

— ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ —

УДК 621.31

*Л.М. Рыбаков, Н.Л. Макарова, А.О. Захватаева***К ВОПРОСУ РАЗРЯДА ЛИДЕРА «МОЛНИИ» НА ВОДНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ОТ ОДИНОЧНОГО ГРОЗОВОГО ОБЛАКА**

Наблюдениями за грозовой деятельностью в регионе средней Волги за последние десятилетия были зафиксированы несколько случаев поражения людей, находящихся в лодке, разрядом молнии от одиночного облака в ясную погоду на водной поверхности.

На берегу водоема находились деревья, которые не были поражены. Хотя, согласно существующих нормативных документов по молниезащите, вероятность поражений высоких объектов в период разряда молнии должна быть гораздо выше, чем низких объектов при их расположении в зоне грозовых разрядов.

Многочисленные исследования от разрядов молнии посвящены работе по защите объектов, расположенных на земной поверхности. Однако работ по физике грозовых разрядов на водную поверхность весьма мало. В настоящее время нет достаточно обоснованной теории по разрядам на водную поверхность. Имеются некоторые предпосылки разрядов молнии на поверхность океанов. Однако эти сообщения не отражают картины сбрасывания из облаков зарядов на водную поверхность из-за высокой электропроводности морской воды, где электропроводность ионная, а не электронная, что ограничивает величину заряда, сбрасываемого в воду.

Работ по разрядам молнии на внутренние водоемы, где вода пресная, в настоящее время не имеется.

Исследование поражений небольших объектов, находящихся на ровной водной поверхности, которые не искажают ориентировку лидера молнии, является актуальной.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процесса пробоя длинного промежутка «лидер (имитация лидера «молнии») – плоскость» (водная поверхность при различной полярности) с учетом изменения абсолютной влажности воздуха.

Задача исследования – выявление радиуса поражения объектов, расположенных на водной поверхности и увлажненной поверхности прибрежных зон.

РЫБАКОВ Леонид Максимович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и технической диагностики Марийского государственного университета.

E-mail: diagnoz@marsu.ru

РЫБАКОВ Leonid Maksimovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Power Supply and Technical Diagnostics, Mari State University.

E-mail: diagnoz@marsu.ru

МАКАРОВА Надежда Леонидовна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и технической диагностики Марийского государственного университета.

E-mail: kosshmarrik@gmail.com

МАКАРОВА Nadezhda Leonidovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chair of Electrical and Technical Diagnostics, Mari State University.

E-mail: kosshmarrik@gmail.com

ЗАХВАТАЕВА Алена Олеговна – магистрант Марийского государственного университета.

E-mail: alena_zah94@mail.ru

ЗАХВАТАЕВА Alena Olegovna – Master-degree student, Mari State University.

E-mail: alena_zah94@mail.ru

Исследование проводилось в лабораторных условиях с имитацией разряда лидера «молнии» на модели лодок, деревьев, жилых домов, расположенных на водной поверхности и прибрежной зоне.

Данная статья имеет поисковое направление. Дальнейшее исследование будет посвящено изучению формирования одиночных грозовых облаков и оценке их заряда и разряда на водную поверхность.

Ключевые слова: молниезащита, лидер молнии, стример, коронный искровой разряд, длинный воздушный промежуток, отрицательная полярность, положительная полярность, чехол канала лидера, радиус стягивания.

L.M. Rybakov, N.L. Makarova, A.O. Zakhvataeva

On discharge of the lightning leader from a single thunderstorm cloud on the water surface

Over the past decades, thunderstorms observations in the middle Volga River region have registered a number of people, when being in boats under clear weather conditions, been struck by the lightning from a single cloud on the water surface.

The trees on the river banks were not struck, though according to the current specification on lightning discharge protection high objects are more likely to be struck in the period of a lightning stroke than lower objects being located in the same lightning zone.

A large body of research on lightning discharge is devoted to the protection of the objects on the ground surface. However, the physical aspects of lightning discharge on the water surface are scantily researched. An adequately justified theory on the lightning on the water surface has not been developed yet. There is some data on lightning on the ocean surface, but they do not describe discharge from clouds on the water surface, being characterized by high sea water conduction, where the electroconductivity is ionic, not electronic, due to which the discharge quantity falling into the water is reduced.

At present, there is no data on lightning on the fresh inland water surface.

The research on the lightning strikes of smaller objects located on the flat water surface, which do not distort the lightning leader's orientation, is currently central.

The objective of the article is an experimental research on the discharge breakdown process of a long air clearance 'leader (lightning leader imitation) – surface' (water surface of different polarity) taking into account the changes of absolute air humidity.

The challenge now is to determine the lightning strike radius of the objects located on the water and moistened surface of river banks.

The research has been done in the laboratory with the imitation of the lightning leader's discharge on the models of boats, trees and houses located on the water and riverbank surfaces.

The present article is of an exploratory character. Further research will be devoted to the study of single thunderstorm clouds formation and estimation of their charge and discharge on the water surface.

Keywords: lightning discharge protection, lightning leader, streamer, corona spark discharge, long air clearance, negative polarity, positive polarity, rod of the lightning leader channel, contraction radius.

Введение

Имеются многочисленные исследования по механизму пробоя длинных воздушных промежутков отечественных и зарубежных исследователей [1,2,3,4,5]. В указанных работах приведены данные лабораторных исследований пробоя длинных воздушных промежутков при различной форме электродов и при различной полярности их напряжения [6,7,8].

В [9] приведены данные формирования и пробоя промежутков токами молнии от грозового облака до поверхности земли применительно к интенсивной грозовой деятельности, происходящих от объемов зарядов, накопленных в облаках больших размеров протяженностью 20-30 км, высотой 1-5 км, где суммарный заряд достигает 20...100 Кл, а значение тока молнии составляет 10...50 кА.

