса каждая.

Распределение интервалов времени между повторными импульсами. И здесь результаты получены с помощью различных методов: клидонографического, катодного осциллографа, включен-

ЭБ "Научное наследие России"

ного на антенну и рамку (Нориндер), шлейфового осциллографа с кратерной лампой и оптического.

Графики (рис. 109), построенные по материалам регистрации быстро вращающихся клидонографов, показывают процентное распределение интервалов времени между смежными импульсами многократных разрядов. Необходимо при этом иметь в виду, что минимальное время определяется разрешающей способностью клидонографов; у различных приборов (вращающихся с разными скоростями) оно равно 300 — 1 000 μS. В некоторых разрядах были измерены интервалы около 400—500 μS, однако эти измерения недостаточно точны.

Рис. 111. Кривая процентного распределения длительности разрядов молнии

Из сравнения графиков видно, что существенной разницы между ходом кривых, построенных по разрядам между тучами и тучами и землей, не имеется. Наиболее частые интервалы находятся в пределах 0.02—0.70 сек., поэтому наивероятнейший средний интервал между импульсами равен примерно 0.03 сек.

Результаты, близкие к этим, дает анализ фотографических снимков, сделанных закатальской экспедицией (рис. 109).

Произведенное Нориндером изучение повторности разрядов при помощи катодного осциллографа привело его к результатам, весьма отличным от обычных. По Нориндеру, наибольшая полная длительность разрядов молнии — около 10^{-2} сек. Это, однако, явно неверный результат. Повидимому, время, которым Нориндер оценивает длительность полного разряда, относится к процессу единичных импульсов, а группы колебаний с интервалами порядка сотен микросекунд относятся не к отдельным импульсам, а к отдельным ступеням образования этих импульсов или главных каналов. Исследования других авторов дают результаты, более близкие к нашим. Зависимость процентного распределения временных интервалов между отдельными импульсами дана на рис. 110.

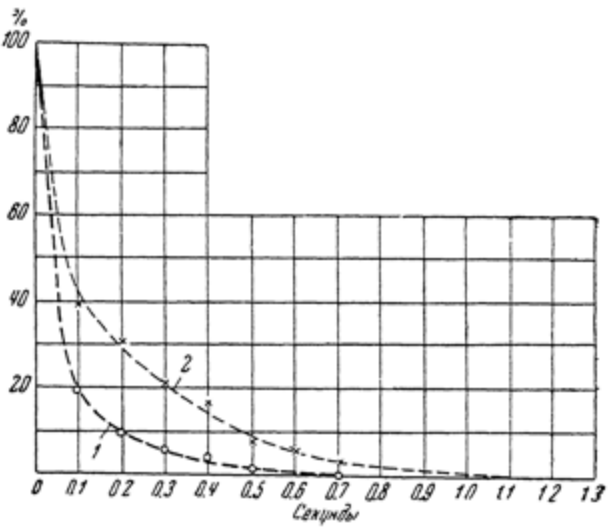


Рис. 112. Кривая процентного распределения длительности разрядов молнии по данным:
1—Мак Икрона; 2—английских исследователей. Примечание. Точки дают число разрядов, длительность которых превышает значение, указываемое абсциссой

Как видно, полученные нами результаты могут считаться определяющими. Средние значения интервалов, отмеченные выше, принимаются нами как результативный материал.

Для оценки полной длительности грозового разряда необходимо просуммировать все интервалы между отдельными импульсами молнии.

Полное время разряда

Процентное распределение полного времени разряда (рис. 111) показывает существование молний с общей длительностью до 1.55 сек. Процент таких молний мал. Наиболее часто встречаются разряды с общей длительностью около

ЭБ "Научное наследие России"

0.2 сек[1]. Сравнение графиков, дающих анализ разрядов между тучами и землей, показывает, что процент первых молний данной длительности несколько меньший, чем вторых.

На рис. 112 дана зависимость процентного распределения полной длительности разрядов по данным различных исследователей. И здесь наши результаты вполне достаточны для окончательных выводов, сделанных выше. Подчеркнем здесь, что амплитудный ток отдельных импульсов и их максимальная крутизна не связаны с порядковым номером их в разряде. Аналогичные результаты получены при оптических исследованиях, проведенных в Южной Африке.

14. КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА, РАЗРЯЖАЮЩЕГОСЯ В МОЛНИИ

Количество электричества, разряжающегося в молнии, колеблется в весьма широких пределах. По данным Теплера и Кольрауша, при разрядах средней интенсивности заряд тучи равен 10—20 С, а при сильных молниях 52—270 С. Пик принимает величину заряда тучи равной 1—20 С, считая возможным для слабых разрядов заряд около 0.1 С. Матиас полагает заряд равным 10—100 С. Значительно меньшие величины заряда измерены для отдельных импульсов Нориндером в Швеции (несколько десятых долей кулона), что при представлениях о структуре разряда, существовавших у этого автора, вполне понятно.

По регистрациям прямых ударов в здание высотою 380 м в Америке, сделанным шлейфовым осциллографом, получены значения количества электричества, протекавшего при полных разрядах.

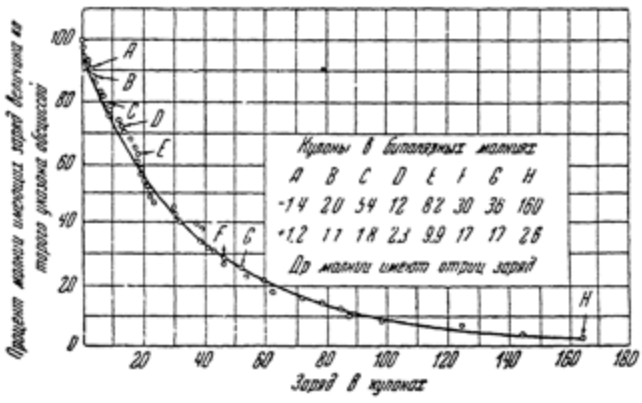


Рис. 113. Кривая процентного распределения величин зарядов, протекших при 49 разрядах молнии в небоскреб (по измерениям, сделанным с помощью осциллографа в течение 1937—1940 гг.).

На рис. 113 дано процентное распределение молний, несущих определенный заряд. Около 50% разрядов имели заряд 25 С, максимальный заряд достигал 164 С. Сравнительно высокие значения зарядов объясняются тем, что измерения делались шлейфовым осциллографом, приключенным к тиритовому шунту, благодаря чему, наряду с большими пиками тока, фиксировались и малые его значения. Произведение малых токов на очень большое время (десятые доли секунды) резко повышало учитываемый суммарный заряд молнии.

Косвенным образом определить заряд Q можно на основании измерений электрического момента молнии, выражаемого соотношением:

$$M = 2QH = \Delta E \cdot L^2,$$

где L—расстояние от прибора до молнии, E—изменение градиента электрического поля за время разряда, H—высота заряда над землей.

Определение ΔE по осциллограммам показало, что численные значения этого параметра колеблются в широких пределах для одних и тех же значений L. Можно принять при $L = 3$ км, как часто встречающуюся величину, $\Delta E = 0.2$ kV/м. При этом электрический момент одного импульса молнии равен:

$$\Delta E L^2 = 200 \cdot 27 = 5400 \text{ V/м} \cdot \text{км}^2.$$

[1] Снова отметим, что по самому принципу регистраций здесь устанавливается лишь минимальное время молнии.

ЭБ "Научное наследие России"

Минимальная высота центра заряда тучи по фотографическим снимкам может быть принята равной 1 км, поэтому на основании приведенного соотношения может быть определен заряд, вытекающий из тучи при одном импульсе. Приведем формулу к практическим единицам:

$$Q = \frac{\Delta E L^3}{2H} \frac{10^{15}}{300 \cdot 100 \cdot 3 \cdot 10^9 \cdot 10^5} = \frac{\Delta E L^3}{2H \cdot 9 \cdot 10^3} C, \qquad (11)$$

где L и H в километрах. Следовательно, в нашем случае

$$Q = \frac{5400}{2 \cdot 1 \cdot 9 \cdot 10^3} = 0.3 \text{ C}.$$

Считая, что число импульсов в одном разряде равно примерно 3, заключаем, что в одной молнии разряжается в среднем около 1 С электричества. В ряде случаев количество электричества должно быть значительно больше за счет нейтрализации зарядов тучи в стадии послесвечения. Эти расчеты, а также замеры, произведенные по осциллограммам прямых ударов молнии, приводят к заключению, что в течение существования больших токов главного канала разряжающееся количество электричества, как правило, не превышает 2—3 С.

15. О ГРОМЕ

Обычно молния сопровождается громом, однако известно, что эти два явления не связаны между собой неразрывно.

В литературе описано много случаев, когда отдельные наблюдатели регистрировали явление грома при отсутствии молнии. Ценность этих наблюдений, правда, невелика, ибо, помимо того, что шумы, похожие на гром, могут происходить и от других причин (подземный гул, обвалы, взрывы и пр.), невидимость молнии может быть легко объяснена прохождением разрядов между тучами. Днем такие разряды чаще всего остаются невидимыми.

Значительно бо́льшую достоверность имеют сообщения об обратном явлении—отсутствии грома при разрядах. Еще в VI книге поэмы Лукреция «О природе вещей» написано, что «невинные молнии в тишине стремятся из туч, не причиняя ни смятения, ни ужаса». Тибо де Шанвалон упоминает о молниях без грома на Антильских островах. О таких же наблюдениях в Индии сообщает в своем дневнике от 1826 г. Лунд. О молниях без грома писал Араго. Инженер, работавший в 1935 г. с камерой Бойса на нью-йоркском небоскребе, сообщил, что он не слышал грома при двух ударах молнии в здание. Во многих случаях шум камеры Бойса делал слышимость грома неудовлетворительной. В 1885 г. пять мощных разрядов произошли без грома в вашингтонский монумент. Аналогичные наблюдения слабого грома при сильных близких разрядах, а также разрядов без слышимого грома были сделаны во время экспедиционных работ под Москвой и в Бакуриани.

Некоторое представление о связи грома с термодинамическими условиями в канале молнии могут дать следующие соображения.

Положим, в согласии с Оллендорфом, что внутри цилиндрического канала молнии, существующего некоторое время в равновесии, в каждом кубическом сантиметре газа находится N_i частиц при температуре T_i абсолютных градусов. Для упрощения положим, что атмосфера состоит только из одноатомного азота. Пусть из общего числа N_i атомов часть x диссоциирована, благодаря чему общее число частиц в каждом кубическом сантиметре канала равно

$$N_i(1-x) + 2N_i x = N_i(1+x).$$

Эти частицы создают в канале давление, величина которого определяется уравнением

$$\bar{p} = kN_i(1+x)T_i, \qquad (1)$$

где k—константа Больцмана.

ЭБ "Научное наследие России"

Направленному изнутри к периферии канала давлению противостоит давление p атмосферного воздуха с числом частиц N_a в единице объема и температурой T_a

$$p = N_a k T_a. \tag{2}$$

Равенство давлений достигается при

$$p = \bar{p}\frac{1-x}{1+x}, \tag{3}$$

откуда

$$\bar{p} = p\frac{1+x}{1-x}. \tag{4}$$

Следовательно, избыток расширяющего оболочку канала давления определяется величиной

$$\Delta p = \bar{p} - p = p\frac{2x}{1-x}. \tag{5}$$

Этот избыток уравновешивается электродинамическими усилиями тока, которые стягивают отдельные нити канала.

Учитывая, что величина x связана с температурой канала, можно представить изменение давления Δp от T. Степень диссоциации x газа определяется из известного уравнения Сага в зависимости от температуры канала:

$$\lg \frac{x^2}{1-x^2}\bar{p} = \frac{5}{2}\lg T_i - 5\,040\,\frac{\varphi_i}{T_i} - 6.5, \tag{6}$$

где φ_i—работа ионизации в вольтах, а $\bar{p}$—давление в атмосферах.

Подставляя в (6), вместо $\bar{p}$, его выражение из (4), находим

$$\lg \frac{x^2}{(1-x^2)}p = \frac{5}{2}\lg T_i - 5\,040\,\frac{\varphi_i}{T_i} - 6.5, \tag{7}$$

где $p = 1$ атм.

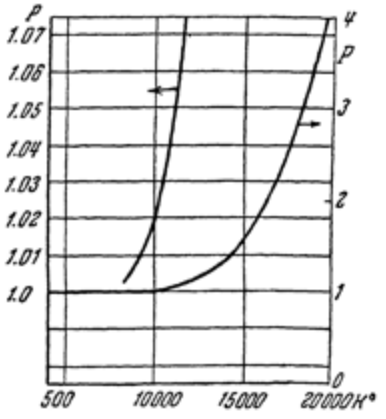


Рис. 114. Давление в канале молнии в зависимости от его температуры

Определяя x при выбранном T_i (в °К) и принимая $\varphi_i = 15\,V$, находим зависимость $x = f(T_i)$. Имея значения x при определенном T_i, можно, пользуясь уравнением (4), найти полное давление в канале.

Зависимость $p = f(T_i)$ показана на рис. 114. Как видно, при $T = 20\,000$°К давление $\bar{p}$ достигает 4.5 атм.

При обрыве тока силы стягивания канала исчезают, и он разрывается давлением Δp. От скорости обрыва тока будет зависеть сила грома. В свете современных знаний можно полагать, что без обычного грома происходят те молнии, в составе которых нет крутых пиков тока. Повидимому, наибольшее значение в образовании грома имеет максимальная крутизна волны тока, а не его абсолютная величина.

На основании уравнений (1), (2) и (3) находим:

$$N_i T_i (1-x) = N_a T_a,$$

откуда

$$N_i = N_a \frac{T_a}{T_i(1-x)}. \tag{8}$$

Это соотношение показывает, что число атомов в единице объема канала значительно меньше плотности атомов в окружающей атмосфере.

ЭБ "Научное наследие России"

Если, с другой стороны, предположить, что плотность газа в канале во время развития главного канала остается неизменной, образовавшееся при температуре T давление может быть определено на основании закона Гей-Люссака по формуле

$$p_t = p\,(1+\beta T), \tag{9}$$

где $\beta = \frac{1}{273.2}$ (термический коэффициент давления).

Уже при температуре $T = 10\,000\,°\text{K}$ давление в канале достигнет почти 38 атм.

Экспериментальных определений давлений в канале молнии нет, поэтому нельзя сказать с уверенностью, к какой из подсчитанных величин p следует отнести реальное давление.

При пропускании лабораторного разряда с амплитудой в 140 kA через фибровую трубку диаметром около 2 см Беллаши было зарегистрировано давление, колебавшееся в пределах 600—1 200 кг/см². Однако столь большие давления должны быть отнесены за счет того, что искровой разряд протекал в ограниченном объеме трубки, стенки которой к тому же могли давать обильное выделение газов.

ЭБ "Научное наследие России"

IV. МЕХАНИЗМ РАЗВИТИЯ МОЛНИИ

1. ОБЩАЯ СХЕМА РАЗРЯДА

На основании изложенных в предыдущей главе исследований процесс грозового разряда схематически можно представить так, как это сделано на рис. 115. Здесь изображены три импульса, каждый из которых состоит из двух процессов, распространяющихся стрелообразно, т. е. в виде перемещающегося с той или иной (равномерной или неравномерной) скоростью светящегося стержня конечной длины, характер продвижения которого может меняться, в различных случаях создавая видимость непрерывных или ступенчатых лидеров.

Первый процесс—предварительный разряд, лидер, средняя скорость которого возрастает с порядковым номером импульса в разряде. Второй процесс—образование главного канала, распространяющегося в обратном направлении.

Рассмотрим теперь теоретические положения об отдельных стадиях развития разряда. Говорить в настоящее время о сколько-нибудь законченной теории образования молнии нельзя. Большинство попыток теоретического объяснения механизма разряда носит чисто спекулятивный характер. Слишком много еще невыясненного в теории газового разряда, чтобы можно было на ее основе объяснить образование молнии. Все же исследования последних лет дают возможность несколько продвинуться вперед на пути к созданию более общих представлений о механизме грозового разряда.

Первыми наиболее полными теориями образования молнии были теории Симпсона, Дорсе и Теплера. Симпсон рассматривал возможность развития молнии из туч к земле только при положительном заряде тучи. В своей физической части теория Симпсона целиком базируется на представлениях, связанных с образованием положительных фигур Лихтенберга. Симпсон, исходя из нёправильных предпосылок, развил теорию образования разрядов из туч, положительно заряженных, полагая, что отрицательно заряженная туча не может дать разряд, направленный к земле. Эту вторую возможность разряда проанализировал Дорсе. Согласно его представлениям, при возникновении ударной ионизации в поле грозового облака (заряженного отрицательно) образуется лавина электронов, которая перемещается толчкообразно в направлении поля, производит ионизацию и образует собственно молнию.

Теплер, исходя из представления о двуслойном распределении зарядов в туче (рис. 1, *а*), считает, что плоскость раздела двух объемных зарядов, имеющая максимальные градиенты электрического потенциала, служит местом зарождения молнии. Разряд происходит симметрично в обе стороны от среднего слоя тучи, причем положительный разряд всегда направлен к земле. Таким образом, для каждого мыслимого распределения знака зарядов в туче, вообще говоря, существовала своя теория, поясняющая образование молнии, направленной к земле. Все теории рассматривали лишь процесс разряда в одном направлении, что, по современным представлениям, формально отображает лишь лидерную часть разряда.

Спекулятивный характер теорий и их расхождение с результатами новейших исследований заставляют рассматривать их в целом, как имеющие лишь исторический интерес. Однако исторические элементы этих теорий имеют свое здоровое

ЭБ "Научное наследие России"

зерно, и учет соображений, выдвинутых их создателями, облегчает дальнейшие работы в этом направлении. Так, например, в теории Теплера, так же как и в гипотезе Дорсе, характерным является полное игнорирование заряда на поверхности земли: молния сама несет на своей головке необходимое для развития электрическое поле, и в процессе ее развития заряды на земле и, следовательно, электрические характеристики почвы роли не играют. Эти представления могут иметь некоторое значение при образовании молнии над грунтами с весьма большими удельными сопротивлениями.

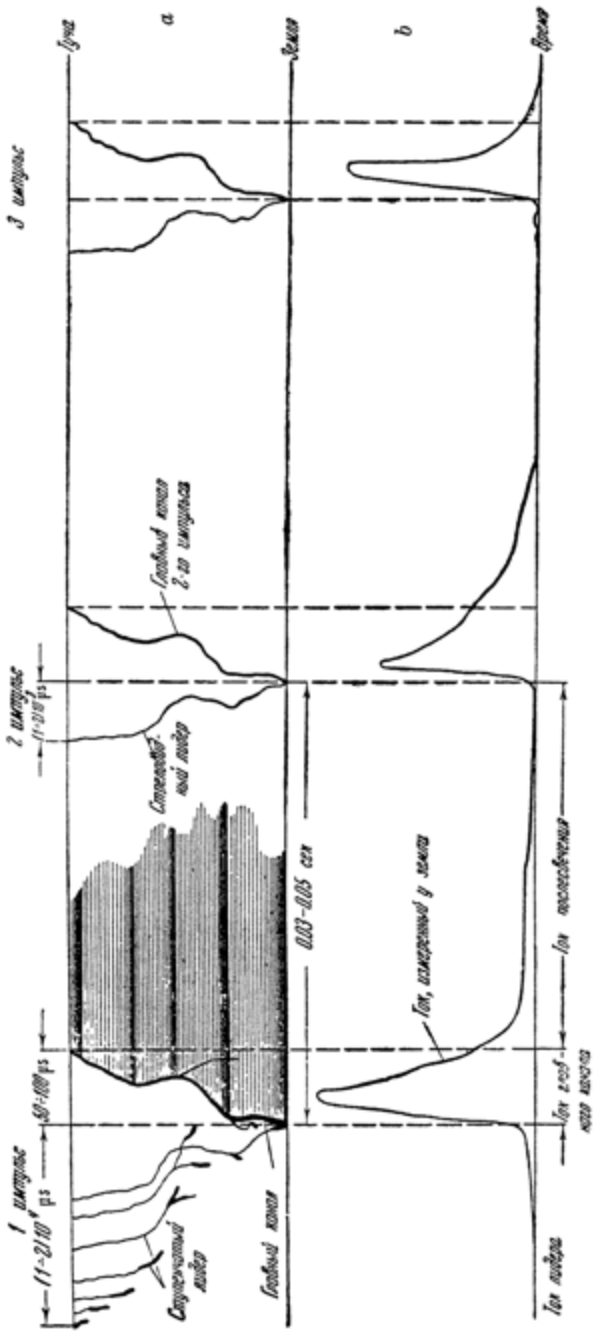


Рис. 115. Стилизованные процессы развития молнии: *a*—оптическая картина, *b*—токовая картина

2. ТЕОРИЯ ЛИДЕРА

Вслед за первыми экспериментальными работами, проведенными в Африке, англичане выдвинули гипотезу о структуре лидера в виде электронной лавины, идущей толчкообразно, от тучи к земле со скоростью, равной скорости головки лидера. При этом электроны у головки лидера при быстром движении производят ионизацию. Количественные соотношения определялись значением коэффициента Таунсенда.

Эта теория представляет собой по существу модифицированную гипотезу Дорсе и базируется на ошибочном представлении.

Действительно, скорость электрона, равная 10^9 см/сек. (а наблюдались и бóльшие скорости лидеров), по данным Таунсенда, может быть создана полем с напряженностью $4 \cdot 10^6$ V/см. Однако существование таких полей весьма сомнительно.

Ошибочным оказалось и то заключение исследователей, что наблюдавшийся ими толчкообразно продвигающийся процесс представляет собой лидер разряда, развивающегося в девственном (неионизированном) воздухе. Это положение, высказанное как фундаментальный закон (разряд в девственном воздухе может развиваться лишь толчкообразно), направило физиков по неправильному пути, ибо предстояло при этом объяснить большие скорости движения головки лидера в неионизированной атмосфере.

Первое решение возникшей задачи было предложено Кравatч и Леб, согласно которым прорастание лидера идет следующим образом. В интенсивном поле

ЭБ "Научное наследие России"

у головки лидера начальные свободные электроны, образованные обычной атмосферной ионизацией, быстро умножаются благодаря ионизации толчком. Эти электроны продвигают разряд, причем они вовсе не должны двигаться со скоростью головки лидера. Для продвижения лидера со скоростью около 10^9 см/сек. в каждом кубическом сантиметре объема воздуха у головки лидера должно быть, по расчетам авторов, 6 электронов. Трудно, однако, допустить возможность существования такого количества свободных электронов, происходящих от нормальных атмосферных ионизаторов.

Повидимому, предположение о том, что необходимое количество электронов может быть создано за счет естественной ионизации (радиоактивными элементами и космическими лучами), неосновательно ввиду малой «долговечности» свободного электрона и малой производительности активных факторов ионизации. Тот факт, что для получения расчетным путем при сделанных предпосылках наблюдавшихся скоростей лидера необходимо принять исключительно большие градиенты электрического поля (в несколько миллионов вольт на сантиметр), делает такие расчеты недостаточно обоснованными.

Проведенные нами и другими исследователями работы привели к заключению, что наблюдающийся толчкообразный процесс не является в буквальном смысле лидерным, ибо ему предшествует другой процесс непрерывного характера, создающий ионизацию. Этот процесс собственно лидерный (по терминологии, установленной английскими авторами,—пилот-лидер) вызывает ионизацию атмосферы. Скорость его продвижения равна средней скорости толчкообразного процесса. Как указывалось в главе III (стр. 73), наблюдаются две группы лидеров: средняя скорость одной наиболее многочисленной равна $1.5 \cdot 10^7$ см/сек., с пределами $(1 \div 5) \cdot 10^7$ см/сек., средняя скорость другой равна $2 \cdot 10^8$ см/сек.

Теоретически скорости лидеров первой группы могут быть получены на основании применения формулы Таунсенда, выведенной для неупругих столкновений между электронами и газовыми молекулами

$$v_c = \sqrt{2E_c e\lambda : \pi m}, \qquad (1)$$

где $\lambda = 3.8 \cdot 10^{-5}$ см—средний свободный газокинетический путь электрона при 20° С и 76 ммHg, e и m—заряд и масса электрона, E_c—критическая величина градиента электрического поля, существующего у головки лидера. При $E_c = 30$ k/V/см, $v_c = 3.6 \cdot 10^7$ см/сек. Учитывая, однако, что при значительных силах поля E, близких к ионизирующим или превышающим их, неупругим столкновениям нет места, необходимо ввести в формулу (1) поправочный коэффициент. Для чисто упругих столкновений величина v_c должна быть уменьшена умножением на коэффициент, определенный Комптоном и Лангмюром, и равный

$$\sqrt{\frac{\pi^2 m}{4M}} = 0.08, \qquad (2)$$

где m—масса электрона, а M—масса молекулы воздуха. Таким образом, истинная величина v будет лежать между v_c и $0.08\, v_c$. Принимая поправку для v_c в виде коэффициента $0.8 \div 0.3$, получим наименьшее значение v_c, равное $1.8 \cdot 10^7$ см/сек.

Шонланд полагал, что наименьшая скорость v_c равна 1.10^7см/сек., однако фактический материал не подтверждает этого вывода. Действительно, по данным Алибоне, при заторможенных по методу И. Стекольникова разрядах, наблюдались скорости отрицательного лидера в пределах $0.8 \cdot 10^6$—$1.6 \cdot 10^6$ см/сек., что почти в 12 раз меньше самого нижнего предела теоретической скорости движения электронов при неупругих столкновениях.

В связи с изложенным особый интерес приобретают отмеченные средние скорости продвижения лидерного процесса; скорость v_c, равная $1.4 \cdot 10^6$ см/сек., получается по формуле Таунсенда для случая упругих столкновений электронов с молекулами газа.

Малые средние скорости продвижения лидера могут быть объяснены слабой концентрацией зарядов в тучах, благодаря чему общее сопротивление подтекания зарядов к формирующемуся каналу велико. Как известно теперь из лабо-

ЭБ "Научное наследие России"

раторных исследований, большее сопротивление тучи должно тормозить развитие лидеров.

Большие трудности вызывало объяснение скоростей второй группы лидеров. Применение для этой цели формулы (1) привело бы к неправдоподобно большим градиентам, при которых самое использование формулы было бы необоснованным.

Для объяснения больших скоростей лидеров Шонланд, принимая теорию Кравatч и Леб, несколько развивает ее, полагая, что время t, необходимое для того, чтобы электрон (у головки канала) дошел до другого электрона в направлении поля, равно

$$\frac{1}{n^{1/3}\bar{v}},$$

где $\bar{v}$—средняя скорость движения электрона на участке формирующегося стримера длиной d, а n—первоначальная плотность электронов.

Скорость движения стримера при этом определяется выражением

$$v = \frac{d}{t} = n^{1/3}\bar{v}\,d.$$

При потенциале головки стримера (радиус 1 см), равном $3 \cdot 10^6$ V (напряженность поля около головки равна $1.5 \cdot 10^6$ V/см), скорость движения стримера равна $7 \cdot 10^7$ см/сек. Однако полагая, что стример идет по уже ионизированному пути (с плотностью $n = 10^3$ электронов в 1 см^3), скорость определится уравнением (3). Для рассмотренного случая длина, на которой может происходить ионизация, равна 6 см. Средняя напряженность поля на расстоянии 3 см от головки стримера будет равна $9 \cdot 10^4$ V/см и $v = 1.7 \cdot 10^7$ см/сек. При этих значениях формула (3) дает $v = 1.3 \cdot 10^9$ см/сек.

Вывод Шонланда построен таким образом, что произвольным подбором количественных характеристик можно получить желаемый результат. Как видно, градиенты здесь уже значительно меньше тех, которые потребовались бы при применении формулы (1), но все же достигают больших величин. Трудность в объяснении больших скоростей лидеров исчезает, если учесть эффект фотоионизации, вызываемый коротковолновыми излучениями самого развивающегося лидера. Еще в 1936 г. Леб, на основании работ Кравatч, констатировал, что ионы могут появиться на головке канала благодаря фотоионизации.

Работы последних лет с камерой Вильсона привели к мысли о возможности существования фотоэлектрического эффекта, вызываемого головкой растущего стримера. Этот эффект играет роль поставщика электронов, необходимых для роста стримера. Известно, что спектр искрового разряда содержит лучи, обладающие длиной волны, достаточно короткой для ионизации воздуха (на этом принципе автором построено световое реле, применяющееся для синхронизации различных контуров при работе с катодным осциллографом, см. главу II).

Выполненные в 1940 г. Швикером специальные исследования показали, что действительно в несамостоятельном разряде в воздухе под действием электронных ударов возникает ультрафиолетовое излучение со спектром, в котором наибольшую часть занимают волны с длиной меньше 1 000 Å. Коэффициент абсорбции этого излучения в воздухе при нормальном давлении $\mu = 1.5$ см$^{-1}$.

Под действием такого излучения, выделяющегося в области головки (имеющей радиус ρ) развивающегося стримера, может происходить образование электрона на расстоянии r, большем ρ. Если этот электрон, образовавшийся в поле (усиленном отрицательным зарядом головки), произведет за некоторое время на пути Δr такую ионизацию, при которой поле в данном месте достигает величины поля у головки стримера, можно говорить о продвижении поля головки на путь $x = r + \Delta r$.

Таким образом, продвижение поля происходит со скоростью в $\frac{r+\Delta r}{\Delta r}$ раз большей, чем скорость движения электрона, возникшего в точке r. В сильно искаженных полях (при коэффициенте искажения $\varkappa = \frac{E_{\text{иск}}}{E_{\text{норм}}} = 10$) скорость

ЭБ "Научное наследие России"

продвижения головки стримера может в несколько раз превышать скорость его распространения в неискаженном поле. С увеличением диаметра канала (случай лидера молнии) те же увеличения скорости могут быть получены при меньших искажениях поля за счет того, что больших размеров головка искажает поле перед собой на большем расстоянии, тем самым создавая для процесса ионизации фотонами более благоприятные условия.

Иллюстрацией изложенного служит рис. 116, воспроизведенный по Реттеру. Здесь ускорение движения стримерной головки относительно скорости движения электронов происходит в $\frac{L}{l}$ раз. Благодаря тому, что электрическое поле между катодом и положительным пространственным зарядом усиливается, в этой зоне должна пройти новая лавина электронов, возникновение которых может происходить как в результате действия фотоионизации, так и благодаря существованию отрицательных ионов. В результате возникает дополнительный положительный объемный заряд, в свою очередь усиливающий поле вблизи катода. Ступенчатая ионизация приведет к повышению температуры, термической ионизации и, наконец, к дуговому процессу в части промежутка, прилегающей к катоду. В плазме дуги падение напряжения вдоль канала невелико, и вскоре канал заполнится отрицательными зарядами, что эквивалентно как бы удлинению электрода в направлении развития стримера. Далее процесс развивается идентично и приходит либо к завершению лидерного процесса на аноде, либо к прекращению разряда, если напряжение с промежутка будет снято или если оно окажется недостаточным для поддержания разряда.

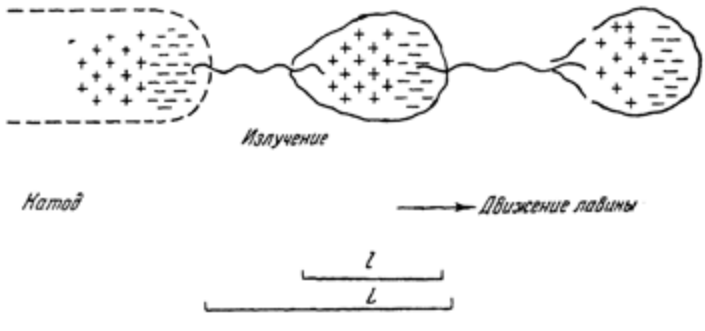


Рис. 116. Схема образования лидерного процесса в атмосфере

Аналогичная картина развития разряда наблюдается и при положительном острие.

Объяснение того, что отрицательный лидер распространяется в определенных стадиях медленнее положительного, заключается, повидимому, в том, что концентрирующийся за его головкой положительный объемный заряд уменьшает градиент электрического поля на пути следования лидера к положительному электроду. Концентрация положительного заряда позади головки лидера, растущего от положительного электрода, увеличивает напряженность поля на части искрового промежутка, еще не пройденного лидером.

С целью количественной оценки критерия перехода электронной лавины в проводящий стример Мик вводит следующее определение. Развитие стримера произойдет тогда, когда сила р а д и а л ь н о г о поля около положительного пространственного заряда, образованного электронной лавиной, достигнет значения, равного силе внешнего поля промежутка. При этом состоянии положительный заряд притягивает электроны, возникающие под действием фотоионизации в окружающем пространстве, в количестве, достаточном для образования самостоятельно развивающегося стримера.

Факт существования ступенчатого лидера, толчкообразно распространяющегося по пути пилот-лидера, теоретически объясняется различно. Исходя из краткости пауз между отдельными ступенями (50—90 μS), полагают, что главной причиной пауз может быть лишь механизм, связанный с газовым разрядом и имеющий фундаментальное значение. Поэтому, по Шонланду, паузы не могут быть связаны с каким-либо свойством зарядов тучи, питающей лидер, а их можно объяснить так: конец остановившегося ступенчатого стримера является началом ствола пилот-стримера (см. стр. 127), при этом поле на фронте этого конца недо-

ЭБ "Научное наследие России"

статочно для ионизации электронным ударом. Время паузы может рассматриваться как время, в течение которого напряженность поля у конца стримера достигает критического значения для ионизации. Можно дать два объяснения того, как происходит это нарастание: либо благодаря уменьшению плотности электронов (рекомбинация) происходит необходимое для поддержания тока стримера усиление поля, либо поле усиливается благодаря образованию положительного объемного заряда на пути продвижения пилот-стримера. Это объяснение, выдвинутое Хиппелем при рассмотрении лихтенберговских фигур, отождествляет время паузы с временем запаздывания.

Газообразный конец ступенчатого стримера по своей природе, однако, весьма отличен от металлического катода искрового промежутка, и поэтому трудно представить образование положительного объемного заряда весьма близко от этого конца.

Локализация главного источника света вблизи головки различного вида стримеров указывает на то, что свечение стримера возникает в сильных полях у конца стримера, где атомы и молекулы приведены в возбужденное состояние электронными ударами. После прохождения головки атомы возвращаются в нормальное состояние с эмиссией света. Производимое при этом свечение распространяется на длину S головки, причем $S \geqslant v\tau$, где v—скорость стримера, а τ—среднее время существования возбужденного состояния. Величина τ определяется по длине светящихся участков главного канала и лидера ($S/v = \tau$) и оказывается равной $5 \cdot 10^{-6}$ сек. Применяя это соотношение для лабораторной искры, получим расхождение с опытными данными. Действительно, при скорости лидера в $2 \cdot 10^6$ см/сек. найдем, что $S = v\tau = 2 \cdot 10^6 \times 5 \cdot 10^{-6} = 10$ см.

Однако, по измерениям Алибоне, ярко светящаяся часть лидера при этой скорости не может быть длиннее 1 см. Лучшее совпадение с результатами опыта получается для лабораторной искры при $\tau = 10^{-7}$ сек., полученном при изучении спектра азота. Однако при этом получается расхождение с наблюдениями над молнией. Вопрос требует дальнейшего изучения.

Яркость стримеров возрастает с увеличением скорости их распространения, что находится в соответствии с известным усилением возбуждения при увеличении скоростей электронов.

Другую картину образования ступеней дает Мик. При прохождении головки пилот-лидера действие ионизации прекращается, и число ионов, вследствие рекомбинации, быстро падает. С уменьшением ионной плотности удельное сопротивление (ρ) газового столба растет, согласно выражению:

$$\rho = \frac{1 \cdot 3 \cdot 10^{15}}{N} \text{ ом. см}, \tag{4}$$

где N—плотность ионов в канале лидера, изменяющаяся со временем согласно известному закону

$$N = \frac{N_0}{1 + aN_0 t}. \tag{5}$$

Мик считает, что ток, текущий через головку лидера, должен сохранять постоянную величину, определяемую соотношением Рюденберга:

$$I = \frac{vrE}{18 \cdot 10^{11}}, \tag{6}$$

где r—радиус головки канала (в см), E—напряженность поля у головки (в V/см), v—скорость ее движения (в см/сек.), а I—ток лидера (в А). На основании литературных данных о распространении лидера в полях с напряженностью порядка 30 kV/см, r может быть принято равным 1 см.

Мик, на основании ошибочного применения соотношения Реттера, установленного последним для определения зоны диффузии, определяет радиус головки лидера приблизительно равным 0.3 см. При этом формула Рюденберга для принятых $E/p = 40$ (p—давление атмосферы, в мм Hg) и $v = 2 \cdot 10^{-7}$ см/сек. дает $I = 0.1$ А.

Произведение постоянного по величине тока на растущее удельное сопротивление канала приводит к возрастанию градиентов потенциала вдоль формирующегося лидера.

ЭБ "Научное наследие России"

Если падение напряжения превысит критический градиент, то может произойти новый «пробой» элемента газового канала, в связи с чем по пути, еще ионизированному прохождением головки пилот-лидера, пройдет новая ступень разряда с большей скоростью и, следовательно, с бо́льшим током. Отметим, что если ионизированное состояние канала после прохождения головки пилот-лидера поддерживается близким к первоначальному, то сопротивление газового столба мало меняется, протекающий по нему ток не вызывает чрезмерных падений напряжений и распространение лидера в этом случае должно итти непрерывно. Хотя теория Мика хорошо согласуется с наблюдениями над молнией, сделанными в Южной Африке, однако содержащиеся в ней недостаточно обоснованные и спорные положения[1] не позволяют считать теорию в настоящем адекватно отображающей затронутые ею физические явления. Все же названное объяснение толчкообразного продвижения является остроумной попыткой количественной оценки сложного явления.

3. ТЕОРИЯ ГЛАВНОГО КАНАЛА

Образование главного канала должно быть связано с индуцированными зарядами в земле. Как показывают катодно-осциллографические регистрации, лидерный процесс спускает в воздух значительную часть заряда тучи. Уменьшение интенсивности свечения части главного канала, прошедшего точку разветвления (см. об этом подробнее ниже), указывает на то, что процесс, наступающий после достижения лидером земли, производит нейтрализацию зарядов ветвей, созданных лидером. Высокая температура главного канала связана, повидимому, с термической ионизацией. Разница в интенсивности протекания процессов лидера и главного канала сделается понятной, если иметь в виду, что лидер, с трудом прокладывая себе путь в воздухе, заряжает систему каналов, причем энергия аккумулируется в статической форме, в то время как процесс обратного движения зарядов разряжает систему, благодаря чему энергия, запасенная в каналах, бурно в них расходуется.

Структура главного канала и вызываемого им послесвечения впервые детально изучалась оптическим методом Маланом и Колленсом. На рис. 117 изображена структура световых компонент разряда, имеющего три разветвления. Опыт показывает, что компоненты 2,3 образуются (с точностью до 10 μS) при подходе компоненты *1* (главный канал) к точкам разветвления *C* и *D*.

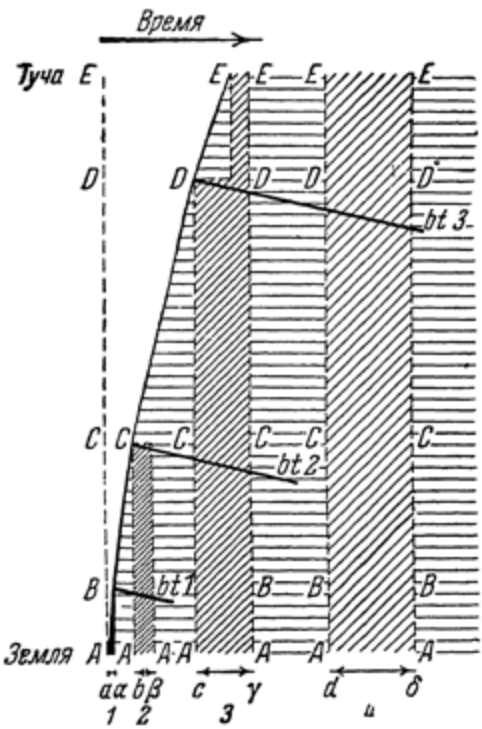


Рис. 117. Схематическое изображение структуры световых компонент грозового разряда, имеющего три разветвления

Длительность T_0 существования компоненты (определяемая интервалами $a-\alpha$, $b-\beta$, $c-\gamma$) и интервал $T_и$ от начала отсчета времени (точка a) до начала образования компонент (точки b, c, d) связаны определенным образом с поряд-

[1] Так, например, коэффициент рекомбинации $\alpha=2\cdot10^{-6}$ принимается для случая ионов, а не для случая рекомбинации положительных ионов и электронов. Согласно Сейерсу, на которого ссылается Мик, необходимо для малых t принимать α не менее $6\cdot10^{-6}$, что приводит к спадению N [по формуле (5)] с 10^{11} до 10^{10} лишь за 16 μS, вместо 50 μS, взятыми в соответствии с наблюдениями.

ЭБ "Научное наследие России"

ковым номером компоненты (2, 3, 4). В табл. 9 приводятся наиболее часто встречающиеся величины названных интервалов.

Таблица 9

Компоненты	Длительность T_0 μS	Интервал $T_и$ μS
1	<10	0
2	20	25
3	50	70
4	100	(150—500)

Длительность компоненты, повидимому, эквивалентна времени «заряда» (или «разряда») соответствующей ветки. Скорость продвижения компоненты точно установить не удалось, вероятно она больше 10^{10} см/сек., приближаясь к скорости света. Направление распространения компоненты также не установлено.

Наблюдались компоненты, не связанные с разветвлениями. Эти компоненты заполняют весь промежуток земля—туча. Из девяти случаев в двух компоненты развивались снизу, а в остальных—сверху. Четыре таких «тучевых» компоненты имели скорости от $2 \cdot 10^9$ до $4.7 \cdot 10^{10}$ см/сек. Число компонент чаще всего равняется четырем, в одном случае их было 20.

Свечение вдоль главного канала может существовать относительно долго. (Длительность свечения определяется, помимо всего прочего, качеством объектива.) Наиболее частые интервалы свечения—порядка 1 000 μS, в исключительных случаях они варьируют от нескольких сотен микросекунд до 0.5 сек. Свойства послесвечения, повидимому, не имеют отношения ни к типу разряда, ни к его интенсивности.

О причинах различной длительности послесвечения существует несколько предположений. Вальтер, например, полагает, что она обусловливается высоким сопротивлением почвы. Однако ставить длительность послесвечения в зависимость от свойств грунта, по нашему мнению, нельзя.

При изучении лабораторного разряда нами отмечалось длительное послесвечение отдельных элементов искры при относительно кратковременном существовании общего послесвечения. Аналогичные светящиеся элементы наблюдаются и у молнии. Мак Икрон и Мак Моррис приводят кинематический снимок молнии, поразившей металлическую хорошо заземленную конструкцию. По их данным, послесвечение отдельных импульсов было весьма различным, что находится в соответствии со сделанным нами предположением о том, что течение процесса регулируется в основном тучей. Однако опубликованная американцами фотография недостаточно убедительна, так как снимок, сделанный вращающимися объективами, резко искажен в наиболее интересном месте, ввиду чего нельзя выяснить, какой разряд производит длительное послесвечение.

Весьма убедительны материалы, даваемые быстро вращающимися клидонографами. По регистрациям можно установить, что процесс изменений поля, очевидно, сопровождающийся изменением количества зарядов в объеме тучи к земле, в различных импульсах молнии протекает в весьма различные интервалы времени (от сотен и меньше до десятков тысяч микросекунд). Эти данные подтверждают предположение о независимости (во всяком случае об отсутствии однозначной зависимости) длительности процесса от свойств почвы.

Для анализа вопроса о воздействии молнии на различные сооружения и в первую очередь на элементы линий электропередач необходимо иметь способ аналитического выражения процесса изменения тока разряда по времени. В литературе известны несколько методов определения формы волны тока, возникающей при прямом ударе молнии в землю, предложенных различными авторами. Основой таких расчетов является схема замещения процесса разряда, трактовавшегося весьма различно.

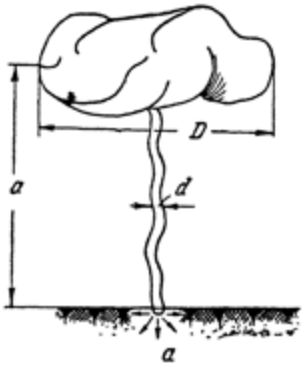
1. Схема Рюденберга. Одной из первых схем замещения процесса развития грозового разряда была схема Рюденберга, согласно которой ток молнии является результатом разряда конденсатора с обкладками туча—

ЭБ "Научное наследие России"

земля на самоиндукцию и сопротивление проводящего канала, возникшего между электродами (рис. 118, *a*).

Определения L и C (рис. 118, *b*) производятся на основании подсчета запаса электростатической и электромагнитной энергии в объеме, образованном пластинами диаметром D, находящимися на расстоянии a. R определяется как сопротивление растекания цилиндрического канала молнии, проникшей на определенную глубину в землю, r—сопротивление излучения канала, которое суммируется с величиной R.

Определение формы волны ведется из условия квазистационарного процесса разряда конденсатора на R и L. Характер разряда при этом апериодический или колебательный, определяется величиной отношения $\frac{R}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$. На квазистационарный процесс разряда в его начальной стадии накладывается затухающий волновой процесс, вызванный повторным пробегом разрядной волны заряженного канала молнии в момент $t=0$, вошедшей в соприкосновение с землей. В начальной стадии волнового процесса пробой промежутка F вызывает контакт между заряженным до потенциала E каналом молнии и землей и обусловливает появление отраженной волны напряжения и волны тока, распространяющихся по волновому сопротивлению к туче. Фронт волн принимается прямоугольным. Возникшие волны благодаря последовательным отражениям у «тучевого» и «земного» концов канала образуют затухающую серию волн, накладывающихся на основной процесс разряда, приводя к картине изменения тока у земли, изображенной на рис. 119. Главные недостатки теории Рюденберга:



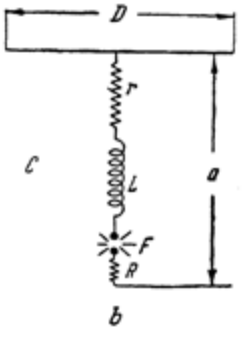


Рис. 118. Электрическая схема замещения тучи (*a*) и молнии (*b*) по Рюденбергу

Рис. 119. Кривая изменения тока у земли $i=f(t)$

а) $\left[\frac{di}{dt}\right]_{t=0} = \infty$ из-за неучета деформации волны, отражающейся у земли.

b) Невозможность получения расчетным путем волн с параметрами, известными из регистрации; например, нельзя получить волну с длительностью фронта в 8 μS при длительности спада амплитудного значения до половины в 100 μS.

c) Невозможность объяснения скорости развития главного канала, значительно меньшей скорости света.

Невозможность получения расчетным путем волны обнаруживается при детальном анализе уравнения тока, имеющего при апериодическом импульсе вид

$$i = i_0 (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}). \qquad (7)$$

Принимая, по Рюденбергу, расчетные формулы для определения емкости тучи в виде

$$C = \frac{D^2 \cdot 10^{-6}}{a \cdot 144}, \qquad (8)$$

находим, при $D=1$ км и $a=1$ км, $C=7 \cdot 10^{-9}$ F. Из соотношений, связывающих коэффициенты уравнения α_1 и α_2 с t_1 и t_2, находим для данного случая: $\alpha_1 = 8 \cdot 10^3$, $\alpha_2 = 560 \cdot 10^3$. Параметры схемы R, L, C связаны с α_1 и α_2 соотношениями:

$$\alpha_1 = \frac{R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}},$$
$$\alpha_2 = \frac{R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}. \qquad (9)$$

ЭБ "Научное наследие России"

На основании этих уравнений находим, что $R=18\,000\ \Omega$, $L=3\cdot10^{-2}\ H$. Последняя величина неприемлемо велика. Так, по формуле самого Рюденберга, $L=1.7\cdot10^{-3}\ N$, т. е. в 17.5 раза меньше требующейся.

