

УДК 551.594

DOI: 10.23671/VNC.2015.3.55272

## НОВЫЙ СПОСОБ ИНИЦИИРОВАНИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВАЖНЫХ ПОДВИЖНЫХ И СТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2015 В.П. Архипов<sup>1</sup>, И.Н. Березинский<sup>2</sup>, Н.А. Березинский<sup>3</sup>, к.ф.-м.н.,  
А.С. Камруков<sup>1</sup>, к.т.н., Н.П. Козлов<sup>1</sup>, д.т.н., М.Ю. Пашкевич<sup>3</sup>, к.т.н.,  
А.В. Трофимов<sup>1</sup>, к.т.н., Л.М. Федченко<sup>2</sup>, д.геогр.н., Р.В. Шереметьев<sup>3</sup>,  
к.ф.-м.н.

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: kamrukov@mail.ru;

<sup>2</sup>Высокогорный геофизический институт Россия, 360030, Кабардино-  
Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2, e-mail: vgikbr@yandex.ru;

<sup>3</sup>Высокогорный научно-исследовательский испытательный центр  
авиационной техники и вооружения, Россия, 360030, Кабардино-  
Балкарская Республика, г. Нальчик, пр. Ленина, 2, e-mail: vniic@rambler.ru

Для инициирования молниевых разрядов из грозовых облаков создают плазменный токопроводящий канал между грозовыми ячейками или ячейкой и землей вблизи объекта, защищаемого от поражения молнией. Канал создают синхронным подрывом серии артиллерийских боеприпасов плазменно-оптического действия с перекрытием облаков разрыва.

**Ключевые слова:** инициирование, молниевый разряд, грозовые облака, грозовая ячейка, поражение молнией, молниезащита.

### Введение

Ежегодно в Землю ударяет почти 32 миллиарда молний. Причиненный ими ущерб оценивается в 5 миллиардов долларов (smalltalks.ru). Считается, что стихия поражает от 3 до 30% от общего количества пострадавших.

Как известно, молния генерирует токи до 200 КА. При этом температура в центральной части ствола молнии может достигать 30000°C. Одним из основных методов защиты от молний на сегодняшний день является наличие заземления, т.к. молниевый разряд проходит по электрической цепи наименьшего сопротивления.

Стационарные молниезащитные сооружения не всегда могут стопроцентно гарантировать защищаемые объекты от грозовых разрядов. В ряде случаев эти сооружения провоцируют разрядные явления, не обеспечив защиту зданий и технических сооружений в их окрестностях. Иногда такие конструкции невозможно возвести в требуемых условиях.

В силу этих и многих других причин, задача молниезащиты является на сегодняшний день весьма актуальной.

Вкратце остановимся на применимости к нашей задаче каждого из известных методов.

### Существующие способы молниезащиты

На современном этапе технического развития (еще со времен Франклина) молниезащита зданий, сооружений и объектов различного назначения осуществляется методом упреждающего инициирования разряда опасной грозовой ячейки на землю через молниеотводы различных конструкций и рассасывания тока молнии по земле до безопасных для защищаемого объекта значений. Понятно стремление специалистов по молниезащите уменьшить ток разряда молнии для снижения его воздействия на защищаемые коммуникации. Это можно осуществить путем принудительного разряда грозовых ячеек на более раннем этапе развития их активности и на большем расстоянии от защищаемого объекта.

**Стационарный молниеотвод** чаще всего изготавливается из стержня, троса или сетки [Инструкция..., 2004]. Он устанавливается на высоте, превышающей защищаемый объект, и концентрирует потенциал земли в точке подвеса. Под действием электрического поля приближающегося грозового облака плотность наведенных на земле положительных зарядов значительно возрастает. Электростатическое поле земли концентрируется у острия молниеотвода до величины, превышающей порог ионизации воздуха. Вокруг острия молниеотвода возникает облачко ионов. Оно поляризуется и вытягивается в сторону ближайшей грозовой ячейки. Электрическое поле этой грозовой ячейки концентрируется в ближайшей к молниеотводу области, и из нее излучаются стримеры, формирующие лидер молниевых разряда. Разряд грозовой ячейки на землю производится через ближайший молниеотвод. Ток молнии рассеивается в земле в окрестности установки молниеотвода. Радиус зоны защиты сопоставим с высотой молниеотвода.