Грозовое облако может состоять из одной или нескольких ячеек. Средний радиус основания одной грозовой ячейки $R=2$ км, расположенной на высоте 9-12 км. Время жизни ячейки от зарождения до распада составляет около часа. Зарождение связано с восходящими потоками теплого влажного воздуха и появлением первых молний. Стадия развития характеризуется активностью восходящих потоков. В стадии распада наблюдается затухание восходящих движений воздуха, уменьшение электрической активности и выпадение осадков. Однако до сих пор нет достаточно обоснованных объяснений по физике процесса образования грозовых облаков и разряда лидера на водные поверхности.

Экспериментальных данных по исследованию состояния канала лидера молнии не достаточно. Поэтому большой интерес представляет информация, которую получают из экспериментов пробоя длинных воздушных промежутков в лабораторных условиях, что может служить отправной точкой для анализа канала лидера молнии, которые приведены в следующих источниках [3].

Исследованием установлено, что молния несет к земле как отрицательный, так и положительный заряд [10].

Пробой длинного промежутка между отрицательным лидером и землей имеет своё отличие и для него требуется более высокое напряжение. Различия лидера в той и другой полярности связаны с состоянием стримерных зон, которые приведены [3].

При формировании разряда в длинных воздушных промежутках рассматриваются следующие стадии:

1. Лавинная корона
2. Стримерная корона
3. Переход стримерной короны в лидерный канал
4. Проращение лидера
5. Переход лидера в искровой разряд
6. Дуговой разряд

Разряд между облаком и Землей начинается с проращения от облака к Земле ступенчатого лидера со скоростями $10^7 \dots 10^8$ см/с. Средняя длина ступени 50 м. Пауза между отдельными ступенями составляет 30...90 мкс. Скорость проращения ступени $5 \cdot 10^9$ см/с.

Система «Грозовое облако – Земля» можно рассматривать как конденсатор состоящий из обкладок: одна обкладка – облако, другая – земля.

Многочисленные наблюдения показали, что в разных регионах России за грозовой период с мая по сентябрь месяц имели случаи поражения людей разрядом молнии от одиночного облака, находящегося над водной поверхностью при ясной погоде, отдыхающих вблизи водоемов (реки и озера) или плавающих на индивидуальных водных средствах (лодки, катамараны и т.д.).

В настоящее время нет достаточно научно-обоснованной теории и экспериментальных исследований пробоя длинных воздушных промежутков, применительно к разряду одиночного грозового облака при ясной погоде на водную поверхность. При разряде молнии недоступны наблюдения разрядных процессов из-за малых значений заряда, сбрасываемых в воду и ограничение тока в канале молнии, что вызывает ослабление свечения молниевых каналов, следовательно, нет иного пути, кроме как проведения исследований длинной искры в лабораторных условиях с последующей теоретической экстраполяцией полученных закономерностей на экстремально длинные промежутки.

Образованию искрового канала в длинных воздушных промежутках с резко-неоднородным полем предшествует коронный разряд в лавинной и стримерной форме (стримерная корона), и в том, и в другом случае ионизация осуществляется лавинами электронов. Поэтому для существования обеих форм коронного разряда необходимо наличие области весьма высокой напряженности поля (порядка 30 кВ/см и более). В первом случае (лавинная форма) область высокой напряженности поля имеет место только вблизи коронирующего электрода [11].

Нарушением электрической прочности длинных воздушных промежутков является условие перехода от стримерной короны к лидеру, который зависит от числа электронов в стримерах, их диаметров, а также от тепловых процессов в канале стримера. При неизменном диаметре стримеров число электронов в них зависит только от их длины. Для образования же стримеров

заданной длины необходимо накопление вблизи коронирующего электрода определенной величины объемного заряда. При этом разрядные напряжения промежутков разной длины должны соответствовать образованию неизменной величины объемного заряда и соответственно одинаковой картине поля вблизи электрода [1].

Нарушение электрической прочности длинных воздушных промежутков в неоднородном поле осуществляется лидерной стадией искрового разряда [2].

Исследование оптической картины разряда в длинных воздушных промежутках при пологих импульсах напряжения показали, что в начальной фазе развития лидера его стримерная зона не достигает заземленной плоскости или установленного на ней стержня, а занимает лишь небольшую часть промежутка. При приближении лидера к заземленному электроду длина стримерной зоны возрастает и в начале сквозной фазы (в момент достижения стримерами заземленного электрода) не превышает (0,4 – 0,5) Н.

Статистическая обработка результатов наблюдений показала, что ориентировка искрового канала на возвышающийся объект начинается только тогда, когда объект попадает в стримерную зону лидера. Начиная с этого момента, направление дальнейшего развития лидера в среднем изменяется: наблюдается отклонение средней траектории лидера на соответствующей высоте в сторону объекта [5].

Анализируются существующие эмпирические и теоретические формулы расчета минимального пробивного напряжения (МПН) длинных воздушных промежутков (ДВП). Особое внимание уделяется промежутку «положительный стержень-плоскость» как имеющему минимальную электрическую прочность и являющемуся базовым при расчете промежутков с другой конфигурацией. Проводится аппроксимация этих формул на сверхдлинные промежутки (СДВП), результаты сравниваются с имеющимися экспериментальными данными. На основе новой зарядовой модели возникновения и развития лидерного разряда предлагается формула, которая связывает параметры лидерного процесса с напряжением, прикладываемым к промежутку. На основе нормирования параметров этой формулы по имеющимся экспериментальным данным предлагается новая формула расчета МПН в ДВП и СДВП промежутках. Результаты расчета сравниваются с экспериментом в диапазоне длин 0,2-100 м. На основе новой формулы делается оценка возможного потенциала грозового облака [12].

Приведены результаты экспериментального исследования импульсной короны для электрических полей различной степени неоднородности при воздействии стандартным грозовым импульсом в широком диапазоне напряжений от порога возникновения до пробоя промежутка.

Известно, что размеры чехла коронного разряда растут при увеличении подаваемого напряжения, а форма чехла короны зависит от полярности активного электрода. Диапазон напряжений от возникновения коронного разряда до искрового пробоя увеличивается с ростом степени неоднородности электрического поля. В работе показано, что аналогичная картина наблюдается и для импульсной короны. Полученные результаты показывают, что характер импульсного коронного разряда существенно зависит от полярности импульса, а искровой пробой становится возможным, когда большинство ветвей стримерной короны замыкает межэлектродный промежуток [13].