2. Схема Бьюли. Бьюли предполагает, что туча может быть заменена схемой, изображенной на рис. 120, в которой конденсаторы C представляют собой емкости отдельных элементов тучи. Разряд начинается при достижении критического градиента в промежутке *1*. Напряжение на первом конденсаторе начинает уменьшаться по закону $Ee^{-\frac{t}{zc}}$, благодаря чему разность потенциалов на промежутке *2* увеличивается. Когда потенциал на разряжающемся конденсаторе достигнет величины $E-e$, произойдет пробой второго промежутка. В силу распределения зарядов между емкостями, потенциал соединившихся конденсаторов сделается равным

$$\frac{C(E-e)+CE}{2C}=E-\frac{e}{2},$$

а потенциал на них будет спадать по закону

$$\left(E-\frac{e}{2}\right)e^{-\frac{t}{2zc}}.$$

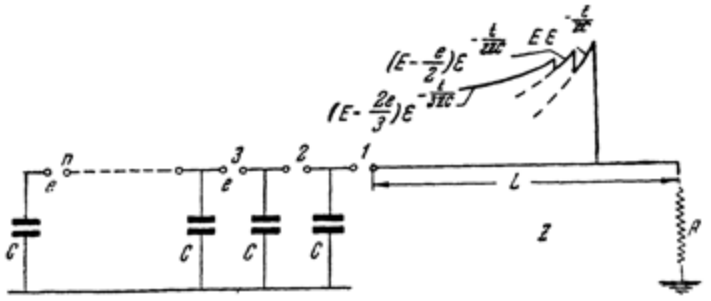


Рис. 120. Электрическая схема замещения тучи по Бьюли

Аналогичным образом произойдет процесс включения третьего, четвертого и n-го конденсаторов. При этом изменение потенциала после пробоя $(m+1)$-го промежутка происходит по закону

$$\left(E-\frac{m-1}{m}\right)e^{-\frac{t}{mzc}}.$$

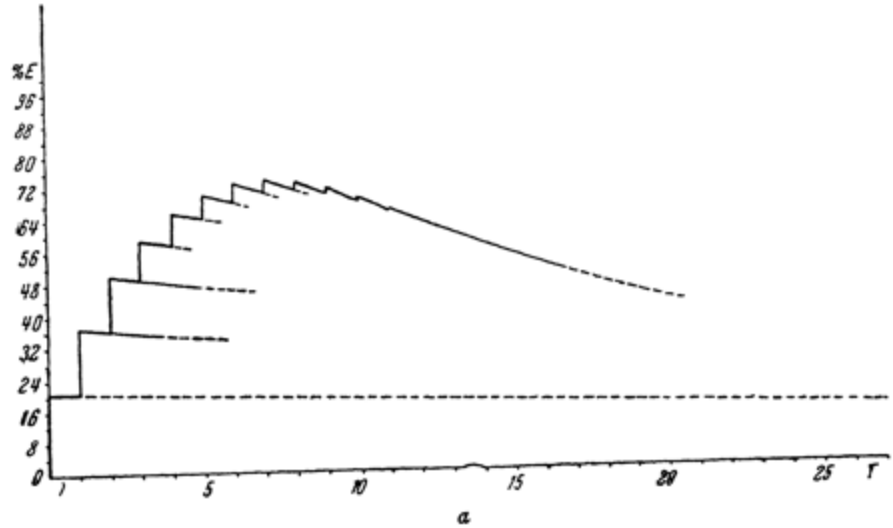
Благодаря описанному ступенчатому процессу, потенциал в начале канала молнии, при достаточно малом значении e и большом E, будет практически неизменен, что сможет объяснить постепенно нарастающие токи молнии (см. ниже). Анализ этого вопроса, однако, для конкретного случая характеристик тучи показывает, что при $m=10$ и емкости одного элемента тучи в 10^{-3} см (эта емкость соответствует туче диаметром 1.2 км, расположенной на высоте 1 км) относительно постоянное напряжение держится лишь около 5 μS. Бо́льшее число m приведет к нереальным размерам тучи и, следовательно, произвольно выбирать его нельзя. В силу изложенного, создать практически постоянный потенциал до конца разряда указанным способом нельзя. Однако, как будет видно из дальнейшего, это обстоятельство не имеет решающего значения для рассматриваемого метода расчета волны, хотя представляет интерес вообще для уяснения процесса разряда. Определение формы токовой волны Бьюли производится наложением последовательно отражающихся у земли и тучи электромагнитных волн, распространяющихся по каналу, образованному молнией. На основании произведенных расчетов Бьюли показывает, что амплитуда тока достигается путем последовательных отражений, действием которых постепенно исключается величина волнового сопротивления канала молнии. С целью экспериментальной проверки возникающих процессов, Бьюли приводит схему разряда конденсатора через длинную линию на сопротивление и осциллограмму, дающую полное совпадение с расчетной формулой волны.

В целях анализа данного метода для констант, указанных Бьюли, сделан подсчет составляющих волн в линии и построено результирующее напряжение на сопротивлении (рис. 121, *а*). Как видно, форма волны, а следовательно, и тока вполне отражает вид волны прямого удара молнии. Однако при выборе для расчетной схемы констант, имеющих физический смысл, вид волны уже не получается столь удовлетворительным (рис. 121, *б*). При этом фронт волны прямоугольный, а форма хвоста не имеет экспоненциально спадающего характера.

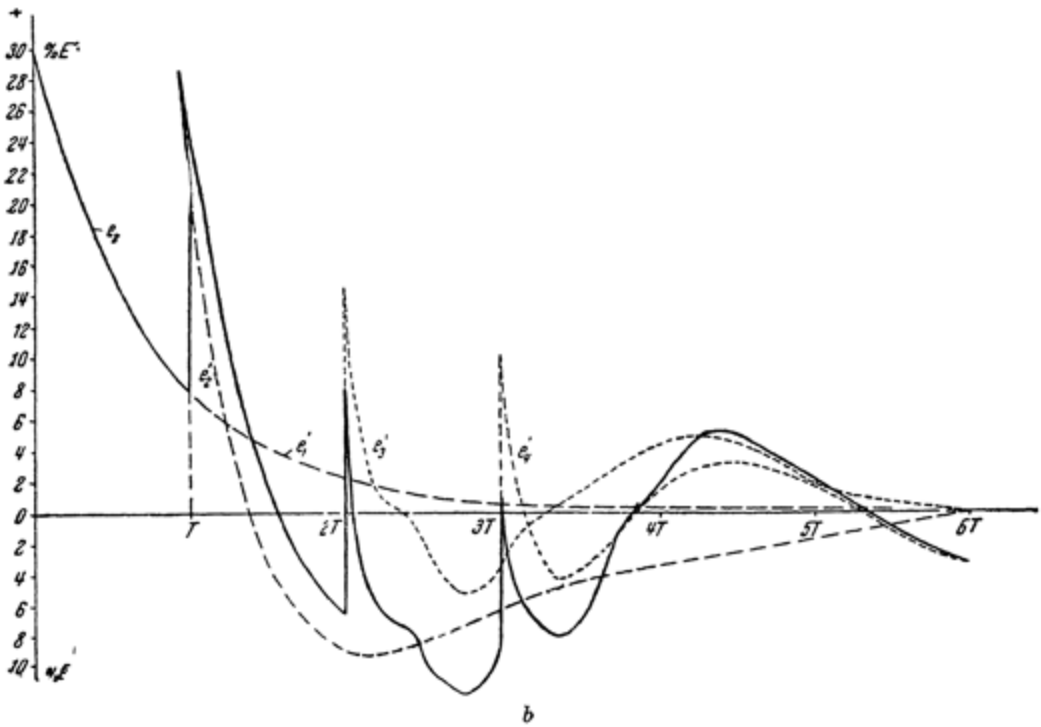
ЭБ "Научное наследие России"

Анализ схемы Бьюли, следовательно, показывает, что волны известного вида, при физически приемлемых константах схемы, не могут быть получены.

Описанными двумя схемами в основном исчерпываются попытки интерпретировать формы разрядных волн. Другие схемы отображают явление разряда менее полно или ограничиваются лишь качественной стороной процесса.



a



b

Рис. 121. Напряжение на сопротивлении, рассчитанное в случае:

a) при константах $C=0{,}75$ μF; $Z=510$ Ω; $R=60$ Ω; $L=200$ м; Отдельные компоненты имеют вид:

$$e'_1 = (1+a)\,Ee^{-\beta t}$$

$$e'_2 = a(1+a)\,(2\beta t-1)Ee^{-\beta t}$$

$$e'_3 = a^2(1+a)\,(1-4\beta t+2\beta^2t^2)Ee^{-\beta t}$$

$$e'_4 = a^3(1+a)\,(\tfrac{4}{3}\beta t^3-6\beta^2t^2+6\beta t-1),\quad Ee^{-\beta t},$$

где

$$a=\frac{R-Z}{R+Z};\qquad \beta=\frac{1}{CZ};\qquad T'=\frac{2L}{v}.$$

b) при константах $C=10^{-8}$ F; $Z=500$ Ω; $R=100$ Ω; $L=10^{3}$ м,

ЭБ "Научное наследие России"

Названные теории, однако, совершенно неудовлетворительно и неполно освещают физический смысл явлений и не дают расчетных форм токовых волн, аналогичных зарегистрированным в последнее время.

3. Схема автора. Ниже делается попытка более полного описания механизма молнии и предлагается схема расчета формы волны тока на новом принципе. Ток, образующий лидер, повидимому, не превосходит нескольких ампер. После прохождения головки лидера, оставляющей обычно положительный заряд, поле между тучей и этим зарядом возрастает, что способствует дальнейшей ионизации объема воздуха, пройденного головкой, и увеличению проводимости плазмы канала. В результате нескольких последовательных аналогичных процессов происходит заполнение канала отрицательным зарядом, спускающимся из тучи (рис. 122). Этот процесс перезаряда положительного канала отрицательным зарядом происходит относительно равно-

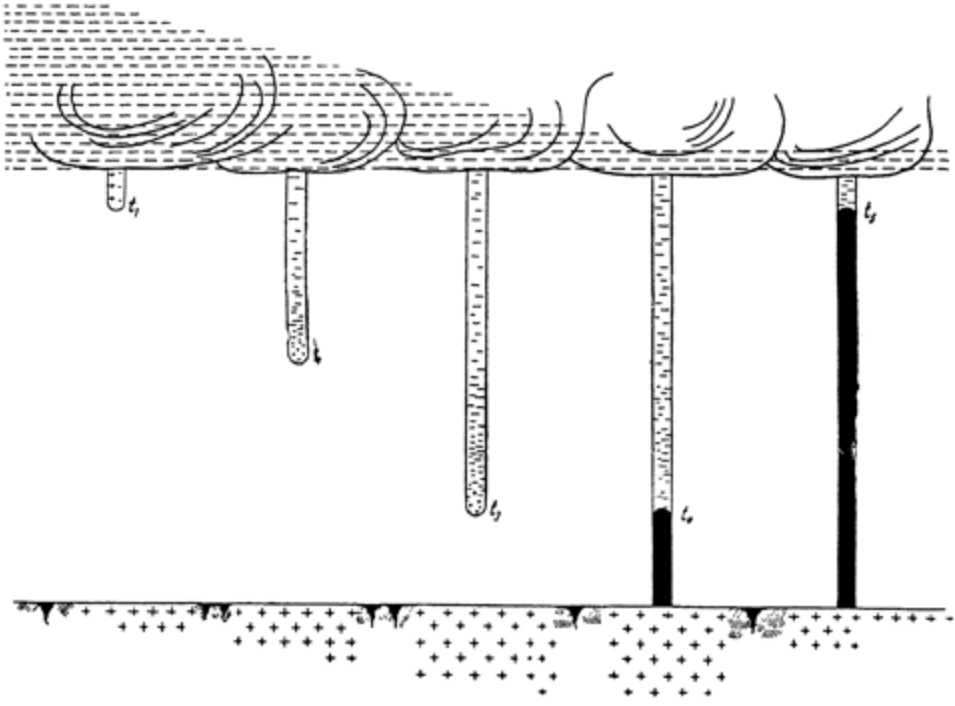


Рис. 122. К механизму образования импульса разряда

мерно, но может иметь и ступенчатый характер. Скорость заполнения каналов зарядами может колебаться в пределах 10^7—10^9 см/сек., а токи—в пределах от десятков до тысяч ампер. В результате этого процесса в газовом канале распределяется заряд, величина которого может достигать многих кулонов. Действительно, при средней величине тока $I=500$ А, скорости движения фронта волны $v=5 10^7$ см/сек. и длине $L=2$ км, заряд, спущенный из тучи, определяется из соотношения

$$Q = It = I\frac{L}{v} = 500 \cdot \frac{2 \cdot 10^5}{5 \cdot 10^7} = 2\,\text{C}.$$

Этого количества электричества вполне достаточно, чтобы создать весьма большие амплитуды тока при развитии главного канала (см. ниже).

По достижении лидером поверхности земли либо при соприкосновении его со встречными лидерами происходит образование главного канала. При этом скорость движения лидерной головки резко увеличивается, достигая при образовании главного канала 10^9—10^{10} см/сек.

Исключительно важное значение имеет то обстоятельство, что развитие главного канала и движение его к туче происходят со скоростью v_k, значительно меньшей скорости света (по измерениям $v_k=10^9$—$1.4 \cdot 10^{10}$ см/сек.). Благодаря

ЭБ "Научное наследие России"

этому время прохождения канала по лидерному пути может составить от нескольких десятков до нескольких сотен микросекунд.

На основании изложенного можно представить процесс изменения тока главного канала в таком виде. Ток определяется по формуле

$$i = qv, \tag{10}$$

где q—плотность зарядов в газовом канале, созданном лидером, а v—скорость движения головки лидера или главного канала. Законы распределения зарядов вдоль газового канала в течение лидерного процесса еще неизвестны, однако на основании осциллографических записей можно полагать, что плотность зарядов с развитием лидера сильно возрастает. Для упрощения расчета можно предположить, что в полностью развившемся канале плотность заряда меняется согласно экспоненциальному закону:

$$q_x = q_0 e^{-ax}, \tag{11}$$

где a—некоторая постоянная, x—длина канала с началом отсчета от земли. Мгновенное значение скорости v_x может быть определено с помощью некоторой возрастающей кривой, при этом увеличение v_x в начале канала идет быстрее

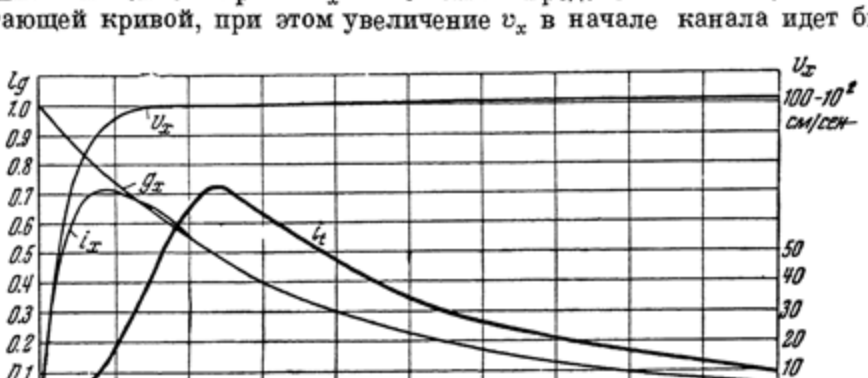


Рис. 123. К расчету волны тока молнии

за счет того, что в этой области происходит переход от скорости лидерной головки к скорости головки канала. Увеличение v_x не требует усиления электрического поля пропорционально квадрату градиента E, как это вытекает из формулы для определения скорости электронов $[v = f(\sqrt{E})]$, ввиду того, что эта формула перестает быть справедливой при скоростях $v \gg 10^7$см/сек. На основании сказанного в качестве первого приближения можно допустить, что скорость определяется выражением

$$v_x = v_k (\eta - e^{-bx}), \tag{12}$$

где v_k—конечная скорость головки главного канала, а η—константа, определяющая, при $x=0$, v_k, равную 1% от v_k (таким образом, $\eta = 1.01$). Некоторое возрастание скорости головки по мере ее удаления от земли может быть обусловлено усилением поля между тучей и концом стримера, продвигающим в атмосферу потенциал, близкий к потенциалу земли. К аналогичным выводам можно притти, принимая, что скорость после достижения максимальной величины снова уменьшается. Согласно уравнению (10), находим

$$i_x = q_x v_x = q_0 v_k e^{-ax} (\eta - e^{-bx}) = A [\eta e^{-ax} - e^{-cx}], \tag{13}$$

где $A = q_0 v_k$. Зависимость $i_x = f(x)$ представлена на рис. 123, на котором также показаны принятые кривые распределения q_x и v_x. Максимальное значение тока определяется выражением:

$$i_m \approx A [e^{-\frac{a}{b} \ln \frac{a+b}{a}} - e^{-\frac{a+b}{b} \ln \frac{a+b}{b}}], \tag{14}$$

ЭБ "Научное наследие России"

причем длина фронтальной части волны в метрах определится уравнением

$$x_\Phi \approx \frac{1}{b} \ln \frac{a+b}{a}. \tag{15}$$

Максимальная крутизна волны на единицу длины определится уравнением

$$\left(\frac{di}{dx}\right)_{\max} = q_0 v_k b, \tag{16}$$

а максимальная крутизна волны тока по времени $i=f(t)$ определится как

$$k = \left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \left[\left(\frac{di}{dx}\right) v_x\right]_{\max}. \tag{17}$$

На основании (12) и (13) имеем

$$\left[\left(\frac{di}{dx}\right) v_x\right] \approx A v_k [(a+c) e^{-cx} - a e^{-ax} - c e^{-dx}]. \tag{18}$$

Если допустить, что

$$d^2 \ll dc \text{ и } a^2 \ll (a+c)c,$$

то максимального значения (18) достигнет при

$$x' = \frac{1}{c-d} \ln \frac{a+c}{d} = f \ln p, \tag{19}$$

где

$$f = \frac{1}{c-d}; \qquad p = \frac{a+c}{d}.$$

Подставляя (19) в (18), получаем

$$k \approx A v_k [(a+c) e^{-cf \ln p} - a e^{-af \ln p} - c e^{-df \ln p}]. \tag{20}$$

Определим теперь связь между $t=f(x)$, для чего напишем:

$$t = \frac{1}{v_k} \int_0^x \frac{dx}{(\eta - e^{-bx})}. \tag{21}$$

Решение этого интеграла приводит к зависимости:

$$t = \frac{1}{v_k b} \left[\ln \frac{\eta e^{bx_2} - 1}{\eta e^{bx_1} - 1}\right]. \tag{22}$$

Графическое изображение $i=f(t)$, полученное на основании (22), изображено на рис. 123[1]. Как видно, фронт волны имеет характерный аллюр, давая переход от лидерного процесса к току главного канала. Вслед за этим процессом может происходить частичное отражение энергии волны от тучи и дополнительное истечение зарядов, находящихся в районе тучевых разветвлений молнии. Благодаря этим процессам происходит удлинение волны тока. При этом сравнительно малые токи (порядка тысячи ампер), могут существовать в течение нескольких тысяч микросекунд, изливая много кулонов электричества.

Механизм ионизации еще недостаточно ясен и поэтому здесь не рассматривается.

Ориентировочные расчеты, сделанные при различных, вполне возможных с точки зрения современных физических представлений, исходных значений функций q_x и v_x, приводят к получению всех параметров токовых волн: амплитудных значений, максимальной и средней крутизны и длительности хвоста.

В качестве примеров приведем результаты расчетов. Пусть $a=3 \cdot 10^{-3}$, $b=30 \cdot 10^{-3}$ (кривая q_x рис. 123), $Q=1$ К, $l=10^5$ см и $v_л=10^7$ см/сек. Максималь-

[1] Учет дополнительного времени, необходимого на распространие токовых волн от различных точек канала до земли, практически не влияет на форму кривой тока.

ЭБ "Научное наследие России"

ная величина тока получится равной $I_m=7.1$ kA, максимальная крутизна: $k=0.658$ kA/μS, длительность фронта: $t_\Phi=23/\eta$S. При $b=300\cdot10^{-3}$ и неизменных других параметрах: $I_m=9.44$ kA, $t_\Phi=3$ μS, $k=7.1$ kA/ηS.

С возрастанием Q происходит пропорциональное увеличение I и K. Так, при $Q=7$ C, $I_m=66.2$ kA, $k=50$kA/μS. Полученные параметры токовой волны находятся в полном соответствии с результатами измерений.

На основании приведенной схемы токи разной полярности могут быть объяснены движением зарядов различных знаков, которое может иметь место либо при разных импульсах разряда, либо в течение одного импульса (это, повидимому, более редкий случай).

Такая схема позволяет легче ориентироваться в экспериментальных работах по изучению характеристик разряда и определению зависимостей, входящих в приведенные уравнения.

С целью введения в уравнение тока переходного сопротивления канала на землю следует установить связь между скоростью v и R.

Для этого необходимо накопление экспериментальных материалов. Вывод уравнения для тока молнии может быть сделан на основании изложенных представлений и несколько другим методом, который позволит ввести в рассмотрение процесса образования тока величину переходного сопротивления растеканию тока молнии в земле R и индуктивности (L) пути токов в земле.

Уравнение токовой волны напишем в следующем виде:

$$L\frac{di}{dt}+iR=E \tag{23}$$

или

$$\frac{L}{R}\frac{di}{dt}+i=\frac{E}{R}=qv. \tag{24}$$

Примем снова, что $q=q_0e^{-ax}$; для v принимаем закон изменения скоростей по экспоненциальному закону

$$v=v_0e^{-bx},$$

учитывая, что в момент $t=0$ ток будет равен нулю, из-за действия L.

При этих условиях и замене переменной x на t, уравнение (24) примет вид:

$$\frac{di}{dx}+Pi=Q, \tag{25}$$

где

$$p=\frac{R}{Lv_0}e^{bx}$$

$$Q=\frac{q_0R}{L}e^{-ax}.$$

Решением этого уравнения является интеграл

$$i=Be^{-me^{bx}}\left\{\int e^{-ax+me^{bx}}dx+k\right\}. \tag{26}$$

Здесь:

$$m=\frac{R}{Bbv_0};\quad B=\frac{q_0R}{L}.$$

Учитывая, что

$$x=\frac{1}{b}\lg(tbv_0+1)$$

и замечая, что $me^{bx}\ll ax$, находим:

$$i=\frac{q_0R}{La}e^{-me^{\ln(tbv_0+1)}}[1-e^{-\frac{a}{b}\ln(tbv_0+1)}]. \tag{27}$$

Это уравнение дает волну тока формы, изображенной на рис. 124. При этом при увеличении R амплитуда тока уменьшается, что находится в полном соответствии с фактом, установленным графиком на рис. 93.

Рис. 124. Схема образования повторных импульсов разрядов по представлениям различных авторов

Сделанный анализ основан на предположении, что изменение тока связано с движением световой головки. Логическое развитие этой идеи приводит к чрезвычайно интересным и важным выводам. Скорость распространения головки главного канала, а следовательно, и рост самого канала

ЭБ "Научное наследие России"

происходят со скоростью в десятки раз меньшей, чем скорость распространения электромагнитных волн по проводникам. При расчете грозоупорных линий электропередач расчет изменения потенциала в месте удара молнии ведется лишь для промежутка времени около 2 μS. За это время главный канал успеет образоваться на длине лишь в несколько десятков метров. Таким образом, можно считать, что на время расчета главный канал практически не существует, т. е. длина его столь мала, что он может не приниматься в расчет. При этом понятие «волновое сопротивление канала молнии» теряет свой смысл, и расчет должен вестись по методу оценки действия данной волны тока, приложенной к месту удара молнии. Такой метод сильно упрощает анализ случаев поражения, подводит под расчет физическое основание, устраняя целый ряд условностей и фиктивных предположений.

При анализе аварий на линии электропередач с деревянными опорами существенный интерес представляет величина падения напряжения на единицу длины канала молнии. Теоретические расчеты, произведенные Оллендорфом, показали что градиент напряжения по длине канала относительно мал. Так, при токе канала $I_k = 10$ kA, $E = 9$ V/см, а при $I_k = 180$ kA, $E = 5.5$ V/см.

По имеющимся данным для электрических дуг E, при $I_g = 1\,000 \div 5\,000$ A, имеет значение 15—16 V/см. Таким образом, можно считать, что падение напряжение в канале молнии, вызванное сопротивлением газового столба длиною 10—15 м, весьма мало по сравнению с падением напряжения, вызываемого прохождением тока молнии в землю, даже при малых сопротивлениях растекания.

4. ЛИДЕРЫ ПОСЛЕДУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

Несмотря на то, что повторные лидеры обычно не имеют ветвей и их емкость меньше емкости первого лидера, все же нельзя заключить, что заряды Q, спускаемые из тучи последующими импульсами, всегда меньше зарядов первого лидера, ибо величина Q обусловлена процессом всего разряда.

Общая схема разряда предполагает существенную разницу в поведении лидеров первого и последующих импульсов. Следует иметь в виду, что лидеры последующих импульсов идут по ионизированному пути.

При рассмотрении механизма стримера, распространяющегося по уже ионизированному пути, отпадают принципиальные затруднения, возникающие при количественной оценке скорости распространения процесса.

Качественно механизм продвижения хорошо объясняется теорией Кратач и Леб. Для количественных расчетов материалов пока недостаточно.

Причины образования и преимущественного роста лидеров в разрядах между тучей и ровной местностью, при отрицательном заряде тучи и даже при учете пониженного давления в области тучи, недостаточно ясны. Действительно, учитывая мощное ионизирующее действие главного канала, следовало бы ожидать образования повторных импульсов от земли. Повидимому образование лидера с земли затруднено отсутствием здесь зарядов, которые стягиваются к месту удара молнии лишь по мере приближения лидерного процесса из тучи. Хотя это предположение страдает недостатком общности, оно дает основание для последующего анализа явления.

5. ПОВТОРНОСТЬ РАЗРЯДОВ

Существование ряда импульсов в одном грозовом разряде имеет важное значение для работы электросистем.

Повторные импульсы вызывают снижение разрядных напряжений изоляции. Многократное действие разрядников от повторных импульсов необходимо учитывать при их конструировании. Система коммутации высоковольтной электропередачи должна проектироваться с учетом возможности повторных, следующих друг за другом через малые интервалы времени, выключений. Расчет термического действия также необходимо делать с учетом повторных импульсов.

ЭБ "Научное наследие России"

То, что молния состоит из ряда самостоятельных повторных импульсов, предполагалось давно благодаря тому, что такие многократные молнии имеют мерцающий характер.

Существует несколько гипотез о механизме повторных разрядов. Симпсон полагает, что прекращение развивающегося разряда из положительной тучи вызывается скоплением отрицательного заряда у истока канала в туче. Естественно, что это объяснение, если оно и правильно, ограничивается случаем положительных разрядов, т. е. относилось бы к менее многочисленной группе разрядов.

Бьюли полагает, что при движении канала от тучи к земле питание его производится из определенного объема тучи. Соединение нового объема тучи с тем соседним объемом, из которого происходит вытекание зарядов и потенциал которого, следовательно, снижается, может произойти лишь при определенной разности потенциалов названных элементов тучи. Возрастающая при этом разность потенциалов приводит, наконец, к пробою слоя тучи и установлению контакта между этими объемами.

При замыкании всей цепочки в контуре туча—земля течет ток. Обрыв его влечет перераспределение потенциалов вдоль тучи, причем на конце, где существовала молния, потенциал начинает увеличиваться, благодаря чему может наступить новый разряд. Для количественной иллюстрации действия схема Бьюли принимает определенные численные значения параметров C и R. С физической точки зрения в схеме нет противоречий, однако математический анализ ее показывает невозможность объяснения количественной стороны процесса при данных параметрах. Вариация же условий работы хотя и может привести к удовлетворительному решению, но лишает схему ее наглядности и простоты, т. е. делает ее, при отсутствии необходимых сведений о емкостях отдельных областей тучи, о сопротивлении стримеров и пр., мало убедительной.

Несколько развив идею Бьюли, Шонланд предложил схему, согласно которой повторные импульсы возникают из раздельно существующих генерирующих центров в туче (рис. 124). Как видно, фазы a и b связаны с опусканием отрицательного заряда из объема тучи в лидер. Фаза c показывает заполнение канала лидера положительными зарядами. Фаза d приводит к полной нейтрализации канала. В момент подхода главного канала к туче из свежего объема начинает развиваться лидерный процесс к первому центру. Отрицательный заряд снова распределяется в канале повторного импульса (фаза e). После соприкосновения с землей снова образуется главный канал, заполняющийся положительным электричеством. Естественно, что фаза f должна была бы соответствовать полностью фазе d, чего в действительности у Шонланда нет. Описанную схему в части фазы d Вагнер и Мак Канн видоизменяют, полагая, что после разряда отрицательного электричества из лидера канал остается заряженным положительно.

Интервал T между повторными импульсами определяется временем продвижения ступенчатого лидера из одного свежего объема тучи к другому (из которого уже произошел разряд). Временем роста стрелообразного лидера, распространяющегося с большой скоростью по пути между тучей и землей, проложенному предыдущим разрядом, пренебрегается. При этом $T=Lv$, где L—расстояние между рассматриваемыми объемами тучи, а v—скорость движения головки лидера. Если среднее значение T равно 0.03 сек., а $v=2\cdot10^7$ см/сек., то L равно 6 км.

Полагая, что скорость стримера в туче меньше и что разряд из второго объема может запаздывать, Шотланд считает, что расстояние L меньше 6 км, не указывая, однако, точного его значения.

Английские авторы Брюс и Гольд в 1951 г. опубликовали схему, которая идентична описанной до фазы c, а затем имеет стадии развития d'—g', поясняемые рис. 124. Авторы считают, что в присутствии поля тучи, существующего в интервале между разрядами, канал, пропустивший уже несколько кулонов электричества и находящийся в контакте с землей, не будет действовать описанным Шонландом путем, но получит положительный заряд и будет играть роль высокого объекта. Он даст начало лидеру к окружающему отрицательному

ЭБ "Научное наследие России"

центру, причем вниз идущий лидер в следующих импульсах будет служить псевдообратным каналом из тучевого центра; этот канал превращается в действительный обратный (главный) канал при контакте развивающегося процесса с землей.

По нашему мнению эта теория, хотя и широко обсуждавшаяся и развивавшаяся рядом исследователей, не может считаться в какой-либо мере удовлетворительной или адекватно объясняющей явление по следующим соображениям.

1. Картина распределения зарядов в туче в виде отдельных локально сосредоточенных объемов (рис. 124) не согласуется с представлениями о формировании туч (рис. 1).

2. Не обосновано утверждение, что разряд смежного объема на область, из которой начался разряд, происходит лишь после прихода к туче главного канала. Снижение потенциала первой области должно происходить с начала образования лидерного процесса. Пробой слоя тучи, разделяющий две смежных области, может произойти при этом в момент, определяемый расположением зарядов и их количеством. Это хорошо иллюстрируется процессом разряда, описанным Бьюли.

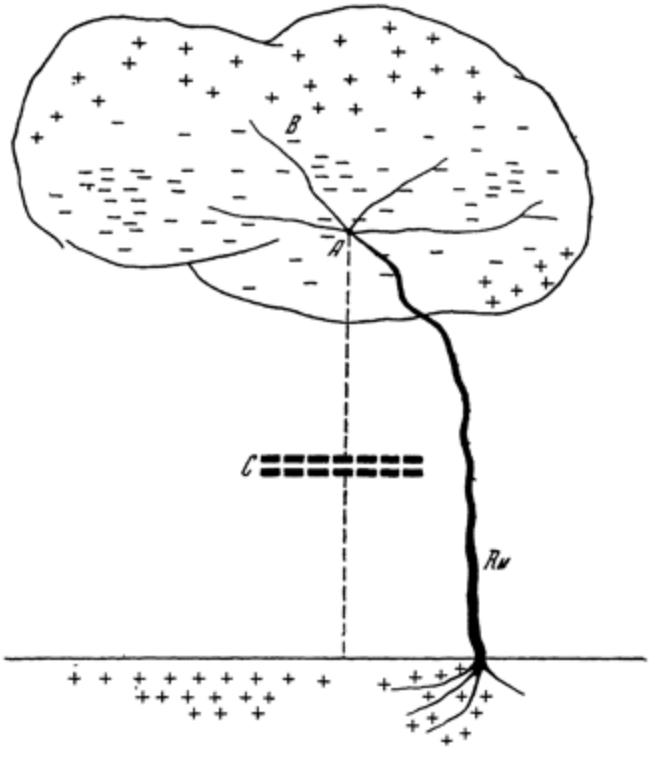


Рис. 125. К схеме возникновения повторных импульсов молнии

3. Наблюдения показывают, что многократные разряды нередко происходят из туч, не имеющих столь больших размеров, как того требует схема Шонланда (L порядка 5—6 км). Действительно, при разряде из 10 импульсов объем тучи должен был бы иметь радиус 50—60 км (речь идет о радиусе потому, что все прилегающие объемы имеют одинаковые шансы для разряда на функционирующую область). Регистрация разрядов клидонографами возможна лишь в сравнительно узкой зоне (около 10 км), поэтому удаление центров образования молний от места регистрации (или соответственно приближение их к нему) на 5—6 км не дало бы возможности регистрировать больше 2—3 импульсов в одном разряде, что противоречит фактам (см. главу III).

4. Наблюдающиеся интервалы между повторными импульсами порядка 1 000 μS и меньше приводят к значениям L, измеряемым в пределах 100—200 м, а это значит, что разряд соседних объемов начинается раньше, чем полностью разрядилась первая область.

5. В рассмотренных схемах, с одной стороны, совершенно не учитывается динамика процесса генерации зарядов в туче, а с другой стороны, в них не принимается во внимание особенность характеристики гигантской электрической искры, которая, например, может оборваться до того, как произойдет вытекание всех зарядов из разряжающегося объема тучи.

6. Следует, наконец, подчеркнуть, что схема не дает никакого представления о том, как может произойти разряд, содержащий разнополярные импульсы.

ЭБ "Научное наследие России"

Действительно, если предположить, что отдельные изолированные объемы тучи имеют разноименные заряды, то разность потенциалов между двумя такими объемами будет уменьшаться при развитии лидерного процесса и нельзя ждать образования разряда после начавшегося вытекания зарядов в лидер.

На основании имеющихся экспериментальных данных и анализа явления повторные разряды могут иметь, как нам кажется, следующее объяснение.

Начавшийся в точке A тучи (рис. 125) разряд вызывает вытекание зарядов из близлежащей области, с чем связаны понижение потенциала и приток зарядов. Суммарный приток (I_n) зарядов при этом значительно меньше среднего тока разряда в импульсе молнии, поэтому непосредственно в течение развития импульса восстановлением заряда на «емкости» области тучи относительно земли можно пренебречь.

Обрыв тока молнии должен произойти до вытекания всего заряда, участвующего в питании импульса объема, за счет того, что по мере развития импульса электродвижущая сила на конденсаторе падает, а относительная потеря напряжения в канале молнии увеличивается из-за роста сопротивления газового столба в силу его старения (это относится к части канала лидера в верхней его области). После обрыва тока импульса в газовом канале, оставленном в атмосфере прошедшим импульсом, может протекать небольшой величины ток, являющийся частью зарядного тока конденсатора C. Весьма значительное и со временем все увеличивающееся сопротивление газового канала представляет собой как бы небольшую утечку конденсатора, не препятствующую его заряду. Десятки ампер зарядного тока (как это можно предположить из анализа кривых восстановления потенциала тучи), в течение сотых и десятых долей секунды, чаще всего протекающих между смежными импульсами, дают заряд на «конденсаторе» порядка долей кулона и больше. Наши определения показали (рис. 106), что именно такие значения q встречаются наиболее часто. При достаточном повышении напряжения на емкости C происходит образование второго импульса.

Если зарождение разряда произошло в зоне раздела двух разноименно заряженных областей (область В на рис. 125), то подтекающие в процессе развития молнии заряды могут быть любого знака, что может обусловить появление разнополярных импульсов.

ЭБ "Научное наследие России"

V. ШАРОВАЯ МОЛНИЯ

1. ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Все сказанное выше о протекании разряда молнии относится лишь к наблюдаемым чаще линейным или полосовым молниям, которые воспринимаются нами как непрерывная, более или менее извилистая и разветвленная огненная лента; в действительности же они имеют прерывистый характер. Но кроме линейной молнии существует еще молния шаровая, представляющая значительный научный интерес.

Литература по шаровой молнии весьма обильна. Большинство ее систематизировано в монографии Бранда. На основании 215 описаний шаровых молний (с литературными ссылками), выбранных из 600 случаев, этот автор делает следующие обобщающие заключения:

1. Шаровая молния—сферический, реже грушевидный электрический разряд большой длительности. Шаровая молния появляется во время грозы, чаще зимней, и преимущественно в конце грозы.

2. Шаровая молния обычно появляется в виде красного светящегося шара диаметром 10—20 см (сфотографирована молния диаметром около 10 м)[1], окруженного контрастной синей областью с туманным контуром. Однако шар может быть и ослепительно белым и иметь весьма резкий контур.

3. Обычно при появлении шаровой молнии слышен свистящий, жужжащий или шипящий звук.

4. При исчезновении шаровая молния часто оставляет остро пахнущую дымку.

5. Длительность явления шаровой молнии изменяется от доли секунды до нескольких минут.

6. Шаровая молния может быть замечена при выходе ее из основания тучи; она может также образовать плавающее в воздухе или осевшее на каком-либо объекте тело. Иногда появлению шаровой молнии предшествует сильный грозовой разряд; в таких случаях шаровая молния появляется в месте удара или около него.

7. Шаровая молния исчезает либо тихо, со слабым треском, либо с оглушающим взрывом, причем из шара вырывается пучок искр.

8. Скорость шаровой молнии весьма значительна: вблизи земли или в закрытых помещениях—приблизительно 2 м/сек. Шаровая молния может оставаться в покое в течение некоторого времени, и «осевший» шар может сохраняться, кипя и выбрасывая искры, вплоть до своего исчезновения (аналогия с «огнями св. Эльма»). Иногда движение шаровой молнии обусловлено воздушным течением, но обычно ее движение не зависит от этого.

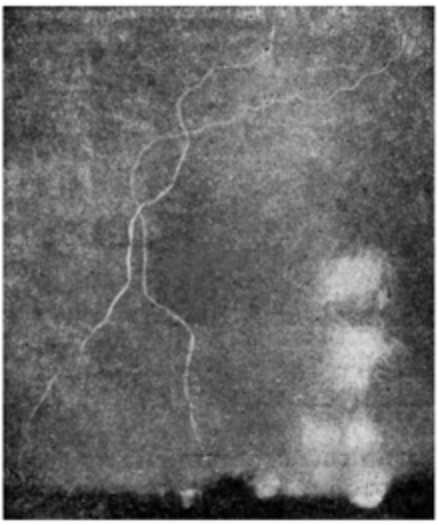
9. Иногда около места, пораженного молнией, появляется несколько шаровых молний: большой шар разбивается на несколько маленьких. Очень редко появляются два шара, один под другим, связанные цепочкой из маленьких шариков.

10. Плавающие и осевшие шаровые молнии ведут себя весьма различно, хотя они и могут переходить одна в другую.

---

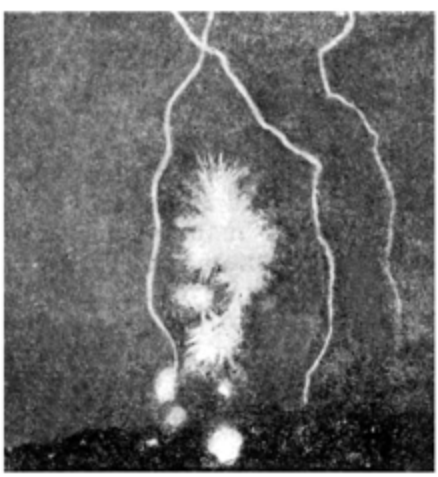
[1] Упоминаются шаровые молнии, диаметр которых, по расчету очевидца, доходил до 27 м.

ЭБ "Научное наследие России"



a

b



c

Рис. 126. Фотография шаровых молний

11. Плавающие молнии вблизи земли имеют красный цвет. По некоторым данным, они—хороший проводник. Шаровые молнии притягиваются к закрытым помещениям, в которые они проникают через открытые окна или двери, а иногда даже через небольшие щели; трубы с их проводящими газами представляют хороший путь для них. После кружения по комнате шаровая молния исчезает по какому-либо воздушному пути, часто по тому же, по которому она вошла. Иногда шаровая молния делает 2 или 3 вертикальных колебательных движения с амплитудой от нескольких сантиметров до нескольких метров. При сочетании этих колебаний с горизонтальными перемещениями молний кажется, что молния скачет. Иногда шаровая молния лишь опускается из тучи до высоты всего лишь нескольких метров над землей, а затем вновь поднимается.

12. Осевшие шаровые молнии имеют ослепительную яркость, цвет их белый или синий. Они либо оседают на хороших проводниках, предпочитая наиболее высокие точки, либо катятся вдоль таких проводников (например, по водосточным трубам). Шаровые молнии нагревают объекты, по которым катятся или на которых они осели. Двигаясь по телам людей (иногда под одеждами), они вызывают сильные ожоги и смерть. Случаи смертельного поражения шаровой молнией неоднократно отмечались в литературе.

13. Переход плавающей шаровой молнии в «осевшую» обычно происходит через стреловидное движение шаровой молнии по направлению к хорошему проводнику. При касании она может либо исчезнуть тихо, либо со взрывом, либо продолжать свое существование «осевшей» молнии. Шаровые молнии, падающие из туч, обычно взрываются, достигая земли.

14. Шаровые молнии причиняют иногда весьма сильные разрушения. Согласно литературным данным (не всегда правдоподобным), шаровая молния может производить удивительные эффекты. Так, например, описаны случаи переноса по воздуху тяжелых предметов, стен, камней и даже людей и животных без причинения им какого-либо ущерба, пробоя шаровыми молниями гранитных стен, дверей, окон и пробуравливание глубоких дыр в земле. Далее рассказывается, что шаровая молния производила колокольный звон, срывала металлические части с дверей, срывала крыши, осушала сосуды с вином, водой и маслом и проделывала самые забавные

ЭБ "Научное наследие России"

и невинные трюки, производя наряду с этим и сокрушительные налеты на различные объекты.

Частота появления шаровых молний (в Средней Европе), по данным Бранда, наибольшая в июне—августе; частота шаровых молний хорошо совпадает с частотой образования гроз. Шаровые молнии чаще образуются при зимних грозах.

Наибольшая частота появления шаровых молний падает на предутренние часы. Грозы первой половины дня беднее шаровыми молниями, чем грозы второй половины.

В ряде случаев видимость шаровой молнии может вызываться оптическим эффектом отражения от ярких поверхностей. При ударах молнии в дом часть разрядов может ответвляться внутрь помещений, вызывая искрение, что создает видимость перескакивающей шаровой молнии. Тот же эффект можно наблюдать в промежутке разорванного проводника. «Огни св. Эльма», имеющие вид шарообразных светящихся пучков, то гаснущих, то возникающих вновь, могут быть приняты за шаровую молнию. Естественно, что аналогия описанного явления с шаровой молнией усилится при передвижении тлеющего разряда (каковым являются «огни св. Эльма») ветром.

Так как на концах проводника, помещенного более или менее вертикально в воздухе, при сильных градиентах возникает свечение, которое может быть принято за шаровую молнию, очень возможно, что тонкая проволока, связанная с каким-либо легким предметом, поднятая сильным ветром, может создать благодаря появлению на ее концах тлеющих разрядов впечатление плавающей шаровой молнии.

Основанием к названным сомнениям является, наряду с весьма своеобразными явлениями, сопутствующими шаровой молнии, почти полное отсутствие объективно научных доказательств ее существования.

Все же в известной нам обширной литературе имеются, хотя их и очень мало, фотографии шаровых молний. Пожалуй, наиболее удачными являются снимки, описанные Иенсеном, которые не оставляют места сомнениям в реальном существовании шаровых молний. Перед грозовым разрядом в небе показалась бесформенная, медленно опускающаяся масса цвета лаванды. В течение трех минут были сделаны пять фотографий, на каждой из которых эти образования были зафиксированы в одной из стадий развития (рис. 126,*a* и 126,*b*). На рис. 126, *c* показана финальная стадия разряда. Некоторые шары пронеслись в высоковольтной линии, удаленной на 600 м от аппаратов. По фокусным расстояниям объективов и удаленности шаровых молний диаметр верхнего шара (рис. 126, *a*) определен в 8.5 м, а другого шара в 12.8 м. Высота разряда над горизонтом 28 м.

2. ГИПОТЕЗЫ О ШАРОВОЙ МОЛНИИ И ПОПЫТКИ ЕЕ ИСКУССТВЕННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Десятки гипотез пытаются объяснить загадочное поведение шаровой молнии. Основная трудность исследовательской работы заключается в том, что экспериментальное воспроизведение шаровой молнии исключительно сложно. Отсутствие экспериментальной базы вызывало и продолжает вызывать развитие спекулятивных методов изучения шаровых молний, доказательством чего служит огромное число теорий и гипотез, возникших для объяснения этого явления.

Бранд различает две группы гипотез. Согласно первой, шаровые молнии являются самостоятельными феноменами, не зависящими от существования сил, лежащих во-вне; шаровая молния рассматривается как система, находящаяся в более или менее стабильном равновесии, являясь как бы вместилищем потенциальной энергии. Согласно второй, источник энергии шаровой молнии лежит вне ее; шаровая молния рассматривается как система, существующая только в связи с причинами, ее вызывающими.

К первой группе гипотез относятся наиболее давние, однако и в более поздние времена они находили поддержку. Так, Мушенброк полагал, что шаровая

ЭБ "Научное наследие России"

молния состоит из воспламеняющейся материи, падающей из верхних слоев атмосферы под влиянием собственного веса. Благодаря нагреву при падении, содержимое шара взрывается, образуя явление шаровой молнии.

Пфейль представлял себе шаровую молнию состоящей из космической пыли, перемешанной со снежными кристаллами и окруженной горючими газами, которые образуются сжатием насыщенных электричеством туч.

Аналогичные представления развивают Араго и Хильдебрандсен: Араго видит в шаровой молнии уплотненное соединение азота с кислородом, сильно пропитанное молниевой материей. Хильдебрандсен принимает шаровую молнию за паровой шар, пропитанный каким-либо гремучим газом. Согласно Мойно, шаровая молния образуется тогда, когда обычный разряд, следовавший вначале по хорошему проводнику, внезапно удерживается благодаря резкому изгибу проводника; по Неесену, шаровая молния представляет собой вырванные, например, из проводника, нагретые до свечения и окруженные сильно нагретым воздухом пары.

Другие теории этой же группы рассматривают шаровую молнию как вихрь. Карльхейм-Гайленскольд считает, что шаровая молния—это сильно ионизированный вихрь воздуха, перемещающийся под действием двойной системы сил—гидродинамических и электростатических. В модернизированном виде вихревая теория шаровой молнии развивается Вольфом. Шаровая молния рисуется в виде вихревого электронного кольца. В конце канала молнии это вихревое кольцо отделяется и движется сначала в направлении канала, а затем под действием воздушных течений. Диаметр кольца, благодаря рассеиванию электронов, больше, чем кажется. Молекулы воздуха под действием электронных ударов ионизируются, возбуждаются и начинают светиться. При этом свечение наиболее сильно в направлении вылетающих электронов.