Недостатки этого способа заключаются в невысокой вероятности попадания разряда молнии в молниеотвод и невысокой степени защиты объекта. Дело в том, что опасность воздействия ЭДС (электродвижущая сила) магнитной индукции молнии на низкопотенциальные и взрывоопасные коммуникации защищаемого объекта требует отвода молнии в землю на значительном удалении от объекта, а это существенно снижает степень молниезащиты объекта.

1. На Западе с конца 1990-х годов получила развитие технология **активной молниезащиты** (*early streamer emission, ESE*) [Artterm-M.ru]. Отличие активной молниезащиты заключается в наличии активного молниеприемника. Его принцип действия основан на генерации высоковольтных импульсов на конце молниеприемника с помощью специального устройства. Активные молниеотводы порождают ответные стримеры раньше и с большей длиной, чем традиционные системы. Они ионизируют воздух с помощью: радиоактивных материалов, специализированных электронных схем, разрядников, рассчитанных на срабатывание по достижении определенной напряженности электрического поля. Это увеличивает область защиты. Работа активного молниеприемника «FOREND» осуществляется за счет разности потенциалов, образующихся между грозовым облаком и поверхностью земли. Когда напряженность электрического поля достигает критического значения, от молниеприемника исходит опережающий разряд в сторону молнии, и, при возникновении молнии над защищаемой территорией, она обязательно будет поймана молниеприемником и отведена в землю. Тем самым обеспечивается повышенная надежность защиты зданий, объектов и сооружений.

Satelit 3 – активный молниеотвод с фотоэлектрическим элементом создан фирмой DUVAL–MESSIEN, Франция. Это молниеотвод с фотоэлектрическим датчиком

и солнечными батареями для заряда элементов питания. Основная задача Satellit 3 – быстрый прием разряда, т. е. ранний эмиттер стримера (ESE). Наличие управляемого заряда большого потенциала противоположной полярности позволяет получить разряд на молниеотвод значительно раньше. Важно предварительно определить полярность (положительная или отрицательная) возникающего электрического поля и определить характер потенциала для захвата молнии, активировать внутренние электронные устройства для заряда иглы молниеотвода.

Многие исследователи молний и молниезащиты как в нашей стране, так и за рубежом, считают, что эти системы не работают; принятые на веру утверждения производителей о раннем появлении стримера, независимыми экспериментами не подтверждены; эффективная длина стримера при активной защите составляет 60 метров против 50 метров у обычного молниеотвода, что не может приводить к существенному улучшению области защиты [The International...]; активные устройства не лучше (или ненамного лучше) чем традиционные системы, и потому с их точки зрения здания с активной защитой (и меньшим числом молниеотводов) оказываются на практике недозащищенными [Базелян, Райзер, 2001]; что активные молниеотводы бесполезны, то есть не имеют никаких преимуществ по сравнению с традиционными средствами сравнимых размеров; использование активных молниеотводов российскими нормативными документами не предписывается [Базелян, 2008]. Многочисленные исследования показывают, что активная молниезащита не имеет выигрыша в эффективности по сравнению с обычными системами. В [Базелян, 2008] описаны десятки повреждений зданий от прямых попаданий молний рядом с устройством активной молниезащиты.

Известен **способ инициирования молниевых разрядов с помощью ракет**, запускаемых с поверхности земли. Они несут за собой медный проводник [Rakov, Uman, 2003]. Используются также ракеты с твердотопливным двигателем [The International...; Hartono and Robiah, 2009]. В состав топлива добавляются хлорид кальция и соли цезия. Горящее топливо оставляет позади летящей ракеты след из этих солей, которые, вступая в контакт с влагой воздуха, образуют токопроводящий канал. Молния идет по пути наименьшего электрического сопротивления, т. е. по сформированному каналу.

Процедура инициирования заключается в ожидании подходящего момента во время грозы, контролируемого измерителем напряженности поля, и запуске ракеты по направлению к грозовой ячейке облака. Электростатическое поле земли концентрируется по проводнику или токопроводящему каналу. Нисходящий из грозовой ячейки и встречный, излучаемый ракетой, лидеры растут навстречу друг к другу. Их объединение замыкает нисходящую молнию через проводящий объект на землю. Проводник, прикрепленный к ракете, при прохождении по нему тока лидеров испаряется, формируя проводящий канал в воздухе. Вдоль созданного канала происходит «короткое замыкание» на землю, и нисходящий лидер свободно проходит вниз по проводнику до земли. Молниевый разряд происходит через стержневые мачты при достижении ракетой высоты ~50–300 м.