Характер развития стримера существенно зависит от напряжения. При низком напряжении плазменная область, дающая начало стримерному каналу, непосредственно граничит с положительным электродом. В этом случае образуется катодонаправленный стример. При напряжении выше определенной величины стример зарождается в межэлектродном промежутке. В этом случае канал имеет две головки – катодонаправленную (положительную) и анодонаправленную (отрицательную), и из первоначального плазменного образования стример прорастает в обе стороны.

Исследованиями выявлено существенные различия в развитии отрицательной и положительной головок стримера. Радиус положительной головки со временем уменьшается, отрицательный – растет. Напряженность поля на фронте отрицательной головки меньше, чем на фронте положительной, а величина фронта у отрицательной головки больше [14].

В работе [8] представлены результаты исследования развития электрического разряда в длинных промежутках «стержень-плоскость» при отрицательном импульсном напряжении.

Известно, что пробой таких промежутков определяется процессами при формировании лидера, причем условия пробоя существенно отличаются от условий зажигания самостоятельного разряда вблизи электрода. Развитие теории пробоя таких промежутков вряд ли возможно без привлечения фактических данных о процессах внутри разрядного промежутка и их связи с внешними характеристиками разряда, такими как пробивное напряжение, ток и т.п. Особый интерес представляют промежутки типа «стержень-плоскость», где зафиксированы наименьшие пробивные напряжения.

Процесс формирования искры можно разделить на две фазы: начальную, от момента возникновения зоны ионизации до пересечения ею межэлектродного расстояния, и сквозную, которая следует за начальной.

Вероятность поражения заземленного стержня отрицательной искрой, так же как и положительной, зависит от длительности фронта импульса напряжения.

Различие процессов ориентировки положительной и отрицательной искры не является принципиальным и носит скорее количественный характер. Причину этих различий, по-видимому, нужно связывать с различными условиями формирования встречного разряда от вершины заземленных сооружений [6].

На основе модели, допускающей приближенное аналитическое решение, рассматривается волна ионизации, которая имитирует процесс в стримерной головке. Обсуждается физический смысл закономерностей и причинные связи между параметрами стримера. Особое внимание уделено нахождению поля в стримерном канале за головкой. Рассматривается начальная ионизация перед головкой стримера. Показано, сколько затравочных электронов в каком месте требуется для нормального функционирования волны ионизации. Проведена оценка числа начальных электронов, которые образуются при распространении стримера в воздухе [15].

Обобщены представления о волновом механизме распространения длинных стримеров в резко неоднородном электрическом поле и выявлены взаимосвязи между основными характеристиками процесса. Выполнен анализ возможностей аналитических моделей стримеров и систематизированы результаты, полученные с их помощью. Показана необходимость решения самосогласованной задачи, объединяющей процессы на фронте волны ионизации и в канале за ней. Рассмотрены одномерные и квазидвумерные расчетные модели стримера с постоянным априори заданным радиусом канала. Выявлена сильная зависимость результатов расчета от радиуса канала [16].

На основе разработанной физико-математической модели положительной импульсной стримерной короны в воздухе и реализующего ее программного обеспечения исследовано распространение короны в электрических полях с различными распределениями и значениями напряженности. Показано, что ветвление стримеров происходит в области пространства вблизи коронирующего электрода, в которой напряженность электрического поля превышает 5,5 – 6,0 кВ/см (и не менее 10 кВ/см, если длительность фронта импульса приложенного напряжения стремится к нулю [17].

В работе [18] предлагаются физические модели процессов, протекающих в каждой из стадий разряда молнии. Предлагается механизм, объясняющий излучение и аномально сильное отражение электромагнитных волн грозowymi облаками. Для анализа рассеяния радиоволн неоднородностями грозового облака предлагается использовать методы компьютерной оптики. Предложен физический механизм образования плазменных сгустков, определяющих ступенчатое распространение и ориентировку канала молнии в пространстве. Показано, что молния обладает фрактальной природой, а случайный характер искривления оси канала является внутренним свойством молнии и не зависит от внешних случайных отклонений температуры и плотности воздуха. Установлена связь между параметрами электромагнитного излучения молнии и характеристиками канала. В частности, показано, что длительность импульса излучения растет с увеличением длины стримерной зоны лидера и насыщается при больших длинах канала молнии. Показано, что существует корреляция между амплитудой импульса излучения обратного удара молнии и его длительностью.

Установлена связь между параметрами импульса излучения молнии и характеристиками канала, которая может быть полезной при решении обратной задачи. В частности, показано,

что длительность импульса обратного удара определяется длиной стримерной зоны лидера, которая в свою очередь зависит от расстояния между облаком и Землей.

Предложена модель катодонаправленного стримера, использующая единый подход к расчету элементарных процессов и электрического поля по всей длине стримера и позволяющая тем самым избежать его условного деления на канал и головку. Высказано предложение, что радиус канала стримера может значительно превосходить радиус начальной лавины из-за ионизации у боковой поверхности уже сформированного канала в радиальном электрическом поле. Установлена сильная зависимость параметров стримера от радиуса канала, введенного в расчет. Показано, что в промежутках с резко неоднородным полем, предельная длина стримера, скорость его распространения и проводимость сформированного канала находятся в прямой зависимости от крутизны импульса напряжения; в практически значимом наносекундном диапазоне два последних параметра могут изменяться на порядок величины при неизменной амплитуде импульса напряжения [19].

В [20] рассматриваются физические процессы, определяющие способность лидера молнии менять свою траекторию, выбирая для удара высокие сооружения. Разъясняется существо лидерного механизма продвижения лидера молнии. Устанавливается критерий старта жизнеспособного восходящего лидера от сооружения. Проясняется механизм дальнего слабого взаимодействия встречного восходящего лидера от заземленного объекта и нисходящего от облака. Обсуждаются современные проблемы молниезащиты и проблема инициирования молний.