Взрыв шара объясняется внезапным проникновением окружающего воздуха в утонченные стенки, которые могут образоваться благодаря вылету вырванных электронов; тихое исчезновение шаровой молнии объясняется постепенным проникновением воздуха в разреженную внутренность. Предположение о том, что шаровая молния представляет собой тело в сфероидальном состоянии, имело много последователей. Первым высказал эту мысль Поей. Он рассматривал шаровую молнию как шар, заполненный более или менее легким газом и обтянутый исключительно тонкой и эластичной оболочкой, цвет которой был следствием интерференции дневного света, отраженного тонкими стенками. Несколько позднее Альт видоизменил мысль, лежащую в основе этой теории. Альт полагает, что благодаря сотрясениям, вызываемым электрическими разрядами, отдельные одноименно заряженные части грозовой тучи отталкиваются друг от друга и одновременно притягиваются противоположно заряженной землей. Уменьшение их объема вызывает высокий электрический потенциал, благодаря чему возникает свечение.

К первой же группе теорий может быть отнесена теория, которая рассматривает шаровую молнию как разряд сильно заряженной лейденской банки, имеющей в качестве внутренней обкладки воздух, более или менее разреженный и соответственно лучше проводящий, а в качестве внешней—окружающий влажный воздух; изолятором служит шарообразный сухой слой воздуха, сильно спрессованный благодаря взаимному притяжению противоположных электрических зарядов на его поверхностях. Фламмарион также рассматривает шаровую молнию как газообразную лейденскую банку.

Теории второй группы почти полностью базируются на лабораторных опытах, хотя эксперименты эти касаются лишь некоторых свойств шаровой молнии. Монсель пытался получить шаровую молнию путем соединения зажимов индукторной катушки плохим проводником. Он полагал, что предшествующие шаровой молнии линейные разряды нарушают непрерывность пути влажной атмосферы, что и вызывает появление шаровой молнии.

Опыты Урбаницки и Ледюк ограничиваются воспроизведением внешних признаков явления. Отто считает шаровую молнию опасным эндотермическим соединением неизвестных молекулярных конституций, являющихся с физической точки зрения тем же, чем мелинит с химической. Это соединение ну-

ЭБ "Научное наследие России"

ждается лишь в некотором прикосновении для того, чтобы произвести разряд, аналогичный сильной молнии. Отто установил два металлических листка на расстоянии 30 мм и зарядил их до 30 000 V. При определенном напряжении возникал маленький огненный шарик, который со своеобразным шипением двигался между пластинами. Успех этого опыта, однако, мало помогает объяснению огромных запасов энергии в шаровой молнии.

Исходя из мысли, что количество электричества в статическом поле слишком мало, чтобы вызвать явление, аналогичное шаровой молнии, Планте сделал опыт с током большой силы и высокого напряжения, применив аккумуляторную батарею из 2 000 элементов, полюсы которой присоединялись к двум смоченным листам картона. Образуется маленький огненный шар, движущийся взад и вперед между пластинами. На основании этого опыта Планте дает следующее объяснение: шаровая молния—это медленный и неполный разряд электричества облака, если этого электричества исключительно много и если само облако или сильно наэлектризованная влажная атмосфера, представляющие собой как бы электрод, находятся весьма близко к земле.

Однако принимать влажный воздух за электрод нет достаточных оснований. Далее, непонятно, почему такой разряд большого количества электричества при высоком напряжении должен происходить в форме шара, состоящего из раскаленного разреженного воздуха, смешанного с продуктами распада водяного пара и паров материала электродов.

Один из многочисленных последователей Планте в этой области, применяя обычную машину влияния, получал из мельчайших водяных капель или пылевых частиц светящиеся шарики, обладавшие большой подвижностью.

За опытами Планте последовал ряд экспериментов. Гезехус и Георгиевский проделали опыты в следующем виде. Медная пластинка, горизонтально помещенная на расстоянии 2—4 см от поверхности воды, присоединялась к одному полюсу трансформатора напряжением 10 000 V, другой полюс которого присоединялся к воде. С медной пластинки начинался разряд, окруженный светлой оболочкой, конусообразной, овальной или шарообразной формы, цвет которой в зависимости от напряжения менялся от красновато-желтого до синевато-белого. Полученное пламя, сопровождаемое шипящим звуком, обладало большой подвижностью, частично распадалось и снова воссоединялось. При покрытии его колпаком под последним собирались пары азотной кислоты. На основании этого Гезехус заключает, что в шаровой молнии происходит сгорание азота.

Не останавливаясь на рассмотрении ничем не обоснованных высказываний других исследователей, упомянем, что Вальтер считает шаровую молнию состоящей из водяного пара или разбрызганной воды. Электрическое состояние шаровой молнии он объясняет тем, что бо́льшая часть заряда течет от тучи к земле, а шаровая молния благодаря приобретению одноименного заряда отталкивается от тучи и плавает в воздухе, как мыльный пузырь. Разрушение шаровой молнии происходит либо частичным испарением воды с ее стенок, либо благодаря тому, что происходящий вблизи разряд молнии нейтрализует землю, и пузырь, падая, разряжается. Опыты с электрически заряженными мыльными пузырями, которые двигались к соседним заряженным металлическим пластинами и здесь с шумом лопались, по мнению Вальтера, подтверждают его теорию. Следует отметить, что пузыри свечением не обладают.

Весьма подробно экспериментально изучал, с помощью большой индукционной машины, вопрос о шаровой молнии Теплер. Он пытался объяснить явление известными свойствами длительных разрядов принимать различные формы, среди которых известен темный разряд, тлеющий, кистевой и дуговой—в зависимости от средней силы тока и длины промежутка. Каждой форме непрерывного разряда соответствует определенное соотношение между геометрическими размерами искры и ее током.

Теплер рассматривает молнию как длительный замедленный разряд, получающийся при нейтрализации электричества между хорошим проводником—землей и полупроводником—тучей. Форма разряда зависит при этом только от скорости, с которой освобождается электричество в двустороннем источнике молнии. В настоящее время многократность молний общеизвестна; известно

ЭБ "Научное наследие России"

и то, что между отдельными импульсами разряда имеет место длительное течение небольших токов. При этом, как предполагает Теплер, после разряд может принимать разнообразные формы. Иногда разряд состоит только из равномерного течения электричества, которое может восприниматься как слабое свечение разрядного канала. Это свечение обычно длится очень недолго, поэтому может быть обнаружено только на фотографии. Однако и простым глазом наблюдались послесвечения, длившеся до 1 сек., причем канал светился, как нить лампы накала после выключения тока. При интенсивных молниях такое послесвечение электричества, повидимому, вообще является правилом. При равномерном истечении электричества молния не является уже светящейся нитью, а образует вдоль разрядного пути световые полосы, которые могут восприниматься как четочные или шаровые молнии. Образование одной такой светящейся массы происходит при длительном, почти постоянном протекании в канале электричества между тучей и землей; в этом заключается явление шаровой молнии.

Теплер полагает, что световая масса является местом сужения разрядного канала и возможно, что на некоторых участках разрядного пути падение потенциала по некоторым причинам принимает особо большие значения. При достаточных плотностях тока воздух в этих местах начинает светиться. Посмотрим, объясняет ли описанная гипотеза известные из наблюдений явления.

Первое условие для образования шаровой молнии—появление возбуждающей ее линейной молнии. Это условие можно считать выполняющимся, даже если в отдельных случаях видимый электрический разряд и не предшествовал шаровой молнии. При этом увязка с теорией Теплера достигается предположением, что, как исключение, ионизированный путь был образован разрядом, не имевшим свечения, так что разряд начался невидимо, и только после некоторого времени при достаточном токе и напряжении возникают световые явления.

Второе условие касается возможности объяснения размеров шаровой молнии, диаметр которой колеблется от нескольких миллиметров до многих метров (при наиболее частых размерах 10—20 см). Аналогичные данные имеются и относительно канала молнии. Подразделение шаров, сопутствующее уменьшению их объемов, может быть объяснено тем, что канал молнии разветвляется в месте нахождения шаровой молнии. Обратно, аналогичным образом несколько маленьких шаров могут объединиться в один большой.

Слоистость разряда шаровой молнии, по Теплеру, не должна иметь сферической формы, что противоречит наблюдениям. Однако тот факт, что шаровая молния падает почти всегда в вертикальном направлении и поэтому представляется в виде круглого диска, может уменьшить противоречие между теорией и наблюдениями.

Цвет шаровой молнии можно объяснить различной силой тока в канале. Труднее объяснить продолжительность существования шаровой молнии, чаще всего равную 3—5 сек., что находится в соответствии с теорией, ибо каналы молний, как было установлено, могут существовать в течение многих секунд. Однако наблюдались шаровые молнии в течение нескольких минут. Мало вероятно, чтобы разрядный канал мог существовать столь долго, хотя Бранд описывает случай очень длительного существования канала, когда по одному и тому же пути прошло несколько линейных молний: одна четочная и две шаровых. Подробности остались неизвестными.

Трудность объяснения усугубляется явлением перемещения шаровых молний. Прежде всего возникает вопрос о перемещающих силах. Не всегда можно объяснить скачкообразные перемещения шаровых молний одним лишь изменением потенциала их. Горизонтальное перемещение шаровой молнии может быть следствием перемещения разрядного канала ветром; вертикальное же перемещение в разрядном канале может быть вызвано изменением силы тока разряда или объяснено так же, как перемещение светящихся масс в кистевой дуге при постоянном токе. Повторные подъемы некоторых шаровых молний без касания ими земли могут быть объяснены так: когда земля была катодом, сила тока в разрядном канале сначала увеличилась, а затем упала. Перескакивание шаро-

ЭБ "Научное наследие России"

вой молнии и проникновение ее в закрытые помещения могут быть вызваны теми же причинами, что и аналогичные явления тлеющего или кистевого разрядов.

Интересен опыт Теплера, поставленный по следующей схеме. Между двумя горизонтальными пластинами a и b создавался кистевой разряд, а затем ближе к нижней пластине вдвигался промежуточный электрод d, и струей воздуха кистевой разряд направлялся на этот электрод; при этом искра разделялась электродом по длине на две независимые части. Даже в том случае когда одна часть разряда, заключенная между электродами a и d, гасла (например, под влиянием дутья), другая часть разряда между электродами d и b в случае достаточной утечки между верхними электродами продолжала существовать. Если считать, что электрод a изображает тучу, электрод b—землю; а d—крышу дома, можно получить представление о возникновении шаровой молнии в реальных условиях. При этом отдельные металлические части, находящиеся в доме, могут играть роль электродов, на которые шаровая молния перескакивает.

Как видно, теория Теплера способна объяснить целый ряд явлений, сопровождающих шаровую молнию. Однако она не объясняет, например, движение шаровой молнии, вертикальное перемещение ее, большие скорости перемещения от тучи к земле, длинные горизонтальные пути, проходимые шаровой молнией, требующие длительного постоянства разрядного канала. Это позволяет думать, что если шаровая молния по каким-либо причинам оставляет канал молнии, она может существовать самостоятельно за счет запасенной в ней энергии. Трудно увязываются с теплеровской теорией качание шаровой молнии, тот факт, что шаровая молния может держаться некоторое время на воде, и странное поведение ее в отношении металлических предметов, с которыми она как бы «играет», приближаясь и удаляясь без каких-либо видимых причин.

Необходимо подчеркнуть, что изложенная гипотеза Теплера дает чисто качественное рассмотрение явления шаровой молнии и не содержит каких-либо данных для оценки энергетической стороны процесса.

Упомянем еще об одной весьма интересной гипотезе, предложенной французским астрономом и физиком Е. Матиасом. Матиас полагает, что шаровые и четочные молнии представляют собой высшие соединения азота с кислородом $N^p O^q$ и высшие формы озона O^m или азота N^n. Эти соединения еще неизвестны, и Матиас приписывает им свойства гремучести (matière fulminante).

Согласно Матиасу, при прохождении некоторого количества электричества Q при разности $U—U_1$ может иметь место изменение структуры элементов воздуха, сопряженное с аккумулированием энергии разряда $Q(U—U_1)$. Происходящая при этом химическая реакция носит эндотермический характер, образующиеся в результате ее упомянутые соединения способны взрываться при охлаждении. Если количество образовавшейся гремучей материи мало, охлаждение происходит мгновенно, и гремучая материя исчезает, не оставляя следа. Если же количество гремучей материи значительно, охлаждение происходит медленно и гремучая материя, оставаясь в воздухе, образует узлы в виде мелких сферических телец, расположенных вдоль пути разряда молнии (образование четочной молнии). Если, наконец, количество гремучей материи велико, охлаждение ее происходит весьма медленно. При этом силы поверхностного натяжения могут стянуть гремучую материю в объеме с минимальной внешней поверхностью, образуя сферическое тело (шаровая молния). Шаровая молния представляет, согласно этой теории, остаток линейной молнии. При взрыве объема гремучей материи возникают звуки, воспринимаемые как гром.

Матиас различает два вида грома, следующие друг за другом: центростремительный гром (описанный Араго) и центробежный гром (описанный Шопенгауэром). Образование первого связывается с проникновением внешнего воздуха в разреженный канал молнии, причем разреженность объясняется сокращением гремучей материи. Второй вид грома происходит при взрыве гремучей смеси. При линейных молниях оба грома разделены малым промежутком времени и воспринимаются ухом как один общий звук. (Упомянем здесь, что, согласно теории линейной молнии, развитой Оллендорфом, имеет место образование грома, аналогичное явлению центробежного грома.) Центростремитель-

ЭБ "Научное наследие России"

ный гром значительно слабее, чем центробежный. При шаровых молниях оба грома могут быть разделены промежутком времени во много секунд.

В качестве еще одной попытки теоретического объяснения механизма шаровой молнии, базирующейся на математическом аппарате квантовой теории металлического состояния, следует упомянуть работу Неугебауера. По мнению этого автора, облако состоит из свободных электронов, положительных зарядов и нейтральных молекул. Шаровая молния при этом рассматривается как вторичное явление, а линейная молния—как первичное. Принимая, что в линейной молнии токи бывают порядка 125 000—250 000 А, при поперечнике главного канала в несколько сантиметров и при скоростях электронов 10 см/сек., автор находит, что плотность электронов на конце канала не менее 10 $см^3$. Эта плотность считается достаточной для образования шаровой молнии, рассматриваемой как капля, капающая с конца канала молнии. Тихое исчезновение шаровых молний или их взрыв объясняется игрой обменных сил, кинетических сил и рекомбинаций. Анализ описанных явлений делается на основании квантово-механических представлений и статистической физики.

Сложные математические расчеты Неугебауера, не имеющие экспериментальных проверок, не могут служить надежным объяснением явления шаровой молнии. Допущенные же им ошибки в физических предпосылках, согласно которым шаровая молния как бы «капает» с конца главного канала (судя по тем значениям токов, которые приняты при расчетах), в значительной мере обесценивают математический анализ явления, сам по себе весьма интересный.

Таким образом, рассмотрение изложенного материала показывает, что в области изучения шаровой молнии достигнуты весьма малые успехи. Загадка шаровой молнии лишь сформулирована, но не раскрыта. Решение ее потребует углубленной работы над вопросами разряда и по всей вероятности позволит вскрыть важнейшие закономерности механизма разряда молнии.

Недостаточность же знаний в этой области затрудняет разработку мероприятий по защите от шаровой молнии, что должно послужить стимулом к скорейшему овладению теорией и этого вида молнии.

ЭБ "Научное наследие России"

VI. ПУТЬ МОЛНИИ В АТМОСФЕРЕ

Наблюдатель, устремляющий свой взор в небо и следящий за развитием грозового разряда, видит, что не водопаду, бурно низвергающемуся с высот и несущему свои воды прямо вниз, по кратчайшему пути, а ручейку, кропотливым трудом пролагающему себе дорогу между бугорков и камней, подобен путь молнии.

Сила тяжести управляет обрушивающимися потоками водопада, и ничто в пути не мешает частицам воды осуществлять свой прямой бег. Сила электрического поля направляет головку молнии, но какие-то причины мешают движению ее по кратчайшему пути.

Что это за силы, которые меняют путь молнии, заставляя ее выписывать причудливые зигзаги, и не позволяют заключить о том, где завершается разряд? Фотографии молнии, помещенные на рис. 52, показывают, что наряду со сравнительно небольшими зигзагами, величина которых составляет малую часть пути между тучей и землей, существуют резкие отклонения молнии от своего начального направления, из-за которых путь молнии удлиняется в несколько раз. Таким образом, если причину зигзагов можно было бы искать в воздухе, через который прокладывает себе путь разряд, факторы, отклоняющие молнию от ее пути, должны лежать в самих «электродах», т. е. тучах и земле.

В тесной связи с этим находится вопрос о предпочтительности некоторых путей молнии в атмосфере или избирательной поражаемости ею земной поверхности.

Как видно, помимо исключительно важного научного значения, которое имеет затронутая тема в проблеме изучения природы разряда, она весьма важна и с практической стороны.

Широкое и систематическое исследование обрисованной здесь проблемы позволяет сделать некоторые выводы.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПУТЬ РАЗРЯДА В АТМОСФЕРЕ

С точки зрения методологической целесообразно рассмотреть вопросы о влиянии различных факторов на путь разряда в следующем порядке:

1) путь искры в воздухе,
2) путь искры по приближении ее к электроду (земле).

а. Факторы, влияющие на путь разряда в воздухе

Природа развития разряда, как известно, во многом зависит от среды. Однако развивающийся разряд в воздухе происходит в условиях наличия электрического поля, и решающая сторона процесса разряда заключается в динамике этого поля. Как только разряд начался, электростатическое поле уже не может полностью отобразить картину распределения градиентов, так как искровый разряд характеризуется меняющимся по мере развития разряда электрическим полем, которое мы называем электродинамическим, в отличие от существовавшего до этого момента статического поля.

ЭБ "Научное наследие России"

Это поле деформируется в зависимости от того, имеются ли в пространстве развития разряда какие-либо неоднородные включения и насколько сам разряд меняет это поле, создавая область объемных зарядов, электронных лавин и пр.

Чтобы резче выявить зависимость траектории развития разряда от наличия всякого рода неоднородных включений, можно воспользоваться опытами на плоскости (в двухмерном пространстве).

В одной из работ, проведенных в ВЭИ (Стекольников и Беляков), для этой цели была применена следующая методика. На гладкой, плотной бумаге, туго натянутой на рамку или на твердый диэлектрик (например, на лист стекла) и служившей двухмерным пространством развития разряда, наносились при помощи графитового карандаша линии, отрезки линий и точки. К поверхности бумаги прикладывались электроды. При разряде путь искры совпадал с линией, проведенной карандашом, даже при относительно крутых изгибах последней или при наличии в ней определенных разрывов. Только при очень крутых изменениях траектории линии или очень больших разрывах путь искры уклонялся от следа, намеченного карандашом. Через микроскоп можно отчетливо видеть, что такая линия составлена из мелких дискретных точечных скоплений графита.

Так было установлено, что дискретно расположенные проводящие частицы привлекают к себе разряд, выпрямляют его путь или придают ему желаемую зигзагообразную форму.

Путь разряда выпрямляется даже при следовании его по ряду начерченных графитом кружков, не объединенных друг с другом.

Проводя наблюдения над переходом выпрямленной искры в обычную зигзагообразную, можно отметить, что направляющее действие графитовых кружков сильнее сказывается у кружков с меньшим диаметром.

По получении четкой картины влияния проводящих включений на путь развития разряда, на плоскости были сделаны опыты в трехмерном пространстве. Направляющими частицами служили расположенные в межэлектродном пространстве изолированные друг от друга шарики из глины, обладающие различными удельными сопротивлениями: $\rho = 1.1 \cdot 10^6$ Ω см и $\rho = 2.8 \cdot 10^6$ Ω см. Как оказалось, и в трехмерном пространстве дискретно расположенные проводящие шарики, изолированные друг от друга, оказывают направляющее действие на развивающийся разряд.

Под действием находящихся в зоне развития разряда проводящих включений поле деформируется, и около включения появляются повышенные значения градиентов, в силу чего избирательность пути разряда в воздухе предопределяется степенью усиления и ослабления электродинамического поля в различных участках пространства, а последнее можно условно характеризовать большей или меньшей проводимостью включений.

В качестве включений могут рассматриваться объемные заряды, объемы ионизации, проводящие частицы и пр. (Стекольников и Беляков). Так, например, в проведенных опытах можно было отчетливо видеть, что развивающийся в междуэлектродном пространстве разряд, в котором укреплены два изолированных шарика, имеет стремление пройти ближе к более проводящему шарику ($\rho = 1.2 \cdot 10^4$ Ω см), не отклоняясь в сторону менее проводящего шарика ($\rho = 6 \cdot 10^5$ Ωсм). Особенно яркая картина этого явления наблюдается в случае, если один шарик металлический, а другой—глиняный ($\rho = 2.8 \cdot 10^{-6}$ Ω см $\rho = 2.8 \cdot 10^6$ Ω см).

При развитии разряда происходят процессы ионизации пространства, образование объемных зарядов, в пограничных областях которых должно деформироваться поле градиентов, вызывая в одних пунктах ослабление, а в других усиление поля. Когда разряд приближается к некоторому проводящему включению, то пространство разряда в соседстве с этим включением становится более проводящим под влиянием прорастания стримеров и образования короны. В этих условиях усиление поля больше вокруг того включения, которое обладает лучшей проводимостью.

Исследования, поставленные с целью выяснения факторов, влияющих на путь прорастания разряда в воздухе, установили, что и на плоскости и в трехмерном пространстве возможно, посредством дискретно расположенных прово-

ЭБ "Научное наследие России"

лящих включений, деформировать электрическое поле, влиять на перераспределение градиентов, создавая на одних участках усиление электродинамического поля, а на других ослабление. Таким образом можно заранее определять путь разряда.

Развивающийся разряд следует по пути скопления более проводящих частиц туда, где имеется усиление электродинамического поля, т. е. где требуется меньшее напряжение для пробоя. С этой точки зрения и можно объяснить зигзагообразный вид молнии и отклонения разряда к областям с повышенной ионизацией воздуха (при отсутствии других влияющих на пути разряда факторов). Этот же взгляд высказывался в общей форме, без попытки объяснения механизма явления, в более поздних (чем наши) работах американских исследователей.

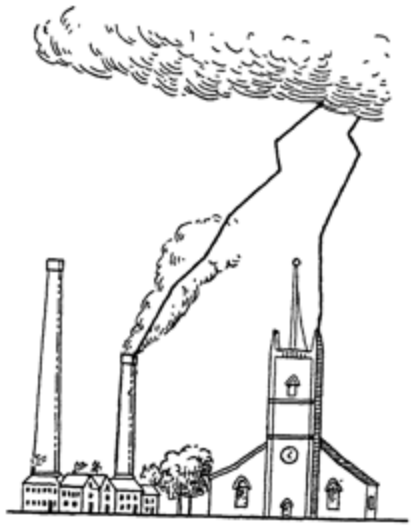


Рис. 127. Удар молнии в дымящуюся фабричную трубу и выступ башни

Каким образом большое скопление в воздухе частиц с значительной проводимостью может влиять на путь разряда молнии даже вблизи земли, показывает случай, описанный в книге Лоджа. На рис. 127 показан удар молнии в дымящуюся трубу, более низкую и притом находящуюся в обычно принятой теперь зоне защиты хорошо заземленного одиночного молниеотвода, имеющегося на высокой трубе. Объяснить этот случай, не учитывая проводимости дыма, выходящего из низкой трубы, невозможно. Еще раз обратим внимание на то, что дым, представляющий собой проводящий слой, в процессе разряда может играть роль динамического уровня, дающего отклонение траектории молнии от ожидаемого (при неучете этого действия) пути.

Параллельно с работами по изучению влияния неоднородности земли в лаборатории ВЭИ велись исследования влияния ионизирующих факторов.

Поставленные автором в 1935 г. эксперименты производились по схеме, изображенной на рис. 128. Над металлической плоскостью C помещены два соединенных между собой металлических электрода A и B. В плоскости C имеется небольшое круглое отверстие, под которым помещается сильная кварцевая горелка. Импульсы положительной и отрицательной полярности прикладывались между иглами и плоскостью. Сначала давались импульсы при выключенной кварцевой горелке, а затем, без каких-либо изменений в схеме, включалась кварцевая горелка, и снова наблюдалось распределение разрядов в промежутках A и B. Как оказалось, даже сильная ионизация воздуха в промежутке A не создает условий для более частого его перекрытия.

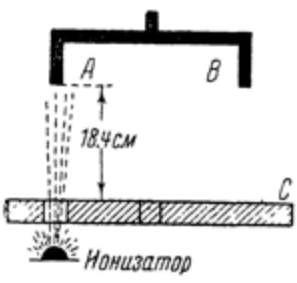


Рис. 128. Схема опыта, поставленного для выяснения влияния ионизации на изменение прочности искрового промежутка

В другой серии опытов металлическая плоскость была заменена листом сырого картона, на который был положен заземленный металлический прут.

В этом случае разряд с иглы происходил сначала на плоскость, по которой в виде скользящего разряда распространялся до заземленного прута. Распределение числа разрядов между иглами A и B и в этом случае не обнаруживало явной зависимости от того, освещен ли промежуток A или нет.

В последующих сериях опытов кварцевая горелка была заменена рентгеновской трубкой, дававшей направленный пучок X-лучей. И эти эксперименты не выявили существенного увеличения разрядов в облученном рентгеновскими лучами промежутке.

ЭБ "Научное наследие России"

Во многих других, проделанных автором и его сотрудниками позднейших экспериментах по ионизации воздушных искровых промежутков разной величины (от 200 до 4 000 мм) опыт выполнялся таким образом, что в промежутке создавалось примерно одинаковое количество носителей обоих знаков. Источником ионизации с направленным излучением служили малой и большой мощности рентгеновские трубки, ультрафиолетовые лучи и, наконец, жесткие γ-лучи от препарата эманации радия (до 93 m Cu).

Исследования не обнаружили сильного действия ионизированного столба от направленного излучения на избирательность пути и зигзагообразность искрового разряда. Некоторая избирательность была отмечена лишь в случае подачи минимального разрядного напряжения. Когда прилагалось напряжение, вызывающее разряд при каждом включении импульсного генератора, существенной разницы в избирательности разряда какого-либо промежутка не наблюдалось.

Подобные опыты были поставлены, и с тем же отрицательным результатом, с пробоем импульсным разрядом больших промежутков (до 4 000 мм), но при этом не обнаружено заметной избирательности искровым разрядом промежутка, облучаемого рентгеновскими лучами или γ-излучением от эманации радия (в количестве до 91 m Cu).

В оценке избирательных свойств разряда был сделан подход и с другой стороны: выяснялось влияние объемного заряда (в воздухе) одного знака на пробивную прочность промежутка. Замечено, что если в промежуток ввести объемные заряды знака, одинакового со знаком источника напряжения, то получается некоторое, незначительное, увеличение пробивной прочности промежутка. Если же знак введенных объемных зарядов обратен знаку источника напряжения, при минимальном разрядном напряжении, получается некоторое незначительное ослабление электрической прочности промежутка (количество ионов 10^5 в 1 $см^3$; промежуток: игла—плоскость; S = 200—300 мм).

Опыты по ионизации воздуха в больших искровых промежутках показывают, что некоторую экстраполяцию на реальные условия можно сделать в следующем виде. Если грозовой разряд развивается в воздухе над примерно однородной по условиям проводимости почвой, то наверное он изберет путь в воздухе в сторону скопления зарядов, обратных по знаку источнику напряжения, а также в область, содержащую ионизированные частицы обоих знаков.

Электродинамическое поле разряда и, следовательно, его направляющие свойства зависят при всех прочих условиях от характеристики источника напряжения. Определяющие показатели—род напряжения, полярность источника, величина напряжения и превышение напряжения над пробивным значением, изменяемость напряжения по времени и мощность источника.

Увеличение перенапряжения вызывает укорочение пути импульсного разряда и выпрямление его траектории. Возрастание влажности воздуха вызывает упрочнение промежутка и изменение траектории разряда. Развивающийся разряд уклоняется от объема воздуха с большим содержанием влажности.

Несколько отличное действие на искровой разряд оказывает дождь. В некоторых условиях дождь может создавать упрочнение воздуха, но в заметно меньшей мере, чем влажность (пар). Однако в случае неоднородного распределения дождя последний может даже способствовать развитию разряда. Объекты, обладающие большей емкостью, при прочих равных условиях отличаются и большей избирательной поражаемостью.

Развитие импульсных разрядов исследовалось в разреженном воздухе (разряды между иглами, укрепленными в стеклянной колбе при S = 114 мм). При понижении давления, наряду с уменьшением напряжения пробоя, может удлиняться траектория разряда. Когда разряды производились при давлении 10—300 мм Hg, то даже при минимальном разрядном напряжении путь разряда выпрямлялся, т. е. делался короче, изменялась форма зигзагов, число их резко сокращалось, а в ряде случаев наблюдались разряды, не имеющие вовсе зигзагов.

Исследованиями, проведенными в ВЭИ, установлено сильное влияние на путь разряда температуры, вызывающей изменение плотности воздуха. Невидимый глазом столб горячего газа избирательно поражается разрядом. При удале-

ЭБ "Научное наследие России"

нии из него ионов он все же продолжает избирательно поражаться в той же степени, как и при наличии в нем большого количества ионов.

Интересно отметить, что действие столба горячего воздуха напоминает эффект стержневого молниеотвода (рис. 129).

При направлении струи горячего воздуха по линии сгущения поля явление избирательной поражаемости струи усиливается.

В лаборатории легко получить зигзаги и форму пути разряда желаемой формы путем создания соответствующих неоднородных температурных условий. Эти опыты могут иллюстрировать в принципе правильную идею получения нагретых с помощью костров столбов воздуха, которые создавались древними для ограждения себя от молнии. Практическая ценность этого мероприятия, конечно, не может быть значительной ввиду несоответствия количественных характеристик опытов на модели реальным размерам явления. Однако при отыскании источников, могущих создавать нагретые столбы воздуха достаточной высоты и стабильности, можно будет сделать крупный шаг в деле создания невидимых молниеотводов.

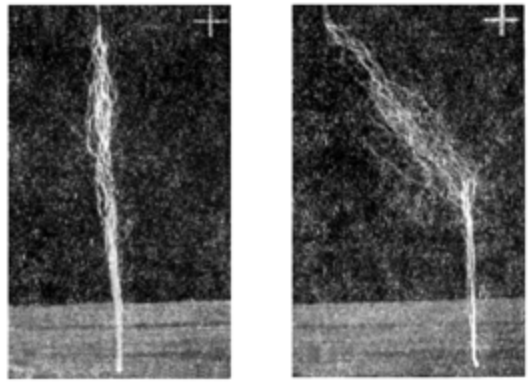


Рис. 129. Поражаемость струи горячего газа искровым разрядом

b. Факторы, влияющие на путь разряда вблизи электрода

Исследования закономерности искрового разряда в воздухе, позволившие выявить существенное влияние на деформирующееся в процессе разряда электродинамическое поле всякого рода проводящих неоднородных включений, дают также повод заключить, что подобные неоднородности, наряду с другими факторами, должны оказывать определенное влияние на избирательность пути разряда вблизи поверхности земли (электрода). Роль их может быть в каждом случае разная, в зависимости от силы действия факторов, обусловливающих электродинамическое поле вблизи поверхности земли (электрода) и зависящих от строения и проводимости самой земли (электрода). Хорошо известны анализированные Э. Марксом явления пробоя в промежутках между металлическими электродами стержень—плоскость и стержень—стержень, когда особенно отчетливо выявляется роль объемных зарядов и перераспределяющихся градиентов при развитии разряда. Так, если источник положительной полярности, то более благоприятные условия для развития разряда создаются в направлении стержень—плоскость, нежели стержень—стержень. При источнике отрицательной полярности создающееся электродинамическое поле способствует поражению выступающих объектов.

Исходя из представления об электродинамическом поле развивающегося разряда и его зависимости от всякого рода проводящих включений, легко видеть, что поле вдали от земли (или электрода) определяется соотношениями проводимости (объемные заряды и пр.), которые в одной части поля создают повышенные градиенты, усиливающие поле и способствующие развитию разряда, а в другой части—градиенты, ослабляющие поле, препятствующие развитию разряда.

Когда разряд приближается к поверхности земли (электроду), к этим факторам добавляется влияние соотношения проводимостей слоев земли (электрода), нередко играющих решающую роль в избирательной поражаемости земной поверхности.

Нетрудно было экспериментально показать значение влияния электродинамических уровней земли, приводящих к изменению пути разряда.

Отметим еще, что если расположить в воздушном промежутке в направлении от стержневого электрода к металлическому листу серию проводящих шариков (из глины), то, как уже упоминалось, разряд следует по пути, намеченному этими шариками. Как только у поверхностей земли было создано неоднородное

ЭБ "Научное наследие России"

электродинамическое поле, заменой металлического листа землей с резко выраженными электродинамическими уровнями (под влиянием заметно проводящего включения в ней), разряд уже не следовал по прежнему пути, намеченному серией шариков, а отклонялся в определенную сторону в зависимости от характера распределения неоднородностей.

На основе представлений о причинах избирательной поражаемости была создана такая модель, в которой можно было проверить влияние неоднородностей (в смысле проводимости в земле). Основное отличие такой модели от обычно используемых—применение в ней в качестве одного из электродов толстого слоя земли. Общая схема всей установки, использованной при экспериментах автора и его сотрудников в ВЭИ, показана на рис. 130. Опыты делались с песком (средней влажности) и глиной (также средней влажности). Методика опытов заключалась в том, что в землю на разную глубину закапывались электроды из различных материалов и производилась регистрация распределения разрядов по поверхности земли.

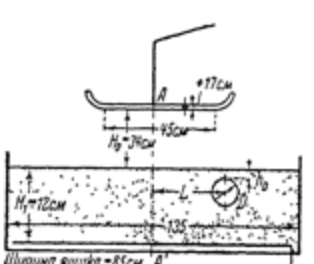


Рис. 130. Схема установки для опытов по избирательной поражаемости

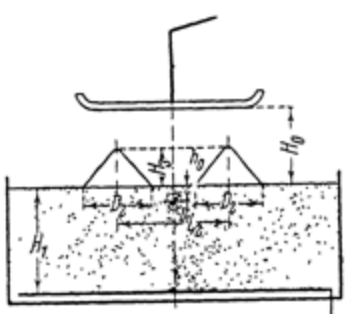


Рис. 131. Схема опытов для выяснения избирательной поражаемости неоднородной и неровной почвы

Полученные результаты сравнивались с распределением разрядов в отсутствие в земле каких-либо неоднородностей, и на основании этого сопоставления делалось заключение о влиянии зарытого тела на путь разряда.

Было проделано несколько серий опытов, на кратком изложении которых мы здесь остановимся.

Первая серия. В землю (глина) закладывался металлический шарик диаметром 2R так, что его центр отстоял от средней линии AA' на расстояние L, а от поверхности земли на расстояние h_0+R. После зарытия шарика в землю поверхность земли тщательно разравнивалась щеткой, и на верхний электрод давался импульс напряжения отрицательной полярности. Наблюдатель, находящийся в непосредственной близости к ванне, регистрировал в таблице попадание и непопадание в зону, расположенную над центром шарика и имеющую диаметр 1—3 см.

Опыты проделывались с шариками диаметром в 10, 15, 20, 25, 30 и 50 мм, зарытыми на глубину h_0, равную от 2 до 30 мм (L во всех опытах этой серии было равно 100 мм).

Рис. 132. Иллюстрация избирательной поражаемости рельефа при неоднородной проводимости почвы

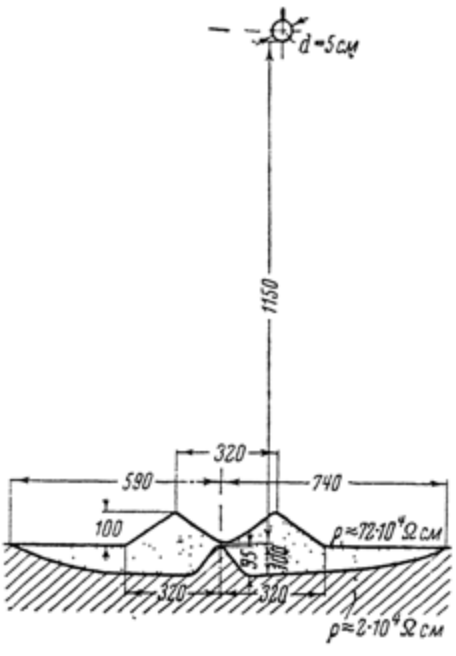
Полученные результаты показали, что наличие в земле шарика влияет на распределение разрядов на поверхности земли: при шарике с диаметром $D=50$ мм, зарытом на глубине $h_0=2$ мм, получался 100% эффект избираемости. Влияние на распределение разрядов уменьшается с увеличением глубины закапывания шариков в землю и с уменьшением их диаметров.

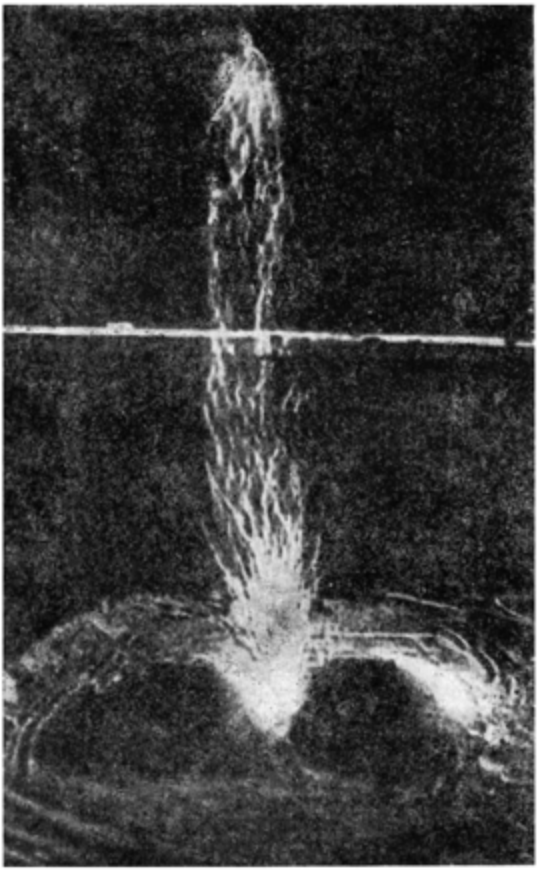
Вторая серия опытов была проделана при заполнении ящика песком. Толщина слоя N_1 при этом равнялась 21 см. Закапываемым в землю электродом

ЭБ "Научное наследие России"

служил медный полый шар, $D=15$ см. Как и в первой серии опытов, шарик закапывался на различную глубину. Применялись импульсы обеих полярностей. Результаты опыта позволяют заключить, что избирательность существует и при положительной и при отрицательной полярности импульса.

Третья серия опытов была посвящена вопросу избирательной поражаемости поверхности земли при наличии на ней неровностей, а в ней—хорошо проводящих предметов. Схема модели для экспериментов этой серии изображена на рис. 131. На поверхности земли в ящике насыпались два холма высотой H_3 и диаметром у основания D_2 с расстоянием между их центрами L_2. На высоте H_0 помещался стержневой электрод с загнутыми краями, и к нему подводились импульсы. При некоторой





a *b*

Рис. 133. Иллюстрация избирательной поражаемости рельефа при неоднородной проводимости почвы:
a—разрез почвы, *b*—фотография модели

высоте H_3 все разряды распределялись между холмами, и ни один из них не попадал в землю между основаниями холмов. По определении величины H_3 в землю закапывался металлический шарик ($D_1=8$ см, $h_0=0.3$ см), и снова давались разряды. Теперь большинство ударов приходилось уже не в холмы, а между ними, в зону непосредственно над шаром.

Приведем результаты одного опыта, в котором $H_1=21$ см, $H_0=30$ см, $D_2=12$ см и $L_2=41$ см; импульс отрицателен. При высоте холмов, сделанных из глины, $H_3=8$ см, все разряды попадают в холмы. При закапывании металлического шарика диаметром $D_1=8$ см, при $H_0=3$ см, большая часть разрядов попадает на шарик. Около 50% разрядов продолжают попадать в шарик даже при $H_3=11$ см.

Опыты этого вида производились в различных вариантах, при которых менялась форма холмов, расстояния L_2, D_2, H_3, диаметр шарика и производилась замена шарика D_1 оцелитовым стержнем.

На рис. 132 показан один из вариантов опыта. Удельное сопротивление грунта возвышенности (гор) здесь было больше, чем удельное сопротивление слоя земли под поверхностью в долине. Другой вариант изображен на рис. 133

ЭБ "Научное наследие России"

и, наконец, еще один наглядный пример поражения хорошо проводящего шарика, помещенного в ущелье, показан на рис. 134.

Исследования, проведенные с двумя слоями (толщина каждого слоя одинакова), заметно разнящимися по величине удельного сопротивления, подтвердили, что разряд направляется в сторону слоя меньшего удельного сопротивления. Опыты на моделях с применением источников постоянного переменного и импульсного высокого напряжения (расстояния от электрода до поверхности земли менялись от 215 до 1 610 мм) подтвердили влияние электродинамических уровней на избирательную поражаемость искрой поверхности земли. Все опыты без исключения привели к одному и тому же принципиально существенному выводу: распределение разрядов по земле не определяется только видом ее поверхности, но зависит также от наличия в ней тела с проводимостью большей, чем у окружающего грунта.

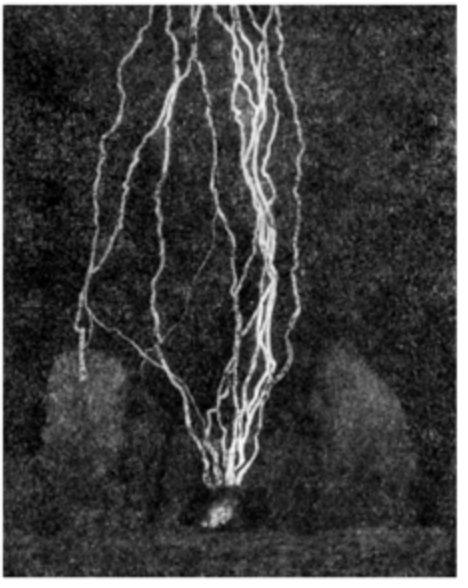


Рис. 134. Поражение ущелья (модель)

В настоящее время опыты с земляным ящиком проделаны во многих странах. Так, Матанс в Германии на моделях, аналогичных нашим, проделал большое количество опытов и пришел к выводам, подтверждающим нашу теорию.

Мюренде в Англии, проделав те же опыты, также пришел к выводу, что избирательная поражаемость определяется хорошо проводящими включениями в почве. Об аналогичных опытах упоминает в своем выступлении на конференции 1937 г. Алибоне, пришедший к заключению, что направляющее влияние на избирательную поражаемость земли разрядами оказывает сопротивление земли, а не ионизация атмосферы, и что результаты проведенных им опытов находятся в противоречии с теорией Дозера.

По нашей же схеме в земляном ящике экспериментировал Фритч и получил полное подтверждение теории электродинамических уровней. Вопреки утверждению Лемана, согласно которому избирательность обусловливается подземными водяными жилами и ручьями, Фритч устанавливает, что избирательность определяется различными проводимостями подпочвенных слоев. Эта точка зрения является полным повторением наших взглядов.

Полученные результаты имеют большое практическое значение. Они объясняют, например, явление поражения хорошо проводящих объектов, находящихся в ущельях и низинах с заболоченными почвами.

В естественных условиях нередко наблюдается неоднородное строение грунта с различными слоями, резко разнящимися по величине проводимости, или с местными, хорошо проводящими естественными или искусственными (металлические конструкции и пр.) включениями в относительно однородном грунте.

Резюмируя проделанные исследования, можно заключить, что электродинамическое поле разряда определяется вдали от земли соотношениями проводимостей (влага, объемные заряды и т. п.) в воздухе, а в случае приближения разряда к земле к этим факторам добавляется влияние соотношения проводимостей слоев земли и находящихся на поверхности земли и в земле объектов, обычно оказывающих решающее влияние на избирательную поражаемость земной поверхности.

Величина этой зоны влияния определяется высотой на которую названные факторы могут оказывать влияние, деформируя электродинамическое поле.

ЭБ "Научное наследие России"

2. ТЕОРИЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ ПОРАЖАЕМОСТИ

При анализе причин повышенной поражаемости грозовыми разрядами ограниченных участков земной поверхности могут быть обнаружены факты, которые влияют на путь молнии, заставляя ее предпочтительно устремляться к определенной точке. Это стремление может быть охарактеризовано, как уже упоминалось, термином «избирательная поражаемость».

Различные гипотезы, выдвинутые для объяснения избирательной поражаемости, можно разделить на две группы. К первой относятся теории и гипотезы, в основе которых лежит предположение, что путь молнии определяется проводимостью воздуха, ко второй—теории и гипотезы, объединяемые идеей о том, что путь молнии предопределяется свойствами почвы.

При анализе причин повышенной поражаемости грозовыми разрядами некоторых сравнительно узко ограниченных районов ряд ученых приписал это явление усиленной ионизации, а следовательно, и повышенной проводимости воздуха над поражаемым местом.

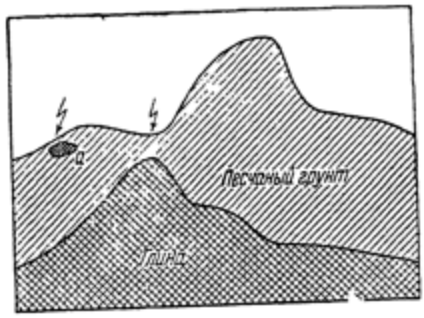


Рис. 135. Иллюстрация избирательной поражаемости почвы в зависимости от ее геологического строения

Исследования автора привели его к убеждению о неправильности представлений, согласно которым избирательная поражаемость земли адекватно определяется состоянием ионизации воздуха вблизи поверхности почвы.

Соображения о том, что путь молнии вблизи земли зависит главным образом от расположения проводящих объектов на поверхности земли и от строения почвы, насколько нам известно, в четкой форме впервые выражены в работе Араго.

В дальнейшем, наряду с некоторыми высказываниями и даже экспериментами, направленными в сторону развития теории о влиянии на избирательную поражаемость неоднородностей в почве, существовало и существует много объяснений, не только не имеющих ничего общего с развитыми Араго положениями, но даже часто просто опровергающих эти положения.

Рассмотрение вопроса о влиянии проводимости земли привело автора к следующей схеме явлений.