Недостатками этого способа являются: громоздкость, дороговизна, связанная с ограниченным радиусом действия ракеты и жесткой привязки точки старта к стержневой мачте молниеотвода; малое быстродействие при повторных вызовах молнии; обрыв прикрепляемого проводника при старте и его влияние на траекторию полета ракеты; невозможность инициировать межоблачные разряды; разрушение целост-

ности токопроводящего канала (из-за его малого сечения) турбулентностью атмосферы.

В способе инициирования молниевых разрядов [Базелян, Райзер, 2001] проводят дистанционное определение предразрядного состояния грозовых ячеек и координат наиболее активных из них, и создание плазменного токопроводящего канала воздействием на атмосферный воздух **излучением лазера**.

В этом способе для инициирования молнии используют инфракрасный (ИК) лазер. Лазерный луч пропускают вблизи вершины высокой башни. Момент лазерного выстрела выбирается по данным датчика электрического поля, встроенного в систему запуска лазерных устройств, т. к. облако должно созреть и быть готовым к испусканию нисходящей молнии, чтобы она была перехвачена лидером, восходящим от башни.

Излучение фокусируется длиннофокусными зеркалом или линзой. В нагретом луче ИК-лазера воздух снижает свою плотность, что способствует его ионизации, формированию проводящего канала, вдоль которого легче развивается электрический разряд. При длительности основной части импульса  $\sim 50$  нс, пороговая интенсивность для пробоя воздуха, содержащего аэрозоли, составляет  $10^7$ – $10^8$  Вт·см<sup>2</sup>. Сформированный вершиной высокой башни восходящий лидер перехватывает молнию.

Основной недостаток этого способа – большие затраты энергии, так как греется весь газ в канале. Необходимые для этого мощности лазеров труднодостижимы.

Имеется также способ инициирования молниевых разрядов, включающий дистанционное определение предразрядного состояния и координат грозовых ячеек, и создание плазменного токопроводящего канала воздействием на атмосферный воздух излучения **ультрафиолетового (УФ) лазера** [Базелян, Райзер, 2000].

С помощью УФ-лазера создают плазменный канал в свободной атмосфере так, чтобы от его концов возбудились лидеры, инициирующие формирование молнии. Условие возбуждения жизнеспособных лидеров от плазменного проводника такое же, как и от заземленного сооружения. Оно определяет минимальную длину формируемого проводника. Осуществляют фотоионизацию чрезвычайно коротким, но очень мощным импульсом ультрафиолетового излучения. К нему добавляется более длительный импульс менее жесткого видимого излучения, которое освобождает электроны из быстро образующихся при УФ-импульсе отрицательных ионов. Создается токопроводящий канал в свободной атмосфере, который поляризуется в поле грозового облака и от его концов возбуждаются лидеры.

Недостатки лазерных методов – громоздкость и сложность оборудования, значительная энергоемкость и стоимость реализации, невозможность формирования протяженных проводящих каналов вблизи грозового облака, где максимальны напряженности электрического поля и наиболее выгодные с энергетической точки зрения условия зарождения лидерных каналов.

Общий недостаток как ракетного, так и лазерного способов искусственного вызывания молнии заключается в том, что формируемый ими плазменный проводящий канал имеет малое поперечное сечение. Любая неоднородность атмосферы – неоднородности плотности, вида и концентрации аэрозоля, мелкомасштабная турбулентность и др. в области проводящего канала – нарушает целостность канала и его проводимость, а, следовательно, и его способность к поляризации и проводника лидера канала.