Исследование и результаты показали, фактическое понимание физического механизма электрического разряда, в частности, переход к «термализованному лидеру» может объяснить способность природных молний распространяться во внешних полях до нескольких сотен $\text{В} \cdot \text{м}^{-1}$ [4].

В [21] представлены результаты расчета стримерной короны в промежутке «острие-плоскость» с малым радиусом кривизны острия. Показано, что развитие одиночного стримера и развитие стримерной короны существенно различаются даже в случае, когда первоначально с острия стартует только один стример. Особенно велико различие в токе, как в его амплитудном значении, так и форме кривой. Длительность импульса тока много больше в случае короны, что свидетельствует о необходимости учета процесса ветвления.

Литературный обзор показал, что нет работ в отечественных и зарубежных источниках, посвященных разряду лидера молнии на водную поверхность и защиты людей, находящихся на водной поверхности.

Необходимо проведение экспериментальных исследований по механизму пробоя длинных воздушных промежутков, имитирующих разряды молнии на водную поверхность и разработка средств защиты плавающих средств на внутренних водах России.

Экспериментальные исследования по имитации разрядов «молний» на водную поверхность при положительной и отрицательной полярности лидера.

Испытательное оборудование и приборы, используемые для проведения экспериментов.

В качестве испытательного оборудования для моделирования лидера «молнии» на водную поверхность использовался генератор импульсных напряжений ГИН-0,8 МВ, показанный на рис. 1.



Рис. 1. Генератор импульсного напряжения

Для исследования состояния атмосферного воздуха использовались следующие лабораторные приборы. Измерение влажности и температуры осуществлялось с помощью анемометра крыльчатого (рис. 2,а). Концентрация аэроионов в атмосферном воздухе регистрировалась с помощью счётчика МАС-01 (рис. 2,б).



Рис. 2. Приборы, используемые для проведения экспериментов
а) анемометр крыльчатый testo 410-2; б) малогабаритный аэроионный счётчик МАС-01

Для имитации водной поверхности использовалась емкость размером 100×100 см, высотой 5 см, в которой устанавливались образцы моделей лодок размерами 8×3×2 см из диэлектрического и металлического материала уменьшены в масштабе в 50 раз с установкой в лодку медной проволоки высотой 0,25 см для имитации уключины и весел. На водной поверхности устанавливались 4 дерева на расстоянии радиуса стягивания молнии 21 см (рис. 3).



Рис. 3. Испытательная установка с используемыми приборами.
(1 – генератор импульсных напряжений 800 кВ; 2 – счётчик аэроионов малогабаритный МАС-01) для проведения экспериментов по выявлению разрядов молнии на водную поверхность с моделями деревьев, дома и лодки (3 – домик: ширина – 6 см, высота – 6 см, длина – 10 см, крыша металлическая двухскатная; 4 – лодка металлическая 8×3×2 см; 5-8 – деревья с высотой 5-18 см)

**Результаты экспериментальных исследований разрядов на водную поверхность лидера
Исследование при положительной полярности лидера**

Опыт № 1. Имитация разрядов на водную поверхность

Температура – $T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность – $\varphi = 75,0 \%$, абсолютная влажность – $\rho = 9,0 \text{ г/м}^3$.

На макет подавалось три разряда напряжением 800 кВ от генератора импульсного напряжения. Высота лидера составила 42 см. Результаты испытания приведены на рис.4.

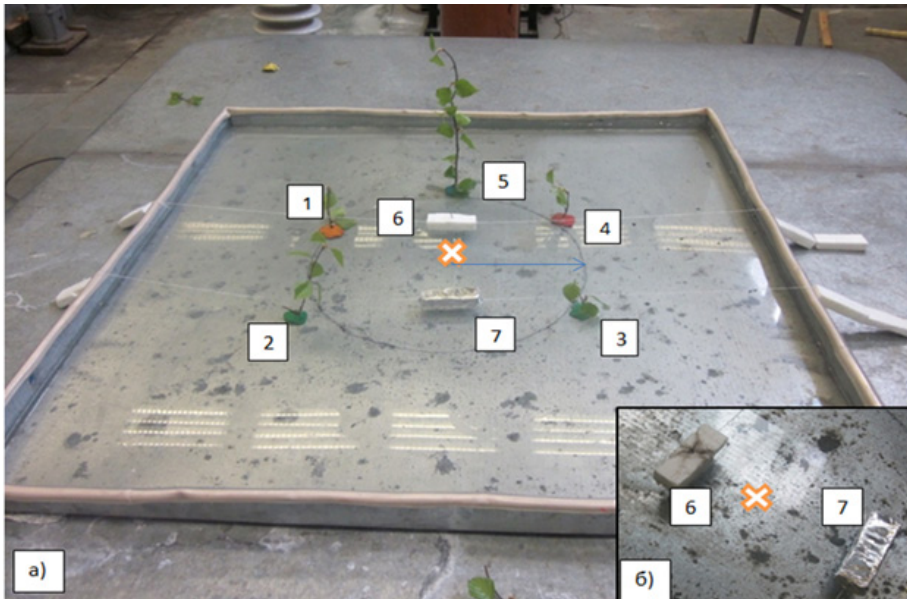


Рис. 4. Результаты испытания объектов разрядом «молнии», находящихся на водной поверхности: 1-5 – деревья высотой 5-18 см; 6 – модель лодки из диэлектрического материала (пенопласт) со штырем, высота которого 0,25 см; 7 – модель лодки, обшитая фольгой (а) и характер поражения моделей лодок № 6 и № 7 разрядом «молнии» (б)

Лодка № 7 находится на расстоянии 12,5, а лодка № 6 на расстоянии 6,25 см от центра радиуса стягивания. Радиус круга равен 21 см.

При имитации разрядов на водную поверхность, получены следующие результаты: 1-й разряд в штырь лодки № 6 из медного проводника, имитирующего уключину лодки и весла; 2-й разряд произошел также в лодку из диэлектрического материала № 6; 3-й разряд – перекрытие лодки № 7 на водную поверхность по обшитой фольге.