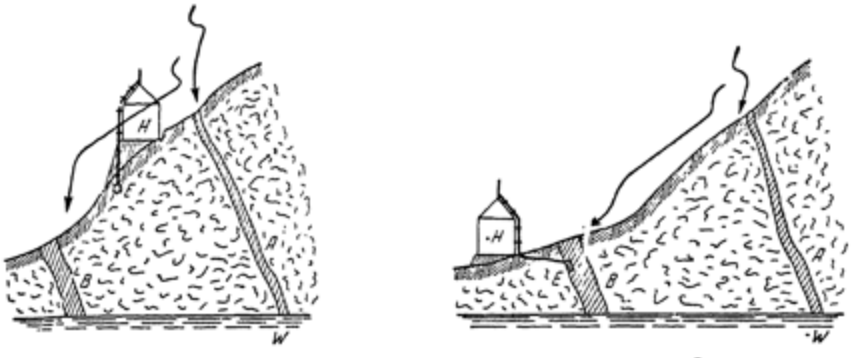
На рис. 135 показан геологический разрез земной поверхности. Пусть над холмом находится та часть грозовой тучи, из которой начинается образование разряда. Подготовляющие этот разряд токи смещения, замыкающиеся токами проводимости в земле, избирают пути наименьшего сопротивления. Так как проводимость у глины выше, чем у песка, то развитие разряда определяется не верхним рельефом места, а контуром верхнего слоя глины. Таким образом следует различать два рельефа местности: один «статический», который до некоторой степени может влиять на начало образования разряда, и другой «динамический», который влияет на путь развивающейся молнии. Какой из этих рельефов будет преобладать, зависит как от их формы, так и от геологической структуры, определяющей проводимость. Не следует поэтому удивляться, что молния в случае, изображенном на рис. 135, ударяет в овраг, расположенный у подножья холма.

Если бы, исходя из той же точки зрения, мы представили себе в месте *a* ручей или подземную водяную жилу, то роль хорошо проводящего слоя глины частично маскировалась бы водой, и при некоторых соотношениях проводимости слоев земли и воды фактором, определяющим место удара молнии, могла бы оказаться вода. Последний вывод хорошо подтверждается наблюдениями. В свете изложенных здесь представлений находит свое объяснение, например, то, что молния часто ударяет, как это было установлено, в месте контакта двух различных геологических пород, так как именно в этом месте сопротивление почвы понижено благодаря наличию здесь грунтовых вод. Кроме того, из двух сходящихся в этом

ЭБ "Научное наследие России"

месте пород одна обладает меньшим сопротивлением, что опять-таки говорит в пользу нашей гипотезы. Удары молнии в гранитные грунты могут быть объяснимы тем, что именно в этого рода почве содержится большое количество расселин, в которых находятся водяные жилы. Вода и гранит создают резкую неоднородность в отношении электрической проводимости в определенных местах, что обусловливает избирательную поражаемость в данном районе. Отмечаемое редкое поражение компактных известняковых пород может быть объяснено тем, что в них отсутствуют грунтовые воды, а сопротивление самой почвы так велико, что молния над этим районом либо не разряжается совсем, либо начало разряда происходит над этим районом, а удар происходит в стыке этой породы с другой, имеющей бо́льшую проводимость.

Идея «статического» и «динамического» электрических уровней позволяет рассматривать вопрос о пути молнии в атмосфере, ее зигзагах и отклоне-



a *b*

Рис. 136. Пример практического использования выводов из теории избирательной поражаемости

ниях, в общем виде: траектория разряда определяется в атмосфере взаимодействием между электромагнитным полем развивающегося процесса и средой, неоднородности в которой искажают распределение электрических градиентов и обусловливают отклонения и изгибы канала. Далеко от поверхности земли (или над идеально однородной плоскостью—в случае искрового разряда над металлическим листом) преобладающее значение имеют неоднородности в воздухе (области повышенной температуры, объемы, содержащие пыль, ионизирующие частицы, влагу и пр.). По мере приближения к земле решающее значение на пути процесса приобретает структура почвы.

Примером практического использования развитых нами теоретических представлений является случай, описанный Фритчем. На рис. 136, *a* изображено расположение сооружения, имеющего заземлитель, устроенный в плохо проводящем грунте. Разряд в «поисках» хорошо проводящего пути может пройти через сооружение, направляясь к жиле *B*. Правильное расположение сооружения и его заземлителя указано на рис. 136, *b*.

Касаясь вопроса влияния линий передач на избирательную поражаемость молнией, следует отметить, что до тех пор, пока провода не имеют электрического контакта с землей (причем такого соединения, которое могло бы обеспечить необходимый приток зарядов к тому месту линии, над которым начинает развиваться канал молнии), они не могут считаться эквивалентными хорошо проводящим телам, находящимся в земле.

Для определения количественных характеристик явления избирательной поражаемости наши сведения еще недостаточны. Так, до сих пор остается невыясненным вопрос о высоте ориентировки молнии на земные объекты (об этом подробнее будет сказано в главе VIII) и ее зависимости от местных условий.

3. ИЛЛЮСТРАЦИИ К ТЕОРИИ ИЗБИРАТЕЛЬНОЙ ПОРАЖАЕМОСТИ

Для иллюстрации избирательной поражаемости приводятся некоторые показательные случаи грозовых разрядов, обследованные по заданию Академии Наук СССР различными авторами с особой тщательностью.

ЭБ "Научное наследие России"

1. Частые удары молнии в овраг ручья Городенки, в районе Шараповой охоты. Местные жители отметили, что в этот узкий и глубокий овраг было шесть ударов молнии, причем четыре из них локализовались на площадке примерно 200 м².

Результаты измерения удельных сопротивлений слоев земли в рассматриваемом участке приведены на рис. 137. Как видно, хорошо проводящее мощное включение имеет заметно выраженную клинообразную форму и всего ближе расположено к оврагу ручья Городенки. Основной породой, образующей проводящую жилу оврага, являются разрозненные известняки и пески, насыщенные водой, которая имеет повышенную степень минерализации и поэтому ничтожное сопротивление.

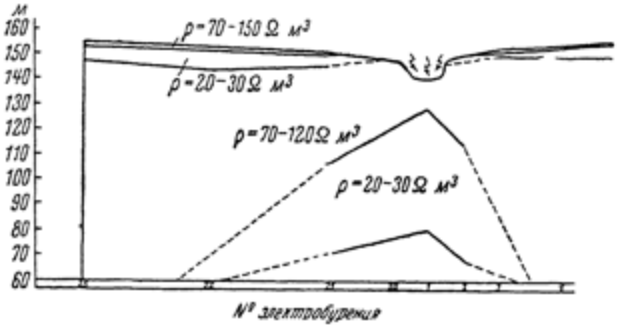


Рис. 137. Изменение удельных сопротивлений слоев земли в районе избирательно поражаемого участка (Шарапова охота)

Резкая деформация электродинамического поля должна была создаваться здесь под влиянием подземного рельефа хорошо проводящего грунта, наличие которого способствует также наименьшему падению напряжения в этом участке от токов развивающегося грозового разряда. Значительная мощность проводящего объекта и форма его рельефа способствуют локализации ударов молнии в определенную, весьма ограниченную зону.

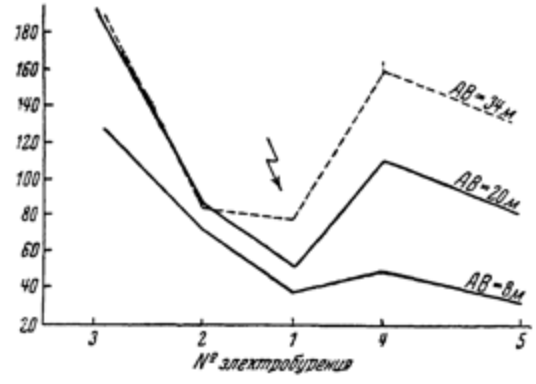


Рис. 138. Изменение удельных сопротивлений слоев земли в районе избирательно поражаемого участка (около села Насонова)
AB—расстояние между электродами, подводящими в землю ток

2. Летом 1936 г. в селе Насонове Звенигородского района ударом молнии была убита лошадь, находившаяся на невысоком холме. Разряд направился в землю через подковы лошади, оставив четыре фульгурита, глубоко уходящих в почву.

На рис. 138 даны результаты электроразведки пораженного места. Наименьшее удельное сопротивление грунта как раз приходится на пораженный участок.

3. Интересен случай, описанный Ализаде и Богдасаровым и изображенный на рис. 139. Молния поражает сторону глубокого ущелья, в котором протекает

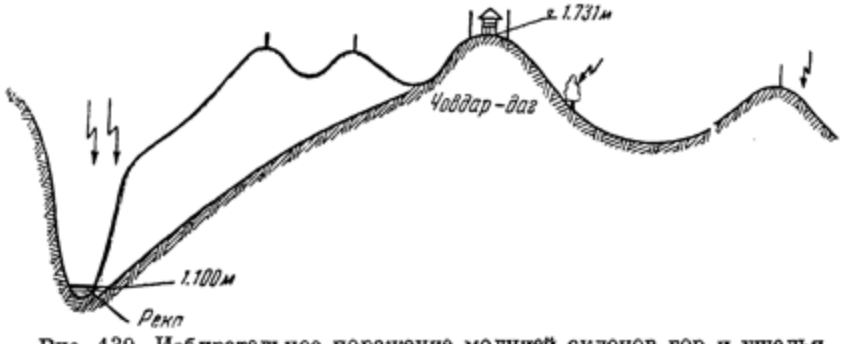


Рис. 139. Избирательное поражение молнией склонов гор и ущелья

река, создающая повышенную проводимость почвы, и склоны холмов, на одном из которых была расположена экспедиция по изучению молнии (Човдар-даг).

ЭБ "Научное наследие России"

4. Эксплоатационные наблюдения за некоторыми нашими линиями электропередач (особенно горными, расположенными в Армении) указывают на то, что весьма большой процент (до 80) всех ударов молнии в них связан с наличием ярко выраженных факторов, благоприятствующих избирательной поражаемости данной точки (повышенная удельная проводимость, наличие реки или возвышения над окружающим местом).

Рис. 140—143. Лозоискатели XVIII века

Интересные факты избирательной поражаемости, вызванной неоднородностью проводимости почвы, описаны Буккиллом, Шипли, Колладоном, Лоджем и другими исследователями.

Частным случаем избирательного действия молнии является поражение точек поверхности земли, лежащих над подземными источниками в грунтах с весьма высоким удельным сопротивлением; этот факт, известный с дальних времен, в новейшее время был отмечен Леманом. Согласно утверждению этого автора, решающую роль в поражаемости данного места играет наличие подземной водяной жилы. Для отыскания подземных источников был привлечен известный «лозоискатель», пользовавшийся для отыскания воды так называемой «волшебной лозой». Последующее бурение в местах, указанных лозоискателем, по указанию Лемана, подтвердило наличие в них подземных источников[1].

Исследования Лемана подверглись суровой критике ряда ученых. В особенности много возражений встретил метод нахождения подземных водяных жил с помощью лозоискателей. Указывая на полную научную необоснованность этого метода, Райх оспаривает существование в районе исследований Лемана водяных жил с резко очерченными краями.

Помимо этого следует отметить, что случаи избирательного поражения, приводимые Леманом для иллюстрации, не являются убедительными, хотя сами факт поражения водяных жил в плохо проводящей почве, конечно, полностью закономерен.

[1] Применение «волшебной палочки» для обнаружения подземной воды, различных минералов и металлов известно очень давно (по некоторым данным около 40 столетий). Систематическое изучение явлений, связанных с методом «волшебной палочки», началось в XVIII веке и продолжается до настоящего времени. Этому вопросу посвящена обширная литература.

Работа лозоискателя заключается в следующем: экспериментатор берется за оба конца вилки (которая может быть сделана из различных материалов, но чаще всего из дерева) руками, повернутыми ладонями кверху; некоторые лозоискатели держат руки при этом приподнятыми. Иногда на тыльную часть кисти кладется прямая «палочка» или палочка удерживается двумя пальцами (рис. 140—143). Руки, согнутые в локтях, слегка прижаты к корпусу. Мускулы рук, кисти, пальцы и палочка образуют одну эластичную систему, находящуюся в неустойчивом равновесии. Малейшее отклонение нарушает это равновесие и вызывает реакцию мускульной системы.

Вопрос о механизме реакции лозоискателя подвергался тщательному изучению в Пражском обществе исследования лозоискания. Многочисленные опыты показали, что основной причиной своеобразной реакции лозоискателей (среди которых не исключается существование шарлатанов) является геоэлектрическая неоднородность подпочвенных пород. Анализ работы лозоискателей показывает, что сила реакции не у всех одинакова, а это требует для сравнительных выводов знания характера реакции каждого лозоискателя. Детальное обследование нескольких заведомо избирательно поражаемых мест показало, что значительная неоднородность подпочвенных слоев обусловливает наблюдавшуюся в отдельных случаях локализацию грозовых разрядов.

ЭБ "Научное наследие России"

Весьма интересен вопрос, еще недостаточно выясненный, об избирательном поражении различных пород деревьев. Различная поражаемость отдельных видов деревьев отмечена весьма давно. Так, этрусский царь Тархон защищал свое жилище от грозы, покрывая его белым виноградом. Плиний находил наиболее благоприятным для этой цели лавровое дерево. Любопытно упомянуть существующую по этому поводу швейцарскую пословицу: «Избегай дуба, ищи бук». Это изречение как бы направляет путника, застигнутого грозой, туда, где он может быть защищен от удара молнии.

Вальтер, внимательно изучавший этот вопрос, пришел к заключению, что различие в поражаемости названных пород деревьев лишь кажущееся. Кора бука имеет гладкую поверхность, поэтому вода, стекающая по его стволу, образует достаточно хороший токоотвод, и молния, поразив дерево, не оставит на нем заметных следов. Напротив, шероховатая кора дуба не позволяет воде быстро стекать, и грозовой разряд производит на нем большее разрушение.

Существующая статистика поражения деревьев не дает возможности сделать какое-либо определенное заключение. Статистические данные, собранные Фейе, позволили Хельману и Леману сделать заключение, что все же чаще всего поражается дуб, реже всего бук. Хельман полагал, что на причину избирательности оказывает влияние также почва. Этот вопрос изучался в лабораторной обстановке Ионеско над образцами 10 различных древесных пород. Ионеско заключил, что основной причиной избирательности является электрическая проводимость дерева. В результате микроскопического исследования он пришел к заключению, что проводимость разных пород деревьев обусловлена количеством содержащейся в них смолы. Чем меньше смолы, тем лучше проводимость дерева.

Резюме

Изложенная в этой главе теория динамических и статических уравнений дает возможность объяснить:

1) избирательную поражаемость некоторых мест, расположенных геометрически неблагоприятно для попадания в них молний;

2) зигзагообразность искры и молнии и отклонения пути их от кратчайшего направления между «электродами».

В тесной связи с влиянием проводимости грунтов на избирательную поражаемость находится вопрос о зависимости величины токов молнии от удельной проводимости пораженной почвы. Отмеченная Стекольниковым и Ламдоном связь (рис. 93) позволяет рационализировать методы грозозащиты специализацией расчетных параметров для районов с определенной геологической структурой.

Идеи, развитые в этих работах, позволили установить новый подход к вопросам создания лабораторных моделей, применяемых при определении защитных зон молниеотводов, и начать исследования в области моделирования.

ЭБ "Научное наследие России"

VII. ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЛНИИ

Воздействия грозовых разрядов могут быть двоякого рода. Во-первых, молния может поражать земные объекты непосредственно, это явление именуется прямым ударом. При этом могут иметь место весьма разнообразные механические, термические и другие явления. Во-вторых, молния может оказывать разнообразные воздействия вторичными проявлениями. К ним относится электростатическая и электромагнитная индукция.

Для проверки теоретических представлений о развитии различных воздействий прямых ударов молнии и для экспериментального воспроизведения разрушительных эффектов служат генераторы больших токов, основным отличием которых от генераторов импульсных напряжений является значительная суммарная емкость в разряде.

За последние два десятка лет потенциалы волн, производимых генераторами импульсов, достигли 10 000 kV между полюсами (5 000 kV—относительно земли)

С 1929—1930 гг. точка зрения на источник опасных грозовых перенапряжений в линиях электропередач меняется. Доминирующую роль получает теория, согласно которой прямой удар молнии—основной фактор, вызывающий аварии в системах высокого напряжения. Усовершенствование измерительной техники дает возможность приступить к широким экспериментам при исследованиях параметров грозового разряда вообще и амплитудных значений токов молнии в частности.

Сдвиги в представлениях о механизме поражений и полученные данные измерений дают толчок к ведению лабораторных испытаний высоковольтной аппаратуры высокими напряжениями при действии токов с амплитудами, близкими к амплитудам молнии. С этой целью в лабораториях, прежде всего в американских, начинают строить генераторы импульсов для получения волн токов с амплитудами в десятки и даже сотни тысяч ампер.

Максимальный ток, полученный до настоящего времени, достигает 300 kA при к о л е б а т е л ь н о м разряде. Наибольшее значение тока а п е р и о д и ч е с к о й волны составляет примерно 2/3 этой величины.

В настоящей работе воздействия прямого удара молнии на линии передач рассматриваются весьма кратко, ибо в нашей литературе этому вопросу посвящено достаточно много места.

Меняющиеся представления о молнии должны повлечь за собой разработку новых методов расчета грозоупорных систем. Однако в настоящее время материал для создания новых расчетных методов еще не накоплен.

1. ПРЯМОЙ УДАР МОЛНИИ

а. Термическое действие токов молнии

Воздействие на проводники

Расчет нагревания проводника при протекании по нему тока молнии может быть сделан в предположении, что процесс происходит адиабатически, т. е. все тепло, выделяющееся в металле, идет целиком на повышение его температуры. Точнее, тепло Q, выделяемое в проводнике, покрывает, помимо запасаемого

ЭБ "Научное наследие России"

в нем тепла (идущего на повышение температуры), также и потери тепла на радиацию, проводимость и конвекцию. Однако в инженерных расчетах этими потерями, незначительными по величине, можно пренебречь (в счет запаса). Количество тепла Q, выделяемого током i за время T в проводнике с сопротивлением R, равно

$$Q = k \int_0^T i^2 R\, dt, \tag{1}$$

где k—константа перевода электрической энергии в тепловую

$$(k = 0.24).$$

Если ток i по времени меняется, согласно уравнению

$$i = I_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \tag{2}$$

(значения входящих в уравнение букв поясняет рис. 144), то полное количество тепла Q, выделившееся в проводнике, определится интегрированием

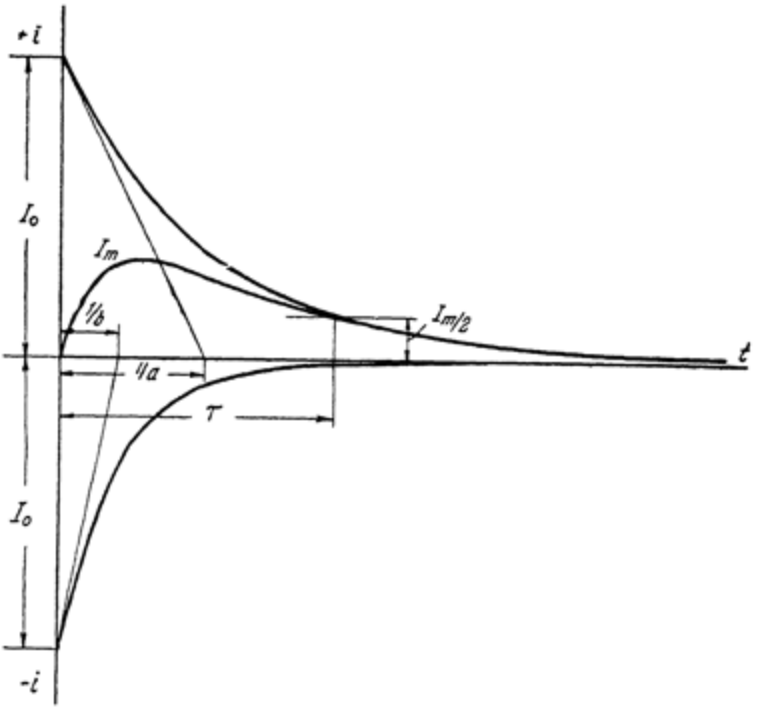


Рис. 144. Стилизованный вид апериодического импульса тока и его составляющие

в пределах от $t = 0$ до $t = \infty$

$$Q = \int_0^\infty k\,[I_0 (e^{-at} - e^{-bt})]^2 R dt = kR \frac{I_0^2 (a-b)^2}{2ab\,(a+b)}. \tag{3}$$

Если, согласно сделанному допущению, все тепло идет на нагрев проводника с массой m, то температура его нагрева T равна $\frac{Q}{mc}$, где c — удельная теплоемкость проводника. Обозначая через q площадь поперечного сечения проводника, l — его длину, g — удельный вес, получаем:

$$m = q\, lg, \tag{4}$$

и, следовательно,

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{q\, lg\, c},$$

ЭБ "Научное наследие России"

или, пользуясь соотношением (3), находим:

$$T = \frac{kI_0^2R(a-b)^2}{2ab(a+b)qlgc} = \frac{kI_0^2\rho(a-b)^2}{2ab(a+b)q^2gc}, \quad (5)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника.

Формулу (5) можно упростить введением понятия об эффективном действии постоянного значения токи I_m (рис. 144), согласно соотношению

$$t_e = \frac{1}{I_m^2}\int_0^\infty i\,dt, \quad (6)$$

которое в случае волны, передаваемой уравнением (2), дает:

$$t_e = \left(\frac{I_0}{I_m}\right)^2 \frac{(a-b)^2}{2ab(a+b)}. \quad (7)$$

Уравнение (5) получает вид:

$$T = I^2 t_e \frac{k\rho}{q^2gc},$$

откуда амплитудное значение волны тока, доводящей проводник с данными физическими характеристиками до температуры T, определяется формулой

$$I_m = \sqrt{\frac{Tq^2gc}{k\rho t_e}}. \quad (8)$$

Подставляя в (8) значение $k = 0.24$, выражая t_e в микросекундах, а g в квадратных миллиметрах, получаем

$$I_m = 20.4\sqrt{\frac{Tgc}{\rho}}\,\frac{q}{\sqrt{t_e}}. \quad (9)$$

При расчетах по формуле (9) приходится приближенно пользоваться средними значениями удельного сопротивления и удельной теплоемкости, определенными для нормальной температуры и температуры максимального нагрева проводника.

Величина сопротивления 1 см³ проводника и его теплоемкость в зависимости от температуры выражаются формулами:

$$\rho = \rho_0(1+\alpha_1 T+\alpha_2 T^2),$$
$$c = c_0(1+\beta T).$$

Принимаем, что плавление меди наступает при 1 080 °С, а железа—при 1 500° С; значения ρ и c в этих температурных пределах:

$$\rho_{м\,ср} = 5.3\cdot 10^{-6};$$
$$c_{м\,ср} = 0.115;$$
$$\rho_{ж\,ср} = 92.9\cdot 10^{-6};$$
$$c_{ж\,ср} = 0.167.$$

Если принять в качестве удельного веса меди величину $g_м = 8.93$, а для железа $g_ж = 7.86$, ток импульса, необходимый для плавления проводника, определится из соотношений:

для медной проволоки:

$$I_{ом} = 20.4\sqrt{\frac{1080\cdot 8.93\cdot 0.115}{5.3\cdot 10^{-6}}}\,\frac{q}{\sqrt{t_e}} = 295\,000\,\frac{q}{\sqrt{t_e}}; \quad (10)$$

для железной проволоки:

$$I_{ож} = 20.4\sqrt{\frac{1500\cdot 7.86\cdot 0.167}{92\cdot 3\cdot 10^{-6}}}\,\frac{q}{\sqrt{t_e}} = 94\,200\,\frac{q}{\sqrt{t_e}}. \quad (11)$$

На основании (10) и (11) можно, задаваясь сечением проводника и длиной волны, определить предельную амплитуду тока, которую проводник сможет выдержать без плавления.

Для волн с коротким фронтом можно без существенной погрешности пренебречь его влиянием и получить в формуле (2) для i величину b, равную ∞, причем

$$i = I_0 e^{-at}. \quad (12)$$

ЭБ "Научное наследие России"

В случае импульсного контура, состоящего из емкости C и разрядного сопротивления R, $a=\frac{1}{RC}$.

Обычно длину волны характеризуют промежутком времени от $t=0$ до момента спада напряжения волны до 50% амплитудного значения. Если это время обозначить через τ (рис. 144) то, как известно,

$$a=\frac{0.693}{\tau}.$$

Из формулы (7), учитывая, что в этом случае $J_0=J_m$, получаем (при $b=\infty$)

$$t_e=\frac{1}{2a}=\frac{\tau}{2\cdot 0.693}=\frac{\tau}{1.386}. \qquad (13)$$

Подставляя это значение t_e в (9), находим:

$$I_m=348\,000\frac{q}{\sqrt{\tau}}, \qquad (14)$$

$$I_m=111\,000\frac{q}{\sqrt{\tau}}. \qquad (15)$$

Выведенные формулы могут рассматриваться лишь как приближенные, ибо в них, помимо указанных выше допущений, имеется еще одно—неучет скин-эффекта. Несомненно, что роль скин-эффекта в увеличении сопротивления должна иметь определенное значение. Эксперименты, проделанные Беллаши с импульсными токами больших амплитуд, показали, что связь между величинами I_m, q (мм²) и τ (μS) выражается формулой

$$I_m=320\,000\frac{q}{\sqrt{\tau}}\ A, \qquad (16)$$

которая имеет расхождение с формулой (14) на 8.7%. Кривые, на основании которых получена эта зависимость, изображены на рис. 145.

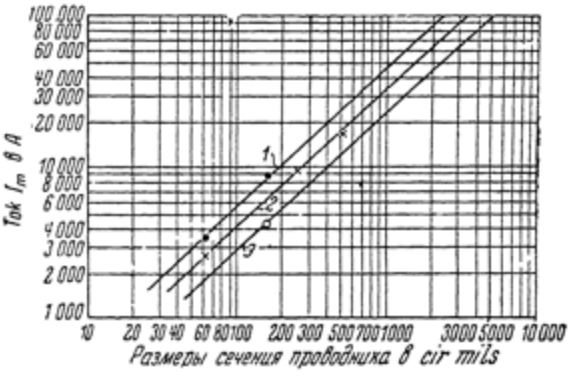


Рис. 145. Зависимость сечений проводов (в cir. mils; 1 cir. mils приблизительно равен $^1/_{2000}$ мм²) от нагревающих их токов (в А)

1—крутой фронт, спад до 0.5 I_m в 9 μS; 2—то же в 18 μS; 3—то же в 40 μS.

Волны, применявшиеся при испытании, имели фронт достаточно краткой длительности по сравнению с хвостом, и поэтому основное предположение о расчете по уравнению (14) осталось в силе.

При сечениях проводника около 1 мм² и больше формула (16) дает завышенные значения расплавляющего тока. Это следует отнести за счет увеличивающегося значения скин-эффекта.

Таблица 10

Материал проводника	Значение постоянной k при доведении проволоки до:		
	плавления	каления	испарения
Медь	305 000	220 000	327 000
Железо	115 000	90 000	438 000
Алюминий	200 000	128 000	230 000
Константан	170 000	70 000	129 000

Эксперименты, проведенные Фойтциком с генераторами больших токов, позволили получить значения k для различных температур проводников, сделанных из разных материалов. В табл. 10 приведены значения k, которые, будучи подставлены в формулу $I_m=k\frac{q}{\sqrt{\tau}}$, дают токи, доводящие проводник соответственно до красного каления, расплавления или испарения.

ЭБ "Научное наследие России"

Как видно, значениям расчетных коэффициентов для меди и железа [формулы (14) и (15)] наиболее близки значения k, характеризующие плавление и испарение проводника. При более детальном анализе процессов, происходящих при очень сильных нагреваниях проволок, весьма важное значение имеет процесс изменения проводимости нагреваемого тела в различных его фазах.

С повышением температуры T проволоки, находящейся в твердом состоянии, ее проводимость сильно падает (у меди приблизительно до 1/7). Во время плавления, т. е. при переходе от твердого состояния к жидкому при постоянной температуре, проводимость падает скачком приблизительно наполовину, например у меди до 1/12 величины проводимости металла в холодном состоянии. С повышением температуры происходит дальнейшее снижение проводимости, падающей почти до нулевого значения при переходе металла в парообразное состояние. У меди это имеет место при 2 310° С. При температуре 3 500° С снова появляется проводимость металлического газа за счет термоионизации. Дальнейшее повышение температуры вызывает быстрый рост проводимости, и при 4 500° С металлический газ имеет примерно ту же проводимость, что и холодный металл. Так как термоионизация у всех металлических атомов протекает примерно одинаково, поведение различных металлов при весьма высоких температурах идентично. Воздух и двухатомные газы, имеющие потенциал ионизации выше, чем пары металлов, приобретают благодаря термоионизации металлическую проводимость при значительно больших температурах.

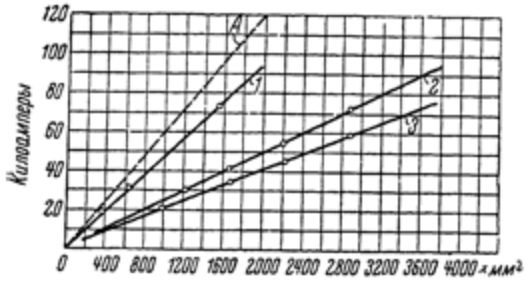


Рис. 146. Зависимость сечений проводов (в cir. mils) от нагревающих их токов:
1—медь; *2*—алюминий; *3*—железо

В качестве примера подсчета термического действия полной волны рассмотрим случай волны, имеющей длительность фронта (от нуля до максимума тока) в 3.4 μS, и хвоста (до половинного значения амплитуды) в 0.2 μS

Уравнение такой волны имеет вид:

$$i = I_0 (e^{-0.2377t} - e^{-0.358t}),$$

где $I_0 = I_m \cdot 6.666$.

Эффективное время t_e воздействия тока на проводник определяется уравнением (7). При этом

$$a = 0.2377 \cdot 10^6,$$
$$b = 0.3580 \cdot 10^6$$

и, следовательно,

$$t_e = \frac{(6.666)^2 \cdot (0.2377 \cdot 10^6 - 0.358 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 0.2377 \cdot 10^6 \cdot 0.358 \cdot 10^6 (0.2377 + 0.358) \cdot 10^6} = 5.8 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$$

Уравнение (10) принимает вид:

$$I_m = 295\,000 \frac{q}{\sqrt{5.8}} = 122\,000q. \qquad (17)$$

На рис. 146 показана зависимость (A) величины токов I_m от сечений q, построенная по уравнению (17) (для медного проводника). На том же рисунке показаны зависимости, полученные Мак Икроном при испытаниях с волной той же формы, что и принятая здесь для расчета. Как видно, расчет дает несколько преувеличенные значения токов.

При испытании образцов проволоки различного диаметра большими импульсными токами выявилось, что если величина тока превышает значение, при котором происходит нагревание проводника докрасна, проволока распадается на куски длиной около 3 см. При постепенном увеличении тока длина кусков, на которые распадается проволока, уменьшается и доходит до 3 мм. Дальнейшее увеличение тока вызывает общее расплавление, а затем и испарение проводника.

ЭБ "Научное наследие России"

Повидимому, объяснение этого факта должно быть связано с собственными колебаниями проводника под действием термодинамических усилий, возникающих при внезапном пропускании громадных по величине токов. Аналогичные действия отмечались и при ударах молнии.

При многократных разрядах, когда отдельные импульсы следуют друг за другом через малые промежутки времени, так что металл аккумулирует тепло, конечную температуру проводника следует определять на основании эквивалентного времени действия токов. Поэтому, при выводе соотношений (14) и (15), вместо величины I_0^2T должна быть взята сумма таких произведений для каждого импульса. При одном и том же количестве разряжающегося электричества более кратковременные импульсы тока производят более значительный тепловой эффект.

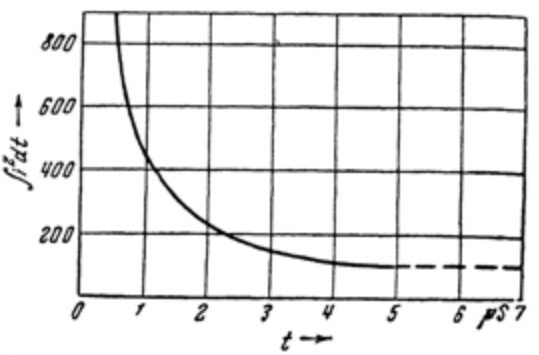


Рис. 147. Зависимость интеграла квадрата плотности тока и времени ($\int i^2dt$) для точки плавления от времени (t)

Измерения Врана показали, что при весьма малых временах расплавления металла токами i крайне высоких плотностей потребная для расплавления мощность W_s не пропорциональна $\int i^2dt$. Оказывается, что при малых t $W_s = \frac{\text{const}}{t}$. Аналогичный характер имеет и зависимость тока плавления от времени плавления t. Эти величины в области малых t (до 5 μS по крайней мере) связаны гиперболической зависимостью $it = \text{const}$.

Изображенная на рис. 147 кривая $\int i^2dt$ в функции от t показывает, что W_s не зависит от t лишь по истечении 5 μS, при этом значении $\int i^2dt$ достигает величины $100 \cdot 10^3$. Таким образом, при малых временах энергия, необходимая для расплавления проводника или превращения его в пары, увеличивается с уменьшением t.

Для определения мощности молнии, выделяемой в месте удара, необходимо знать падение напряжения в месте перехода тока из воздуха на проводник. Процесс этот недостаточно изучен. Согласно данным о дуговом процессе, напряжение перехода тока из металла в воздух колеблется от 6 до 8 V. Таким образом, тепловая энергия, выделяемая в проводнике, например при протекании одного кулона под напряжением 6 V, определится из соотношения:

$$W = 0.24QV = 0.24 \cdot 6 \approx 1.5 \text{ кал.}$$

Этого количества достаточно для расплавления 1 мм³ меди или 100 мм³ свинца.

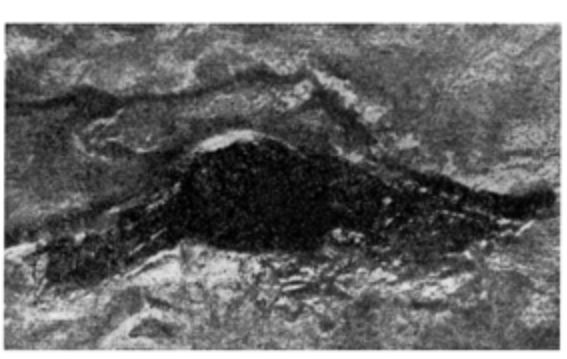


Рис. 148. Выплавление молнией отверстия в свинцовой оболочке кабеля

В качестве примера такого «выплавляющего» действия молнии можно привести рис. 148, на котором дана фотография (Петерса) свинцовой оболочки кабеля, пораженной молнией. Видно отверстие, как бы пробитое молнией в свинце.

В толстых образцах металла ток импульса течет лишь в поверхностных слоях, проникая на глубину δ. Полагая, что волны тока эквивалентны синусоидам с периодами $f = \frac{\omega}{2\pi}$ от 5 000 до 1 000 Hz, Петерс определяет глубину проникновения токов по формуле:

$$\delta = 1 : \sqrt{\frac{\omega \times \mu 10^{-8}}{2}}, \qquad (18)$$

где $\varkappa$ — проводимость, μ — магнитная проницаемость. Формула эта дает значения δ для меди при названных переходах в пределах от 1 до 2 мм.

Эта формула в практических единицах может быть написана приближенно так:

$$\delta \approx 5\,300 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}.$$

В случае, например, меди $\mu = 1$, $\rho = 1.79 \cdot 10^{-6}$ ом. см. и для $f = 5$kHz получаем $\delta = 1.0$ мм.

В литературе упоминается немало случаев полного расплавления более или менее длинных кусков проволоки. Так, Пик описывает случай, когда проволока антенны сечением 3.3 мм² (№ 12 по американскому сортаменту) и длиной около 30 м была целиком обращена в пары. Он же отмечает нередкое расплавление телефонной проволоки сечением 2.08 мм² (№ 14).

Рис. 149. Парадоксальные разрушения, произведенные молнией

Весьма интересно сообщение Янецкого: сделанный из меди токоотвод 35-миллиметровой фабричной трубы, диаметром 6.5 мм, от ударившей в него молнии был расплавлен и распался на отдельные куски, которые разбросало на 75 м.

Кольрауш описывает такой случай (1913). Удар молнии в молниеприемник 39-миллиметровой трубы расплавил и разорвал во многих местах медный токоотвод сечением 40 мм² (12 проволок по 3.3 мм²). Несмотря на то, что железный молниеприемник (диаметром 2.7 м), возвышавшийся над трубой на 2.5 м, сохранился, произошло сильное разрушение верхней части трубы, и на землю упало около 10 м³ кирпича. Токоотвод был порван больше чем в 12 местах, часть кусков упала на землю, часть осталась висеть в закрепах. Заземление токоотвода было сделано из пластины и имело сопротивление 4 Ω. На высоте 9 м молния сильно разрушила цоколь трубы и перешла на конек оцинкованной крыши, прошла по нему 11 м, затем перешла на водосточную трубу. На высоте 1.6 м молния пробила дыру (величиной с голову) в стене толщиной в два кирпича, по внутренней стороне которой висели медные кольца (показавшие следы плавления), и исчезла в большой железной конструкции, соединенной с паровой трубой. Вблизи конструкции лежали также водопроводные и газовые трубы (не имевшие следов оплавления). При прохождении по наклонной трубе (4.5 м) молния произвела исключительное действие (рис. 149). Концы труб, входившие в следующие колена, были смяты в воронку, а концы, куда они входят, расширены.

Рис. 150 *a*. Молниеприемник округлой формы, пораженный многочисленными грозовыми разрядами

Рис. 150 *b*. Молниеприемник пирамидальной формы, пораженный несколькими разрядами

На основании изучения рабочих поверхностей 19 молниеприемников, пораженных грозовыми разрядами, Хесс пришел к выводу, что молния, производя термические воздействия на поверхности, не разбрызгивает металла в стороны, не создавая тем самым опасности воспламенения объектов, находящихся вблизи.

ЭБ "Научное наследие России"

На рис. 150 *а* показан молниеприемник, пораженный в сотнях точек. Хесс считает, что скругленные концы молниеприемника содействуют деконцентрации тока молнии по поверхности металла.

На рис. 150 *b* показан молниеприемник пирамидальной формы с острыми краями. Поражения его концентрируются на малых участках (*a*, *b*, *c*, *d*) и состоят в выжигании металла. Вершина молниеприемника совершенно расплавлена.

В качестве примеров термического и термодинамического действия больших токов можно привести также некоторые результаты лабораторных исследований. На рис. 151 показаны результаты воздействий волны тока с амплитудой 200 kA и длительностью 30 μS на различные объекты. Характерно, что если рассчитать на расплавление полосу сечением 15 мм² (рис. 151 *а*) по формуле (16), то амплитуда волны тока оказывается равной 870 kA, что указывает на неприменимость выведенной для цилиндрического проводника формулы к случаю плоской ленты.

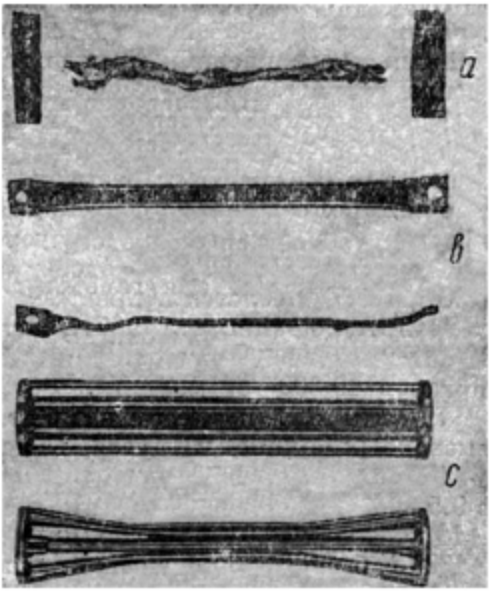


Рис. 151. Результаты воздействия импульсной волны тока с амплитудой 200 kA:
а—медная пластина 300.75.0.2 мм³; *b*—медная труба 300.75.0.3 мм³; *с*—конструкция из 8 проволок диаметром 4 мм

Следует вообще подчеркнуть особый характер термического воздействия молнии (и искрового разряда) в месте соприкосновения с металлом. Пережог одной или нескольких жил в многожильном тросе, выплавление отверстий в тонких листах металла и выжигание углублений в более толстых образцах указывают на то, что мощность разряда реализуется локально и проводимость и теплопроводность металла оказываются недостаточными для быстрого отвода тока и тепла от пораженного места. Естественно, что всякое мероприятие, уменьшающее переходное напряжение V искра—металл, будет способствовать уменьшению поражений на его поверхность. Обратно, искусственное повышение V приведет к увеличению объема выплавленного металла.

Действие токов молнии на сооружении

Абсолютное и относительное число пожаров, вызванных молнией[1]. По данным ГУПО НКВД за 1938—1940 гг. по СССР произошло свыше 9 000 пожаров, вызванных грозовыми разрядами. Эта статистика охватывает не все фактически имевшие место случаи. Особенно большое число пожаров от молнии приходится на июль. Так, в июле 1938 г. было зарегистрировано 1 164 пожара, а в июле 1939 г.—1 137. В Венгрии за период с 1890 по 1900 г. среднее число ежегодных пожаров от молнии равно 309. В Шлезвиг-Гольдштейне с 1874 по 1920 г. было поражено 5 094 сооружения. В Англии (по данным, опубликованным в 1912 г.) молнией поражается ежегодно около 400 строений. В Ленинграде в течение 1935—1936 гг. установлено 25 случаев поражения молнией различных сооружений.

Наибольшее число поражений и пожаров от молнии падает на сельские местности. Замечено, что в СССР районы с весьма высокой грозоносностью характеризуются малым числом пожаров и, наоборот, в центральных районах Европейской части СССР с сравнительно слабой грозовой деятельностью (по числу грозовых дней) пожары чаще. При анализе причин этого необходимо учитывать,

[1] По материалам Руководящих указаний по грозозащите промышленных и других сооружений. Изд. АН СССР, 1940.

ЭБ "Научное наследие России"

конечно, и характер построек (их воспламеняемость) в различных районах СССР.

Интересны данные о распределении 10 000 пожаров от молнии в Пруссии (за 14 лет):

Берлин	14
Крупные города	353
Мелкие »	1 689
Окрестности городов .	4 379
» деревень .	4 161

Нельзя, однако, согласиться с утверждениями, высказываемыми в литературе, что число пожаров в городах меньше из-за меньшего числа ударов молний. Причины этого кроются прежде всего в том, что городские строения менее воспламеняемы.

Число пожаров, вызванное молнией, относительно общего числа пожаров незначительно, и особенно это относится к городам. Статистические данные за период с 1870 по 1904 г. показывают, что для Европейской части России количество пожаров от молнии в сельских местностях колеблется в пределах 2.9—3.9% общего числа пожаров. Для городов эта цифра значительно меньше: так, за период 1923—1928 г. для городов трех союзных республик (РСФСР, УССР и БССР) она колеблется в пределах 0.3—0.5%.

В США, по данным за 1937 г., число пожаров от молнии составляет примерно 3% общего числа пожаров (из зарегистрированных в настоящем году 620 000 пожаров 19 300—от молнии).

У б ы т к и, п р и ч и н я е м ы е м о л н и е й. В результате пожаров, вызванных молнией в Пруссии за период с 1881 по 1908 г., причинено убытков на 117 млн. марок. В Баварии за период с 1885 по 1890 г. убытки исчисляются в 9.5 млн. марок. В Швейцарии за время с 1925 по 1936 г. молния поразила в 18 кантонах 6 301 строение, причинив убытки около 5 млн. франков. В США в 1899 г. было 6 256 поражений молнией сооружений с общим убытком в 3 млн. долларов, а по данным 1938 г. ежегодные убытки от молнии в США превышают 9 млн. долларов, что составляет примерно 3% общих убытков от пожаров.

Особо стоит вопрос об анализе действия грозозащитных сооружений и выяснения практических величин зон защиты. Вопрос о том, в какой мере защитное устройство действительно защищает сооружение, т. е. насколько эффективно оно работает, может быть решен лишь на основе длительных наблюдений над объектами с выполненной грозозащитой.

В настоящее время имеются некоторые статистические исследования этого рода, правда, весьма неполные. Так, в штате Айова наблюдения в этом направлении проводились Сельскохозяйственным страховым обществом в период с 1902 по 1905 г. На основании анализа 22 000 поражений молнией было установлено, что убытки от пожаров защищенных сооружений составляют всего лишь 1.31% убытков, вызванных пожарами незащищенных сооружений. В этом же штате за период с 1919 по 1921 г. пострадало 28 защищенных сооружений, что вызвало потери в 87 979 долларов, и 503 незащищенных сооружения с потерями в 1 060 668 долларов, хотя число защищенных зданий было равно 50% общего количества сооружений.

По данным Бюро стандартов, в США на 58 незащищенных сооружений, пострадавших от молнии, приходится лишь одно пострадавшее сооружение, имеющее защиту. Защита пострадавших сооружений оказывалась в большинстве случаев неисправной.

По данным 1912 г., в Англии из пострадавших от молнии сооружений только 2% имели защиту.

Приведенные данные все же не дают возможности достаточно полно судить об эффективности работы молниеотводных устройств, так как в них нет сведений об относительном количестве сооружений, обеспеченных противогрозовой защитой.

Повреждения и пожары защищенных сооружений случаются главным образом или вследствие неисправности молниеотводного устройства или неправильности его выполнения. В последнем случае молния при поражении молниеотвода

ЭБ "Научное наследие России"

легко переходит с частей молниеотводного устройства на части сооружения или электропроводку и вызывает пожары. Специальное изучение этого вопроса в Швейцарии показало, что именно такого рода случаи имели место довольно часто.

Поражение молнией промышленных объектов. Особый интерес в рассматриваемом случае представляют сооружения, в которых хранятся, перерабатываются или изготовляются взрывчатые или легко воспламеняющиеся вещества. Несмотря на то, что в такого рода сооружениях иногда сконцентрированы очень большие количества легко воспламеняющихся материалов, поражение их молнией с последующим крупным пожаром бывает сравнительно редко. Тем не менее, несмотря на их немногочисленность, разрушительность их столь велика, что они весьма сильно отражаются на экономике соответствующей отрасли хозяйства.

За период с 1905 по 1925 г. в США было 304 пожара нефти, причем сгорело 416 резервуаров. 55% этих пожаров произошло от молнии.

Отдельные нефтяные пожары, вызванные молнией, причинили большие убытки. Так, в Калифорнии в 1926 г. пожаром уничтожено 9 млн. баррелей нефти и причинен убыток в 10 млн. долларов. Пожар в Монтари в Калифорнии в 1924 г. вызвал убытки в 1.5 млн. долларов.

В СССР за последние 10 лет известно всего лишь три случая относительно больших пожаров нефтехранилищ. За 1938 г. известно пять случаев незначительных разрушений и пожаров на нефтяных предприятиях, происшедших от молнии.

Наиболее легко подвергаются поражению молнией возвышающиеся над окружающими строениями сооружения. К таким сооружениям следует отнести фабричные трубы, башни, радиоантенны и т. п. Из литературы известно много случаев поражения молнией фабричных труб. Особенно большие разрушения наносит удар молнии незащищенным кирпичным трубам. Башня Эйфеля ежегодно подвергается примерно двум прямым ударам молнии. Наиболее высокое здание Америки Empire State Building (имеющее высоту 380 м) за три года подверглось 68 ударам молнии.

По абсолютному числу наибольшее количество поражений приходится на жилые сооружения. В СССР особенно большое количество поражений и пожаров приходится на строения в селах, совхозах и т. п. В течение 1938 и 1939 гг. от зарегистрированных 96 поражений молнией сельскохозяйственных объектов сгорело 393 строения. Большое значение при этом имеет то, что кровля этих сооружений чаще всего бывает из легко воспламеняющегося материала. По данным статистики за 10 лет в Японии, при поражении сооружений с мягкой крышей в 73.5% случаев возникал пожар. В поражениях молнией строений с металлической кровлей пожар возникал лишь в 28% случаев.

b. Поражения людей и животных

В населенных местах с значительным количеством гроз число убиваемых ежегодно молнией достигает 11 на 1 млн. населения. В Венгрии за период с 1897 по 1900 г. было убито молнией 601 человек, что составляет на каждый миллион населения 10 смертей в год. В США в 1900 г. было поражено 1 686 человек, из них 713 человек было убито.