### **Новый способ молниезащиты**

Нами разработан новый способ инициирования молниевых разрядов из грозовых облаков [Архипов и др., 2014], который, на наш взгляд проще, дешевле, надежнее описанных выше, и имеет более широкие возможности применения. Он включает дистанционное определение предразрядного состояния и координат грозовых ячеек, а также создание плазменного токопроводящего канала между грозовой ячейкой и землей или между соседними активными ячейками того же, или соседнего облака, в зависимости от конкретно сложившейся метеорологической обстановки вблизи важного объекта, защищаемого от поражения молнией. При осуществлении этого способа плазменный токопроводящий канал для инициирования молниевых разрядов создают синхронным подрывом серии артиллерийских боеприпасов плазменно-оптического действия [Взрывной плазменно-вихревой источник оптического излучения получил патент РФ № 2462008 Архипов и др., 2014]. Точки подрыва располагают так, чтобы ионизированные области, возникающие в атмосферном воздухе при срабатывании боеприпасов плазменно-оптического действия, располагались с перекрытием по цепочке в направлении от грозовой ячейки к поверхности земли или к соседней грозовой ячейке.

Перекрытие ионизированных областей в атмосферном воздухе от срабатывания боеприпасов плазменно-оптического действия может быть осуществлено изменением направления полета каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего; изменением времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего или одновременным изменением направления полета и времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего. Конкретнее эти процессы будут разьяснены на примерах.

Для реализации предложенного способа инициирования молниевых разрядов необходимы следующие технические средства:

- 1) станция грозовой разведки, обеспечивающая дистанционное определение предразрядного состояния и координат грозовых ячеек.
- 2) вычислительный блок на базе микропроцессоров, осуществляющий обработку данных станции грозовой разведки в режиме реального времени и выдачу команд целеуказания.
- 3) несколько мачт молниеотводов стандартной конструкции, расположенных на безопасном удалении от защищаемого объекта.
- 4) одна или несколько скорострельных артиллерийских установок.
- 5) Боеприпасы плазменно-оптического действия (БПОД) (такие боеприпасы выполняются, например, на основе взрывного плазменно-вихревого источника излучения, описанного в [Буланов и др., 2010; Инструкция..., 2004].

### **Технология создания токопроводящего канала для инициирования молнии**

Принцип действия БПОД основан на использовании эффектов ударного торможения и вихреобразования при импульсной инжекции высокоэнтальпийных плазменных струй в атмосферный воздух. Плазменные струи, с требуемыми термодинамическими параметрами и химическим составом, формируются с помощью кумулятивного заряда бризантного взрывчатого вещества (ВВ). При дистанционном подрыве БПОД в атмосферном воздухе формируется долгоживущее плаз-

менно-вихревое образование в виде сфероида с характерным диаметром порядка нескольких метров (в зависимости от массы заряда ВВ) и генерируется мощный высокоэнергетический импульс широкополосного электромагнитного излучения оптического диапазона спектра (0,19–14 мкм). Яркость такого излучения многократно превышает яркость солнечного излучения и соответствует радиационным температурам 15000–20000 К, фронт нарастания интенсивности излучения приходится на микросекундный диапазон длительностей.

В быстрой фазе процесса срабатывания БПОД – фазе ударного торможения высокоскоростной струи в воздухе – более 50% излучаемой энергии приходится на ультрафиолетовую область спектра, коротковолновые кванты которой вызывают фотоионизацию окружающего воздуха.

В процессе дальнейшего торможения струи в воздухе (медленная фаза) формируется плазменный тороидальный вихрь с характерными температурами плазмы 3000...5000 К. Время жизни плазменного вихря в воздухе – десятки и сотни миллисекунд (до 0,1 с.). В течение этого времени в плазменном вихре сохраняются достаточно высокие концентрации электронов –  $10^{12} \dots 10^{14}$  в см<sup>3</sup>.

Эффективность преобразования химической энергии конденсированного ВВ во внутреннюю энергию вихря и излучение достигает 20%.

Такие БПОД могут быть адаптированы ко всем типам современных артиллерийских установок, в том числе и к автоматическим пушкам с высоким темпом стрельбы (6000 выстрелов в минуту и более). Время задержки подрыва (или дистанция, на которой осуществляется подрыв) задается встроенным электронно-программируемым или пиротехническим взрывателем-замедлителем.

Темп стрельбы современной 30 мм автоматической пушки составляет 6000 выстр./мин (соответственно, частота стрельбы 100 Гц), скорость 30-миллиметрового снаряда при выходе из ствола составляет  $V_0 \approx 500 \dots 1000$  м/с, т. е. снаряды следуют друг за другом на расстоянии 5...10 м. Так что облака разрывов, при линейном их пролегании, перекрываются, обеспечивая таким образом непрерывность токопроводящего канала большого сечения. Пушка имеет устройство передачи времени срабатывания взрывателя снаряду внутри ствола индуктивным методом. Пушка снабжена программно-регулируемыми приводами, обеспечивающими перемещение ствола по азимуту и углу возвышения с заданной скоростью.