Опыт № 2. Имитации разрядов на водную поверхность

Температура – $T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$; относительная влажность – $\varphi = 75,0 \%$, абсолютная влажность – $\rho = 9,0 \text{ г/м}^3$.

На макет подавалось три разряда напряжением 800 кВ от генератора импульсного напряжения. Высота лидера составила 42 см. Результаты испытания приведены на рис.5.

Лодка находится на расстоянии 6,25 см от центра радиуса стягивания.

При имитации разрядов на водную поверхность, получены следующие результаты: 1-й и 3-й разряды в лодку № 5; 2-й разряд в дерево № 3.

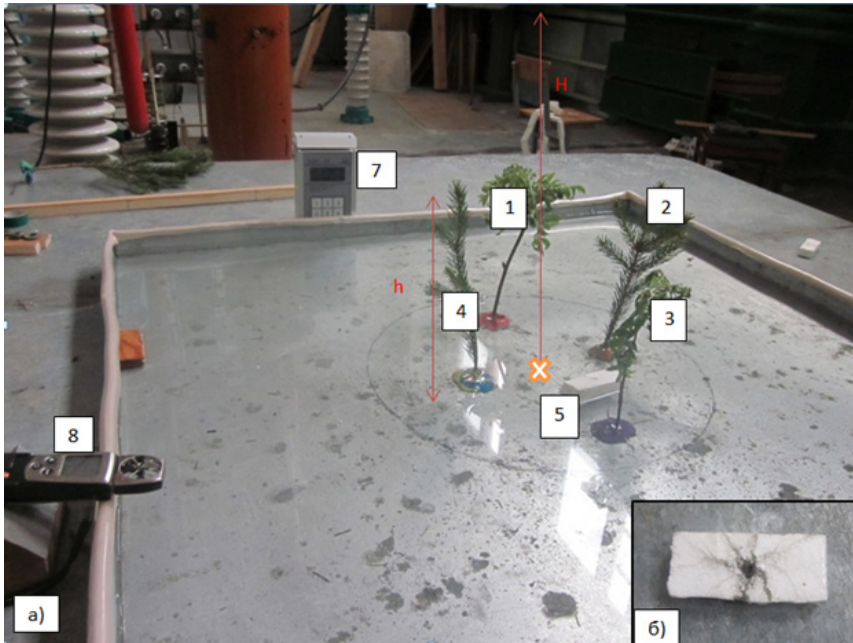


Рис. 5. Имитация защиты модели лодки деревьями одинаковой высоты, находящихся на водной поверхности: 1,3 – лиственные деревья, 2,4 – хвойные деревья высотой 25 см; 5 – модель лодки из диэлектрического материала с медным штырем в середине, высота которого 0,25 см.; 7 – прибор МАС-01; 8 – прибор TESTO 410-2 (а) и характер повреждения модели лодки № 5 разрядом «молнии» (б)

Опыт № 3. Имитация разрядов на водную поверхность

Температура – $T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность – $\varphi = 75,0\%$, абсолютная влажность – $\rho = 9,0\text{ г/м}^3$.

На макеты подавалось три разряда напряжением 800 кВ от генератора импульсного напряжения. Высота лидера составила 42 см. Результаты испытания приведены на рис. 6.

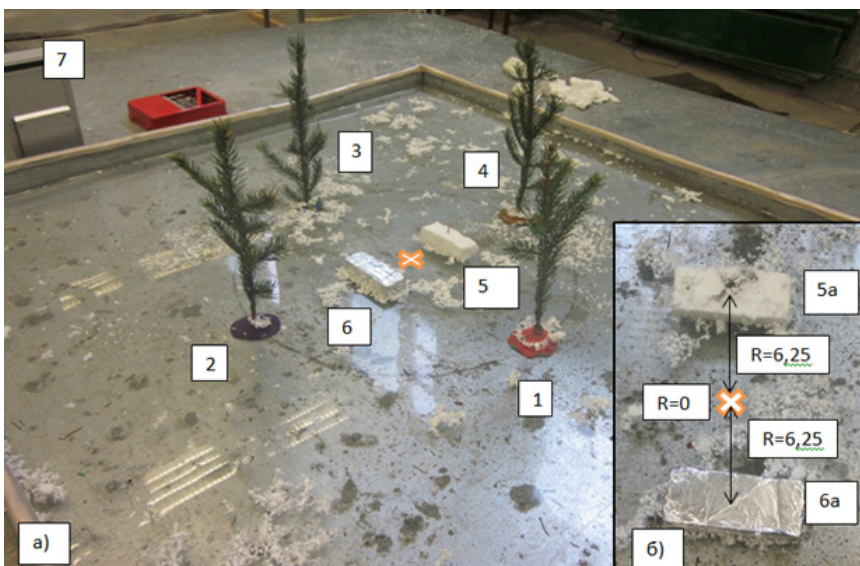


Рис. 6. Имитация защиты моделей лодок деревьями одинаковой высоты, находящихся на водной поверхности: 1-4 – хвойные деревья, высотой 25 см; 5 – модель лодки из диэлектрического материала с медным штырем в середине, высота которого 0,25 см; 6 – модель лодки, обшитая фольгой; 7 – прибор МАС-01(а) и характеры поражений 2-х образцов лодок показаны на рис. 6,б

1. Образец лодки № 6, обшитый фольгой имел следы перекрытия по металлической поверхности;

2. Образец лодки № 5, из диэлектрического материала имел следы поражения на штырь с последующим разрушением

Лодки находятся на расстоянии 6,25 см от центра радиуса стягивания.

Полученные результаты эксперимента: 1-й разряд в центр радиуса стягивания $R=0$; 2-й разряд в лодку из диэлектрического материала № 5, расположение лодки от центра стягивания на расстоянии; 3-й разряд в лодку, обшитую фольгой № 6.

Исследование при отрицательной полярности лидера

Опыт № 1. Имитация разрядов на водную поверхность

Температура – $T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность – $\varphi = 75,0\%$, абсолютная влажность – $\rho = 9,0\text{ г/м}^3$

Подавали три разряда напряжением 800 кВ на макет. Высота лидера 42 см.