По отдельным странам можно привести следующие данные для ежегодного числа поражений, приходящихся на 1 млн. населения:

Бельгия . . .	2.2	США	7.0
Швеция . . .	3.1	Франция . .	3.0
Пруссия . . .	4.4	Англия . . .	0.4

По материалам японского электрического института в Японии за 10 лет молнией было убито и ранено 1 055 человек.

Большое число поражений людей происходит от косвенных проявлений действия молнии. Так, из 1 055 человек, пострадавших от молнии в Японии, непосредственным ударом молнии было поражено лишь 225 человек, 392 человека

ЭБ "Научное наследие России"

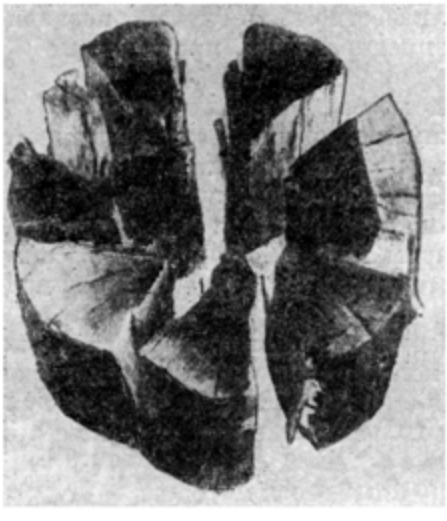
было поражено в зданиях, в которые ударила молния, 201 человек пострадал от грозовых перенапряжений через телефонные и телеграфные провода, 188 человек от удара молнии в деревья.

Особое внимание обращают на себя многочисленные поражения людей от перенапряжений, появляющихся во время грозы в воздушных проводах.

От непосредственных ударов молнии и от вызванных ею пожаров гибнет очень много животных.

c. Электромеханическое действие токов молнии

При ударе молнии в какой-либо объект, расположенный на земной поверхности, последний подвергается обычно тем бо́льшим разрушениям, чем меньше его проводимость. Так, на металлических частях больших сечений обычно не остается и следа от прошедших через них токов молнии. К редким случаям принадлежат также электромагнитные разрушения молнией тонких проводников. Все же, как указывалось, наблюдались случаи вырывания проводов из креплений и своеобразного их изгибания под действием электродинамических сил



a

b

Рис. 152 *a* и *b*. Разрушения разрядами:
a—дерево, разрушенное лабораторным импульсом, *b*—разрушение кирпичной кладки

тока молнии. При ударе молнии в плохопроводящие или изолирующие предметы имеют место значительно более серьезные повреждения. Так, при попадании молнии в каменные сооружения наблюдались случаи, когда отдельные их части разбивались вдребезги, причем куски камня отбрасывались на десятки метров. При поражении молнией деревьев и деревянных столбов обычно наблюдается их расщепление, при этом на силу расщепления оказывает влияние состояние поверхности дерева: до дождя расщепление сильнее, чем после дождя. Само расщепление носит характер взрыва, причем из столба либо вырываются более или менее длинные щепы, либо сам столб разрывается вдоль волокон на несколько частей. Изредка наблюдается полное измочаливание и разрушение столба. Эффектное разрушение образца дерева лабораторным импульсным током показано на рис. 152 *a*. Причина этих повреждений, повидимому,—усиленное газо- и парообразование и диссоциация газов при прохождении токов молнии по капиллярам дерева, заполненным воздухом и влагой. Учитывая громадные температуры канала молнии, можно предполагать, что даже и в отсутствие влаги дерево может превращаться в пары и газ, действие которых ведет к тяжелым разрушениям.

ЭБ "Научное наследие России"

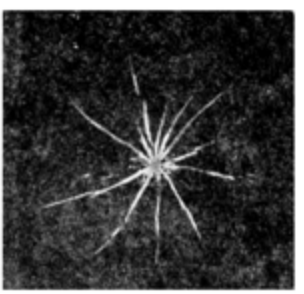
Подтверждением этому могут служить известные из литературы (Фойтцик) примеры механических разрушений импульсными разрядами исключительно сухого дерева, которое было расщеплено так же, как сырое.

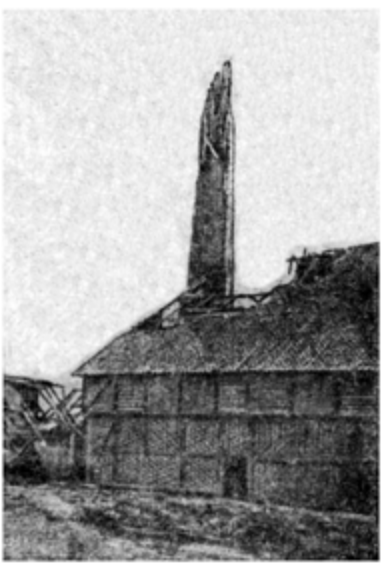
На рис. 152*b*, показано разрушение кирпичной кладки. Характер повреждения, отмеченный в случае относительно свежей кладки (1/4 года), остается неизменным и в случае старой кладки, подвергавшейся перед опытом длительной сушке при 120°С. Аналогичные разрушения наблюдаются и при пробое фарфоровых изоляторов (рис. 152 *c*).

Рис. 152 *c*. Разрушения разрядами: результат пробоя фарфорового изолятора

Насколько велика роль, которую указанные факторы могут играть в расщеплении материала, видно из того, что при переходе водорода из формы, в которой он образует воду, в газообразное состояние давление его при постоянном объеме повышается примерно в 1 300 раз. Таким образом, стенки канала, в котором имело место образование газа, подвергнутся разрывающему их давлению больше тысячи атмосфер.

При прохождении тока по волокнам дерева развиваются электродинамические усилия, направленные к оси столба, и обратно направленные электростатические силы, производящие отталкивание волокон. При протекании тока эти силы частично взаимно уравновешиваются; когда же ток молнии обрывается, электродинамические силы исчезают и остаются лишь электростатические, под действием которых отталкивание волокон может, повидимому, достигать весьма больших значений (см. выше теорию Дорсе). Взрыв в этих случаях в силу крайней кратковременности имеет бризантный характер и обусловливает наблюдающиеся иногда парадоксальные эффекты.





d *e*

Рис. 152 *d* и *e*. Разрушения разрядами: *d* — стекло, пробитое молнией, *e* — разрушение высокой кирпичной трубы, произведенное молнией

Приведем несколько интересных случаев разрушительного действия молнии.

Молния, поразившая замок Клермон в Боувази (Франция), пробила в каменной стене (столь твердой, что ее с трудом брал лом) отверстие в 65 см шириной и 60 см глубиной. Осколки каменной кладки были разбросаны по всем направлениям более чем на 16 м.

Исключительный случай механического воздействия молнии описан Араго. Небольшое кирпичное здание, служившее для хранения каменного угля, имело наверху цистерну. Стены были толщиной в 0.3 м и высотой около 3.5 м. Фундамент опускался в землю на 0.3 м. Ударом молнии внешняя стена, подвал

ЭБ "Научное наследие России"

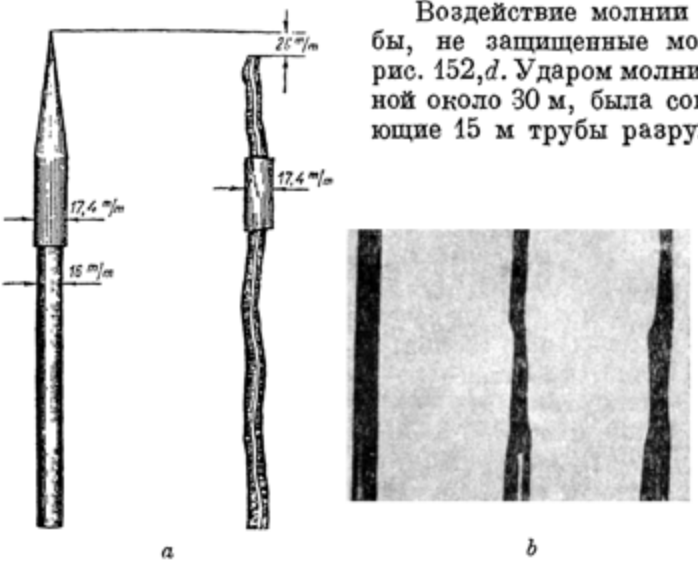
и цистерна были сорваны с фундамента, подняты всей массой и отнесены на некоторое расстояние от первоначального места. Одна часть стены подвинулась примерно на 7.5 м, другая примерно на 1.2 м. Стена, состоявшая из 7 000 кирпичей, весила не менее 27 т. В момент происшествия в подвале находилась тонна угля, а в цистерне некоторое количество воды.

В 1778 г. молния ударила в окно дома инженера Казели в Александрии и повредила только стекла в окне, которые оказались пробитыми несколькими отверстиями, диаметром около 4 мм. Края этих отверстий были окружены маленькими короткими трещинами. Снимок стекла, пробитого молнией, приведенный Лоджем, воспроизведен на рис. 152,*d*.

Известны случаи, когда молния, ударившая в дома, пробивала в стеклах такие ровные круглые отверстия, как будто они были просверлены буравом.

Весьма часты случаи обнаружения в горах камней, разбитых и расщепленных грозовыми разрядами. Поразительно, что молнией избираются небольшие круглые камни.

Воздействие молнии на высокие кирпичные трубы, не защищенные молниеотводами, показано на рис. 152,*d*. Ударом молнии верхняя часть трубы, длиной около 30 м, была совершенно разрушена. Следующие 15 м трубы разрушены наполовину, а в нижней части получилась трещина. Отдельные небольшие камни разлетелись на расстояние 200—300 м.



a *b*

Рис. 153 *a*. Фотографии разрушенной ударами молнии медной трубы, диаметром 14.65 мм и толщиной стенки 0.675 мм. *b*. Иллюстрация постепенного разрушения медных трубок повторным воздействием лабораторных импульсов

Обвалившаяся кладка трубы повредила крышу соседнего здания.

Тяжелые повреждения молнией деревьев иллюстрирует следующий случай. Молния ударила в крону сосны высотой 26 м и пошла спиралеобразно вниз, оставив канал шириной в несколько сантиметров, затем, на высоте 15 м над землей, вошла внутрь дерева, сделав дыру диаметром 8 см. Отсюда произошло отщепление на длине 13—14 м одной четверти дерева и полный отрыв другой четверти дерева на протяжении 13 м. Кора дерева тыла сорвана без следов ожогов. Дерево было разбито на три части. Вес отщепленной и отброшенной части достигал 1 000—2 000 кг.

Механические усилия, испытываемые двумя параллельными проводниками, находящимися на расстоянии d см друг от друга, обтекаемые каждый током I_a, при средней длительности тока T сек., определяются величиной момента на единицу длины:

$$mv = FT = \frac{2I^2T}{100d} \text{ dn/сек.}, \qquad (19)$$

где F — сила протяжения в длинах, m — масса каждого проводника на 1 см длины в граммах, v — скорость каждого проводника в конце времени T. Согласно приведенному уравнению, ток, равный 100 kA, производит усилие около 450 кг на каждый метр длины проводника. При этом проводники получают скорость около 6.6 м/сек. Удвоение тока дает учетверение названных величин. Эти силы вызывают разрушение проводников и трубок.

Гемфрис приводит воспроизведенные на рис. 153,*a* фотографии разрушения полой медной трубки, имевшей внутренний диаметр 14.65 мм и толщину стенки 0.675 мм. Постепенное разрушение медных трубок повторным воздействием ла-

ЭБ "Научное наследие России"

бораторных импульсов иллюстрируется рис. 153,*b*. Сжатие и скручивание металлических пластин уже отмечались выше (рис. 151).

Повторные импульсы могут давать кумулятивные механические эффекты, приводящие к серьезным разрушениям. При ударе молнии с амплитудой тока I_a и радиусом канала r см перпендикулярно в провод развивается сила F кг, действующая на каждый сантиметр проводника. Величина F определяется формулой

$$F = \frac{10^{-6}}{9.81} B \frac{I}{2}. \qquad (20)$$

При этом поток магнитной индукции B в направлении оси (рис. 154) может быть принят на поверхности проводника равным, из условий симметрии, половине потока бесконечно длинного проводника, т. е.

$$B = 0.1 \frac{I}{x}. \qquad (21)$$

Подстановка значения B в уравнение (20) дает

$$F = \frac{10^{-7}}{9.81} \frac{I^2}{2} \frac{1}{x} = 0.51 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{x}. \qquad (22)$$

Сила пропорциональна квадрату тока и уменьшается с увеличением x. Полная сила, действующая на длину проводника a, определяется интегрированием

$$F_a = \int_{x=r}^{a} F\,dx = 0.51 \cdot 10^{-8} \ln \frac{a}{r}.$$

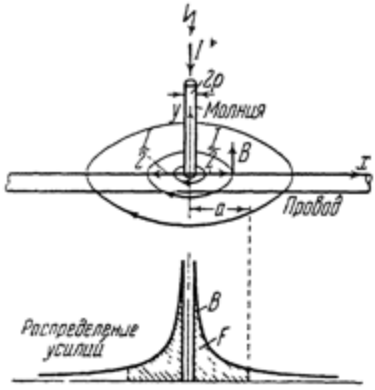


Рис. 154. Распределение магнитного поля при ударе молнии в горизонтальный провод

Усилием, создаваемым полем в канале молнии, пренебрегаем.

При токе $I = 30$ kA и диаметре канала молнии, равном 5 см, удельная сила тяжения вблизи канала получается из формулы.

$$F = 0.51 \cdot 10^8 \left(30\,000^2 : \frac{5}{2}\right) = 1.84 \text{ кг/см}.$$

Сила действует снаружи внутрь и стремится поэтому сжать проводник. При небольших провесах это усилие может резко превышать нормальное расчетное тяжение проводов. Перемещение проводников и в этом случае определяется из соотношения (19).

Упомянем здесь еще о приводимых Араго случаях магнитного воздействия молнии.

«В июле 1681 г. корабль «Квин» находился в сотне миль от мыса Род, как вдруг был поражен молнией. Удар молнии причинил значительные повреждения в мачтах, парусах и пр. Когда же наступила ночь, то оказалось по положению звезд, что из трех компасов, находившихся на корабле, два, вместо того, чтобы указывать, как и прежде, на север, указывали на юг; прежний северный конец третьего компаса направлен был к западу».

«В июне 1731 г. один купец поместил в углу своей комнаты в Уэкфильде большой ящик, наполненный ножами, вилками и другими предметами, сделанными из железа и стали. Ящик этот был приготовлен для отсылки в колонию. Молния проникла в дом именно через тот угол, в котором стоял ящик, разбила его и разбросала все вещи, которые в нем находились. Все эти вилки и ножи, из которых одни представляли следы оплавления, а другие оказались совершенно неповрежденными, сделались сильно намагниченными».

Известно, что Эрстед произвел свой знаменитый опыт, принимая во внимание магнитные действия молнии. Так, Эрстед, описывая свои опыты на лекции, говорит: «На этой лекции я повторил опыт Кантона относительно влияния химических действий на магнитное состояние железа, обратил внимание на перемены,

ЭБ "Научное наследие России"

испытываемые магнитной стрелкой во время грозы, и выразил предположение, что электрический разряд может оказать действие на стрелку, помещенную вне гальванического тока». Таким образом, фактическое повторение явления, многим известного, произвело сенсацию и послужило мощным толчком к быстрому открытию основных законов электродинамики.

d. Фульгуриты

Следует остановиться еще на одном виде действия молнии, заключающемся в том, что при разрядах в землю в ней иногда обнаруживаются спекшиеся стекловидные элементы, нередко имеющие форму трубок. Эти, по образному выражению Вуда, «автографы» молнии в земле имеют наиболее характерный вид в песке, в котором они лучше всего образуются. Однако фульгуриты найдены также и в глинистых и в твердых породах, изверженных и осадочных. Известны андезитовые оплавления на вершине малого Арарата (Абих). В просторечии фульгуриты часто называют чортовыми пальцами. Описания фульгуритов появились уже давно, по крайней мере с 1711 г., однако в литературе неоднократно высказывались сомнения в том, что эти образования—результат ударов молнии. В настоящее же время факт образования фульгуритов от молнии может считаться установленным. Очень обстоятельную работу с подробной библиографией по фульгуритам в 1922 г. опубликовал П. Н. Чирвинский. Приводимые ниже данные взяты из этой работы.

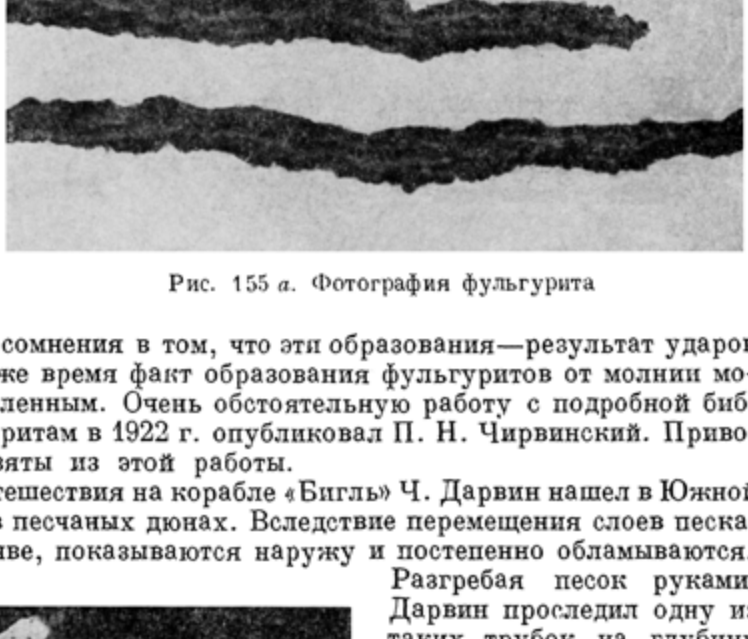


Рис. 155 *а*. Фотография фульгурита

Во время своего путешествия на корабле «Бигль» Ч. Дарвин нашел в Южной Америке фульгуриты в песчаных дюнах. Вследствие перемещения слоев песка, трубки, скрытые в почве, показываются наружу и постепенно обламываются. Разгребая песок руками, Дарвин проследил одну из таких трубок на глубину 60 см; соединив обломки трубок, здесь лежавшие, он получил трубку длиной около 1.6 м. Внутренняя поверхность трубки была остеклованная, гладкая и блестящая.

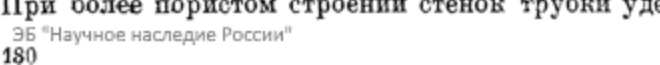


Рис. 155 *б*. Искусственные фульгуриты

Фульгуриты длиной в один метр и больше встречаются часто. Известны трубки длиной в 10 м. Весьма типичный фульгурит, описанный Чирвинским, изображен на рис. 155 *а*. Он имеет ствол длиной около 125.5 см, от которого идут две ветви, одна из них достигает 40 см длины. По внешнему виду фульгурит напоминает вилы. Вес фульгурита 200 г. Удельный вес песчаных фульгуритов, по Кюмбелю, колеблется от 2.35 до 2.46. При более пористом строении стенок трубки удельный вес значительно ниже.

ЭБ "Научное наследие России"

Химический состав песчаных фульгуритов—более или менее чистый кремнезем (91—99%).

В литературе часто описывалось искусственное получение образований, аналогичных фульгуритам. Уже в 1828 г. Бедо, Гашетт и Савар, действуя искрами от сильной батареи на мелко истолченное стекло, помещенное в углублении кирпича, получали трубки. Прибавление поваренной соли, способствующей плавкости стекла, позволяет приготовлять трубки несколько бо́льших размеров—до 30 мм длиной при наружном диаметре 4.5 и внутреннем 2 мм.

В 1868 г. Рольман описал свои опыты получения трубочек в серном цвете, к которому он иногда добавлял железные опилки, окись железа, окись ртути и пр.

Беллаши и Фойтцик в лабораторных условиях при пробое кварцевого песка искрой, несущей большой импульсный ток с амплитудой в десятки тысяч ампер, были получены остеклованные трубки диаметром 10—20 мм при толщине до 3 мм (рис. 155 *b*), весьма похожие на естественные фульгуриты.

е. Разряд в молниеотвод

Весьма важен с практической точки зрения анализ случая поражения молнией высоковольтной линии электропередач. На количественном анализе явления прямого удара молнии в различные элементы высоковольтной системы базируется расчет этих сооружений на грозоупорность. Техника расчетов для разнообразных случаев широко освещена в нашей литературе, и поэтому здесь мы на ней не останавливаемся. Здесь лишь рассмотрим один простой случай, имеющий фундаментальное значение для практики грозозащиты, а именно на случай поражения молнией металлического вертикального стержня.

При поражении разрядом протяженных металлических проводников по ним распространяются электромагнитные волны, законы движения которых описываются в общем виде максвелловскими уравнениями. Принимая для обычных

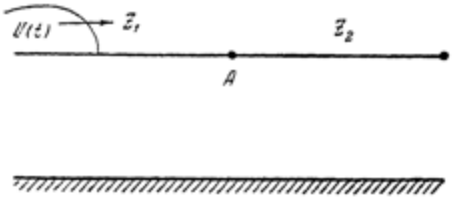


Рис. 156 *a*. Переход волны с линии Z_1 на линию Z_2

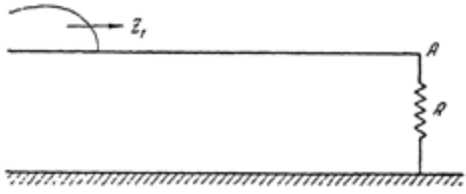


Рис. 156 *b*. Набегание волны по линии Z_1 на R

инженерных расчетов провода без активного сопротивления и утечки, можно базироваться на применении волновых сопротивлений Z, определяемых как отношение волны напряжения к волне тока, распространяющихся по проводам.

Известно, что при прохождении волной какой-либо неоднородности в линии, включенной последовательно или параллельно проводу, имеют место ее отражение и преломление.

Для интересующего нас случая следует напомнить лишь соотношения, существующие при переходе электромагнитной волны с одной линии, обладающей волновым сопротивлением Z_1, на другую, обладающую волновым сопротивлением Z_2 и имеющую практически весьма малую длину, или на точечное активное сопротивление R, включенное в конце протяженной линии. Если обозначить распространяющуюся по проводу с волновым сопротивлением Z_1 волну напряжения через $U(t)$ (рис. 156 *a*), то в провод Z_2 пройдет волна, определяемая формулой

$$U(t)_2 = U(t)_1 \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = k_1 U(t)_1. \qquad (23)$$

При этом от узловой точки A обратно в линию отразится волна, определяемая уравнением

$$U(t)_0 = U(t)_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = k_2 U(t)_1. \qquad (24)$$

ЭБ "Научное наследие России"

Ввиду того, что в коэффициент, стоящий в правых частях (23) и (24), входят лишь постоянные величины, форма проходящей и отраженной волны остается подобной форме падающей волны $U(t)_1$.

В случае набегания волны напряжения по линии Z_1 на активное сопротивление R (рис. 156 *b*), напряжение на конце линии определяется формулой

$$U(t)_2 = U(t)_1 \frac{2R}{R+Z_1} = U(t)_1 k, \tag{25}$$

а напряжение отраженной от конца линии волны—формулой

$$U(t)_0 = U(t)_1 \frac{R-Z_1}{R+Z_1} = U(t)_1 k_0. \tag{26}$$

От полученных уравнений для определения напряжений было бы легко перейти к токовым волнам, однако на практике обычно расчеты ведутся, исходя из анализа действия волн напряжения. Последовательное применение формул (23) и

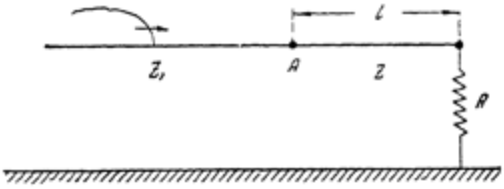


Рис. 156*c*. Переход волны с линии Z_1 на линию Z_2 длиной l, замкнутой на сопротивление R

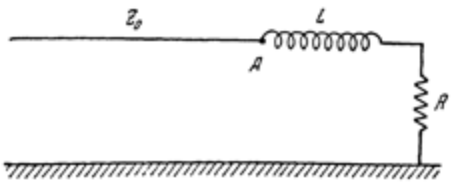


Рис. 156*d*. То же, что и на рис. 156*c*, но линия Z_2 заменена эквивалентной индуктивностью L.

(26) позволяет проследить процесс повторных отражений при падении электромагнитной волны на какую-либо систему проводов.

На основе сказанного рассмотрим изменение потенциала в системе, изображенной на рис. 156 *c*, в точке A, при падении по проводу Z_1 (имеющему бесконечную длину) волны с косоугольным фронтом, длительностью T и амплитудой U_0, на линию Z_2, длиной l, замкнутую в конце на землю через активное сопротивление R (имеющее практически нулевую длину). Волна, прошедшая из линии Z_1 в линию Z_2, дойдет до точки B, и часть ее отразится обратно в линию Z_2. Отраженная волна после набегания на узел A даст новую отраженную волну, которая, в свою очередь, отразится в точке B, и т. д. Суммирование отраженных и проходящих волн в точке A может быть произведено либо графическим методом сетки Маундера-Бьюли, либо аналитически, учитывая сдвиг по времени t отдельных волн, за счет конечного t, требующегося на пробег волн по длине l.

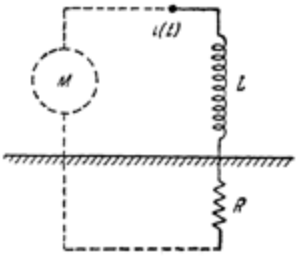


Рис. 156 *e*. Расчетная схема замещения молниеотвода, пораженного молнией

В окончательном виде изменение напряжения в точке A для момента времени $t=T$ (т. е. тогда, когда падающая волна достигает своего максимального значения) определится уравнением

$$U = \frac{gU_0}{1-D'H'}\left[D - \frac{\tau}{T}\frac{D'H}{1-D'H'}\right], \tag{27}$$

где

$$g = \frac{2Z_2}{Z_2+Z_1}, \qquad D = \frac{2R}{R+Z_2}, \qquad D' = D-1,$$

$$H = \frac{2Z_1}{Z_1+Z_2}, \qquad H' = H-1, \qquad \tau = \frac{2l}{v},$$

ЭБ "Научное наследие России"

где v — скорость движения волны по проводу Z_2. Для частного случая, когда

$$Z_1 = 300\,\Omega, \quad Z_2 = 200\,\Omega, \quad f = 10\,\Omega, \quad T = 4\,\mu S,$$
$$l = 30\text{ м}, \quad v = 3 \cdot 10^8\text{ м/сек}, \quad U_0 = 3 \cdot 10^7 \text{V},$$

из формулы (27) получаем

$$U = 2\,900\text{ kV}.$$

Другим методом решения задачи об установлении потенциала в точке A является замена величины Z_2 эквивалентной самоиндукцией L, определяемой из соотношения $L = \frac{Zl}{v}$ (рис. 156 *d*). Пользуясь правилом Петерсена[1], решение задачи ведем по схеме, изображенной на рис. 156, *e*.

Ввиду того, что электрическая цепь, состоящая из $Z_1 = Z_0$, L и R, включается на $2U$, имеем для тока в цепи выражение

$$I = \frac{2U}{Z_0 + Z_k}, \tag{28}$$

где Z_k — комплексное сопротивление, обусловленное самоиндукцией L и активным сопротивлением. Для единичного толчка напряжения ($U = 1$) имеем на основании правил операционного исчисления:

$$Z_k = L_p + R$$

и далее

$$U_A = \frac{2(L_p + R)}{Z_0 + (L_p + R)} \cdot 1 = \left[2\frac{p}{m+p} + \frac{2R}{L}\frac{1}{p+m} \right] \cdot 1 \tag{29}$$
$$m = \frac{Z_0 + R}{L}.$$

Решение этого уравнения дает

$$U_A = \frac{2R}{Z_0 + R}\left[1 + \frac{Z_0}{R} e^{-mt} \right]. \tag{30}$$

Для нахождения потенциала в точке A, когда падающая волна имеет косоугольный фронт, применяем интеграл Дюамеля, который может быть написан в форме:

$$U_A = U(0)\varphi(t) + \int_0^t \varphi(t-\tau)\frac{dU}{d\tau}\,d\tau. \tag{31}$$

В данном случае $U = at$ $\left(\text{(где } a = \frac{U_0}{T} \right)$,

поэтому U $(0) = 0$ и, кроме того,

$$\varphi(t-\tau) = \frac{2R}{Z_0 + R}\left[1 + \frac{Z_0}{R} e^{-m(t-\tau)} \right] \cdot 1,$$
$$\frac{dU}{a\tau} = \frac{d(a\tau)}{d\tau} = a.$$

Решение (31) дает:

$$U_A = \frac{U_0}{T}\frac{2R}{R + Z_0}\left\{ t + \frac{Z_0 L}{R(Z_0 + R)}\left[1 - e^{-\frac{Z_0 + R}{L} t} \right] \right\}. \tag{32}$$

---

[1] Это правило формулируется следующим образом: если электромагнитная волна некоторой формы движется по проводу с волновым сопротивлением Z и набегает на какую-либо комбинацию сопротивлений, состоящую из концентрированных R, Z и C и линии с распределенными постоянными, обладающими волновыми сопротивлениями Z_1, Z_2..., то токи и напряжения в этой системе даются уравнениями цепи, в которой на место волновых сопротивлений Z_1, Z_2,...Z, включаются омические сопротивления $R=Z$, $R_1=Z_1$, $R_2=Z_2$..., и вся система (в остальном без изменения) включается на напряжение, равное удвоенному напряжению падающей волны.

Максимум U_A наступает при $t=T$

$$U_A = U_0 \frac{2R}{R+Z_0}\left\{1+\frac{Z_0 L}{TR(R+Z_0)}\left[1-e^{-\frac{Z_0+R}{L}T}\right]\right\}. \qquad (33)$$

Если сделать по формуле (33) подсчет при значениях букв, уже употреблявшихся в предыдущем примере, то найдем,

$$U_A \approx 288 \text{ kV},$$

что практически совпадает с найденной выше величиной U_A. (При этом, как показывает расчет, в момент $t=T$ через опору течет ток $I=191$ kA.)

Таким образом, нами обоснована возможность замены в такого рода расчетах протяженного волнового сопротивления концентрированной самоиндукцией. Такая замена весьма сильно упрощает анализ вопросов изменений потенциала и связанных с этим расчетов.

Касаясь теперь случая поражения разрядом молниеотвода, укажем, что в отличие от применявшегося до настоящего времени метода расчета, согласно которому молния принималась за постоянное волновое сопротивление Z_0, по которому на рассматриваемую систему происходит падение волны напряжения[1], на основании соображений, изложенных на стр. 141 рекомендуется другой метод расчета, схема которого изображена на рис. 156 *e*.

В этой схеме заданным является не волна напряжения, падающая по «каналу молнии», а волна тока, проходящая через элементы схемы L и R и замыкающаяся через токи смещения (на рис. 156 *e* в условном виде через генератор M). Определение потенциала в точке A производится решением уравнения, написанного для случая прохождения тока заданной формы через L и R

$$U_A = iR + L\frac{di}{dt}. \qquad (34)$$

Для косоугольной волны тока, имеющей амплитуду 191 kA (равную той что была найдена в предыдущем примере), и при применявшихся в предыдущих расчетах значениях

$$T=4\,\mu S, \quad R=10\,\Omega, \quad L=2\cdot 10^{-5} H$$

получаем $(U_A)_{t=T}=2870$ kV, что практически совпадает с величиной, определенной по формуле (33).

Найденное значение служит для определения допустимых расстояний при установке молниеотводов от окружающих сооружений или проводов линий передач.

f. Число разрядов в линии электропередач

Весьма важно для создания грозоупорных линий электропередач иметь данные о вероятном числе поражений линий молниями. Изучение этого вопроса, предпринятое Вальдорфом с помощью ферромагнитных регистраторов на пенсильванских линиях с рабочим напряжением от 66 до 220 kV, показало, что число разрядов на 160 км линии в течение года колеблется от 59 до 232. Максимальные вариации для различных линий за пятилетний период происходят в пределах 85—232 разряда при средних вариациях; изменений среднего числа поражений для каждой линии за пятилетний период происходило от 90 до 165. Среднее взвешенное число поражений линий длиной 160 км в течение года равно $N=120$. Эти линии расположены в местности с изокероническим уровнем 35—40. С учетом того, что некоторые регистрации происходили под влиянием индуцированных токов, приведенная цифра, согласно с данными Вальдорфа, уменьшится до 112. Приведение местности к стандартному изокероническому уровню в 30 грозовых дней приводит к величине $N=96$ или округленно $N=100$. Существенно указать на то, что линии с рабочим напряжением от 66 до 220 kV,

[1] При этом схема расчета совпадает с той, что изображена на рис. 156 *b*, причем Z_1 и является каналом молнии.

ЭБ "Научное наследие России"

не защищенные тросом и проходящие в местностях с изокероническими постоянными от 30 до 55, дают среднее взвешенное число выключений за год на 160 км линии—30—35.

Не все разряды в линию вызывают перекрытия, и не все перекрытия производят отключения. Так, для бестросового участка 220 kV линии Белл указывает отношение между числом разрядов, вызывающих перекрытия, и числом разрядов, вызывающих отключение, равным K = 1.5. Для 132 kV линии, имеющей защитный трос, Гросс указывает величину K = 1.27. Оценка вероятного среднего отношения между числом выключений и разрядов на линии без защитных тросов (с рабочим напряжением 66—220 kV) дает цифру около 60 на 160 км линии в год, что близко к вышерассмотренным цифрам.

g. Физиологическое действие токов молнии

Воздействие токов на живые организмы изучается с давних пор. Известны работы, датированные 1747 г. Особенное развитие приобрели исследования в области воздействия напряжений промышленной частоты. Этот вопрос имеет обширную литературу.

Изучение вопроса о воздействии токов на живые организмы наталкивается на большие трудности ввиду взаимодействия целого ряда факторов, из которых основные: характер электрической цепи, ее напряжение, сопротивление организма в целом, величина тока, путь тока в организме и длительность воздействия тока.

Каждый из этих факторов может меняться весьма широко, что осложняет изучение названной задачи. Например, сопротивление сухой кожи человека колеблется в пределах от 70 до 100 тыс. Ω на 1 см², увлажненная кожа снижает величину сопротивления в сотни раз. Свойство кожи весьма сильно изменяет само термическое действие протекающих через нее токов. Благодаря этому невозможно установить смертельно опасное для организма напряжение. Опасность определяется величиной тока, протекающего через организм. Однако и предельно опасная величина тока также колеблется в весьма широких пределах. Считают, что смертельным является ток силой свыше 0.1 А; тем не менее токи, превышающие эту величину в десятки и сотни раз, иногда переносятся безнаказанно. Это явление находит свое объяснение в чисто физиологических воздействиях токов на важнейшие органы.

Ток малой величины, протекая через сердце, может нарушить нормальный ритм его сокращений и ввести его в состояние так называемой вентрикулярной фибрилляции (учащенного сокращения). Циркуляция крови прекращается, и обычно наступает смерть, ибо сердце само по себе редко восстанавливает нормальное биение.

Большой ток производит сильное сокращение мускулатуры вообще и сердца в частности, в силу чего после кратковременного воздействия тока сердце возобновляет свое действие автоматически.

Весьма подвержен воздействиям токов мозг. (При казни на электрическом стуле один электрод поэтому прикладывается к голове.) Известны, однако, случаи, когда серьезные последствия наблюдались при поражении токами, не прошедшими через центральные органы. В таких случаях ток воздействует не на центральную нервную систему, а действие его обусловлено внезапным шоком и изменением вазомоторной системы.

Ввиду двоякого действия токов на организм применяются два метода «оживления» жертвы, а именно прекращение фибрилляции сердца и искусственное дыхание при нервном шоке. Второй метод пользуется наибольшим распространением и хорошо известен, в то время как первый не вышел из стадии лабораторных исследований. Идея этого метода заключается в том, что на сердце, находящееся в состоянии фибрилляции, производится воздействие током значительной силы, вызывающим сокращение его мускулатуры и кратковременную остановку, после которой следует восстановление его нормальных функций.

Широко практикующийся среди населения метод «оживления» пораженных молнией людей временным закапыванием пострадавшего в землю скорее может

ЭБ "Научное наследие России"

принести вред, чем пользу. Действительно, в то время как человек нуждается в искусственном дыхании и усиленном притоке воздуха к телу, засыпание землей препятствует этому и может в случае открытых ранений вести к загрязнениям.

Фактор длительности воздействия тока на организм имеет особо важное значение. Опыт показывает, что уменьшение времени действия тока ведет к уменьшению силы воздействия. С рассматриваемой точки зрения большой интерес представляют данные о наименьших значениях смертельного тока в зависимости от длительности его воздействия, полученные при экспериментировании на животных. Кривая рис. 157 иллюстрирует результаты многочисленных опытов. Как видно, наименьшее значение смертельно опасного тока возрастает при уменьшении времени его воздействия. Токи молнии относятся к весьма кратковременным явлениям, ибо наиболее значительные по величине токи, всникающие при разряде, существуют лишь десятые или стотысячные доли секунды (импульсные воздействия).

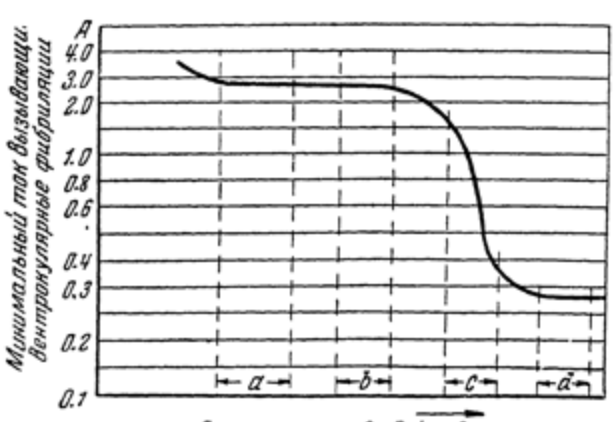


Рис. 157. Эффект длительности воздействия смертельного тока:

a—время воздействия 0.03 сек.; b—время воздействия 0.10—0.12 сек.; c—время воздействия 0.47 сек.; d—время воздействия 3.0 сек.

Специфика импульсных воздействий на организм почти не изучена, и поэтому не имеется материалов, которые могли бы быть положены в основу расчетов, связанных с техникой безопасности.

Следует упомянуть еще одно весьма своеобразное свойство молнии—оставлять на коже пораженных ею людей отпечатки находящихся вблизи предметов. В литературе можно найти описание случаев, когда на различных частях тела пораженных людей находили отпечатки монет, цветов, листьев, ложек и пр., а также четко вырисованные фигуры типа лихтенберговских.

2. ИНДУЦИРУЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ МОЛНИИ

Воздействия грозовых разрядов могут проявляться в индукции электростатической и электромагнитной.

Ввиду важного значения, которое эти проявления молнии имеют в технике, кратко рассмотрим оба вида индукции в отдельности.

а. Электростатическая индукция

Определение величины индуцированных напряжений может быть сделано лишь в принципиальном виде, ибо обычно для практических расчетов остаются неизвестными местные условия, от которых зависит амплитуда и форма образующихся волн.

Принятый метод расчета индуцированных напряжений на изолированной линии, обладающей конечной величиной утечки на землю, заключается в следующем. Предположим, что к месту расположения линии приближается туча, заряженная, например, положительным электричеством. Через электрическую индукцию заряд тучи вызывает появление отрицательного заряда на проводе, в то время как положительный заряд уходит в стороны и, растекаясь по линии, постепенно стекает в землю через различные сопротивления (утечка по изоляторам, заземление нейтрали и т. п.).

Если туча проносится дальше и постепенно удаляется от линии, то заряды на проводе начинают медленно растекаться вдоль линии, и весь процесс заканчи-

ЭБ "Научное наследие России"

вается без всяких внешних проявлений, ибо все время потенциал провода по отношению к земле остается равным нулю. Действительно, провод через утечки имеет соединение с землей, и, следовательно, его потенциал не отличается от нуля.

Под действием заряда тучи провод приобретает некоторый потенциал, который, вообще говоря, равен

$$\int g_x \, dx = U, \tag{35}$$

где g_x—градиент поля в точке, лежащей между проводом и поверхностью земли на расстоянии x от последней. Если для упрощения принять, что туча дает однородное электростатическое поле между своим основанием и землей, то градиенты по всей высоте H (H—высота тучи над уровнем земли) будут одинаковыми и равными

$$\frac{U_0}{H} = g,$$

В этом случае потенциал провода будет равен

$$U = gh,$$

где h—высота провода над землей. Что касается численных градиентов потенциалов при грозе, то как максимальную измеренную величину можно указать

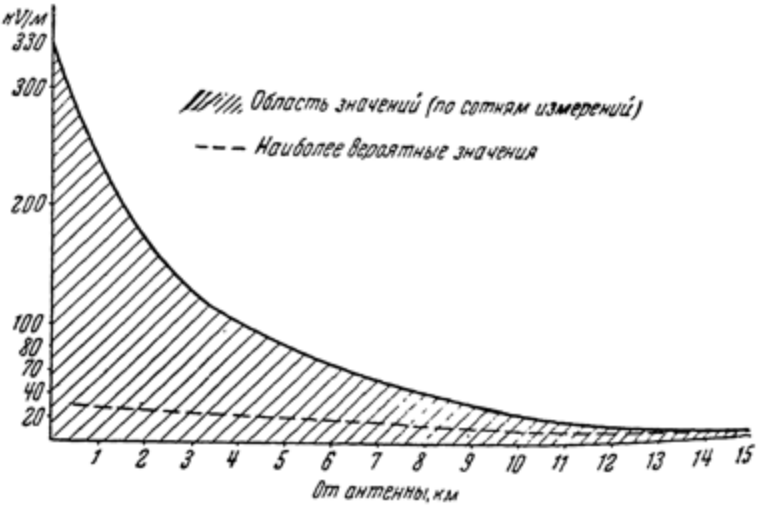


Рис. 158. Градиенты электрического поля, измеренные на антенне

330 kV/м. Ряд измерений градиентов, проделанных на антеннах, представлен на рис. 158, где по оси ординат отложены измеренные киловольты, а по оси абсцисс—удаление антенны от разряда.

Когда на проводе появляется заряд, он создает потенциал провода по отношению к земле, который может быть определен из уравнений Максвелла, имеющего для одного провода такой вид:

$$U_1 = \alpha_{11} Q_1. \tag{36}$$

Для того чтобы провод сохранил потенциал нуль, необходимо, чтобы

$$U + U_1 = 0, \quad \text{или} \quad U_1 = -U.$$

Следовательно, в том случае, когда существует заряд тучи и индуцированный ею заряд на проводе, потенциал провода от действия тучи U компенсируется потенциалом от заряда провода. Предположим теперь, что когда туча находилась над линией, произошел разряд ее на землю, и заряд мгновенно исчез. Вместе с исчезновением заряда тучи исчезает и поле, им создаваемое, а следовательно, исчезает потенциал провода $U = gh$, заряд же провода не может сразу

ЭБ "Научное наследие России"

исчезнуть (утечки в линии слишком незначительны для быстрого отвода заряда в землю). Таким образом, потенциал U остается теперь нескомпенсированным и проявится в линии как некоторое напряжение по отношению к земле. Но в следующий же момент после заряда тучи заряд на проводе должен начать двигаться, ибо он теперь сделался свободным. Это движение будет происходить со скоростью, определяемой константами линии (близкой к скорости света). В момент разряда тучи на проводе существует некоторое распределение потенциалов, которое обусловлено на каждом его элементе величиной заряда на этом элементе и его емкостью по отношению к земле. Будем называть это распределение первоначальным. Известно, что электромагнитное состояние на проводе состоит из пары одинаковых волн напряжений и пары волн токов, которые движутся со скоростью $c = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (для идеальной линии без потерь) в противоположных направлениях.

Нахождение первоначального распределения зарядов на проводе—$f(x)$ для конкретных условий расположения тучи, ее размеров и распределения заряда может быть сделано аналитически.

Так, например, кривая распределения заряда или (что то же, в случае его мгновенного освобождения) первоначальное распределение потенциала на линии высотою h при существовании заряженной сферы с центром на высоте $H \gg h$ выражается формулой:

$$U_x = g_x h = \frac{2QHh}{\sqrt{(H^2 + x^2)^3}} = \frac{2QHh}{(H^2 + x^2)^{3/2}}. \qquad (37)$$

Распределение заряда вдоль линии, получающееся до начала разряда, имеет характер колоколообразной кривой с максимумом под центром тучи. Количественное определение величины индуцированного на проводе при разряде молнии напряжения может быть произведено при учете следующих факторов:

1) распределения заряда тучи и его величины;

2) геометрического расположения тучи и провода (высота грозовой тучи над землей);

3) напряженности электрического поля между тучей и землей;

4) закона и времени разряда тучи.

Эти факторы связаны между собой, и, выбирая произвольно и одновременно несколько из них, можно притти к абсурду.

Разобранный пример относился к случаю мгновенного разряда тучи. Однако в действительности процесс разряда, как известно из предыдущего, является сложной функцией времени (см. главу IV).

Если разряд тучи происходит постепенно, то и освобождение зарядов в линии также является функцией времени. В этом случае форма блуждающей волны не будет повторять собой форму первоначального распределения заряда, а будет являться функцией как распределения зарядов, так и закона его освобождения.

Математическая задача нахождения формы блуждающей волны по известному первоначальному распределению связанного заряда и закону его реализации (освобождению) может быть решена методом суперпозиции отдельных решений для единичных волн, $f(x \pm ct)$, распространяющихся в противоположные стороны и следующих друг за другом через промежутки времени Δt.

Каждая единичная волна получается от разряда $Q = 1$; n единичных разрядов, следующих друг за другом через промежутки времени Δt, дают полный разряд за время $n\Delta t = T$.

Если промежуток времени стремится к нулю, то потенциал провода определяется интегралом:

$$U = \int_0^t \{f[x + c(t-\tau)] + f[x - c(t-\tau)]\} \frac{\partial F(\tau)}{\partial \tau} d\tau. \qquad (38)$$

Аналитическое решение уравнения (38) возможно лишь при условии, если можно произвести интегрирование подинтегральных функций. Однако графическое решение выражения возможно для любого случая.

ЭБ "Научное наследие России"

В качестве примера применения аналитического метода в виде уравнения найдем максимальное значение волны, образующейся на проводе при разряде тучи. Форму тучи принимаем шарообразной с зарядом Q, равномерно распределенным по поверхности. Пусть центр тучи находится на высоте H, высота линии—h. Если бы единица заряда тучи исчезла мгновенно на проводе в точке p, на расстоянии x от точки, находящейся непосредственно под центром тучи, то появился бы потенциал U_x, величина которого была определена уравнением (37).