Имеются экспериментальные данные по исследованию характеристик макетных образцов БПОД калибра 30 мм, подтверждающие указанные выше сведения [Буланов и др., 2010].

В основе разработанного способа инициирования молниевых разрядов лежит возможность высокоэффективной ионизации атмосферного воздуха под действием высоких температур и интенсивного оптического излучения, удачно сочетающихся во взрывном плазменно-вихревом источнике оптического излучения (патент РФ № 2462008). Это артиллерийский снаряд, в котором оптимально организованы условия пространственно ориентированного выделения химической энергии конденсированного ВВ во взрывном кумулятивном процессе и импульсная инжекция сформированной высокоэнтальпийной плазменной струи в атмосферный воздух [Буланов и др., 2010]. Процесс инжекции сопровождается интенсивным вихреобразованием и самоорганизацией истекающего потока в долгоживущую крупномасштабную вихревую структуру в виде плазменного тороидального вихря. Таким образом, энергия взрыва после высокотемпературной стадии ударного сжатия не дис-

сипирует сразу в окружающее пространство, а локализуется в вихре и утилизируется им. Генерация мощного электромагнитного излучения оптического диапазона осуществляется за счет ударно-волновых процессов при торможении плазменной струи в воздухе и плазмохимических процессов в вихре. Выделяемая в результате экзотермических реакций тепловая энергия конвертируется в энергию оптического излучения и энергию циркуляционного движения.

Во взрывной камере были проведены эксперименты с малогабаритными (диаметр 30 мм; длина 130 мм) генераторами с цилиндрическим зарядом конденсированного ВВ массой 20 г и полным энергосодержанием ~100 кДж. В качестве ВВ применен состав на основе гексогена с 20% массовой добавкой алюминиевой пыли. Скорость детонации ВВ составляла ~7,9 км/с. Заряд (наружный диаметр 18 мм) имел цилиндрическую кумулятивную выемку диаметром 8 мм и длиной ~70 мм, облицованную алюминиевой фольгой толщиной 0,3 мм.

В экспериментах проводилась покадровая (до 300 тыс. кадров в секунду) фоторегистрация инжекции плазменной струи в атмосферу, фронтальная видеосъемка и фотоэлектрическая дозиметрия генерируемого оптического излучения в четырех спектральных диапазонах (УФ –  $\lambda = 270 \pm 20$  нм, «синяя» –  $\lambda = 430 \pm 50$  нм, «зеленая» –  $\lambda = 555 \pm 50$  нм и ближняя ИК –  $\lambda = 1000 \pm 70$  нм).

На рисунке 1 представлены кадры скоростной съемки процесса срабатывания взрывного генератора. Время указано с момента разрыва выходной диафрагмы – начала истечения.