Результаты эксперимента приведены на рис. 7.

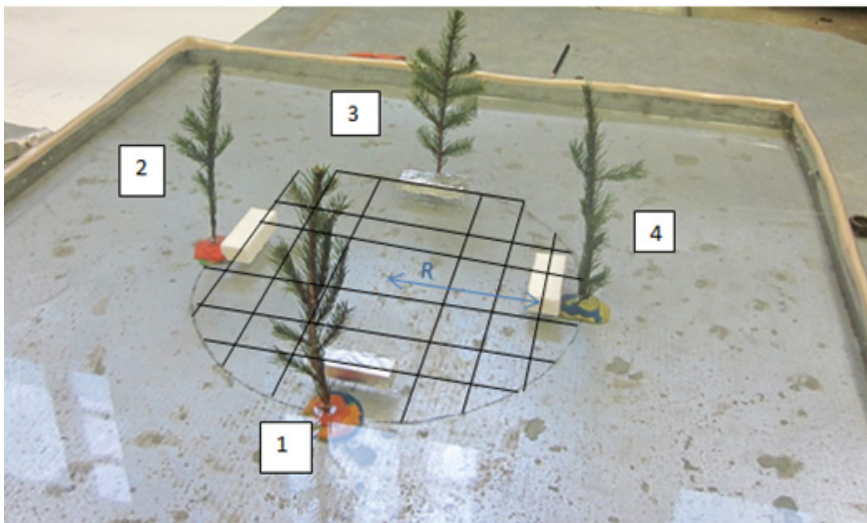


Рис. 7. Имитация защиты моделей лодок деревьями одинаковой высоты, находящихся на водной поверхности: 1-4 – хвойные деревья высотой 25 см; 2,4 – модель лодки из диэлектрического материала; 1,3 – модель лодки, обшитая фольгой (номера лодок соответствуют номеру дерева, возле которого они расположены)

Лодки находятся на расстоянии $R=17\text{ см}$ от центра радиуса стягивания.

При имитации разрядов на водную поверхность, получены следующие результаты: 1-й разряд в центр радиуса стягивания, $R=0$; 2-й разряд в лодку № 1, обшитую фольгой; 3-й разряд в лодку № 1, обшитую фольгой.

Опыт № 2. Имитации разрядов на водной поверхности

Температура – $T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность – $\varphi = 75,0\%$, абсолютная влажность – $\rho = 9,0\text{ г/м}^3$

Подавали 3 разряда напряжением 800 кВ на водную поверхность, где установлены лодки. Высота лидера 42 см. Результаты эксперимента приведены на рис.8.

Лодки находятся на расстоянии 12,5 см от центра радиуса стягивания.

При имитации разрядов на водную поверхность, получены следующие результаты: 1-й разряд в лодку № 1, обшитую фольгой; 2-й разряд в лодку № 1, обшитую фольгой; 3-й разряд в лодку № 1, обшитую фольгой.

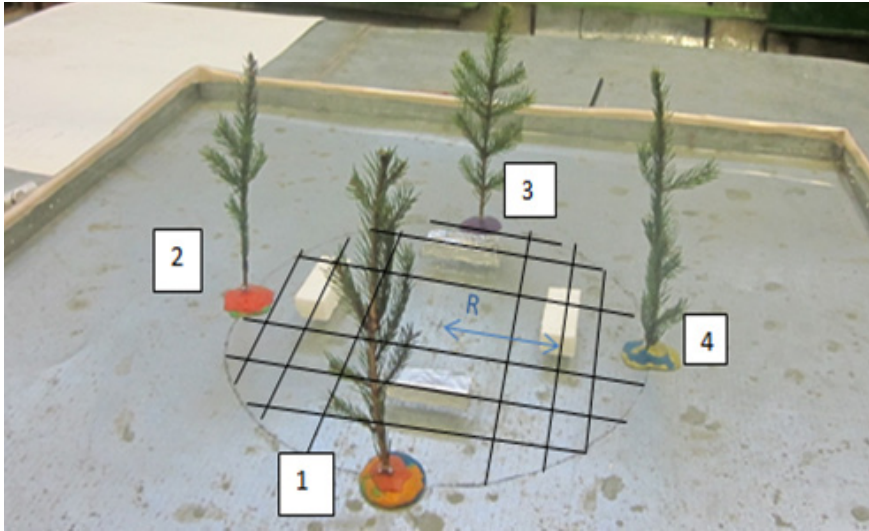


Рис. 8. Имитация защиты моделей лодок деревьями одинаковой высоты, находящихся на водной поверхности: 1-4 – хвойные деревья высотой 25 см; 2,4 – модель лодки из диэлектрического материала; 1,3 – модель лодки, обшитая фольгой (номера лодок соответствуют номеру дерева, возле которого они расположены)

Опыт № 3 Имитация разрядов на водную поверхность

Температура – $T = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$; относительная влажность – $\varphi = 75,0\%$, абсолютная влажность – $\rho = 9,0\text{ г/м}^3$.

Подávalи четыре разряда напряжением 800 кВ на водную поверхность, где установлены лодки. Высота лидера 42 см. Результаты эксперимента приведены на рис.9.