Положим, что разряд тучи происходит равномерно, т. е. $Q=It$, где I—сила тока, постоянная по величине. По уравнению (37) решение для U_x представляет собой значение функций $f(x\pm ct)$ в момент $t=0$. Для какого-либо другого момента времени t мы получим:

$$U_t=\frac{1\cdot Hh}{\{H^2+[x+ct]^2\}^{3/2}}+\frac{1\cdot Hh}{\{H^2+[x-ct]^2\}^{3/2}},$$

$$f[x+c(t-\tau)]+f[x-c(t-\tau)]=\frac{Hh}{\{H^2+[x+c(t-\tau)]^2\}^{3/2}}+\frac{Hh}{\{H^2+[x-c(t-\tau)]^2\}^{3/2}},$$

а $\frac{\partial F(t)}{\partial t}$ здесь будет равно $\frac{\partial(It)}{\partial t}$, т. е. $\frac{\partial t}{\partial t}I=I$ (ибо $I=\text{const}$). На основании этого выражение (38) напишется так:

$$U_t=Hh\int_{t=0}^{t=\tau}\left\{\frac{1}{\{H^2+[x+c(t-\tau)]^2\}^{3/2}}+\frac{1}{\{H^2+[x+c(t-\tau)]^2\}^{3/2}}\right\}Idt. \qquad (39)$$

Интегрируя это выражение по частям и беря пределы от $t=0$ до $t=T$, найдем

$$U_t=\frac{Ih}{cH}\left[\frac{x+cT}{\sqrt{H^2+(x+cT)^2}}-\frac{x-cT}{\sqrt{H^2+(x-cT)^2}}\right]; \qquad (40)$$

для $x=0$ в момент окончания разряда T найдем:

$$U_T=\frac{2ITh}{H\sqrt{H^2+c^2T^2}}=g\alpha. \qquad (41)$$

Эта формула дает максимальную величину потенциала на проводе при разряде. Для разряда тучи, находящейся на расстоянии d от линии, величину H^2 в формуле (41) заменим величиной (H^2+d^2), тогда для точки $x=0$ получим формулу для определения максимального потенциала на проводе при данных условиях разряда:

$$U_T=\frac{2Qh}{\sqrt{H^2+d^2}\sqrt{H^2+d^2+c^2T^2}}9\cdot10^{11}. \qquad (42)$$

U_T—в вольтах, H, h, d—в см, а скорости c—в см/сек.

Пусть $H=1640$ м, высота линии $h=16.4$ м, $Q=20$ C, время разряда $t=100$ μS $=10^{-4}$ S. Таким образом, ток, текущий во время разряда, будет равен 200 000 А. Подставляя эти значения в формулу (42) и принимая $c=3\cdot10^{10}$ см/сек., получим максимальное напряжение на проводе, непосредственно под центром тучи, $U_T=120\,000$ V. Если линия находится на расстоянии $d=1.5$ км, то соответственный подсчет по формуле (42) дает $U_T=85\,000$ V.

Из приведенных подсчетов видно, что электростатическая индукция при учете времени разряда тучи не создает напряжений, величина которых была бы опасна для линий с рабочим напряжением 110 kV и выше. Для линий средних напряжений, порядка 30 kV и более низких, индуцированные напряжения могут быть опасными и вести к перекрытию изоляции в системе.

Вопрос о предельных величинах индуцированных напряжений до сих пор остается невыясненным. Подстановка в уравнения меньших значений высот

ЭБ "Научное наследие России"

тучи H ведет к увеличению индуцированных напряжений. Учет реального развития процесса разряда показывает, что действительно за счет распределения заряда тучи в лидерном канале эффективная высота H_e, на которой можно сосредоточить заряд, равный заряду тучи, распределенному лидером, будет значительно меньше H.

Имея в виду лидерный разряд, можно заключить, что напряжение на проводе будет меняться так, как это было описано в главе III. Сначала на проводе напряжение возрастает медленно, что соответствует развитию лидера. Затем напряжение нарастает быстро, что находится в связи с нейтрализацией зарядов в главном канале. Вид индуцированной волны изображен на рис. 159.

Качественное рассмотрение процесса индукции в этом случае может быть сделано в следующем виде. При распределении заряда в канале лидера напряженность поля у провода изменилась на ΔE_1. При нейтрализации заряда лидера главным каналом изменение напряженности происходит на величину ΔE_2. Измерения показывают, что $\frac{\Delta E_1}{\Delta E_2}$ меняется в пределах $1-6$ и более.

Таким образом, при определенных условиях разряда величина ΔE_2 может во много раз превышать индукцию, создаваемую лидерным процессом. Если $H = H_e \ll cT$ и $H > d$, формула (42) дает

$$U_{\max} \approx \frac{2h}{cH} I,$$

или, полагая $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек. и переходя к практическим единицам:

$$U_{\max} \approx 60 \frac{h}{H} I \text{ V}. \qquad (43)$$

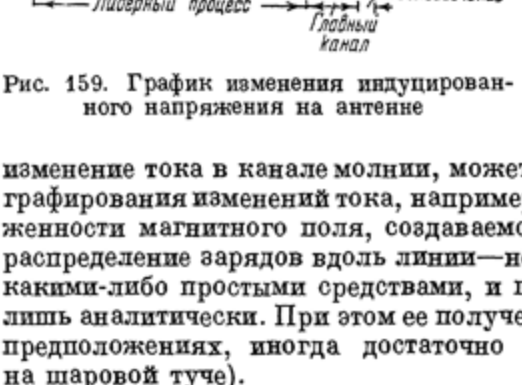


Рис. 159. График изменения индуцированного напряжения на антенне

Экспериментальная проверка формулы (38) требует знания двух функциональных зависимостей: $F(t)$ и $f(x)$. Зависимость $F(t)$, характеризующая изменение тока в канале молнии, может быть установлена при помощи осциллографирования изменений тока, например, методом регистрации изменений напряженности магнитного поля, создаваемого током. Зависимость $f(x)$—начальное распределение зарядов вдоль линии—не может быть определена опытным путем какими-либо простыми средствами, и потому эта функция может быть введена лишь аналитически. При этом ее получение будет базироваться на определенных предположениях, иногда достаточно абстрактных (например, базирующихся на шаровой туче).

С целью проверки соотношений (38), Нориндер предпринял регистрацию разрядов молнии при помощи катодных осциллографов, которыми одновременно записывались изменения по времени напряженности магнитного и электрического полей, создаваемых молнией. На основании полученных записей и определенного расстояния между молнией и регистрирующими приборами определение эффективности упомянутой формулы производилось следующим образом. Интегрированием осциллограммы (рис. 160, *а*), дающей зависимость $\frac{dI}{dt}$ от времени t, определяется зависимость изменения количества электричества тучи от времени (рис. 160, *б*). Согласно уравнению, волна напряжения в линии образуется как бы отдельными этапами, благодаря чему аналитическое построение возможно производить методом последовательных интервалов. В своих расчетах Нориндер исходил из тучи шарообразной формы. Сопоставление результатов расчетов, произведенных Нориндером, с полученными им осциллограммами индуцированного напряжения, по его данным, достаточно удовлетворительно.

Однако все же ясно, что этот вывод не может быть распространен на все случаи электрической индукции при возможном разнообразии условий разряда.

Частота возникновения грозовых перенапряжений на линиях электропередач. Число зарегистрированных с помощью клидонографов атмосферных перенапряжений на линиях элект-

ЭБ "Научное наследие России"

ропередач с рабочим напряжением от 33 до 220 kV, расположенных в восточных частях США, колеблется в пределах 15—100 в год. Эти линии расположены в районах с изокераническим числом 25—40. Измерительные клидонографы были расположены на концах линий и так как волны, возникающие на расстоянии больше 30 км от прибора, при движении затухают до величины, меньшей предела регистрации клидонографом, вышеназванные данные приводят к числу волн от 75 до 500 на 160 км линий в год. Как показали исследования, выполненные ферромагнитными регистраторами, число прямых ударов в линии этого класса напряжений, расположенные в местностях с изокераническим числом 25—40, достигает 50—250 на 160 км линий в год, со средним числом 100 (глава VII, f). Таким образом, клидонографические данные показывают, что приблизительно половина волн перенапряжения вызывается прямыми ударами молнии. Так как удары, индуцирующие напряжение, примерно одинаковы с ударами, поражающими линию, и так как линия притягивает разряды только из узкой области смежной с ней, разряды, индуцирующие перенапряжение, должны поражать землю вблизи линий передач. Это было подтверждено наблюдением над разрядом, поразившим землю на расстоянии 65 м от линии и 500 м от регистрирующих приборов, установленных на этой линии: ни катодный осциллограф, ни клидонограф не дали регистрации.

Индуцированное напряжение редко превышает 500 kV, и поэтому значительные перенапряжения с амплитудой 800—1200 kV, зарегистрированные клидонографами, следует считать появившимися от прямых ударов.

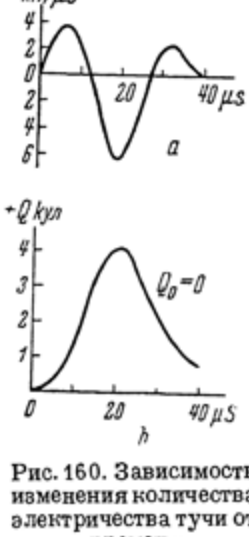


Рис. 160. Зависимость изменения количества электричества тучи от времени

b. Электромагнитная индукция

В общем виде напряженность (H) магнитного поля, создаваемая током молнии в какой-либо точке пространства в момент t, может быть вычислена на основании уравнения для диполя:

$$H = -\frac{1}{c}\frac{\partial^2 P}{\partial t\,\partial R}, \qquad (44)$$

где c—скорость света, P—численная величина вектора Герца.

Как известно, решение приведенного уравнения, для случая гармонического колебания тока в диполе, приводит к двучленному выражению $H = \frac{A}{R^2} + \frac{B}{R}$.

При анализе выражения для H необходимо различать зону вблизи диполя, т. е. такую, где расстояние от него (R) мало по сравнению с его длиной волны (λ), и зону, удаленную от вибратора, где $R \gg \lambda$. Область больших R, называемая волновой зоной, характеризуется тем, что в ней напряженности электрического и магнитного полей численно равны друг другу и убывают обратно пропорционально первой степени расстояния от диполя.

Эта зона представляет собой интерес для исследования радиопомех.

В «близкой» зоне величины H могут достигать больших значений, в силу чего влияние молнии может быть замеренным в сильноточных и высоковольтных системах. Для строгого анализа уравнения (44) необходимо, чтобы R было значительно больше длины осциллятора (l) для возможности считать его диполем. Обоим условиям можно удовлетворить лишь тогда, когда $l \ll \lambda$.

В реальных условиях молнию нельзя однако рассматривать как диполь.

При решении различного рода задач приходится исходить из ряда разных условий и ограничений. Так, при определении напряженности магнитного поля, создаваемого каналом молнии длиной h с установившейся вели-

ЭБ "Научное наследие России"

чиной тока на расстоянии R от его оси, можно исходить из стилизованного вида тучи и распределения токов, показанных на рис. 161, *а* и *b*.

По сечению диаметром d течет ток I канала молнии, а вся остальная площадь, занятая полем плоского конденсатора туча—земля, заполнена током смещения, замыкающим ток I равным ему по величине. Силовые линии магнитного поля молнии представляют собой концентрические окружности с центром на оси канала. Величина напряженности поля в какой-либо точке пространства определяется линейным интегралом

$$\oint H\,dx = 4\pi \sum I. \tag{45}$$

Исходя из симметрии поля при бесконечной длине канала, можно написать

$$H = \frac{2\sum I}{x},$$

где x — расстояние данной точки от оси канала.

Напряженность H слагается из действия токов—текущего в канале молнии, и того тока смещения, который течет в пределах круга с радиусом x. Первая составляющая напряженности, как легко видеть, определяется выражением

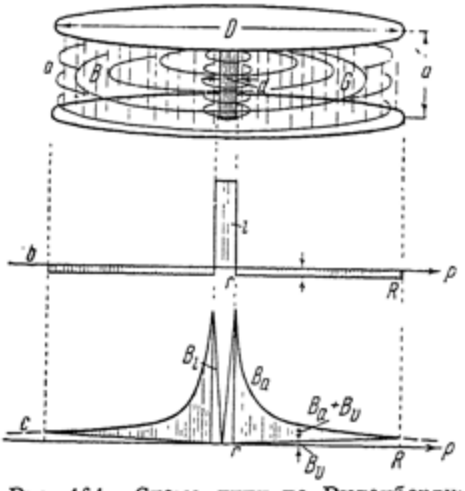


Рис. 161. Схема тучи по Рюденбергу:
а, *b*—распределение токов между тучей и землей; *с*—распределение напряженности магнитного поля между тучей и землей

$$H' = \frac{2I}{x},\ \text{Эрстед}, \tag{46}$$

вторая

$$H'' = -\frac{2Ix}{R^2}. \tag{46а}$$

Знак минус здесь взят из-за обратного направления токов смещения. Таким образом,

$$H = H' + H'' = \frac{2I}{x} - \frac{2Ix}{R^2} = 2I\left(\frac{1}{x} - \frac{x}{R^2}\right). \tag{47}$$

Распределение напряженности показано на рис. 161, *с*. При $x=R$, т. е. на краю цилиндрического пространства, ограничивающего конденсатор, напряженность поля равна нулю. Магнитная индукция, следовательно, за пределы радиуса тучи, а точнее за пределы пространства, охваченного электрическим полем тучи, не распространяется.

При практических расчетах магнитного влияния, имеющего наибольшее значение вблизи канала молнии, с действием токов смещения можно не считаться. В этом случае схема расчета упрощается, ибо необходимо рассматривать влияние лишь одного тока I.

Примером подсчета такого влияния является определение э. д. с., наводимой током молнии, поражающей опору, в измерительной рамке регистратора (см. главу II).

Особо следует отметить факт постепенного продвижения волны тока по каналу молнии (вернее, лидера), что в конечном итоге приводит к замедлению нарастания H в данной точке. Действительно, даже если волна тока I, поднимающегося по каналу со скоростью v, имеет прямоугольный фронт, в какой-либо точке пространства над землей напряженность магнитного поля, соответствующая амплитудной величине тока I, достигает конечного значения через некоторое время t, что, без учета этого обстоятельства при регистрации осциллографом, создает впечатление о пологом фронте волны тока.

Одним из случаев, когда необходимо учитывать отмеченные обстоятельства, является расчет величины э. д. с., наведенной в линию, параллельную

ЭБ "Научное наследие России"

земле, при ударе молнии вблизи провода P_2 (рис. 162). Максимальная величина индуцированной э. д. с. имеет место при наибольшей скорости изменения тока молнии, т. е. в течение фронта токовой волны. Оценивая длительность фронта в T и приписывая среднюю скорость движения токовой волны по каналу в течение этого времени, равной v, установим, что длина канала достигает величины $h = vT$. Примем далее, что провод удален от молнии на расстояние (a).

Величина напряженности магнитного поля в точке P_0 (в середине между проводом P_2 и землей P_1) определится интегралом:

$$H = \int_{-h_0/2}^{h_0/2} \frac{I \sin \alpha}{4\pi R^2}\, dh. \tag{48}$$

Принимая во внимание рис. 162, находим после преобразований:

$$H = \frac{J}{2\pi a} \frac{L}{\sqrt{L^2 + 4a^2}}. \tag{49}$$

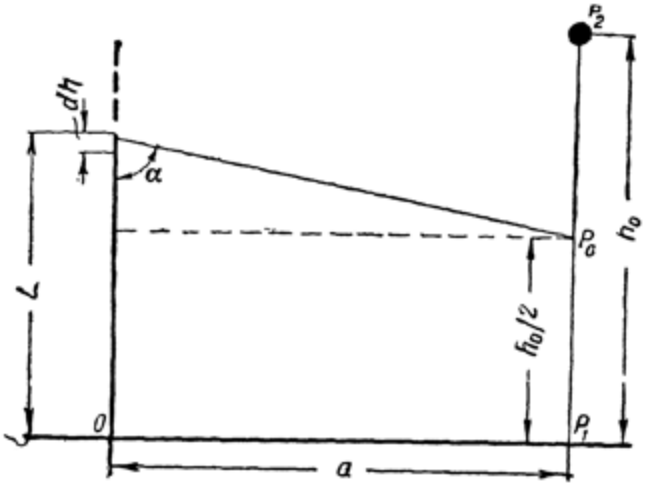


Рис. 162. Схема для расчета электромагнитной индукции молнии на горизонтальный провод.

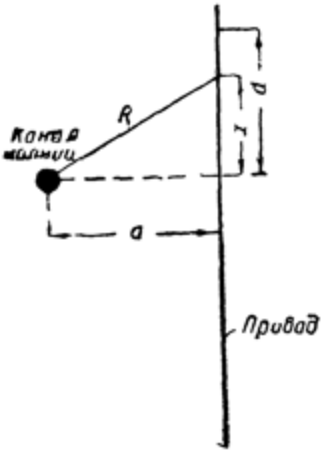


Рис. 163. То же, что на рис. 162 (план)

Коэффициент $\frac{L}{\sqrt{L^2 + 4a^2}}$ указывает на уменьшение H в зависимости от длины канала. Величина H обусловлена положением точки P_0 на линии $P_1 - P_2$. Среднее значение H на этой линии близко к

$$H_{ср} = \frac{I}{2\pi a} \frac{L}{\sqrt{2L^2 + 4a^2}}. \tag{50}$$

Магнитный поток, пронизывающий под углом 90° плоскость проводника, при интегрировании по длине провода до расстояния d от его середины (см. рис. 162,b) определяется интегралом:

$$\Phi = \int_0^d H'_{ср} \mu h_0 \cos \varphi\, dx, \tag{51}$$

где

$$H'_{ср} = \frac{I}{4\pi R} \frac{L}{\sqrt{2L^2 + 4R^2}}, \quad \cos \varphi = \frac{x}{R}$$

ЭБ "Научное наследие России"

и, следовательно,

$$\Phi = \int_0^d \frac{I\mu\, h_0\, L\, dR}{4\pi\, 2R \sqrt{\frac{L^2}{2} + R^2}} = -\frac{I\mu\, h_0}{4\pi}\, k, \tag{52}$$

где

$$k = \frac{L}{2\sqrt{A}} \left\{ \ln \left[\frac{1}{\sqrt{a^2 + d^2}} \left(1 + \sqrt{1 + b^2 (d^2 + a^2)}\right) \right] - \right.$$
$$\left. - \ln \left[\frac{1}{a} \left(1 + \sqrt{1 + a^2 + b^2}\right) \right] \right\}.$$

Здесь

$$b = \frac{2}{L^2}, \qquad A = \frac{L^2}{2}.$$

Максимальная величина наведенной э. д. с. определяется из уравнения

$$U_m = \left| \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right| = \frac{I_m \mu\, h_0\, k}{4\pi\, T} \quad (\text{здесь } \mu = 4\pi \cdot 10^{-9}). \tag{53}$$

Если принять, что

$$L = vt = 5 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} = 500 \text{ см}; \quad T = 10^{-6} \text{ сек.},$$
$$I_m = 3 \cdot 10^4 A, \quad h_0 = L = 500 \text{ см}, \quad d = 10^4 \text{ см}, \quad a = 10^3,$$

найдем:

$$U_m = 24 \cdot 1\ kV.$$

Эта величина потенциала почти в 3 раза меньше той, которая получилась бы при расчетах, базирующихся на канале молнии бесконечной длины.

Приведенный пример подчеркивает важность учета отмеченного обстоятельства об ограниченной длине канала.

ЭБ "Научное наследие России"

VIII. ГРОЗОЗАЩИТА

1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Попытки защищаться от молнии известны еще задолго до начала нашей эры. При археологических раскопках в Египте на стенах разрушенных храмов найдены надписи, указывающие, что установленные вокруг храма Эдфу мачты служат для защиты от «небесного огня», а также надпись, что 40-метровые мачты, заостренные сверху и позолоченные по приказанию Рамзеса III (за 2 000 лет до н. э.), устраняют грозы и огонь от храма.

В XII книге Талмуда имеется место, которое прямо свидетельствует о попытках защищать от грозы жилые палатки. «Кто между шалашами (палатками) ставит железо, тот поступает против запрещения подражать язычникам; для охраны перед громом и молнией делать это разрешается».

В труде римского энциклопедиста Плиния (II книга) также указывается, что, согласно преданиям, древние при выполнении своих обрядов переводили молнию в землю, пользуясь высоким металлическим шестом.

В истории IV и V веков находятся следы использования некоторых устройств, подобных молниеотводам.

Существует подробное описание специального устройства около иерусалимского храма, существовавшего от времени Соломона до 70-го года н. э. (т. е. более тысячелетия), которое истолковывается многими авторитетами как грозозащита. Повидимому, действительно, это древнее сооружение, подвергавшееся весьма сильным и частым грозам Палестины, было окружено металлической арматурой, как бы образующей, по нашим современным представлениям, клетку Фарадея, и имело резервуар с водой, который играл роль заземления.

Геродот в книге IV (глава 94) говорит, что «фракиане во время грозы имеют обыкновение пускать в небо стрелы для угрожения метеору».

Плиний повествует, что этруски умели низводить гром с неба, направлять его по своему усмотрению и что они даже поразили им чудовище, опустошавшее окрестности и называвшееся Волтою.

В Японии, сверх каменных стен и земляных насыпей, покрывавших искусственное подземелье или естественную пещеру, в которых люди скрывались от грозы, устраивались водяные резервуары. Вода предназначалась для тушения огней молний.

Древние полагали, что люди в лежачем положении не поражаются молнией. Римляне считали тюленьи кожи верным предохранительным средством от молнии. На этом основании они делали палатки из шкур, в которых и укрывались от грозы.

Древние верили в то, что лавровое дерево никогда не поражается молнией. «Когда небо одевалось грозой, Тиверий всегда надевал лавровый венок, следуя мнению, что молния не поражает лавровых листьев», пишет Светоний. Мнение о различной поражаемости разных пород деревьев, повидимому, существовало во все времена (см. главу VII).

Проходили века, а слабый рост знаний об атмосферном электричестве не давал оснований к разработке сколько-нибудь рациональных методов грозозащиты. В царствование Карла Великого для предотвращения гроз и града на полях ставили высокие шесты, на остриях которых привязывались кусочки

ЭБ "Научное наследие России"

пергамента, покрытые особыми письменами. Известно, что и пламя костров рассматривалось как мера, рассеивающая грозы. В некоторых местах крестьяне в случае приближения грозы зажигали кучи соломы и дерева, расположенные друг от друга на некотором расстоянии.

Вольта также считал, что огни представляют лучшее средство предупреждать грозы и делать их менее опасными. В литературе можно найти немало высказываний о том, что пушечные выстрелы уменьшают опасность гроз, рассеивая их и прекращая выпадение града. Многие земледельцы прибегали к стрельбе из пушек, пытаясь рассеять грозу сотрясением воздуха, однако не всегда сильнейшая пальба из многих орудий мешала образованию грозы. Были также попытки предупредить грозообразование колокольным звоном.

Современное состояние наших знаний не дает оснований к положительной оценке упомянутых эффектов. Быть может, происхождение шумовых методов рассеивания грозы следует искать, как это предполагает и Араго, в инстинктивных попытках некультурных людей шумом заглушать свой страх перед стихийным бедствием.

Некоторые физики допускали, что молния не может ударить в стекло, поэтому клетка, построенная только из стекла, по их мнению, могла бы быть весьма надежным убежищем от грозы. Такие клетки были построены. Исходя из современных представлений о грозовом разряде, нельзя приписывать стеклу таких свойств (см. главу VII).

Лишь в середине XVIII века начинается движение в деле рационализации грозозащиты. Одним из пионеров этого движения был Франклин. Из переписки Франклина с друзьями можно заключить, что он, так же как и Ломоносов, приписывал (во всяком случае после 1755 г.) остриям, установленным на зданиях, не только предупредительное действие, но и защитное, проявляемое при совершившемся разряде.

Каковы были представления о защитных мероприятиях от молнии в век Франклина, хорошо видно из советов этого ученого лицам, боящимся молнии и находящимся во время грозы в домах, не защищенных молниеотводами. Франклин рекомендует не становиться близко к каминам, потому что сквозь них нередко входит молния, чему способствует проводимость сажи каминных труб, не прикасаться к металлам, зеркалам (имеющим амальгаму) и пр.; лучше всего стоять среди комнаты, если над головой не висит люстра. Наиболее безопасным считается лечь в койку, подвешенную посреди комнаты к потолку на шелковых шнурах, полезно положить на пол какой-нибудь изолятор.

Сложность рекомендаций по профилактике защиты послужила основанием к известным юмористическим рассказам Марк Твена.

В 1754 г. Дивиш, священник из Моравии, соорудил первый молниеотвод, состоявший из шеста длиной 10 м, кончавшийся металлическим разветвленным крестом и соединенным с землей. Это устройство было разрушено, однако, местным суеверным населением из-за боязни засухи.

В 1777 г. молния ударила в крышу здания, оборудованного молниеотводом. Место удара было удалено на 14 м от стержня (под углом 31°). Анализ этого случая вызвал большие споры в кругах ученых.

В Германии начало грозозащите было положено в 1769 г. Реймарусом. Система его защиты заключалась в том, что непосредственно на здании, вдоль всего его конька и по стенам, прокладывалась широкая свинцовая или медная полоса, погруженная в землю. Молниеприемные штанги и иглы им не применялись.

Грозозащитой занимался Лихтенберг, рекомендовавший применять штанги, имевшие наверху пучки игл. В 1779 г. Махон рекомендовал применять штанги высотой 5 м на расстоянии друг от друга от 12 до 15 м.

Во Франции по грозозащите первые шаги были сделаны Гей-Люссаком и Пуйе. Они и ряд их последователей рекомендовали применение штанг от 5 до 10 м высотой, имеющих заостренные концы. Большое значение придавалось заземлению молниеотводов. В качестве зон защиты рекомендовалось, повидимому, предложенное Шарлем цилиндрическое пространство, имеющее осью штангу с радиусом 10—12 м, высотой 4—5 м. Позднее Араго также принимает

ЭБ "Научное наследие России"

радиус защищенного пространства равным двойной высоте штанги. Айзенлор принимает в качестве защищенной зоны конус, вершина которого совпадает с острием штанги, а радиус основания имеет двойную высоту штанги.

Хольтц, изобретатель электрической машины, полагал, что роль штанг сводится не к бесшумному разряду электричества туч (предупреждение разрядов), а к тому, что они, притягивая на себя молнию, создают защиту для сооружений. В качестве защищенной зоны Хольтц, так же как и Айзенлор (1768), принимают конус с углом при вершине в 90° (радиус основания равен высоте штанги). Хольтц считает невозможным проникновение молнии под углом, меньшим 45°.

До 1823 г. применение грозозащиты делалось не систематично и без авторитетных руководящих указаний. После длительной работы ряда комиссий, в которых участвовали выдающиеся ученые, в 1823 г. была разработана инструкция по грозозащите, докладчиком по которой был Гей-Люссак. Защитная зона стержневого молниеотвода, рассматривавшегося как устройство для восприятия молнии, определилась правилом: «проводник эффективно защищает пространство в виде цилиндра, с радиусом, равным двойной высоте стержня». Докладчик заявил, что эта зона находится в соответствии с расчетом, произведенным Шарлем.

В 1843 г. Сноу Гаррис высказывает сомнение относительно этой величины зоны защиты. Правило Гей-Люссака было изменено в 1854 г. работой другой комиссии, докладчиком которой был Пуйе. Установлено, что зона защиты стержня не может указываться с такой определенностью, ибо на нее влияет ряд факторов. В работе, представленной к этому времени, Прииc сообщил, что молниеотвод защищает коническое пространство, высота которого равна длине стержня, а основанием служит круг с радиусом, равным также высоте стержня. Образующей является окружность, радиус которой тоже равен высоте стержня. Прииc исходил из мысли, что туча никогда не спускается до высоты, меньшей высоты молниеотвода. Уже в конце XIX века некоторыми исследователями делались попытки чисто геометрического определения защитных зон молниеотвода. Так, Лакоин предложил следующий метод: радиусом, равным высоте (H) тучи над землей, проводится окружность, проходящая через вершину молниеотвода (h) и касательная к поверхности земли. Область, заключенная между отрезком окружности, землей и молниеотводом, считалась при этом защищенной от проникновения в нее молнии (1879 г.).

Отметим, что через несколько десятков лет Пик снова опубликовал идентичные построения, после чего открытие этого метода неправильно связывают с его именем.

Кроме сооружения громоотводов, были предложены и другие способы защиты. В 1856 г. Максвелл прочел доклад в Британской ассоциации, в котором развил идею о защите сооружений от молнии специальной клеткой из стержневых молниеотводов или проволочной сеткой.

В России вопросу о молнии и защитным от нее устройствам—громоотводам (слово, потерявшее смысл и замененное теперь более правильным—молниеотвод) посвящался, после первых исследований Ломоносова и Рихмана, ряд работ.

В 1878 г. появляется книга Смирнова о громоотводах, а в 1896 г. издается книга Д. Голова «Теория и практика громоотводов», в которой автор обрисовывает положение с практикой грозозащиты, опираясь в своих физических представлениях на работы Лоджа. Эта книга дает возможность представить себе уровень научных знаний того времени в отношении образования атмосферноэлектрических явлений.

Защите от молнии начинает придаваться все более серьезное значение, в связи с чем в разных странах разрабатываются руководящие указания по защите разнообразных объектов.

Форма и размеры защищаемого пространства на протяжении десятков лет претерпевали существенные изменения, колеблясь в значительных пределах.

В 1863 г. в Брюсселе была повреждена башня Думы, после чего защита здания была поручена Мельсансу, который, на основании изучения существо-

ЭБ "Научное наследие России"

вавшей литературы, высказал сомнение в действенности стержневого молниеотвода и отверг целесообразность его применения. Единственно правильным методом защиты он считал металлическую клетку. При этом он базировался на идеях, высказанных Фарадеем.

Мнение о целесообразности сооружения фарадеевской клетки разделял и Максвелл.

В 1883 г. Ценгер писал о существовании полной неясности в вопросах количественной оценки защищенных зон. Он сам предлагал применять при защите башен радиус круга, равный одной трети высоты штанги, а при защите домов—одной четверти.

В табл. 11 дается краткая сводка применявшихся размеров защитных зон за период 1777—1885 гг. Как видно, отношение радиуса защитного круга стержневого молниеотвода к высоте стержня колебалось в пределах 9—0.25. На рис. 164 приведены сечения ряда защищенных (по мнению различных авторов) от молнии объемов.

Таблица 11

Год	Автор	Отношение радиуса основания защищенной стержневым молниеотводом площади к высоте молниеотвода r/h	Форма защитной зоны, обусловленной стержневым молниеотводом
1777	Франклин	1.7	—
1779	Махон	1.5	—
1798	Ачард	2.0	—
1807	Шарль	2.0	цилиндр
1809	Бокман	9.0	—
1816	Имхоф	1.65	—
1823	Гей-Люссак	2.0	цилиндр
1823	Пуйе	2.0	»
1827	Хель	3.3	—
1854	Араго	2.0	цилиндр
1867	Айзенлор	2.0	конус
1872	Вильде	4.0	—
1874	Фонвейль	2.0	конус
1875	Чапмен	1.0	цилинер
1875	Парижская комиссия	1.75	конус
1878	Беккерель	1.75	—
1878	Хольтц	1.0	конус
1881	Прис	1.0	конус
1883	Ценгер	0.25—0.33	—
1884	Вебер	1.5	—
1885	Андерсон	1.0	—

В конце VIII века весьма большое значение придается острию молниеотвода. Считалось что чем острее игла, тем быстрее происходит тихий разряд и тем эффективнее защита.

В 1875 г. в Англии военное ведомство на основе работы Сноу Гарриса издает первый циркуляр по защите пороховых погребов и других сооружений. Руководящей идеей защиты была теория дренирования зарядов тучи молниеотводами (draine pipe view). Эта работа представляет интерес с точки зрения выяснения существовавших идей о принципах работы грозозащиты.

Рассмотрение материалов этой работы показывает, что к этому времени сложилось уже вполне четкое представление о действии молниеотводов и о разделении их на два вида: к первому относились такие, которые по мысли их авторов должны предупреждать возможность разрядов (превентивные методы), ко второму типу относились такие, которые воспринимали произошедший разряд на себя и уводили его в землю (защитительный метод).

В старой литературе большое внимание уделялось конструктивному выполнению молниеотводов. Было выдано и описывалось очень много патентов на устройство отдельных элементов грозозащиты.

ЭБ "Научное наследие России"

Ряд новых конструктивных элементов в систему грозозащиты был внесен строителем Финдейзеном. На основании регистрации 2 000 разрядов, поразивших Вюртемберг в течение 25 лет, Финдейзен делает заключение, что, несмотря на 15 000 молниеотводов, молния продолжает свое разрушительное действие. Финдейзен отмечает, что крыши домов, имеющих угол с горизонтом в 45° и больше, поражаются обычно в конек или какую-либо выступающую его часть. Только в очень редких случаях, когда, например, дерево касается крыши

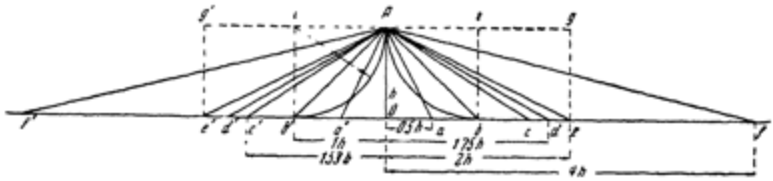


Рис. 164. Защитные зоны одиночного стержневого молниеотвода по данным различных авторов:

e, g', e'—цилиндр Гей-Люссака, 1823 г.; *A, e, e'*,—конус Фонвейля, 1874 г.; *A, d, d'*—конус Парижской комиссии, 1875 г.; *b i i', b'*—цилиндр Чапмена, 1875 г.; *A, b, b'*—конус Адамса, 1881 г., Приса, 1881 г.; *A, a, a'*—конус Мельсанса; *A, f, f'*—конус Пика, 1924 г.; *A, d, d'*—конус ВЭИ, 1931 г.; окружность *Ab'*—*Ab*—Швайгера, 1938 г.

своими ветвями, место поражения может лежать на более низких, чем конек крыши, частях. Это положение Финдейзен подтверждает многочисленными примерами. С другой стороны, Финдейзен приводит пример, когда молния, попавшая в молниеотвод, благодаря его недостаточно хорошему выполнению, все же перескочила на отдельные части здания. На основании этих наблюдений Финдейзен разработал систему защиты (носящую его имя), принцип которой

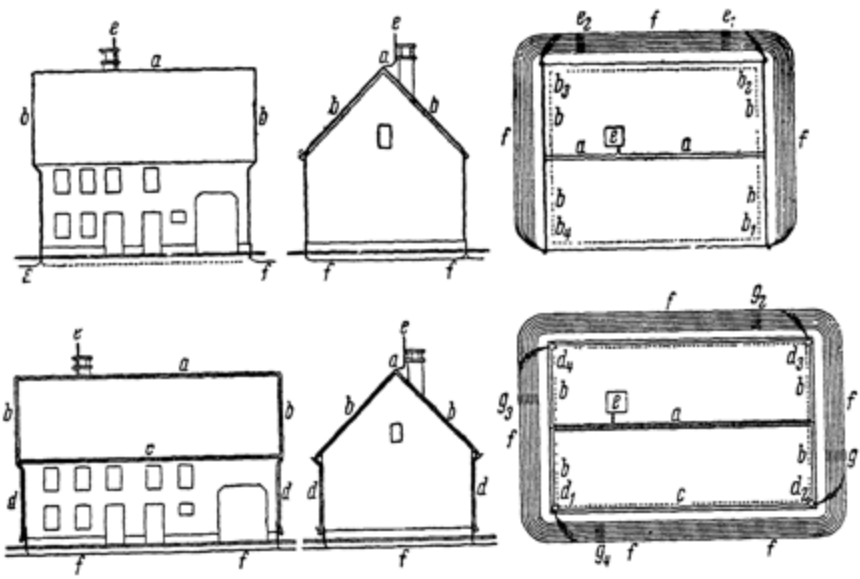


Рис. 165. Примеры практического выполнения грозозащиты (по Финдейзену)

заключается в том, что защищаются все выступающие части здания, а объединенные между собой токоотводы присоединяются к общему заземлению.

Некоторые примеры практического выполнения грозозащиты показаны на рис. 165. На этом рисунке: *a*—цинковая полоса шириной 400 мм и толщиной 0.75 мм, *b*—полосы из жести шириной 280 мм, *c*—желоба из жести 330 мм диаметром, *d*—водосточные трубы из оцинкованного железа, *e*—молниеотводы на трубах из железного троса, *f*—заземляющая проводка из 7-жильного троса с диаметром отдельных проволок 3—3.4 мм, закопанная на глубине 40 см с расщеплением на отдельные проводники, обведенные вокруг здания.

Произведенный обзор показывает, что, наряду с наивными и часто, с современной точки зрения, совершенно неправильными теоретическими представлениями об образовании грозовых разрядов и их действии, применявшиеся методы грозозащиты содержали здоровые элементы и некоторые системы были вполне рациональными.

2. Современные методы защиты

Несмотря на то, что вопросы грозозащиты разрабатывались выдающимися исследователями всех стран мира в течение долгого времени, рациональные способы защиты, и особенно расчет защитных зон молниеотводов, остаются до сих пор невыясненными. Ниже будет показано, что, наряду с рекомендациями конструкций молниеотводов одними исследователями, другие высказывают сомнение в целесообразности устройства именно такого рода защиты. Будем в дальнейшем различать систему п р е в е н т и в н о й грозозащиты с целью предупреждения образования молнии (по существу это то, что буквально можно понимать под термином громоотвод) и систему з а щ и т и т е л ь н о й грозозащиты с целью перехвата молнии специальным устройством, называемым в силу этого молниеотводом.

В последние годы особое внимание уделялось молниеотводам, хотя и превентивные системы находят, если не широкое применение, то все же некоторое экспериментальное развитие. Ниже будут рассмотрены пути, по которым возможно развитие новых систем грозозащитных устройств.

а. Статистический материал по работе грозозащиты

Решающее значение для оценки правильности устанавливаемых зон защиты имеет статистический материал, к сожалению, исключительно скудный. Рассмотрение в этом направлении громадной по объему литературы (сотни статей в десятках различных журналов за десятки лет) дает лишь единичные случаи описания работы грозозащиты с достаточно удовлетворительными подробностями, относящимися к данному случаю поражения молнией того или иного объекта.

Для анализа работы защитных устройств необходимо произвести рассмотрение имеющихся наблюдений. Здесь приводятся лишь те случаи, по которым имеется возможность установить вероятные зоны поражения. Эти случаи рассматриваются здесь с двух точек зрения: 1) поражения молнией или при наличии лишь одного молниеотвода, или когда находящееся вблизи устройство можно рассматривать как одиночный молниеотвод, 2) поражения молнией при наличии нескольких молниеотводов. Анализ второго вопроса оказался почти невозможным, хотя зачастую и имеется прямое указание о наличии нескольких молниеотводов. Вся трудность в том, что не дается почти никаких указаний, как был расположен пораженный молнией пункт относительно молниеотводов: находился ли этот пункт внутри пространства, окруженного молниеотводами, или вне его. Если же и можно из описания сделать заключение, что прямой удар молнии имел место в пространстве между двумя молниеотводами, размеры даются только по отношению к одному из молниеотводов. Эти случаи при более полных сведениях могли бы, конечно, дать весьма ценный материал относительно защитных коэффициентов при совместном действии нескольких молниеотводов.

а) К о э ф ф и ц и е н т ы п о р а ж е н и я о д и н о ч н ы х с т е р ж н е в ы х м о л н и е о т в о д о в. Собранные на основании литературного материала сведения о коэффициенте поражения одиночного молниеотвода и некоторые дополнительные данные приведены в табл. 12.

Как видно, лишь в одном случае из 108 молния ударила в объект, находящийся на расстоянии от молниеотвода, меньшем его высоты (случай 9-й, имевший место в 1777 г.). В трех случаях коэффициент поражения оказался равным единице.

ЭБ "Научное наследие России"

Таблица 12

Коэффициент поражения	Высота молниеотвода h	Высота пораженного объекта h_0	$\frac{h_0}{h}$	Коэффициент поражения	Высота молниеотвода h	Высота пораженного объекта h_0	$\frac{h_0}{h}$
1.0	900	8	0.009	1.65	35	20	0.57
1.42	»	0	0	1.25	40	20	0.5
1.67	»	»	»	1.5	—	—	—
1.42	»	»	»	3.3	15	3	0.2
1.20	1000	»	»	1.6	15	8	0.53
1.42	900	»	»	2.8	52	8	0.15
1.00	»	8	0.009	10.0	45	25	0.55
1.0	»	0	0	3.0[1]	50	»	0.50
0.92	—	—	—	1.6[2]	104.5	»	0.24
2.65	—	—	—	1.3[3]	132.0	»	0.19
2.00	—	—	—	2.3	132.6	»	0.19
2.58	30	8.2	1.27	3.6[4]	147.0	»	0.17
3.85	37	10	0.28	Больше 1[5]	380.0	—	—
				1.0	15	10	1.5

[1] Число разрядов вблизи молниеотвода (или в него) равно 2.
[2] » » » » » » » 3.
[3] » » » » » » » 8.
[4] » » » » » » » 5.
[5] » » » » » » » 68.

В качестве иллюстрации действия сверхвысокого одиночного стержневого молниеотвода на рис. 166,*а* показано распределение разрядов в районе одного из таких устройств (по материалам Подмосковной экспедиции ЭНИН). Как видно из рис. 166, *а*, заштрихованная окружность, радиус которой равен высоте молниеотвода, молнией не поражалась.

Защитная зона одиночного троса. Статистические данные говорят о том, что в среднем грозовая аварийность линий с тросом раза в два-три

Рис. 166. Поражения при защите сверхвысокими молниеотводами: H—высота тучи; H_1—высота молниеотвода; r—расстояние до места поражения

ниже аварийности линий без тросов. Однако несовершенная подвеска и недостаточно хорошее заземление тросов не дают обычно возможности определить, какую часть аварий, происходящих на линии с тросом, следует отнести за счет вторичных явлений (перекрытия с опоры или троса на провод) и какая часть обусловлена непосредственным ударом молнии в провода линий вследствие недостаточного экранирования их тросом. Защитный угол, порядка 45°, для

ЭБ "Научное наследие России"

защиты провода тросом оказывается недостаточным. Об этом свидетельствуют аварии на двухцепных линиях с одним тросом, когда сопротивление заземления опор достаточно мало, а расстояние между проводами и тросом достаточно велико для того, чтобы исключить возможность обратного перекрытия; с большой степенью вероятия эти аварии можно отнести за счет непосредственных поражений молнией проводов, т. е. за счет недостаточной защитной зоны тросов.

Опыт эксплоатации некоторых сооруженных в последнее время американских линий, работающих без перекрытий в течение нескольких лет в весьма грозовых местностях, дает основание полагать, что защитный угол тросов, порядка 20° (относительно крайних проводов), является достаточным для надежного экранирования проводов.

Угол в 30° является промежуточным, ибо если, с одной стороны, мало фактов, непосредственно свидетельствующих о недостаточности его для экранирования проводов, то с другой—некоторые из аварий на линиях, где тросы подвешены с защитным углом в 30°, не дают основания отрицать возможность непосредственного поражения молнией провода линии передач.

Поражение разрядом молнии при многократных отводах. В отношении оценки защитного действия нескольких молниеотводов на основании данных наблюдений дело обстоит, как указывалось, значительно хуже, чем с оценкой эффективности одиночных молниеотводов. Объясняется это тем, что эта сторона вопроса была обследована совершенно недостаточно. Известно, что, например, Пик распространял на одиночные молниеотводы результаты, полученные при лабораторном исследовании защитного действия нескольких симметрично расположенных молниеотводов.

На основании данных Вальтера составлена табл. 13, по которой можно судить о зонах поражения в пространстве между двумя и более колокольнями. При этом имеется в виду, что защищенная площадь между колокольнями ограничивается прямыми, касательными к окружностям, описанным вокруг каждой колокольни, с радиусом, равным высоте превышения колокольни над окружающими зданиями. Высота последних равна 25 м.

Таблица 13

Зоны поражения в пространстве между двумя колокольнями в районе г. Гамбурга за период с 1912 по 1932 г.

(Составлено по карте Вальтера)

№ колоколен	Высота колоколен h_1 и h_2, м	Расстояние между ними a, м	Количество поражений	$k = \frac{a}{h_1 + h_2 - 2h_0}$
2 и 7	50 и 132.6	500	2	3.7
2 и 3	50 и 104.5	400	0	3.8
3 и 7	104.5 и 132.6	300	»	1.6
4 и 7	112 и 132.6	260	»	1.3
4 и 8	112 и 147.0	350	»	1.7
7 и 8	132.6 и 147.0	500	»	2.2
8 и 3	147 и 104.5	740	»	3.7
8 и 5	147 и 112.5	260	»	1.2
5 и 7	112.5 и 132.6	520	»	2.7
5 и 3	112.5 и 104.5	670	»	2.4
8 и 6	147 и 132.0	810	1	3.5

Таким образом, в то время как для одиночных колоколен был получен наименьший коэффициент (k), равный 1.3, для пространства между двумя колокольнями коэффициент поражения, как видно, значительно выше. Пространство между соседними и противоположными колокольнями, за исключением двух случаев (пространство между колокольнями *2* и *7*, а также *8* и *6*), в течение 21 года было

ЭБ "Научное наследие России"

защищено башнями[1], хотя расстояние между соответствующими колокольнями превышает двукратную и более величину суммы высот превышения этих башен над окружающими зданиями. Эти наблюдения достаточно наглядно дают представление о сравнительной эффективности одиночных и многократных молниеотводов. Последние оказались в два с лишним раза эффективнее одиночных молниеотводов.

Рис. 166, *b*, иллюстрирует действие многократных стержневых сверхвысоких молниеотводов. Заштрихованная площадь поражениям не подвергалась.

b. Применяемые системы молниеотводов и зоны защиты

Экспериментальные исследования по определению защитных зон молниеотводов в лабораторных условиях начались несколько десятков лет назад и продолжались непрерывно до настоящего времени. То в одной, то в другой стране делались сообщения о произведенных опытах. Впервые в широком масштабе и под углом зрения инженерных запросов опыты по определению защитных зон были предприняты Пиком. Теоретическую интерпретацию своих, с современной точки зрения методологически далеко не безупречных, опытов Пик делал, исходя из положения, согласно которому молния выбирает кратчайший путь (предпосылка, полностью разработанная, как указывалось на стр. 200, уже в 1879 г.). Эта основная мысль, однако, не может быть признана правильной по целому ряду соображений. То, что молния на своем пути проделывает самые причудливые изгибы, известно всем. Известно это и работающим с разрядами в длинных искровых промежутках. С другой стороны, на путь молнии вдали от земли земные объекты обычной высоты влиять не могут. Даже очень высокие сооружения, как показывают наблюдения, не предопределяют пути молнии при выходе ее из тучи. Но и при приближении головки разряда к земле на путь его может влиять целый ряд факторов, среди которых геометрическое расположение объектов не явится решающим.

Позднее защитные зоны молниеотводов различных конструкций рассматривались многими (как в СССР, так и заграницей) исследователями, вносившими в методику экспериментов те или иные изменения. Однако основная предпосылка о кратчайшем пути молнии оставалась неизмененной. Отсутствие основных идей научного моделирования в целом ряде случаев не давало возможности критического сопоставления и анализа данных опыта и обесценивало работы, проделанные на несовершенных моделях. Только в самое последнее время, в связи с работами по избирательной поражаемости молнией земной поверхности и изучению механизма развития грозовых разрядов, опыты по экспериментальному определению защитных зон молниеотводов получили более надежную базу.

Крупным шагом вперед по пути рациональной разработки системы грозозащиты являются новые эксперименты, полученные путем применения продуманных схем моделирования и работы с высокими импульсными напряжениями.

Кардинальным вопросом, лежащим в основе количественной оценки зон защиты при существующих методах расчета, является вопрос о высоте, на которой развивающаяся из тучи молния устремляется к поражаемому ею объекту. Эта высота носит название высоты ориентировки молнии.

Для определения радиуса r зоны защиты стержневого молниеотвода высотою h Пиком была приведена формула, имеющая вид:

$$r = \sqrt{(2H - h)\,h}. \qquad (1)$$

Эта формула, так же как метод ее вывода, известны с 1879 г.

Для расчетов по формуле, вместо h, подставлялась высота стержня, а вместо H—высота тучи над землей. Сопоставляя результаты лабораторных опытов на модели с данными статистики о поражении молнией сооружений, защищен-

[1] Правда, следует иметь в виду, что все зарегистрированные случаи поражения относятся к ударам молнии, вызвавшим пожар или другие серьезные повреждения. Возможно, что были и случаи прямых ударов без серьезных последствий, оставшиеся незамеченными.

ЭБ "Научное наследие России"

ных высокими башнями с молниеотводами, Вальтер (1933) отметил, что единственной причиной, вызывающей ошибочные значения r, получаемые из формулы, является допущение, что молния уже при «выходе» из тучи направляется к поражаемому объекту. Подставляя в формулу значения r и h на основании материалов статистики, Вальтер получил величины для H порядка от h до 2.5 h. Получившиеся значения H Вальтер определил для высот, с которых развивающаяся молния как бы «замечает» поражаемый ею объект.

На основании рассмотрения траекторий молнии Вальтер делает вывод об опытном доказательстве вышеупомянутого заключения и, следовательно, тем самым оправдывает применение формулы Пика.

Сама по себе мысль о том, что молния «замечает» или, вернее, ориентируется на поражаемый ею объект с определенной высоты, не вызывает возражений, напротив, целый ряд наблюдений над искровым разрядом в лабораторной обстановке убеждает в том, что разряд в некоторых случаях действительно явно направляется к поражаемому им объекту из некоторой определенной точки своей траектории.

Посмотрим, однако, является ли действительно упомянутая формула обоснованной физическими соображениями и дает ли ее применение больше того, что дает имеющийся статистический материал.

Тщательный анализ фотографий, приводимых Вальтером, не позволяет согласиться с его утверждением, что молния ориентируется на поражаемый ею объект (высотой h) на высотах от h до 2.5 h, хотя в некоторых случаях, вообще говоря, такие соотношения и могут иметь место. Более правильно при этом стать на точку зрения, сформулированную в результате исследований причин образований зигзагов искрового разряда (глава VII), согласно которой основным фактором, определяющим траекторию разряда, является электродинамическое поле, развивающееся совместно с разрядом и зависящее от характера разряда (мощности, продолжительности и т. д.) и окружающей обстановки (проводимости различного рода включений, объемных зарядов, проводимости электродов, их конфигурации и т. д.).

Согласно изложенному, можно заключить, что наличие около башни, например, объемных зарядов, имеющих знак, одноименный со знаком индуцированных зарядов на молниеотводном устройстве, ослабит направляющее действие стержня на путь молнии. При развитии канала и нейтрализации объемных зарядов действие молниеотвода начнет внезапно сказываться, и молния резко изменит свой путь. Этот механизм не зависит от прочности промежутка.

К этим соображениям нужно добавить следующее.

Известно, что импульсная прочность промежутков игла—игла, игла—плоскость различна, поэтому основная предпосылка при выводе рассматриваемой формулы о равнопрочности промежутков воздуха между концом молнии и землей и между концом молнии и стержнем, по крайней мере для лабораторных экспериментов, несостоятельна.

Несмотря на это, согласно некоторым необоснованным взглядам, высказанным в последнее время (например, Швейгером, о чем см. ниже), в основу расчета грозозащитных устройств все же кладется условие равнопрочности.

Развитие лидера с высокого здания заставляет считаться с тем, что при определении высоты поражаемого объекта его высота как бы увеличивается за счет роста лидера. Таким образом, появление лидера на молниеотводе увеличивает его высоту, что не предусматривается формулой.

Резюмируя, можно сказать, что расчет r базируется на несовершенных физических представлениях и при современных воззрениях на развитие искрового разряда не может быть принят. Отсутствие критерия для выбора величины H для данных условий расчета также обесценивает практическое применение формулы.

К сожалению, наши сведения пока недостаточны для окончательного решения вопроса о высоте ориентировки молнии.

Произведенное в ВЭИ и ряде других научно-исследовательских организаций изучение защитных зон различного вида молниеотводов позволило выявить ряд неясностей в существовавших до последнего времени воззрениях на оценку

ЭБ "Научное наследие России"

пространства, защищаемого от проникновения в него грозового разряда. Ввиду того что техника моделирования молнии и поражаемых ею объектов не достигла полной научной завершенности, установление защищенных зон экспериментальным путем в лабораторной обстановке не может быть пока осуществлено. Действительно, одно лишь подобное уменьшение размеров модели (без моделирования других физических факторов, например давления, влажности и пр.), конечно, не дает оснований для утверждения того, что условия развития лабораторного разряда тождественны с условиями развития молнии. Напротив, распределение градиентов между тучей и электродами весьма различно, характеризуясь в последнем случае большими значениями, что приводит к более интенсивному образованию лидеров с модели. В то время как длина лидеров, образующихся с заземленных частей модели, достигает 30% длины искрового промежутка, длина лидеров, растущих от земли при развитии молнии, хотя и не имеет непосредственных замеров, все же согласно существующим фотографиям с разверткой не может превышать нескольких процентов от промежутка земля—туча. Для практических целей в настоящее время рекомендуются защитные зоны, полученные на базе многочисленных экспериментов, выполненных на лабораторных моделях. В ряде руководящих указаний по осуществлению грозозащиты даны зоны стержневых и тросовых молниеотводов в СССР, построение которых определяется сериями графиков и формул. Анализ экспериментальных материалов, положенных в основу рекомендуемых защитных зон в свете вышеизложенных соображений, приводит к заключению, что в настоящее время нельзя рассматривать определение защитных зон как точную геометрическую задачу (как это пытаются делать некоторые авторы), ибо экспериментальное установление расчетных параметров зависит от таких факторов, как вероятность поражения данной зоны молнией, полярности высоковольтного электрода и пр. С другой стороны, имеющаяся даже немногочисленная статистика о работе стержневых молниеотводов (или сооружений им подобных) показывает, что рекомендуемые зоны защиты поражались разрядами. При этом оценка рекомендуемой зоны будет базироваться на принятии того или иного «коэффициента запаса» или, другими словами, допуска той или иной степени риска.

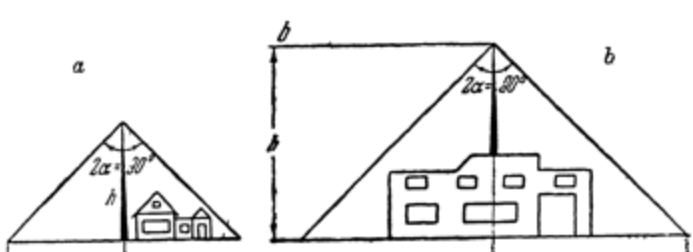


Рис. 167. Вертикальное сечение зоны защиты отдельно стоящего одиночного стержневого молниеотвода:
а—отдельно стоящий молниеотвод; b—молниеотвод, установленный на сооружении

Анализ существующих союзных и иностранных материалов, проделанный с учетом изложенных соображений, приводит нас к рекомендациям защитных зон для ряда конкретных систем молниеотводов.

Стержневые молниеотводы. В качестве защитной зоны одиночного стержневого молниеотвода рекомендуется вертикальный конус с линейной образующей и углом при вершине $2\alpha=90°$ (α называется углом защиты).

На рис. 167 показаны вертикальные сечения зоны защиты для случаев установки одиночного стержневого молниеотвода при установке его около защищаемого сооружения (рис. 167, *а*) и при установке на самом сооружении (рис. 167, *b*). При весьма высоких стержневых молниеотводах—выше 50—60 м, в качестве образующей конуса можно рекомендовать, для особо ответственных случаев, дугу окружности с радиусом, равным высоте молниеотвода, с центром на уровне высоты молниеотвода.

При использовании для защиты данной области двух стержневых молниеотводов, находящихся на расстоянии друг от друга *а*, защитное действие каждого из них в пространстве между ними повышается. На рис. 168, *а* показан вертикальный разрез защитных зон двухстержневого молниеотвода *А* и *В*.

ЭБ "Научное наследие России"

Слева от молниеотвода A и справа от молниеотвода B защитная зона представляет собой вертикальный конус с углом $\alpha = 45°$. Во внутренней области (между молниеотводами) угол при вершине защитного конуса $\beta = 55°$. Кони-

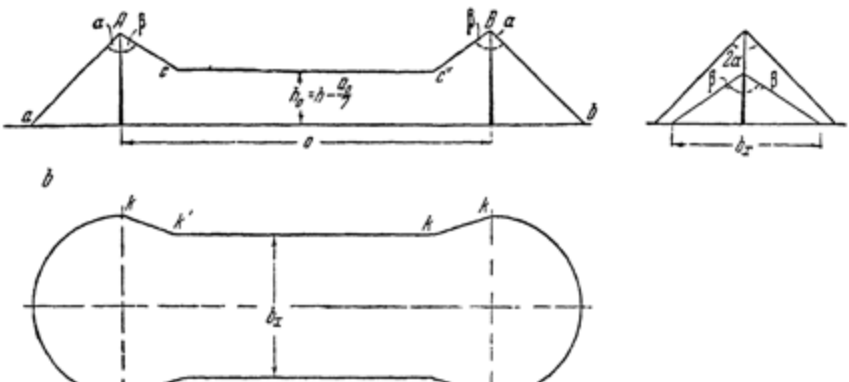


Рис. 168. Защитные зоны двойного стержневого молниеотвода
Высота молниеотводов A и B одинакова

а—вертикальное сечение зоны защиты; *b*—горизонтальное сечение защищенной молниеотводами площади (на поверхности земли); *с*—вертикальное сечение зоны защиты по линии b_x.

ческие поверхности $Ac—Bc'$ пересекаются плоскостью C, C^1, проведенной параллельно поверхности земли ab на высоте $h_0 = h - \frac{a}{7}$. На рис. 168 *b* и *с*

Рис. 169. Защитные зоны двойного стержневого молниеотвода, с молниеотводами A и B разной высоты

даны план и сечение его по линии b_x. Участки K, K' (рис. 168, *b*) получаются путем плавного сопряжения линии K', K' с полуокружностями. Действие двойного стрежневого молниеотвода сохраняется лишь до значения $a \leqslant 6 \div 7$.

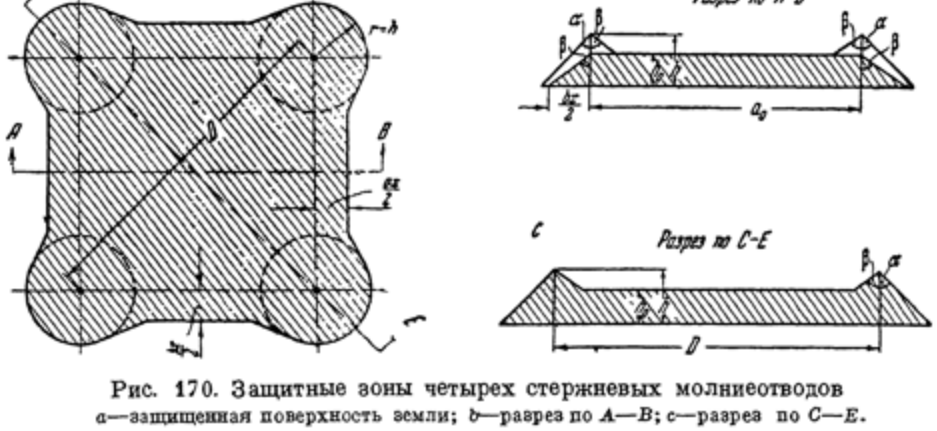


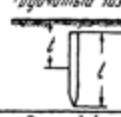
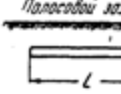
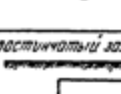
Рис. 170. Защитные зоны четырех стержневых молниеотводов
а—защищенная поверхность земли; *b*—разрез по $A—B$; *с*—разрез по $C—E$.

Если стержневые молниеотводы имеют различные высоты (рис. 169), построение защитных зон производится следующим образом. Для стержневого молниеотвода большей высоты строится его защитный конус с углом при вершине рав-

ЭБ "Научное наследие России"

ным 2 α. Через вершину второго молниеотвода проводится горизонтальная линия до пересечения с образующей конуса B. Из точки пересечения на основание опускается перпендикуляр, который принимается за фиктивный молниеотвод. Определение защитных зон во внутренней области далее производится по правилам, указанным выше для двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты. Выполняемые при этом элементарные геометрические построения достаточно поясняются рис. 169. Значительно более эффективна защита многократным стержневым молниеотводом (с тремя и более молниеотводами).

Таблица 14

Эскиз заземлителя	Расчетная формула сопротивления растеканию тока с заземлителя
Трубчатый заземлитель 	$R=\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\frac{2l}{d}+\frac{1}{2}\ln\frac{4t+l}{4t-l}\right]$ ом ρ-уд сопротивление d-диаметр трубы
Полосовой заземлитель 	$R=\frac{\rho}{2\pi l}\ln\left[\frac{2l^2}{bt}\right]$ ом, для $\frac{l}{2t}>2.5$ b-ширина полосы Если железо круглое, то вместо „b" подставить „$2d$". d-диаметр полосы
Кольцевой заземлитель	$R=\frac{\rho}{2\pi^2 D}\ln\left[\frac{8\pi D}{bt}\right]$ ом, для $t\ll\frac{D}{2}$ b-ширина полосы Если железо круглое, то вместо „b" подставить „$2d$". d-диаметр полосы
Пластинчатый заземлитель 	$R=\frac{\rho}{8\sqrt{F}}\left[1+\frac{2}{\pi}\arcsin\left(\frac{\sqrt{F}}{\sqrt{(2t)^2+F}}\right)\right]$ ом F-площадь пластины

Защитная зона четырех стержневых молниеотводов (четырехкратный молниеотвод) имеет очертания, изображенные на рис. 170. Расстояние D между наиболее удаленными молниеотводами равно $6h$, остальные размеры определяются в полном соответствии с рис. 168.

Наиболее эффективная защита соответствует симметричному расположению молниеотводов вокруг защищаемого объекта. Размещение молниеотводов целесообразно у выступающих частей или углов защищаемого объекта.

Если по условию защиты стержневые молниеотводы должны быть установлены изолированно от защищаемого сооружения (рис. 171), то необходимо исходить из следующих положений. Потенциал в U^a точке a стержневого молниеотвода (имеющего волновое сопротивление Z) определяется так, как это указывалось на стр. 188. При этом форма волны тока должна выражаться уравнением:

$$i=i_0(e^{-at}-e^{-bt}). \qquad (2)$$

Для упрощения расчета можно применять волну с косоугольным фронтом $i=\frac{I_m}{T}t$. В соответствии с принятыми в настоящее время расчетными параметрами можно рекомендовать при этом значение $Im=200$ kA, а $T=4\mu$S.

Если принять, например, $Z=200\,\Omega$, $R=10\,\Omega$ и $L=2\cdot\cdot10^{-5}\,H$, то в соответствии с расчетом на стр. 187 найдем $U=2870$kV.

Допустимое расстояние от токоотвода до защищаемого объекта определяется из условия.

$$S_в=\frac{U_a}{U_в}, \qquad (3)$$

где $U_в$—допустимое импульсное напряжение для воздуха. Минимальное допустимое $S_в$, определяемое обычно из эксплоатационных соображений, равно 5 м.

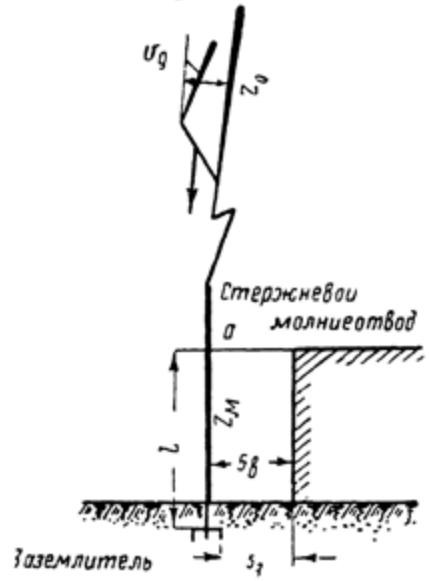


Рис. 171. Схема расчета расстояний [в земле ($S_з$) и в воздухе ($S_в$)] от элементов стержневого молниеотвода до частей защищенного объекта первой категории

В целях устранения возможности передачи опасного потенциала от заземлителя молниеотвода на части защищаемого сооружения необходимо расстояние $S_з$ (рис. 171) определить по формуле $S_з\leqslant 0.6\div0.7\ R$.

ЭБ "Научное наследие России"

Антенные молниеотводы. Большую роль играют молниеотводы, выполненные в виде горизонтально натянутых тросов. Такие тросы обычно применяются для защиты высоковольтных линий передач.

Развитие геометрических представлений о расчете зон защиты тросовых молниеотводов в последние годы сделано Швайгером. В своих исследованиях Швайгер исходит из следующих положений: 1) между разрядным напряжением и пробивным расстоянием существует линейная зависимость для всех видов напряжений и всех родов искровых промежутков; 2) форма электродов не имеет почти никакого влияния на величину пробивного напряжения, так как при всех формах электродов разряд происходит так же, как между двумя иглами с тем же искровым промежутком. Эти законы выдерживаются тем точнее, чем больше пробивные промежутки.

На основании этого Швайгер заключает, что удар молнии при всех прочих равных условиях произойдет в наиболее близкий к нему заземленный объект. По поводу этих заключений можно сказать, что они сделаны на основании умозрительных предпосылок, ошибочных по существу и не подтвержденных опытом. Отклонения в величинах защитных зон, получающиеся при указанных предпосылках, от тех значений, которые приняты в СССР, значительны в обла-

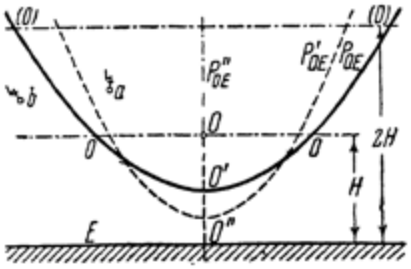


Рис. 172. Построение граничной параболы (по Швайгеру)

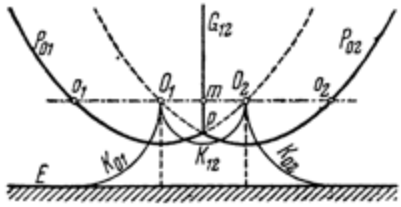


Рис. 173. Граничные параболы двух тросов, расположенных горизонтально

сти относительно большой высоты ориентировки молнии. При малых же высотах, принятых Швайгером (также без каких-либо убедительных аргументов), разница получается практически незначительной.

Основные соображения, положенные Швайгером в основу расчета тросовых молниеотводов, иллюстрируются рис. 172, на котором O изображает трос, расположенный горизонтально на высоте H над поверхностью земли E. Электрод, который должен представлять головку канала молнии, располагается в различных точках плоскости чертежа. Напряжение источника прикладывается между электродом и землей E. Согласно сделанному предположению, разряд произойдет в минимальном промежутке. При положении электрода в точке a разряд произойдет в O, при положении электрода в точке b разряд устремится на землю. Положение электрода на параболе P_{OE}, дающей геометрическое место точек, равноудаленных от земли и троса (фокус ее лежит в O, а осью является линия E), характеризует возможность разряда как в землю, так и в трос. Внутренняя часть площади, ограниченная параболой, характеризует зону «притяжения» молнии к тросу, а внешняя—«притяжение» землей. Эта кривая носит название граничной параболы. При снижении троса ширина параболы уменьшается, и при совпадении троса с землей граничная парабола превращается в прямую P_{OE}. В этом случае поражение троса наименее вероятно и возможно лишь при помещении электрода на этой прямой P_{OE}.

Из сказанного ясно, что зона притяжения увеличивается по мере возрастания высоты троса H. Из рис. 172 можно установить величины напряжений, необходимых для пробоя промежутков между электродом b, с одной стороны, и тросом или землей—с другой. Зоны притяжения молнии тросом и землей простираются до тучи, однако опыт показывает, что влияние на пути молнии начинается лишь на некоторой высоте над землей.

На рис. 173 показано действие двух тросов O_1 и O_2. Граничные параболы тросов P_1 и P_2 располагаются симметрично, а между ними проходит граничная

ЭБ "Научное наследие России"

прямая C_{12}, с которой разряд может происходить либо в трос O_1, либо в трос O_2. Граничная линия является перпендикуляром к середине отрезка O_1O_2. Из точки K разряд возможен как в любой из тросов, так и в землю. Как видно, зона притяжения троса O_2 уменьшается за счет существования троса O и, следовательно, вероятность его поражения также уменьшается, однако защита является неполной.

В своих построениях Швайгер не делал различия между действием троса и провода электропередачи.

На рис. 174 изображено расположение проводников, лежащих на плоскости, составляющей с поверхностью земли угол 45°. Как видно, плоскость O_0 пересекает плоскости G_{0r} и G_{rs}, что означает, что молния, спустившаяся до уровня O, может поразить не только трос, но и провода R, S, T, . . . ,V. Вероятность поражения отдельных проводов пропорциональна отрезкам OR, RS, ST.

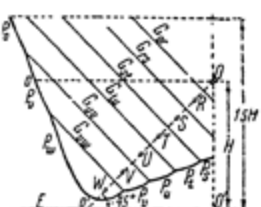
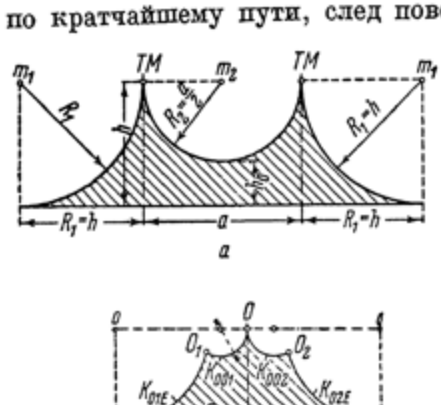


Рис. 174. Граничные параболы для нескольких проводников, расположенных в плоскости, составляющие с поверхностью земли угол 45°

При указанном расположении проводников в трос и в провод может попадать по 10% всех разрядов, а в провода от R до U по 20%. Если считать, что головка молнии опустится до высоты $1.5\,H$, то защитное действие троса, как это видно из рисунка и легко рассчитывается, дойдет до 40%. Поражение проводов R, S, T будет равно 17%, а провода U—8%. При еще большей высоте ориентировки молнии, что характеризуется уровнем линии O_0, защитная зона троса еще более возрастает, и при некоторой высоте H защитное действие троса достигает 100%. Как видно, при высоте ориентировки молнии, равной OO', защитное действие троса минимально.

Эта высота принимается Швайгером за основу при всех расчетах.

На основании сделанных предпосылок о высоте ориентировки и разряда по кратчайшему пути, след поверхности, ограничивающий зону защиты одиночного троса, представляет собой дугу окружности.



a

b

Рис. 175. Защитные зоны двух (*a*) и трех (*b*) тросов (по Швайгеру)

Теоретические предпосылки Швайгера приводят его к установлению зон защиты тросовых молниеотводов в разных комбинациях.

На рис. 175 изображены два варианта расположения тросов, защищающих зоны, сечения которых показаны заштрихованными площадями.

Опыты ВЭИ показали, однако, что тросовые молниеотводы обладают большей защитной способностью, чем это получается из вышеприведенных расчетов.

Анализируя различные литературные материалы и учитывая сказанное ранее по вопросу лабораторных экспериментов, можно рекомендовать зоны защиты антенных молниеотводов, несколько отличающиеся от тех, что рекомендуются в наших руководящих указаниях последних изданий.

1. Одиночный трос защищает пространство, ограниченное трехгранной призмой, одно ребро которой совпадает с тросом. Вертикальное сечение зоны защиты тросового молниеотвода, следовательно, такое же, как у одиночного стержневого молниеотвода (рис. 167). Угол защиты α, образованный вертикальной плоскостью и боковой гранью, принимается равным 20—30°. При защите тросами проводов линий электропередач угол защиты для одиночного троса принимается также не более 30°. Угол защиты в этом случае меньше, чем при стержневом молниеотводе.

Это находит оправдание в том, что, как показали эксперименты на моделях, защитные действия молниеотвода высотой h, защищающего объект высотой h_0,

ЭБ "Научное наследие России"

ухудшается с увеличением отношения $\frac{h_0}{h}$. При осуществлении тросовой защиты отношение $\frac{h_0}{h}$ обычно больше (особенно в случае линий электропередач), чем при защите стержневым молниеотводом, откуда и меньше угол α.

Практически большое значение имеет также двойной антенный молниеотвод. Сечение пространства, защищенного двумя тросами, в упрощенном виде аналогично вертикальному разрезу зоны защиты двух стержневых молниеотводов (рис. 168, *а*). Основные размеры определяются следующими данными:

$$\alpha = 20 \div 30°; \quad \beta = 45°; \quad h_2 = \frac{a}{3.5 \div 3}.$$

Пространство, защищенное многократным тросовым молниеотводом, определяется так же, как и пространство, защищенное двойным тросом.

Каждая используемая в качестве молниеотвода антенна должна иметь заземление с обоих концов. При ударе молнии в какую-либо точку антенны на последней возникает потенциал, определяемый по формуле:

$$U_x = \frac{3 \cdot 10^6}{300 + 0.5R} \cdot \left(R + \frac{100l}{300 + 0.5R}\right) \text{kV},$$

где R—сопротивление заземлителя каждого конца антенны (в омах), l—некоторая эквивалентная длина (в метрах), значение которой зависит от места контакта молнии на антенне. Согласно «Руководящим указаниям по грозозащите промышленных и других сооружений», изданным Академией Наук СССР в 1940 г. (в дальнейшем сокращенно называемым РУ), величина l, при определении потенциала в точке b (вершина молниеотвода—рис. 176) равна

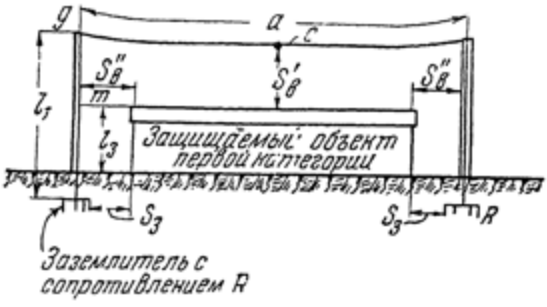


Рис. 176. Схема для расчета допустимых расстояний при антенном молниеотводе, установленном на отдельно стоящих опорах

$$l = \frac{2l_1(a + l_1)}{2l_1 + a}, \tag{5}$$

при определении потенциала в точке m,

$$l = \frac{2l_3(a + l_1)}{2l_1 + a}. \tag{6}$$

При определении U в середине троса (точка c, рис. 176)

$$l = l_1 + \frac{a}{2}. \tag{7}$$

Допустимое расстояние между средней точкой антенны и защищаемым сооружением (в метрах) определяется условием:

$$S'_в \geqslant \frac{U_c}{500}. \tag{8}$$

При ударе молнии в точке m, $S_в$ определяется условием

$$S''_в \geqslant \frac{U_m}{500} \text{ м}. \tag{9}$$

Допустимое расстояние от заземлителя антенного молниеотвода до защищаемого объекта в земле (рис. 176) определяется по формуле

$$S_з \geqslant 0.4R. \tag{10}$$

с. Новый метод грозозащиты

Существующие методы грозозащиты используют в качестве молниеотводов (молниеулавливающих приспособлений) стержни антенны или комбинации тех и других.

ЭБ "Научное наследие России"

Все эти устройства характеризуются тем, чте молниеприемники более или менее возвышаются над защищаемым ими сооружением. На основании теории избирательной поражаемости и представлений о механизме развития грозового разряда может быть предложено нового типа грозозащитное устройство (авторское свидетельство № 22140). Действие этой системы базируется на принципе недопущения или уменьшения величины индуцированных в земле тучей зарядов на территорию, занимаемую защищаемым сооружением, находящимся в земле.

Конструктивно защита может быть выполнена либо сооружением изолирующего барьера в земле, который мог бы задержать подтекание зарядов к месту, куда направляется лидер молнии, либо металлическим барьером, например в виде троса, уложенного в земле вокруг подземного резервуара, собирающим упомянутые заряды на себе, либо применением обоих барьеров—металлического и изолирующего.

Защищаемое сооружение может несколько выступать над поверхностью земли. Размеры защиты зависят от конкретных условий грунта и величины сооружения и могут быть установлены экспериментально на моделях. Таким образом, предлагается метод грозозащиты для наружных сооружений, отличающийся от существующих типов защиты тем, что молниеприемные устройства находятся в земле.

d. Заземляющие устройства

Восприняв разряд, молниеотвод только тогда выполнит свое назначение, когда обеспечит нормальный отвод тока в землю. Система заземляющего устройства может состоять из одного или нескольких электродов, заложенных в землю и присоединенных к токоотводу, спускающемуся от молниеприемника. Тип заземлителя выбирается в зависимости от требуемых величин сопротивления растеканию (R) тока молнии и условий почвы и местности (удельного сопротивления грунта ρ, высыхания почвы и пр.). Сопротивление электрода, заложенного в землю, зависит от ρ строения и влажности почвы, от формы электрода, его расположения относительно других электродов и других факторов. Величину R характеризуют по измерениям переменным током, однако при быстрых изменениях тока молнии, стекающего у его поверхности в землю при больших плотностях на электроде (благодаря чему возникает искрообразование), сопротивление растеканию (R_i) заземлителя может сильно отличаться от значения R. Отношение $\frac{R_i}{R}$ характеризуется импульсным коэффициентом заземления α_i.

Для наиболее употребительных типов заземлителей в табл. 14 приводятся формулы для вычисления R.

В приведенных формулах ρ должно выбираться в зависимости от типа почвы (глина, песок и пр.), влажности, температуры, наличия в грунте солей, кислот и пр. Приближенное сопротивление некоторых грунтов приводится в табл. 15. За расчетное удельное сопротивление грунта $\rho_{\text{расч.}}$ следует принимать возможное максимальное значение удельного сопротивления грунта в течение грозового периода. Расчетное удельное сопротивление грунта определяется из следующего условия: $\rho_{\text{расч.}} = \rho_{\text{изм}}\psi$, где $\rho_{\text{изм}}$ есть удельное сопротивление грунта, полученное непос-

Таблица 15

Наименование грунта	Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^4$ ом. см	
	возможные пределы колебаний величин	при влажности 10÷20% к весу грунта
Песок	4÷7*	7
Супесок	1.5÷4*	3
Суглинок	0.4÷1.5*	1
Глина	0.08÷0.7*	0.4
Черновем	0.096÷5.3	2.0
Речная вода	10	—
Морская вода	0.002÷0.01	—

* Возможны и бо́льшие значения сопротивлений при малом процентном содержании влажности в грунте.

ЭБ "Научное наследие России"

редственным измерением на данном участке в одном из месяцев грозового периода, а ψ—коэффициент изменения удельного сопротивления грунта, ориентировочные значения которого приведены в табл. 16.

Таблица 16

Коэффициент изменения ψ удельного сопротивления грунта для среднеевропейской части СССР

Характер заземлителей	Состояние грунта во время измерений	
	влажный	сухой
Горизонтальные заземлители, уложенные на глубине 0.5 м	1.8	1.4
Трубчатые заземлители длиной 2—3 м.	1.4	1.2

Для достижения необходимого значения R в большинстве случаев приходится выполнять заземлитель из нескольких электродов. Общая проводимость системы электродов меньше суммы проводимостей отдельных электродов из-за взаимного влияния их электрических полей. Снижение проводимости обычно характеризуется коэффициентом использования η системы. В табл. 17—20 приводятся (согласно РУ) данные, достаточные для расчета различных систем заземлителей.

Имея в виду низкие коэффициенты использования при малых расстояниях между электродами, для трубчатых заземлителей рекомендуется принимать расстояние между соседними трубами не меньше, чем длина трубы, а при большом количестве труб это расстояние желательно доводить до двойной длины трубы.

В случае применения параллельно идущих полосовых заземлителей расстояние между полосами не должно быть менее 4 м.

Таблица 17

Коэффициенты использования для трубчатых заземлителей, расположенных в ряд, и для полосы, объединяющей эти трубы в земле

$\frac{a}{l}$	Число труб n	Коэффициент использования		Примечания
		для труб η_1	для соедин. полосы в системе η_2	
1	2	0.85	0.8	1. a — расстояние между соседними трубами
	3	0.8	0.8	
	5	0.7	0.75	2. l — длина трубы
	10	0.6	0.6	3. Приведенные коэффициенты действительны для $\frac{l}{d} \geqslant 20$, где d — диаметр трубы.
2	2	0.9	0.9	
	3	0.85	0.9	
	5	0.8	0.85	
	10	0.75	0.75	
3	2	0.95	0.95	4. Общее сопротивление системы заземления $R_{сист} = \frac{R_1 R_2}{R_1 \eta_2 + R_2 n \eta_1}$, где R_1 — сопротивление заземления одной трубы, R_2 — сопротивление заземления соединительной полосы или кольца
	3	0.9	0.9	
	5	0.85	0.8	

ЭБ "Научное наследие России"

Таблица 18

Коэффициенты использования для трубчатых заземлителей, расположенных по замкнутому контуру, и для полосы, объединяющей эти трубы в земле

$\frac{a}{l}$	Число труб n	Коэффициент использования		Примечания
		для труб η_1	для соедин. полосы в системе η_2	
1	3	0.75	0.5	1. a — расстояние между соседними трубами 2. l — длина трубы 3. Приведенные коэффициенты действительны для $\frac{l}{d} \geqslant 20$, где d — диаметр трубы 4. Общее сопротивление системы заземления $R_{\text{сист}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 \eta_2 + R_2 n \eta_1}$, где R_1 — сопротивление заземления одной трубы, R_2 — сопротивление заземления соединительного кольца
	4	0.65	0.45	
	6	0.6	0.4	
	10	0.55	0.35	
	20	0.5	0.25	
	40	0.4	0.2	
2	3	0.8	0.6	
	4	0.75	0.55	
	6	0.7	0.5	
	10	0.66	0.4	
	20	0.61	0.3	
3	3	0.9	0.75	
	4	0.85	0.7	
	6	0.8	0.65	
	10	0.75	0.56	

Таблица 19

Коэффициент использования радиальных заземлителей

Длина каждого луча, уложенного на глубину 0.5—0.8 м от поверхности земли (в м)	Коэффициент использования η		Примечание
	3 луча	4 луча	
3	0.75	0.62	Сопротивление системы заземления $R_{\text{сист}} = \frac{R_1}{n\eta}$, где R_1 — сопротивление заземления одного луча, n — число лучей, η — коэффициент использования
6	0.77	0.65	
9	0.78	0.68	
12	0.8	0.7	
18	0.81	0.71	

Таблица 20

Коэффициент использования заземлителей из двух параллельных полос

Для каждой полосы, уложенной на глубину 0.5—0.8 м от поверхности земли (в м)	Расстояние между соседними полосами (в м)	Коэффициент использования η	Примечание
15—30	4	0.75	Сопротивление системы заземления из двух полос $R_{\text{сист}} = \frac{R_1}{2\eta}$, где R_1 — сопротивление заземления одной полосы, η — коэффициент использования
	8	0.85	
40—60	4	0.7	
	8	0.8	

ЭБ "Научное наследие России"

Импульсное сопротивление заземлителя R_i является весьма сложной и мало изученной функцией параметров токовой волны молнии, структуры почвы и геометрии заземлителя. Исследования поведения заземлителя при воздействии на него импульсных токов в общем виде не существует. На основании большого количества теоретических и экспериментальных исследований можно установить, что для заземляющих систем, у которых ввод тока расположен не дальше, чем на 10—12 м от крайних элементов заземлителей, импульсное сопротивление будет иметь несколько меньшее значение, чем сопротивление при токе промышленной частоты.

Если же заземлитель имеет бо́льшую протяженность от места ввода тока, то имеет место увеличение импульсного сопротивления, из-за превалирующего влияния индуктивного сопротивления полосы.

Снижение сопротивления R при данном токе молнии больше у системы, расположенной в менее проводящем грунте, так как в таких грунтах искрообразование, вызывающее улучшение проводимости, начинается при меньших плотностях тока. Из этого следует, что α_i тем меньше, чем выше ρ и больше амплитуда тока. В табл. 21 дана сводка значений α_i для некоторых типов заземлителей и определенных условий опытов (по материалам «Руководящих указаний по защите от перенапряжений», 1941 г.).

На основании изложенного не рекомендуется устройство протяженных заземлителей (более 25—30 м) при наличии только одного токоотвода к ним.

Присоединение заземляемых частей к заземлителям осуществляется возможно более короткими проводниками.

Заземлители располагаются так, чтобы ввод занимал относительно них центральное место.

Таблица 21

Импульсные коэффициенты α_i для различных типов заземлителей, определенные при токе молнии не менее 7 kA и длине фронта 2—3 μS для $\rho = 10^4$ ом. см

№№ п/п	Тип заземлителя	α_i
1	Единичный трубчатый заземлитель длиной до 4 м и диаметром до 5 см.	0.8
2	Единичный горизонтальный заземлитель (стальной трос диаметром до 1 см или полоса шириной до 4 см). При длине заземлителя в м (считая от места ввода тока):	
	10	0.8
	20	1.1
	30	1.4
	40	1.7
3	Единичный кольцевой заземлитель (стальной трос диаметром до 1 см или полоса шириной до 4 см), при диаметре кольца в м:	
	4	0.7
	8	0.8
	12	0.9

Для грунта с удельным сопротивлением $\rho = 3 \cdot 10^4$ ом. см значения α_i, приведенные в табл. 21, следует умножить на коэффициент 0.75.

Порядок расчета заземлительной системы, т. е. определения общей величины R_i, таков:

1) на основании сведений о геологии почвы и с учетом факторов, влияющих на изменение удельного сопротивления, устанавливается $\rho_{расч.}$;

2) определяется R;

3) оценивается амплитуда и длина фронта волны тока молнии, протекающего через каждый единичный заземлитель, и на основании этого оцениваются коэффициенты α_i;

4) для каждого единичного заземлителя определяется $R_i = \alpha_i R$;

5) по взаимному расположению единичных заземлителей в системе для каждого типа электрода оцениваются коэффициенты η, согласно табл. 17—20

ЭБ "Научное наследие России"

и по формулам, в них приведенным. При этом в формулы следует, конечно, вместо отдельных значений R_1, R_2 вставлять произведения $R_1\alpha_1$, $R_2\alpha_2$.

е. Превентивные методы грозозащиты

Предупреждение образования грозовых разрядов мыслится при помощи дренирования зарядов тучи до того момента, как их концентрация достигнет значений, при которых возможно образование молний. Другими словами, основой превентивного метода является спокойное и равномерное отведение зарядов из тучи для предупреждения кратковременных и бурных атмосферно-электрических разрядов.

В основе этого метода лежат следующие физические идеи: туча и земля имеют заряды различных знаков, которые создают электрическое поле определенной напряженности. В принципиальном виде процесс заряда тучи может быть представлен в виде схемы, изображенной на рис. 2. Соотношения между величинами зарядных токов, приведенные на стр. 11, указывают на подавляющее значение конвективного тока, образующегося от истечения с остриев.

Эти соображения, а также результаты подсчетов, сделанных на основании анализа кривых восстанавливающегося напряжения, показывают, что ток тучевого генератора достигает 2—4 А. При сильных грозах этот ток может быть значительно больше.

Дренирование зарядов тучи может быть достигнуто созданием противотока, а так как между грозовой тучей и землей существует электрическое поле, дело сводится к необходимости создать повышенную проводимость от тучи к земле. В силу того, что туча в неионизированном состоянии является изолятором, проводимость, даже металлическая, созданная в одной области тучи, не будет достаточной для дренирования зарядов всего объема тучи. Согласно опытам автора и опытам, упомянутым на стр. 204, при подъеме в область тучи металлического, хорошо заземленного троса (на высоту 1 000—2 000 м) молнии вовсе не прекращались, а продолжали поражать землю на определенном расстоянии от основания троса; не предупреждают образования молний и несколько одновременно поднятых в область тучи, соединенных с землей металлических тросов. Для действительного дренирования зарядов необходимо, следовательно, распределить противоток по площади тучи, что сводится к рассеянию зарядов в атмосферу под тучей.

Для осуществления этой задачи могут быть использованы несколько способов. Один из них—усиление истечения электричества из остриев, другой—искусственная ионизация воздуха, например при помощи лучистой энергии.

Проанализируем оба способа.

1. Активизация истечения электричества с земной поверхности при данной напряженности поля может быть осуществлена созданием большого количества острых металлических стержней, например подвеской заземленных колючих проволок (как это предусмотрено системой Кейдж) или другими аналогичными средствами.

По американским данным, ток, рассеиваемый тремя рядами колючей проволоки, подвешенной на высоте около 30 м, достигает 1 200 μA с одного погонного метра устройства. Ряд замеров, проведенных автором в высокогорной лаборатории в Бакуриани (в течение 1939 г.), показал, что антенна диаметром 7 мм, имевшая длину 900 м и среднюю высоту подвеса около 30—40 м во время близких гроз, сопровождавшихся разрядами на землю, пропускала ток истечения, доходивший всего лишь до 500—800 μA. Согласно американским данным, подвеска 2—3 км колючей проволоки должна произвести дренирование зарядов тучи, питающейся током 2—3 А. Однако такое рассуждение ошибочно по следующим причинам:

а) подвеска колючей проволоки искажает электрическое поле у земли, экранируя определенную площадь, и благодаря этому лишь отчасти может вызвать увеличение рассеивания зарядов с данной площади;

б) выделяющиеся из остриев заряды образуют пространственный объемный заряд, ослабляющий поле между тучей и тросом и уменьшающий эмиссию.

ЭБ "Научное наследие России"

С другой стороны, поле между тучей и этим зарядом усиливается, что может лишь облегчить возникновение молнии;

в) эмитированные заряды, осевшие на молекулах воздуха, подвергаются воздействию ветра, поэтому не все из них дойдут до тучи.

Тот факт, что даже над самыми крупными городами, в которых имеется огромное количество мачт, антенн, тросов и металлических крыш с многочисленными ребрами (в месте сочленения кровельного железа), развиваются грозы, указывает с очевидностью на недостаточность дренирования зарядов наземными установками для предотвращения образования молнии.

Перейдем к вопросу о противогрозовой защите, известной под названием системы Мельсанса. Существует мнение, что эта система предупреждает попадание молнии в защищаемое сооружение. Между тем можно со всей определенностью утверждать, что система Мельсанса практически не может рассматриваться как сколько-нибудь эффективная, доказательством чего служат неоднократно зарегистрированные в СССР методом магнитозаписи случаи поражения сооружений, защищенных этой системой.

2. Ионизация воздуха лучистой энергией возможна несколькими путями; практически наиболее доступные из них: γ-лучи от радиоактивных элементов и рентгеновское излучение. Число пар ионов, производимых радиоактивным веществом, определяется рядом коэффициентов. В состоянии равновесия с продуктами своего распада один грамм радия выделяет в одну секунду $3.5 \cdot 10^{10}$ α-частиц. Образование α-частицы сопровождается выделением одного или нескольких γ-лучей[1] (ионизирующим действием самих α-частиц и β-лучей, ввиду их малой проникающей способности, пренебрегаем). Длина лучей зависит от длительности T жизни радиоактивного материала (λ уменьшается с уменьшением T). Для радия $\lambda = 66 \cdot 10^{-11}$ см. Принимая, что 1 г радия выделяет $3.5 \cdot 10^{10}$ γ-лучей с длиной волны $\frac{66 \cdot 10^{-11}}{10^{-8}} = 66 \cdot 10^{-3}$ Å, найдем энергию излучения (V_i) в вольт-электронах по формуле $\lambda V_i = 12\,340$, в которой λ выражается в Å:

$$V_i = \frac{12\,340}{66 \cdot 10^{-3}} = 1.86 \cdot 10^5 \text{ вольт-электронов.}$$

Работа ионизации при расщеплении атома воздуха равна приблизительно 32.5 вольт-электрона. При больших энергиях γ-лучей число пар ионов, образуемых фотоном, пропорционально всей энергии потока лучистой энергии и равно

$$\frac{1.86 \cdot 10^5 \cdot 3.5 \cdot 10^{10}}{32.5} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ пар ионов/сек.}$$

При коэффициенте абсорбции γ-лучей, равном $4.4 \cdot 10^{-5}$ см$^{-1}$($R_a C$), слой воздуха, пронизываемый излучением, измеряется сотнями метров (половина лучей застревает в 150-метровом слое воздуха), и следовательно, в области тучи, находящейся на высоте 1—2 км, ионизирующее действие лучей будет весьма слабым. Если бы даже все ионы, выделенные γ-лучами, достигли тучи, то в приведенном примере общий заряд, доставляемый этим источником ионизации в 1 сек., достиг бы $2 \cdot 10^{14} \cdot 2 \cdot 1.59 \cdot 10^{-11} = 6.3 \cdot 10^{-5}$C, что составляет ничтожную часть от заряда тучи. Таким образом, при применении радиоактивных веществ нет оснований ждать сколько-нибудь существенного дренирования зарядов тучи.[2] Однако в литературе описываются попытки использовать для грозозащитных установок свойство радиоактивности.

Ярко выраженной превентивной системой молниеотвода является устрой-

---

[1] Под γ-лучами имеется в виду квант излучения с длиной волны λ и энергией hc, где h—постоянная Планка, c—скорость света.

[2] В главе VI приводятся соображения некоторых исследователей, считавших, что колонны воздуха, ионизированные γ-лучами, должны служить, в отличие от скаванного здесь, молниеотводами.

ЭБ "Научное наследие России"

ство, получившее название молниеотвода Helita. Это радиоактивный молниеотвод, изобретенный Сциллардом. с дополнительным устройством, позволяющим использовать само атмосферное электричество для создания потенциала, увеличивающего скорость ионов, эмитируемых радием. В этом случае получается устройство с большой активностью умеренных доз радия. Как отмечалось выше, Сциллард констатировал, что применение радия позволяет резко увеличить ток, расходуемый молниеотводом, ввиду чего возможно уменьшение заряда тучи и предупреждение грозовых разрядов. Число разрядов в районе, защищенном радиевыми молниеотводами, согласно этим представлениям, будет меньше, чем число разрядов в отсутствие этих защитных устройств, ибо тучи не смогут в достаточной степени аккумулировать заряды. В связи с этим необходимо отметить, что эксперименты по извлечению атмосферного электричества, произведенные в 1933—1934 гг. Пароди в Италии, показали, что постоянный ток от устройства, имевшего около 200 металлических игл, укрепленных на башне, высотой 35 м, при ясном небе достигал 7 mA, а при грозе 19 mA. При радиоактивированных иглах, по мнению Гренье, результаты должны получиться значительно более интересными.

Несмотря на то, что именно сравнительные данные о величине тока, протекающего через обычный и радиоактивный молниеотводы, имеют весьма важное значение при оценке их эффективности в способности дренировать (выкачивать) заряды из тучи, Гренье не дает каких-либо количественных оценок действия рекомендуемого им типа грозозащиты.