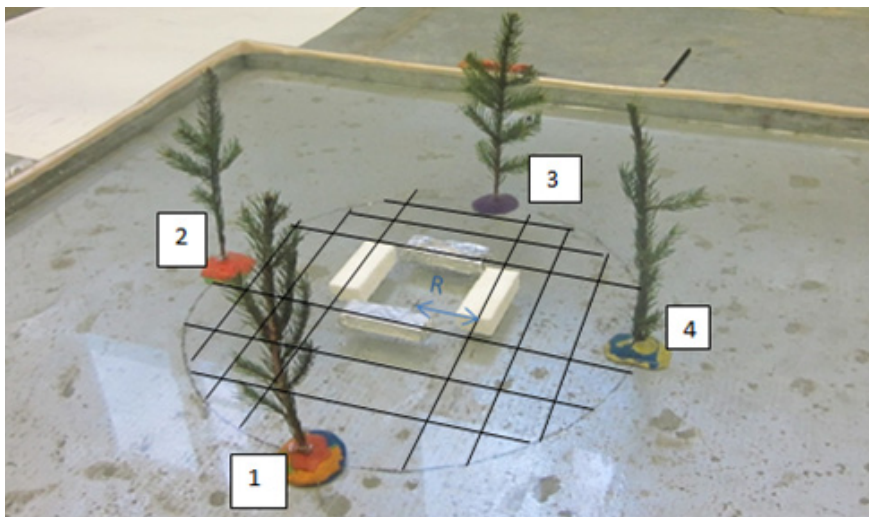


Рис. 9. Имитация защиты моделей лодок деревьями одинаковой высоты, находящихся на водной поверхности: 1-4 – хвойные деревья высотой 25 см; 2,4 – модель лодки из диэлектрического материала; 1,3 – модель лодки, обшитая фольгой (номера лодок соответствуют номеру дерева, возле которого они расположены)

Лодки находятся на расстоянии 6,25 см от центра радиуса стягивания.

При имитации разрядов на водную поверхность, получены следующие результаты: 1-й разряд в центре, радиус стягивания $R=0$; 2-разряд в лодку № 1, обшитою фольгой; 3-разряд в лодку № 1, обшитою фольгой; 4-разряд в лодку № 3, обшитою фольгой.

Заключение

1. Проведены экспериментальные исследования по выявлению зависимости радиуса стягивания молнии на объекты, расположенные на водной поверхности рядом с высокими деревьями для имитации их защиты, при абсолютной влажности атмосферного воздуха $9,0 \text{ г/м}^3$.
2. По существующим нормативам по молниезащите (РД 34.21.122-87 [22]) лодки, расположенные рядом с высокими деревьями должны быть экранированы ими, однако, это не подтвердилось проведенными опытами № 1,2,3 при разряде лидера «молнии» как положительной, так и отрицательной полярности на водную поверхность.
3. Наблюдения показывают, что поражения объектов, расположенных на водной поверхности, происходят одноимпульсным разрядом.
4. Физические процессы образования грозовых облаков над водной поверхностью при ясной погоде до сих пор не раскрыты.
5. Механизм разряда молнии между одиночным грозовым облаком, несущим большой электрический заряд, и водной поверхностью пока достаточно не изучен.
6. Необходимы дальнейшие исследования по защите объектов, расположенных на водной поверхности, от разрядов одиночных грозовых облаков.
7. Настоящая работа представляет поисковые решения по поставленной задаче.

Литература

1. Александров Г.Н. Особенности развития искрового разряда в длинных воздушных промежутках // Журнал технической физики. – 1969. – Том 39, № 4. – С. 744–747.
2. Александров Г.Н., Базелян Э.М., Горин Б.Н. Исследование развития искрового разряда в длинных воздушных промежутках // Электричество. – 1971. – № 3. – С. 31–33.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – Москва: Физматлит, 2001. – 320 с.
4. I. Gallimberti, G. Vacchiega, Anne Bondiou-Cleargerie, Philippe Lalande. Fundamental processes in long air gap discharges / Applied physics/ C.R. Physique 3 (2002). 1335-1359.
5. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Базелян Э.М., Садыхова Е.С. Об ориентировке канала длиной искры // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66.
6. Базелян Э.М., Волкова О.В., Левитов В.И., Пулавская И.Г. Об отрицательном импульсном разряде в промежутке стержень - стержень на плоскости // Электричество – 1973. – № 7. – С. 72-74.
7. Базелян Э.М., Садыхова Е.А. Ориентировка длиной искры // Электричество. – 1970. – № 10. – С. 63-67.
8. Горин Б.Н., Шкилев А.В. Развитие электрического разряда в длинных промежутках стержень-плоскость при отрицательном импульсном // Электричество. – 1976. – № 6. – С. 31-39.
9. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я., Козодеров В.В., Хворостьянов В.И. Облака и климат. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. – 512 с.
10. Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Физика грозовых облаков.– Москва: Препринт. – 2004. – 38 с.
11. Александров Г.Н. О механизме перехода коронного разряда в искровой в длинных воздушных промежутках // Журнал технической физики. – 1965. – Том 35, № 7. – С. 1225–1229.
12. Кухно А.В., Макальский Л.М., Никитин О.А., Сысоев В.С. Исследования минимальной электрической прочности длинных и сверхдлинных воздушных промежутков. Теоретический подход // Журнал Электро. – 2002. – № 5. – С. 7-13.
13. Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Субботский А.С., Ковалев А.Н. Экспериментальное исследование импульсного коронного разряда в воздухе // Журнал технической физики. – 2010. – Том 80, № 11 – С. 21-28.
14. Самусенко А.В., Стишков Ю.К., Пек Б.Э. Особенности лавинно-стримерного перехода в однородном и неоднородном электрическом поле // Сборник трудов IX Международной научной конференции «Современные проблемы электрофизики и электрогидродинамики жидкостей». – Санкт-Петербург, 2009. – С. 206-209.
15. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Прораствание стримерного канала: поле и плотность плазмы за волной ионизации, начальные электроны перед нею // Теплофизика высоких температур. – 1997. – Том 35, № 2. – С. 181-186.
16. Александров Н.Л., Базелян А.Э., Базелян Э.М., Кочетов И.В. Моделирование длинных стримеров в газе атмосферного давления // Физика плазмы. – 1995. – Том 21, № 1. – С.60-80.
17. Белогловский А.А., Мирзабекян Г.З., Пашинин И.В., Верещагин И.П., Белоусов С.В., Михайкин Е.А.

О влиянии напряженности электрического поля на ветвление стримеров в положительной импульсной короне в воздухе // *Электричество*. – 2008. – № 1 – С. 25-30.

18. Петров Н.И., Сисакян Н.И. Излучение молниевго разряда // *Компьютерная оптика*. – 1993. – № 13. – С. 65-75.