Постоянная эмиссия ионизирующих лучей радиоактивных игл создает, по мнению Гренье, проводящий путь между тучей и молниеотводом и позволяет получить, по его утверждению, радиус действия в несколько сот метров. Лучи проникают, повидимому, на значительную высоту над слоем нулевого потенциала и действуют при количествах радия, практически доступных для применения в более или менее грозовом состоянии атмосферы.

Количество радия имеет большое значение и теоретически должно давать возможность изменять радиус действия молниеотвода без изменения других элементов устройства. Опыты Сцилларда были проведены с довольно значительными количествами радия, что делает применение такого типа молниеотвода даже при положительном эффекте весьма затруднительным.

Увеличение эмиссии радия физическими и химическими воздействиями невозможно. С целью усиления действия молниеотвода общество Helita направило усилия к увеличению скорости выбрасываемых ионов, используя классическую технику ускоряющих потенциалов. Достаточно поместить вблизи радиоактивного вещества металлическую поверхность, имеющую высокий положительный потенциал, чтобы ускорить выбрасывание вверх положительных ионов, производимых радием. Для создания необходимого высокого потенциала без применения постороннего источника общество Helita использует само атмосферное поле. Радиевый молниеотвод получает при этом такую форму. Вертикальный стержень металлически связан со спуском к заземлителю. На верхушке стержня помещается эмалированный фарфоровый сосуд, покрытый нерастворимой солью радия. При этом активная часть прибора не подвержена различным атмосферным факторам, и срок ее службы неограничен. Известно, что полураспад радия длится 1580 лет, и потому ограничение использования молниеотвода с этой стороны не имеет места.

Над радиоактивным веществом находится металлический диск, укрепленный на изолирующей подставке, связанной с металлическими антеннами (длина которых не указывается).

Это устройство должно, по мысли изобретателей, быть аналогичным действию, хорошо известному физикам под названием «включения радия под потенциал». Названный выше металлический диск находится под потенциалом слоя атмосферы, имеет положительный знак и весьма большую величину относительно нулевого потенциала заземленного стержня. Таким образом, налицо металлическая пластина высокого потенциала вблизи радия. Можно сказать, что защитный радиус молниеотвода является функцией грозового состояния

ЭБ "Научное наследие России"

атмосферы, ибо ускоряющий потенциал, используемый в молниеотводе Helita, увеличивается с приближением грозы и возрастанием ее интенсивности.

Здесь следует, однако, отметить, что при увеличении активности молниеотвода должно иметь место увеличение текущего через него тока, благодаря чему будет происходить усиление связи антенн, создающих потенциал с землей, что ведет к снижению ускоряющего потенциала. Как велико это взаимодействие между усиливающим эффектом поверхностей, покрытых радиоактивными солями, и снижением ускоряющего потенциала антенны, должен показать опыт[1].

В 1936 г. Гренье сообщил, что после четырех лет эксплоатации молниеотвода можно заключить, что зона защиты прибора простиралась на сотни метров.

К сожалению, однако, присоединиться к этому мнению нет достаточных оснований. Нет также никаких данных полагать, что в количественном отношении радиоактивный молниеотвод сможет дренировать заряды тучи.

Бо́льшие, чем от радиоактивных веществ, интенсивности лучистой энергии могут быть получены искусственным путем, например с помощью рентгеновских установок. Было предложено поэтому использовать для предупреждения молний рентгеновские лучи. Количественные соотношения при ионизации воздуха рентгеновскими лучами определяются следующим образом.

Полное число пар ионов N, возникающих при облучении воздуха рентгеновской трубкой, к которой подведено напряжение V и через которую протекает ток I, может быть очень приближенно определено по формуле

$$N = \frac{VI\eta}{\varepsilon}, \tag{11}$$

где η — коэффициент, учитывающий преобразование подводимой к трубке мощности в рентгеновское излучение ($\eta = 10^{-3} \div 10^{-4}$), ε — работа ионизации (для случая ионизации воздуха $\varepsilon \approx 32.5$ вольт-электронов).

Если принять $V = 100$ kV, а $I = 100$ mA, то приведенная формула дает

$$N = \frac{10^{-1} \cdot 10^{5} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 6.3 \cdot 10^{11} \cdot 10^{7}}{32.5} = 9.7 \cdot 10^{17} \text{ пар ионов/сек.}$$

Если принять, что к нижнему краю тучи в течение одной секунды, в соответствии с изложенным выше, подводится 3 С или $\frac{3 \cdot 10^{19}}{1.59} = 1.9 \cdot 10^{19}$ электронов, то отношение величин искусственной и естественной генерации зарядов составит около 0.05.

Следует еще отметить, что высота, на которую проникают рентгеновские лучи, относительно невелика. Так, в случае $V = 100$ kV длина наиболее короткой волны спектра излучения, определяемая из соотношения $\lambda = \frac{12.3}{V}$, равна 0.123Å. Это излучение составляет лишь незначительный процент от всего спектра, испускаемого антикатодом рентгеновской трубки, но даже для этой волны, для которой полный коэффициент поглощения в воздухе при атмосферном давлении $\mu + \sigma = 1.9 \cdot 10^{-4}$ см$^{-1}$ (пользуясь формулой $L = L_0\, e^{(\mu+\sigma)x}$), можно установить, что уже на высоте 300 м рентгеновское излучение имеет лишь 0.3% начальной интенсивности и не может иметь практического влияния на проводимость воздуха. Необходимо еще учесть, что лишь незначительная часть далеко не всех ионов, образующихся в воздухе под действием рентгеновского излучения, достигнет области тучи вследствие процессов рекомбинации разноименно заряженных частиц.

Ввиду изложенного, рассчитывать на искусственное воздействие рентгеновских лучей на путь развивающегося лидера уже в области тучи или дренирования заряда при практически рентабельно реализуемых рентгеновских установках не приходится.

---

[1] Необходимо, конечно, учесть, что знак поля не всегда будет благоприятен для работы молниеотводов.

ЭБ "Научное наследие России"

Исходя из представления, что молния поражает избирательно места, где отрицательные ионы преобладают над положительными, Вьель делает вывод, что если помешать образованию отрицательных ионов, то можно предотвратить попадание молнии в очень часто поражаемые места. Достаточно, по мнению Вьеля, обратить электрическое поле вблизи земли, сообщая земле положительный заряд, чтобы она выделяла положительные ионы.

Практическая реализация этого метода может быть осуществлена в форме системы горизонтальных проволок, накрывающих местность, где происходит выделение отрицательных ионов. Сетка ставится под отрицательное напряжение в несколько сот вольт относительно земли.

Эксперименты Вьеля, по его словам, позволяют заключить об эффективности этого устройства в свободной атмосфере. Был проделан опыт с пластиной площадью 1 м², присоединенной к напряжению 450 V относительно земли и помещенной в погребе, где проводимость была достаточно высокой. В несколько минут проводимость изменилась в 2—3 раза и осталась на этом уровне. Таким образом, Вьель полагает, что имеется практическое средство уменьшать проводимость, например внутри хлевов во время гроз, и снижать число несчастных случаев. В отношении этой системы защиты можно лишь повторить критические замечания, высказанные по поводу радиоактивного молниеотвода, добавив, что предлагаемые здесь конструктивные мероприятия лишены каких-либо практических оснований.

f. Заключение по различным системам грозозащиты

Резюмируя изложенный в настоящей главе материал, можно сформулировать некоторые основные положения о различного вида грозозащитных устройствах.

На рис. 177 в виде схемы показаны типы защиты, расклассифицированные по принципам действия и конструктивному оформлению. Как видно, существую-

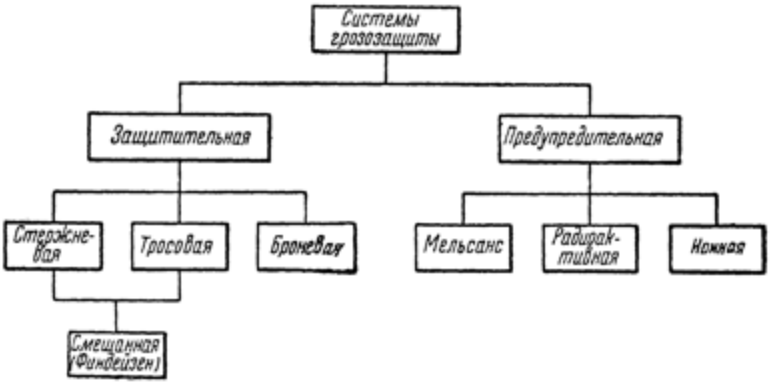


Рис. 177. Схема известных типов грозозащиты

щие системы распадаются на два вида: 1) предупредительная (превентивная) и 2) защитительная (воспринимающая разряды на себя). Зарождение обоих видов грозозащиты произошло почти одновременно. Однако на практике наибольшее распространение получила защитительная система. Основная идея предупредительной защиты сводится к дренированию зарядов туч, благодаря чему должно предупреждаться появление грозовых разрядов. Средством для достижения этой цели является рассеивание электричества с остриев (система Мельсанса), создание проводящих путей между тучей и землей (радиоактивный молниеотвод Helita) и паллиативный способ, основывающийся на создании ионных облаков вблизи защищаемых объектов.

Анализ молниеотводов этой группы показывает отсутствие достаточных экспериментальных количественных характеристик и данных статистики, на основе которых можно было бы произвести объективную проверку предлагаемых способов.

ЭБ "Научное наследие России"

Опираясь же на проведенный анализ энергетических соотношений, заключаем, что делать выводы о рациональности практического использования этих систем преждевременно.

Особо нужно коснуться достаточно широко распространенной системы Мельсанса. Формально эта система может рассматриваться как прообраз сеточного (тросового) молниеотвода. Однако, если рассматривать эту систему защиты как превентивную, что часто делается, то конструктивное оформление ее не рассчитывается на попадание в нее прямого удара. При этом сетка обычно расположена на небольшом расстоянии от кровли или на самой кровле и уже не может служить надежным токоотводом, так как сетка в этой системе не изолирована от защищаемого сооружения. Применение ее в таком состоянии для защиты взрыво- и огнеопасных объектов недопустимо. Если же системе Мельсанса приписывать смысл защитной клетки по типу клетки Фарадея, что, по нашему мнению, является единственно правильным, то такое устройство грозозащиты не будет отличаться от аналогичных устройств второй из названных групп. При этом, однако, система должна быть рассчитана на прямой удар молнии[1].

Практически это означает выполнение проводников сетки достаточного сечения с точки зрения термического воздействия молнии. Помимо этого, пучки игл, предназначавшиеся Мельсансом для рассеивания электрических зарядов, следует заменить более рациональными молниеприемниками, защищающими поверхность крыши от попадания в нее разрядов. Размеры ячейки сетки определяются по принципу: чем гуще сетка, тем надежнее защита.

Экономия металла часто заставляет делать сетку с расстояниями между проводниками порядка 4—5 м. Нужно, однако, указать, что при такой конструкции сетки, по крайней мере в некоторых особо ответственных случаях, защита не сможет быть полноценной ввиду слабой экранировки внутренности сооружения от электромагнитных воздействий.

Практические рекомендации по конструктивному выполнению сетки могут даваться лишь в зависимости от специфики защищаемого объекта.

Идеальным (с точки зрения электрической) методом защиты второй группы является полное покрытие всего защищаемого объекта металлической броней (броневая защита). Такая система защиты естественно выполняется у цельнометаллических сооружений. Однако и в этом случае необходимо при выполнении конкретных объектов учитывать специфику защищаемого объекта, как, например, его взрывоопасность, способность к детонациям и пр. Выполнение броневой защиты в огромном большинстве случаев не может иметь места по экономическим соображениям. В силу этого необходим переход к системе, требующей меньших затрат металла, т. е. к созданию системы клеток, тросовых сеток, стержневых молниеотводов или их комбинаций. Фундаментальным вопросом в этом случае является установление тех зон, которые при выполненной конструкции грозозащиты гарантированы от проникновения в них непосредственно молнии или появления искрения благодаря действию электромагнитной индукции или электростатических явлений.

Принципиально установление защитных зон различных конструкций стержневых и тросовых молниеотводов не встречает затруднений. Однако решающим моментом при выборе полученных в экспериментах или расчетах защитных зон является отсутствие достаточных сведений о высоте ориентировки молнии. По существу все исследования последних лет, направленные к уточнению защитных зон, имеют общий пробел из-за отсутствия этой величины.

Останавливаться на практических методах проектировки грозозащиты нет надобности, ибо этот вопрос достаточно подробно освещен в нашей литературе.

g. Защита от вторичных воздействий молнии

Вторичными воздействиями молнии называются такие воздействия, при которых нет непосредственного контакта между главным каналом молнии или одним из его разветвлений и объектом, потерпевшим поражение. С формаль-

[1] При этом система Мельсанса переходит в левую ветвь схемы рис. 177.

ЭБ "Научное наследие России"

ной точки зрения к этой категории можно отнести и случаи поражения людей, находившихся близ места удара молнии, шаговым напряжением (см. подробней раздел i этой главы), хотя в этом случае имеет место непосредственный контакт пострадавшего если не с каналом, то с токами, протекающими в земле.

Под вторичными проявлениями грозового разряда понимаются явления, сопутствующие основному грозовому разряду. К вторичным проявлениям можно отнести:

1) электрическую индукцию разряжающего облака,

2) электромагнитное влияние тока грозового разряда,

3) электромагнитные волны,

4) шаровую молнию (условно).

Электростатическая индукция. Грозовая туча создает между собой и землей электрическое поле, напряженность которого определяется зарядом тучи, расположением его относительно земли. Благодаря наличию этого поля на поверхности земли в объектах, с ней соединенных, индуцируются заряды со знаком, обратным знаку зарядов тучи. При этом, поскольку нарастание потенциалов тучи происходит достаточно медленно, индуцированные заряды появляются даже на объектах, которые с обычной точки зрения могут рассматриваться как изолированные относительно земли (например, провода линий сильного и слабого токов, металлические кровли деревянных сооружений и т. п.). Если бы эти объекты были изолированы относительно земли идеально, поле грозовой тучи не вызывало бы разделения зарядов.

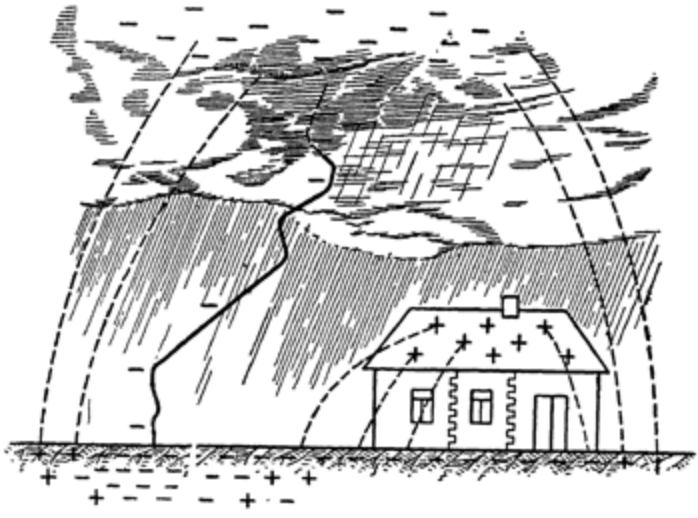


Рис. 178. Иллюстрация появления индуцированных зарядов на сооружении в поле грозовой тучи

Однако в действительности даже такая высокая, с обычной точки зрения, изоляция, как фарфор и т. д., обладает некоторой утечкой, благодаря которой заряды, одноименные с зарядами тучи (если нарастание поля тучи происходит, как это и имеет место в действительности, достаточно медленно), успевают стекать в землю.

Естественно, что после грозового разряда, который длится значительно меньшее время, чем процесс формирования поля грозовой тучи, заряды на рассматриваемом объекте, которые были связаны с зарядами тучи, благодаря высокому сопротивлению утечки не успевают стечь в землю и нейтрализоваться противоположными по знаку зарядами тучи. В течение некоторого времени заряды, индуцированные на объекте, и связанные с ними заряды тучи, которые теперь оказались уже на поверхности земли, образуют поле, определяющее величину разности потенциалов между рассматриваемым объектом и землей (рис. 178).

Разность потенциалов может появиться, например, между металлической кровлей деревянного или каменного здания и водопроводными и канализационными трубами здания или другими заземленными объектами.

В других случаях, наоборот, опасные разности потенциалов, обусловленные электростатической индукцией, могут быть занесены в здание, все элементы которого заземлены извне благодаря наличию электрической воздушной проводки, на которой могут появиться индуцированные напряжения.

ЭБ "Научное наследие России"

Оставляя в стороне вопрос о предельной величине индуцированных за счет электростатической индукции напряжений, следует отметить, что они являются более чем достаточными для создания весьма интенсивного искрения между двумя проводниками, расположенными друг от друга на расстоянии, по крайней мере, 10 см. Учитывая же, что эти значения не являются предельными и что дополнительные э. д. с., наведенные за счет электростатической индукции зарядов приближающегося к земле лидера, также могут играть известную роль, расстояния порядка 30—50 см также нельзя считать безопасными в смысле перекрытий искровыми разрядами при сильных ударах молнии.

Приведенные значения относятся к объектам, высота которых не превышает 20—25 м. Чем объект выше, тем потенциалы, индуцируемые на нем, больше и тем бо́льшим следует принимать безопасное расстояние между этим объектом и ближайшим заземленным предметом.

Из сказанного ясно, что основной мерой борьбы с появлением внутри сооружений потенциалов, ведущих к искрообразованию, обусловленных электростатической индукцией, является заземление всех проводящих элементов сооружения. Напомним, что выходящие за пределы здания электрическая или телефонная воздушная проводки могут занести внутрь сооружения опасные потенциалы.

Электромагнитное влияние тока молнии. Если все проводящие элементы сооружения заземлены и внутри него не содержатся крупные изолированные от земли металлические предметы, оно все же может пострадать от вторичного поражения молнией в результате электромагнитной индукции. Действительно, если какой-либо проводник, например трубопровод, электрический кабель и т. п., даже надежно заземленный в одной или нескольких точках, образует контур, пересекаемый линиями магнитного поля тока молнии, в нем индуцируется некоторая э. д. с. Если контур замкнут, эта э. д. с. вызывает протекание в нем токов, которые в случае плохого контакта (например, в месте соприкосновения поржавевших железных частей и т. п.) могут вызвать местные перегревы, опасные с точки зрения возможности воспламенения взрывоопасных веществ. Значительно вероятнее появление искрообразования в незамкнутом контуре, концы которого находятся в непосредственной близости друг от друга, но между собой непосредственно не соединены. Электродвижущая сила, индуцируемая в таком контуре магнитным полем тока молнии, может оказаться достаточной для образования искры между близко расположенными частями одного и того же контура.

Сказанное иллюстрируется рис. 32, на котором изображенный контур может быть образован, например, металлическим каркасом здания и водопроводом, соединенным электрически у поверхности земли, но идущим раздельно до верха здания, где они опять сближаются, но не соединяются электрически. Это место сближения и может явиться источником искрообразования при появлении э. д. с., обусловленной магнитным полем тока молнии в контуре каркас—водопроводная труба.

Предупреждение искрообразования может быть достигнуто лишь устройством хороших соединений между металлическими частями.

Электромагнитные волны. Энергия прямого удара молнии, попавшего в здание или в установленный на нем молниеотвод, частично рассеивается в земле в непосредственной близости к заземлениям защиты, частично в форме электромагнитных волн может заноситься на соседние сооружения (даже далеко отстоящие от пораженного здания) по различным металлическим системам—водопроводу, газопроводу, канализации, трубопроводам, оболочкам кабелей, рельсовым путям и т. п.

К этому же виду вторичных проявлений грозового разряда нужно отнести передачу на различные объекты через землю потенциала от заземления молниеотвода при ударе в него молнии.

Когда прямой удар молнии в защищаемое здание исключен и заземления молниеотводов находятся далеко, проводящие системы, находящиеся в земле, принимают уже не полный грозовой потенциал заземлений, а лишь часть его,

ЭБ "Научное наследие России"

обусловленную их удалением от заземлений и интенсивностью спадания потенциала в земле.

В целях снижения амплитуды волны на трубопроводах и других металлических объектах значительной протяженности следует избегать близости заземлений молниеотводов к подземным проводящим системам. Особенно это относится к электрическим кабелям, которые могут заносить электромагнитные волны в здания и вызывать там нежелательные последствия. В особо ответственных случаях следует устраивать особую защиту кабелей (разрядники и пр.).

Шаровая молния. Подробное рассмотрение шаровых молний было сделано в главе V. Легко представить, насколько может быть опасна шаровая молния, проникшая, например, в огне- или взрывоопасное помещение. Защита от шаровой молнии требует принятия особых мер.

До сих пор не только не существует сколько-нибудь надежных методов защиты от шаровой молнии, но и не установлены даже принципы такой защиты. Несомненно, что ни стержневые, ни антенные молниеотводы не представляют сколько-нибудь надежной защиты от шаровой молнии, так как неоднократно были зарегистрированы случаи поражения шаровой молнией объектов, которые с точки зрения поражения обычной молнией были заэкранированы вполне надежно.

Хотя и есть указания на то, что шаровая молния способна проникнуть даже через закрытое окно, пробив оконные стекла, все же можно, повидимому, считать целиком закрытое помещение при закрытых окнах и воздухопроводах достаточно защищенным от действия шаровой молнии.

В качестве элементарных мероприятий можно рекомендовать:

1) установление над входными отверстиями труб в вентиляционных проходах металлических заземленных сеток с площадью отверстий не более 4 см^2;

2) закрытие во время грозы окон, дверей и пр. Эти меры должны особенно тщательно осуществляться в огне- и взрывоопасных помещениях.

Исходя из представления, что шаровая молния есть светящаяся часть невидимого линейного грозового разряда, благоприятное действие будут оказывать проволоки, соединяющие металлические крыши зданий с землей.

h. Общее положение по классификации сооружений с точки зрения их грозозащиты и необходимых защитных мер

Согласно уже упоминавшимся РУ, все виды зданий и сооружений разделяются на четыре категории, для которых предусмотрены свои меры защиты.

Первая категория. К ней относятся:

1. Производственные, складские и другие виды помещений и сооружений, в которых в воздухе могут образовываться смеси паров, газов и пыли в концентрациях, опасных для взрыва от электрической искры, и в количествах, при которых возникновение взрыва может привести к серьезным разрушениям оборудования и здания или к человеческим жертвам.

Исключение составляют сооружения, в которых хотя и может образоваться взрывчатая смесь газов, паров и пыли, однако само сооружение представляет собой сплошной металлический экран, в силу чего возникновение электрической искры от грозы внутри такого сооружения мало вероятно. К ним относятся, например, металлические резервуары горючих жидкостей (бензина, спирта и т. д.), металлические газгольдеры с огне- и взрывоопасными газами без отепления, металлические трубопроводы горючих жидкостей или огне- и взрывоопасных газов и т. д. Такого рода сооружения следует отнести ко второй категории.

2. Все виды зданий и сооружений, в воздухе которых хотя и не может образоваться взрывчатая смесь газов, паров и пыли, но содержится много взрывчатых и легко воспламеняющихся веществ в открытом виде или в неметаллических укупорках; возникающие в таких помещениях искры от грозовых разрядов могут непосредственно соприкасаться с огне-взрывоопасными веществами. К такого рода сооружениям относятся, например, хранилища, в которых взрывчатые вещества содержатся в неметаллических укупорках, в деревянных ящиках, в мешках и т. д.

ЭБ "Научное наследие России"

Меры защиты сооружений первой категории

1. Все виды зданий и сооружений первой категории защищаются от прямых ударов молнии, от вторичных проявлений молнии и от заноса высоких потенциалов через воздушные провода, кабели, трубопроводы, деревья и т. п.

2. Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов, надземные и подземные токопроводящие элементы которых должны быть изолированы от частей защищаемого объекта и от всяких других металлических предметов (от заземлителей для защиты от вторичных проявлений молнии, трубопроводов, кабелей, проводов и т. п.), имеющих связь с защищаемым объектом.

3. Необходимые расстояния от надземных и подземных токопроводящих элементов молниеотводов до частей защищаемого объекта и металлических протяженных предметов, имеющих связь с защищаемым объектом, выбираются расчетным путем.

4. Сопротивление заземления молниеотводов целесообразно применять порядка 10 Ω.

5. Необходима защита от вторичных проявлений молнии, защита от заноса высоких потенциалов через воздушные провода, кабели и посредством деревьев.

6. Все виды сооружений первой категории, находящихся в земле, защищаются в полном соответствии с перечисленными выше мерами. При этом защита от прямых ударов молнии осуществляется так, чтобы все выступающие из-под земли части (например, газоотводные трубы) и вся площадь поверхности земли непосредственно над сооружением находились в зоне защиты.

7. Некоторые виды зданий и сооружений первой категории могут иметь такую большую высоту, что для них осуществление защиты от прямых ударов молнии с помощью изолированных молниеотводов практически трудно выполнимо. К такого рода сооружениям относятся, например, элеваторы, высокие газгольдеры с отеплением, многоэтажные производственные здания и т. п. Для такого рода сооружений в виде исключения допускается осуществление защиты от прямых ударов молнии с помощью молниеотводов, не изолированных от здания, с токоотводами, проложенными непосредственно по стенам сооружения. При этом необходимо соблюдать следующие меры предосторожности.

а) Сопротивление заземления молниеотводов должно быть не более 5 Ω; желательно заземлитель устраивать в виде контура, охватывающего все сооружения.

б) Следует создать условия для выравнивания потенциалов на отдельных уровнях сооружения между токоотводами и всеми металлическими деталями сооружения, а также металлическими предметами внутри сооружения. Такое выравнивание потенциалов следует создавать во всяком случае на уровнях междуэтажных перекрытий путем устройства на каждом уровне замкнутого металлического контура, соединяющего между собой все токоотводы. К этим контурам должны быть присоединены кратчайшими путями все металлические конструкции сооружения и все металлические предметы, находящиеся внутри здания. Для вновь проектируемых или находящихся в стадии строительства железобетонных сооружений необходимо использовать железную арматуру стен, колонн, междуэтажных перекрытий, потолка и пола в качестве выравнивающей сетки. Для этой цели должно быть предусмотрено соединение арматуры между собою и присоединение ее к выравнивающим контурам. Кроме того, арматура колонн должна быть присоединена к контуру заземления. Железная арматура колонн может быть использована в качестве токоотводов при условии, что отдельные элементы арматуры в местах их стыков будут надежно сварены между собой.

в) Все мероприятия в части защиты от вторичных проявлений молнии выполняются в соответствии с требованиями для сооружений первой категории.

г) Защита от заноса высоких потенциалов через воздушные провода, кабели, трубопроводы и т. д. выполняется в соответствии с требованиями для сооружений второй категории.

д) Для газгольдеров, имеющих газоотводные трубы, необходимо также создать условия, делающие маловероятным воспламенение от канала молнии выходящих из этих труб газов. Молниеотводы должны возвышаться над верхними частями газоотводных труб не менее чем на 3 м и быть к ним не ближе 5 м.

Вторая категория. К ней относятся:

1. Все виды зданий и сооружений, в которых взрывчатая смесь газов, паров и пыли может образоваться в таких количествах, что взрыв их может носить только местный характер (в виде хлопка) и, следовательно, не может повлечь сколько-нибудь серьезных разрушений и не угрожает жизни людей. К такого рода сооружениям, например, могут быть причислены производственные помещения, в которых производится механическая (физическая) обработка взрывчатых веществ или применяется бензин, спирт и пр. в качестве промывочных средств.

2. Складские помещения и хранилища взрывчатых веществ, в которых эти вещества содержатся в металлических укупорках (в металлических ящиках, в металлических цилиндрах и т. п.).

3. Сооружения, в которых может образоваться взрывчатая смесь газов, паров или пыли, однако само сооружение представляет собой цельнометаллическую конструкцию, т. е. сплошной металлический экран (металлические резервуары, цистерны, газгольдеры без отепления и всякие другие емкости легко воспламеняющихся жидкостей).

ЭБ "Научное наследие России"

Меры защиты сооружений второй категории

1. Все виды зданий и сооружений второй категории защищаются от прямых ударов молнии, от вторичных проявлений молнии и от заноса высоких потенциалов через воздушные провода, кабели, трубопроводы, деревья и т. п.

2. Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов, непосредственно установленных на защищаемом объекте. Токоотводы прокладываются по стенам и крыше защищаемого объекта. Заземлители для отвода токов молнии и для защиты от вторичных проявлений молнии могут быть совмещены. Общее сопротивление заземления не должно превышать 10 Ω.

3. Если защищаемый объект попадает под определение 1 или 2 второй категории и имеет металлическую крышу, то сама крыша может быть использована в качестве молниеприемника. Число токоотводов, соединяющих крышу с заземлителем, должно быть по возможности большим, и во всяком случае токоотводы должны быть проложены по углам сооружения и не менее чем через каждые 10—15 м.

4. Для объектов, подпадающих под определение 3 второй категории и обладающих полной герметичностью с достаточной толщиной металлических стен и крыши (толщиной не менее 2 мм), установка специальных молниеприемников и токоотводов не требуется. Роль молниеприемников с успехом может выполнять металлическая крыша, а роль токоотводов—металлические стены сооружения. В данном случае вся защита сводится к тщательному заземлению стенок объекта. Заземлитель целесообразно устраивать в виде замкнутого контура, окружающего весь объект.

5. В тех случаях, когда защищаемый объект, подпадающий под определение 3, обладает газоотводными трубами (свечками, например, резервуары, газгольдеры и т. п.), установка молниеприемников обязательна. Высота и взаимное расположение молниеприемников в этом случае выбираются из условия защиты от прямых ударов молнии всей площади крыши объекта и всех выступающих частей и верхних концов газоотводных труб. Целесообразно располагать молниеприемники по возможности дальше от газоотводных труб, во всяком случае для газгольдеров не ближе 4—5 м.

Для газгольдеров превышение молниеприемников над верхними концами газоотводных труб должно быть не менее 3 м.

Для баков и резервуаров легко воспламеняющейся жидкости (бензин, нефть, керосин) превышение молниеприемников над крышей следует делать не менее 3 м при диаметре защищаемого объекта 5—7 м и не менее 5 м при диаметре большем 7 м.

6. Необходима защита от вторичных проявлений молнии, от заноса высоких потенциалов через воздушные провода, кабели, трубопроводы и деревья. Внутри цельнометаллических объектов не требуется специальных мер для защиты от вторичных проявлений.

Третья категория. К ней относятся:

Все виды зданий и сооружений, в которых отсутствуют взрывчатые или легко воспламеняющиеся вещества. Для зданий и сооружений третьей группы удар молнии опасен в смысле механических разрушений, пожара и несчастных случаев с людьми, находящимися внутри их. К третьей категории можно отнести, например, все виды фабрично-заводских зданий и сооружений, в которых не изготовляются и не перерабатываются взрыво- и огнеопасные вещества (металлообрабатывающие, деревообделочные и тому подобные производства), жилые здания и другие общественные помещения, фабрично-заводские трубы, всякого рода башни, памятники и т. п.

Исключение составляют помещения для содержания большого количества скота в силу их специфических особенностей в отношении необходимости специальных мер от шаговых напряжений и напряжений прикосновения.

Меры защиты зданий и сооружений третьей категории

1. Сооружения третьей категории защищаются от прямых ударов молнии молниеотводами, установленными на самом сооружении, и токоотводами, проложенными по стенам здания. Сопротивление заземления молниеотводов может иметь величину порядка 20—30 Ω.

В качестве заземлителей могут быть использованы все существующие в пределах сооружения металлические подземные устройства.

2. Если защищаемое здание (сооружение) имеет металлическую кровлю, то специальных молниеприемников не требуется, и вся защита от прямых ударов молнии осуществляется надежным заземлением металлической крыши.

Только для выступающих над крышей неметаллических частей (архитектурные украшения, дымовые трубы и т. д.) следует предусмотреть специальные молниеприемники, установленные непосредственно на этих частях и надежно соединенные с металлической кровлей. Металлическую кровлю следует заземлить в нескольких местах. Токоотводы следует прокладывать по углам здания и не менее чем через каждые 15—20 м.

3. В качестве токоотводов могут быть использованы металлические водосточные трубы. Независимо от того, используются или нет металлические водосточные трубы в качестве токоотводов, их всегда следует заземлять.

ЭБ "Научное наследие России"

4. Если защищаемое здание имеет легко воспламеняющуюся мягкую крышу (солома и т. д.), токоотводы по крыше следует располагать таким образом, чтобы они не соприкасались с материалом крыши во избежание ее возможного воспламенения от нагретого ударом молнии токоотвода. Лучше всего в таких случаях токоотводы на крыше устанавливать на деревянных или металлических держателях (колышках) с таким расчетом, чтобы токоотвод располагался на расстоянии 10—15 см от материала крыши. Если крыша покрыта деревянными щепами, токоотвод может быть положен непосредственно по крыше.

5. Для зданий и сооружений с железобетонными колоннами железная арматура колонн может быть использована в качестве токоотводов лишь в том случае, если между отдельными частями арматуры (в местах их стыков) обеспечены достаточно надежные соединения путем сварки. В противном случае должны быть положены специальные токоотводы в нужном количестве.

6. Если площадь защищаемого здания (сооружения) имеет весьма большие размеры, затрудняющие осуществление защиты всей крыши с помощью молниеприемников, или если стержни нельзя устанавливать по другим соображениям (например архитектурным), допускается осуществление защиты от прямого удара молнии с помощью крупной сетки, уложенной непосредственно на крыше и по выступающим частям здания. Расстояние между соседними элементами сетки в одном каком-либо направлении целесообразно делать не более 5 м.

7. Здания и сооружения третьей категории не нуждаются в защите от вторичных проявлений молнии.

8. Сооружения третьей категории, особенно жилые помещения, пожарные станции и другие здания, в которых находятся люди, должны защищаться от заноса высоких потенциалов через воздушные провода и деревья.

9. В производственных помещениях и других сооружениях третьей категории, в которых присутствие людей непосредственно вблизи токоотводов неизбежно по роду выполняемой ими работы, необходимо предусмотреть меры, исключающие опасность от шаговых напряжений и напряжений прикосновения.

Четвертая категория. К ней относятся:

Сооружения и помещения, в которых содержится в большом количестве скот (коровники, конюшни, конные заводы и т. д.). Для животных, особенно для крупного скота, весьма большую опасность представляют шаговые напряжения и напряжения прикосновения. Для таких сооружений необходимо не только принять меры, исключающие возможность разрушения и пожара от молнии, но также создать условия, уменьшающие напряжение шага и прикосновения животных.

Меры защиты сооружений четвертой категории

1. Защита от прямых ударов молнии осуществляется точно так же, как и для сооружений первой категории, т. е. с помощью молниеотводов, надземные и подземные токоведущие элементы которых изолированы от частей сооружения. Необходимые расстояния от токоведущих частей молниеотвода до здания, а также до всяких металлических предметов, имеющих связь с защищаемым сооружением, выбираются в соответствии с расчетом.

2. Защита от заноса высоких потенциалов через воздушные провода и деревья осуществляется так же, как и для сооружений третьей категории. При этом следует стремиться к тому, чтобы провода (освещения, телефона и т. д.) и всякие приборы и аппараты, присоединенные к этим проводам (лампочки, выключатели, телефон и т. д.), были расположены по возможности дальше от животных, во всяком случае не ближе 5 м.

3. Для уменьшения шаговых напряжений животных при ударе молнии в молниеотводы в земле между заземлителем молниеотвода и защищаемым зданием следует устраивать специальные экраны, выравнивающие распределение напряжения по поверхности земли.

i. Некоторые мероприятия по защите людей от грозовых разрядов

Молния может оказывать на людей и животных двоякого рода воздействие.

1. Поражение непосредственно грозовым разрядом или его ответвлением; этот вид поражения называется прямым ударом.

2. Поражение разностью потенциалов, образующейся между ступнями ног человека, стоящего вблизи заземлителя молниеотвода (шаговое напряжение), или между ступнями ног и какой-либо другой частью тела, приходящей в соприкосновение с токоотводом (напряжение касания).

В качестве профилактических мер для предупреждения первого вида поражения рекомендуется не подходить во время грозы (или грозового состояния)

ЭБ "Научное наследие России"

к молниеотводам или высоким одиночным предметам (столбам, деревьям) на расстояние меньше 8—10 м. Не следует поэтому искать защиты от грозы под деревьями. Весьма опасно также пребывание в течение грозового состояния на возвышенных местах (холмы, горы) или на открытых равнинах. Рекомендуется искать укрытие в небольших углублениях на склоне холмов, вблизи больших камней или деревьев (на расстоянии 8—10 м от одиночных стволов), выбирая, если можно, место посередине между двумя деревьями, растущими на расстоянии 15—25 м.

Если по условиям производства неизбежна работа при грозовых явлениях вблизи молниеотводов, следует использовать предложенные автором резиновые боты с металлическими стельками, соединяющимися между собой проволокой. Хотя опасность от действия напряжения касания при этом не уменьшается, однако любые, сколь угодно большие шаговые разности потенциала между ногами устраняются полностью. Все же находиться, даже при работе в резиновых перчатках и резиновых ботах, на расстоянии меньше 6—7 м от токоотвода не рекомендуется.

ЭБ "Научное наследие России"

БИБЛИОГРАФИЯ

Ализаде А. С. и Богдасаров. Изучение молнии в горных местностях Азербайджана. Тр. сект. энергетики Акад. Наук СССР, АзФАН, 1940, т. IV.

Ализаде А. С. Механизм развития молнии и методы ее изучения. Изд. АзФАН, 1940.

Комельков В. С. Исследование импульсных искровых разрядов. I. Журн. техн. физ., 1940, т. X, № 17, стр. 1426.

Руководящие указания по грозозащите промышленных и других сооружений (проект). Изд. Акад., Наук СССР, 1940.

Руководящие указания по защите от перенапряжений электроустановок. Госэнергоиздат, 1941.

Стекольников И. С. Пути развития грозозащитных устройств. Эл-во, 1940, № 11.

Стекольников И. С. Молния. Изд. Акад. Наук СССР, 1940 (с исчерпывающей библиографией).

— Изучение молнии в горной лаборатории в Грузии. Эл-во, 1940, № 2.

— Итоги изучения молнии в СССР. Эл-во, 1940, № 10.

— Параметры молнии и расчет формы волны тока прямого удара. Эл-во, 1941, № 2.

Чирвинский П. Н. О фульгуритах. Bull. intern. de l'Académie des Sciences de Bohême. 1922 (с обширной библиографией).

Bellaschi P. L. Lightning Strokes in Field & Laboratory. El. Eng., 1939, vol. 58, № 11, p. 466.

— Lightning Strokes. The Electrician, 1939, September 15, p. 271.

Fulchronograph records full lightning stroke. El World, 1939, 26 August, vol. 112, № 9, p. 74.

Gross I. W. and McMorris W. A. Lightning Currents in Arresters at Stations AIEE Transactions, v. 59, 1940, p. 417.

Hagenguth J. H. Lightning recording instruments. Gen. El. Rev., 1940, vol. 43, part I, № 5, p. 195; part II, № 6, p. 248.

Loeb L. B. Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases (John Wiley). 1939.

Meek J. M. A Theory of Spark Discharge. Phys. Rev., 1940, vol. 57, № 8, p. 722.

Meek J. M. The mechanism of the lightning discharge. Phys. Rev., 1939, vol. 55, № 10, p. 972.

Rokkaku and Katoh. Direct-Stroke Current Investigation on a 154-kV line. Electrotechnical journal (japan), 1938, v. 2, p. 175.

Snoddy L. B. and Beams I. W. A Laboratory study of spark discharge between conducting clouds. Phys. Rev., 1940, vol. 57, № 1, p. 63.

Surge Phenomena. Сборник работ, выполненных с 1339 по 1940 г. Британской электротехнической исследовательской ассоциацией. London, 1941 (с обширной библиографией).

Wagner C. F. Direct stroke proves length of lightning tail. El. World, 1939, vol. 112, № 5, p. 37, 125.

Wagner C. F. and McCann G. D. New instruments for recording lightning currents. AIEE, 1940. № 5, p. 13.

Wagner C. F., McCann G. D. and Beck E. Field Investigations on Lightning, AIEE Transactions, v. 60, 1941.

Wagner C. F., McCann G. D. Lightning Phenomena (с подробной библиографией). El. Eng., August—October 1941.

Waldorf S. K. Experience with preventive lightning protection on transmission lines. AIEE Transactions, v. 60, 1941 (June section), p. 249.

ЭБ "Научное наследие России"

АЗОВСКОЕ МОРЕ
ЧЕРНОЕ МОРЕ
КАСПИЙСКОЕ МОРЕ
ТУРЦИЯ
ИРАН
ГЛАВНЫЙ КАВКАЗСКИЙ ХР.
ВНУТРЕННИЙ ХР.
АБХАЗСКИЙ ХР.
КОДОРСКИЙ ХР.
ЛЕГУХСКИЙ ХР.
РАЧИНСКИЙ ХР.
СВАНЕТСКИЙ ХР.
СУРАМСКИЙ ХР.
АДЖАРО-ИМЕРЕТИНСКИЙ ХР.
ТРИАЛЕТСКИЙ ХР.
ЭРУШЕТСКИЙ ХР.
САМСОРСКИЙ ХР.
ЯЙЛАДАГСКИЙ ХР.
ПАМБАКСКИЙ ХР.
ЮЖНЫЕ ГОРЫ
ЛОРЕ-ПАМБАКСКИЙ ХР.
ЮЖН. ГОГЧИНСКИЙ ХР.
ШАХ-ДАГСКИЙ ХР.
МУРОВ-ДАГ
ЗАНГЕЗУРСКИЙ ХР.
ДАРАЛАГЯЗСКИЙ ХР.
ГЕГАМСКИЙ ХР.
БЕРГУШЕТСКИЙ ХР.
МЕГРИ-ГУНЕЙСКИЙ ХР.
ЛЕЗГИНСКИЙ ХР.
ГЫРДЫМАНСКИЙ ХР.
ДЖАВАХЕТСКИЙ ХР.
ЦАЛКИНСКИЙ ХР.
ТЕРСКО-СУНЖЕНСКИЙ ХР.
ГУДАМАКАРСКИЙ ХР.
ГОЙТХСКИЙ ХР.
ТЕБЕРДИНСКИЙ ХР.
ГОЛОВНОЙ ХР.
ЛЕСИСТЫЙ ХР.
ЧЕРНЫЕ ГОРЫ
ГЛАВНЫЙ ХР.
ВОСТОЧНЫЙ ХР.
ЗАПАДНЫЙ ХР.
ЮЖНЫЙ ХР.
ВОСТОЧНЫЙ ГОРЫ
ЗАПАДНЫЙ ГОРЫ
ЮЖНЫЙ ГОРЫ

ЭБ "Научное наследие России"

Рис. 42. Карта распределения среднего числа грозовых дней по СССР в изокераунических линиях (по Б. В. Соколову).

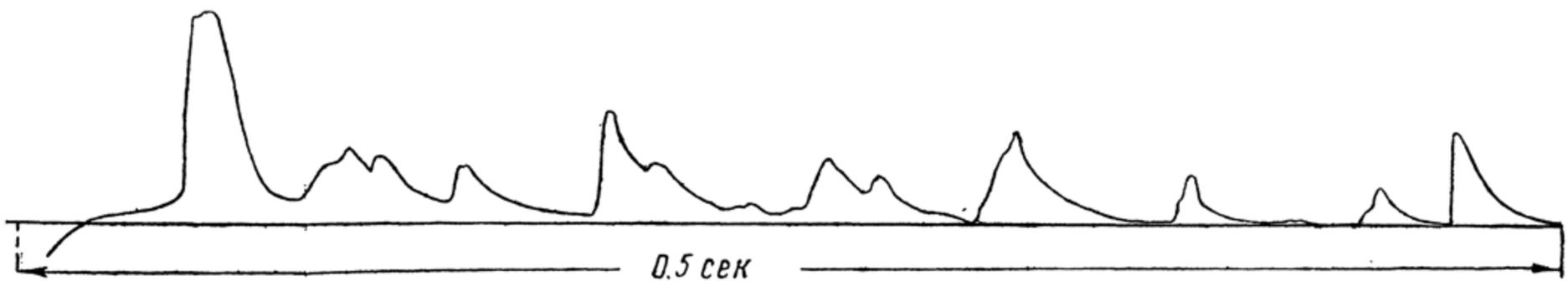
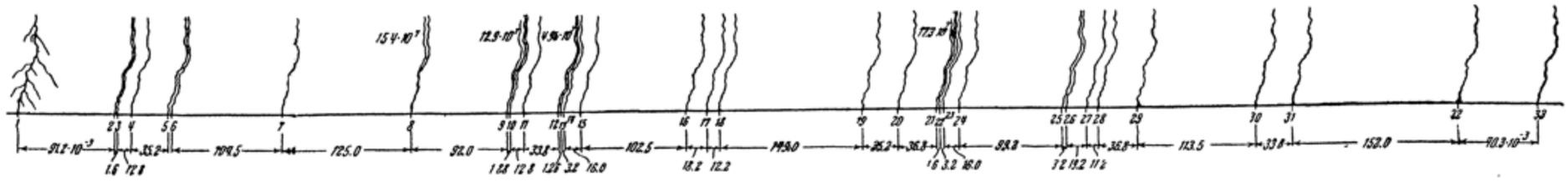


Рис. 44а.



а

Рис. 53а. Развертка многократного (33-импульсного) разряда

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3
Введение 4

I. Образование гроз 5
1. Нормальное электрическое поле земли и его нарушение 5
2. Образование электрических зарядов грозовых туч 9
3. Напряженность поля при тучах смешанной полярности 12
4. Распределение гроз на земной поверхности 19

II. Методы и аппараты для изучения молнии 25
A. Оптические методы исследования молнии 25
1. Развитие аппаратуры 25
a. Принцип работы камеры Бойса 25
b. Конструкции фотокамер с временной разверткой 26
c. Многолинзовые фотокамеры 28
B. Осциллографические методы исследования молнии 29
1. Применение шлейфового осциллографа 29
2. Катодно-осциллографический метод 31
a. Конструкции катодных осциллографов и схемы к ним 33
C. Клидонографический метод исследования молнии 39
1. Развитие прибора 39
2. Образование фигур Лихтенберга и их формы 40
3. Конструкции клидонографа 41
a. Стационарный клидонограф 41
b. Медленно вращающийся клидонограф 44
c. Быстро вращающийся клидонограф 44
d. Клидонограф с толчкообразным перемещением электрода 45
D. Магнитный метод исследования молнии 45
1. Принцип метода ферромагнитных регистраторов 45
2. Конструкция регистраторов 48
3. Конструкция магнитометра и определение B_0 49
4. Методика подсчета и определения поправочных коэффициентов 49
a. Апериодические импульсы 49
b. Колебательные импульсы 50
5. Методы использования регистраторов 50
a. Регистрация амплитудных значений токов молнии 50
b. Фульхронограф 51
c. Ферромагнитный метод определения фронта волны 52
E. Обоснование методов измерения напряженности электрического поля атмосферы 52
1. Различные способы регистрации 52
2. Трансформация электромагнитных волн при удалении их от места возникновения 57
3. Расшифровка катодных осциллограмм и клидонограмм 58
F. Лаборатории по изучению молнии 60
1. Подмосковная полевая лаборатория 61
2. Горные лаборатории на Кавказе 65
3. Лаборатория на американском небоскребе 68

III. Результаты исследований молнии 69
1. Результаты оптических исследований молнии и искрового разряда 69
a. Типы разрядов молнии 69
b. Развитие разряда 72
c. Модель молнии—искровой разряд 79
2. Лидерные процессы 87
3. Диаметр канала молнии 97

ЭБ "Научное наследие России"