19. Базелян А.Э., Базелян Э.М. Катодонаправленный стример в воздухе при импульсах напряжения с наносекундным фронтом // *Теплофизика высоких температур*. – 1993. – Том 31, № 6. – С. 874-887.

20. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией // *Успехи физических наук*. – Том 170, № 7. – С. 753-769.

21. Верещагин И.П., Белогловский А.А. Физико-математическое моделирование импульсной стримерной короны в воздухе // *Электричество*. – 2005. – № 2. – С. 18-30.

22. РД 34.21.122–87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. – Введ. 30.07.1987. – Москва: Стандартинформ, 1997. – 37 с.

References

1. Aleksandrov G.N. Osobnosti razvitiya iskrovogo razryada v dlinnykh vozdushnykh promezhtkakh // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. – 1969. – Том 39, № 4. – С. 744-747.

2. Aleksandrov G.N., Bazelyan E.M., Gorin B.N. Issledovaniye razvitiya iskrovogo razryada v dlinnykh vozdushnykh promezhtkakh // *Elektrichestvo*. – 1971. – № 3. – С. 31-33.

3. Bazelyan E.M., Rayzer YU.P. Fizika molnii i molniyezashchity. – Moscow: Fizmatlit, 2001. – 320 s.

4. I. Gallimberti, G. Bacchiaga, Anne Bondiou-Cleargerie, Philippe Lalonde. Fundamental processes in long air gap discharges / *Applied physics/ C.R. Physique* 3 (2002). 1335-1359.

5. Aleksandrov G.N., Ivanov V.L., Bazelyan E.M., Sadykhova Ye.S. Ob oriyentirovke kanala dlinnoy iskry // *Elektrichestvo*. – 1973. – № 3. – С. 63-66.

6. Bazelyan E.M., Volkova O.V., Levitov V.I., Pulavskaya I.G. Ob otritsatel'nom impul'snom razryade v promezhtke sterzhen' - sterzhen' na ploskosti // *Elektrichestvo* – 1973. – № 7. – С. 72-74.

7. Bazelyan E.M., Sadykhova Ye.A. Oriyentirovka dlinnoy iskry // *Elektrichestvo*. – 1970. – № 10. – С. 63-67.

8. Gorin B.N., Shkilev A.V. Razvitiye elektricheskogo razryada v dlinnykh promezhtkakh sterzhen' - ploskost' pri otritsatel'nom impul'snom // *Elektrichestvo*. – 1976. – № 6. – С. 31-39.

9. Marchuk G.I., Kondrat'yev K.YA., Kozoderov V.V., Khvorost'yanov V.I. Oblaka i klimat. – Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. – 512 s.

10. Yermakov V.I., Stozhkov YU.I. Fizika grozovykh oblakov. – Moscow: Preprint. – 2004. – 38 s.

11. Aleksandrov G.N. O mekhanizme perekhoda koronnogo razryada v iskrovoy v dlinnykh vozdushnykh promezhtkakh // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. – 1965. – Том 35, № 7. – С. 1225-1229.

12. Kukhno A.V., Makal'skiy L.M., Nikitin O.A., Sysoyev V.S. Issledovaniya minimal'noy elektricheskoy prochnosti dlinnykh i sverkhdlinnykh vozdushnykh promezhtkov. Teoreticheskii podkhod // *Zhurnal Elektro*. – 2002. – № 5. – С. 7-13.

13. Stishkov YU.K., Samusenko A.V., Subbotkiy A.S., Kovalev A.N. Eksperimental'noye issledovaniye impul'snogo koronnogo razryada v vozdukhe // *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. – 2010. – Том 80, № 11. – С. 21-28.

14. Samusenko A.V., Stishkov YU.K., Pek B.E. Osobnosti lavinno-strimernogo perekhoda v odnorodnom i neodnorodnom elektricheskom pole // *Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sovremennyye problemy elektrofiziki i elektrogidrodinamiki zhidkostey»*. – Sankt-Peterburg, 2009. – С. 206-209.

15. Bazelyan E.M., Rayzer YU.P. Prorastaniye strimernogo kanala: pole i plotnost' plazmy za volnoy ionizatsii, nachal'nyye elektrony pered neyu // *Teplofizika vysokikh temperatur*. – 1997. – Том 35, № 2. – С. 181–186.

16. Aleksandrov N.L., Bazelyan A.E., Bazelyan E.M., Kochetov I.V. Modelirovaniye dlinnykh strimerov v gaze atmosferного davleniya // *Fizika plazmy*. – 1995. – Том 21, № 1. – С. 60-80.

17. Beloglovskiy A.A., Mirzabekyan G.Z., Pashinin I.V., Vereshchagin I.P., Belousov S.V., Mikheykin Ye.A. O vliyaniy napryazhennosti elektricheskogo polya na vetvleniye strimerov v polozhitel'noy impul'snoy korone v vozdukhe // *Elektrichestvo*. – 2008. – № 1 – С. 25-30.

18. Petrov N.I., Sisakyan N.I. Izlucheniye molniyevogo razryada // *Komp'yuternaya optika*. – 1993. – № 13. – С. 65-75.

19. Bazelyan A.E., Bazelyan E.M. Katodonapravlennyy strimer v vozdukhe pri impul'sakh napryazheniya s nanosekundnym frontom // *Teplofizika vysokikh temperatur*. – 1993. – Том 31, № 6. – С. 874-887.

20. Bazelyan E.M., Rayzer YU.P. Mekhanizm prityazheniya molnii i problema lazernogo upravleniya molniyey // *Uspekhi fizicheskikh nauk*. – Том 170, № 7. – С. 753-769.

21. Vereshchagin I.P., Beloglovskiy A.A. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye impul'snoy strimernoy korony v vozdukhe // *Elektrichestvo*. – 2005. – № 2. – С. 18-30.

22. RD 34.21.122–87. Instruksiya po ustroystvu molniyezashchity zdaniy i sooruzheniy. – Vved. 30.07.1987. – Moscow: Standartinform, 1997. – 37 s.