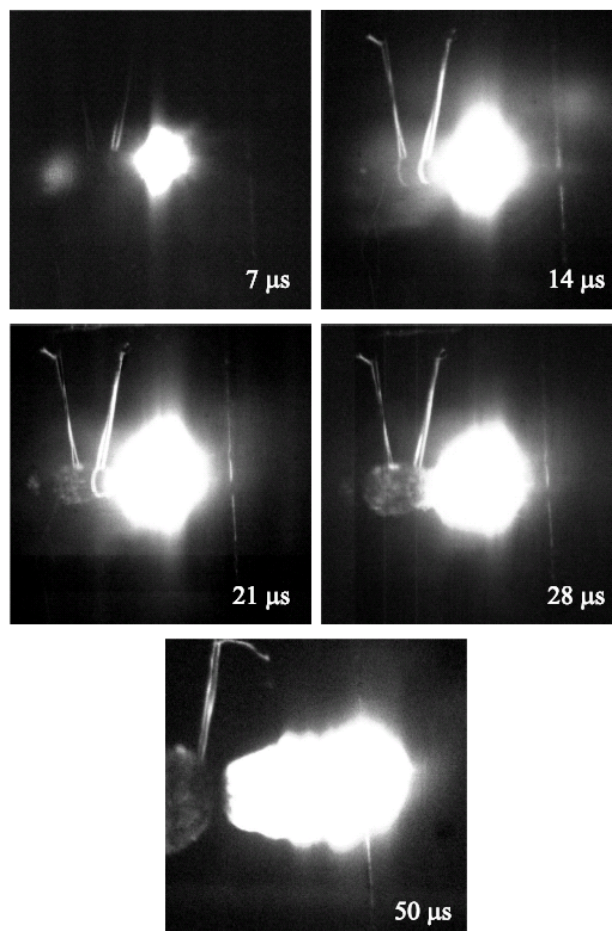


Рис. 1. Покадровая скоростная съемка процесса срабатывания взрывного генератора

Первые два кадра (7 и 14  $\mu\text{s}$ ) соответствуют максимуму мощности излучения. Характерная особенность структуры потока – в первые 20  $\mu\text{s}$  истечения поперечный размер струи превышает продольный размер, т. е. размер по основному направлению вектора скорости. В последующие моменты времени скорость радиального расширения струи существенно падает, и струя вытягивается в осевом направлении.

Кадры фронтальной фотосъемки приведены на рис. 2. Из него видно, что уже на 240  $\mu\text{s}$  процесса (а реально раньше, см. ниже) формируется выраженная торoidalная вихревая структура. К 300-й  $\mu\text{s}$  регистрируемый на скоростных фотографиях диаметр вихря составляет  $\sim 30$  см.

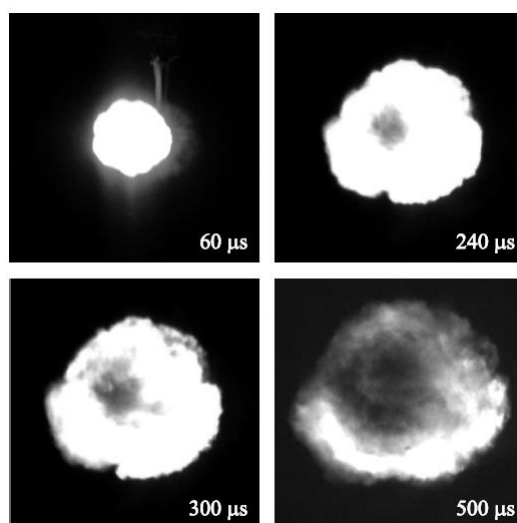


Рис. 2. Кадры фронтальной скоростной фотосъемки процесса срабатывания взрывного генератора излучения. Поле кадра 50x50 см.

На рисунке 3 приведена динамика измерения продольного и поперечного (диаметра) размеров струи. Начальная скорость расширения плазменной струи (скорость контактной границы плазма-воздух) превышает 10 км/с. Средняя за первые 50 мкс процесса скорость расширения составляет 4–5 км/с. К 300-й мкс процесса осевая скорость переднего фронта плазменного образования падает до  $\sim 300$  м/с, радиальная скорость расширения – до 100 м/с.

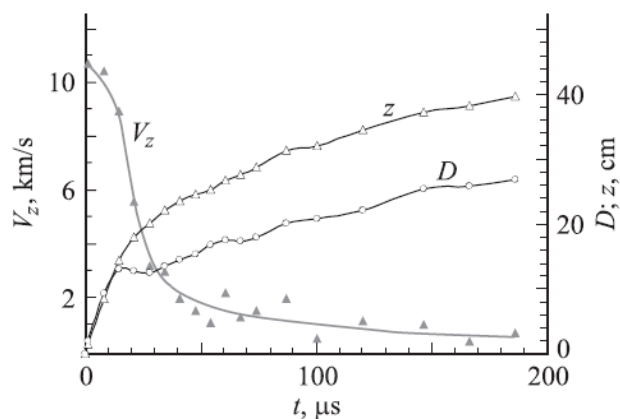


Рис. 3. Временные зависимости координаты переднего фронта ( $z$ ), диаметра ( $D$ ) и осевой скорости расширения ( $V_z$ ) плазменной струи взрывного генератора



Если аппроксимировать временную зависимость диаметра струи степенной функцией, то оказывается, что после того, как пройдет примерно 150 мкс, закон изменения поперечного (а также и продольного) размера существенно изменяется – показатель степени в зависимости  $D \propto t^p$  уменьшается примерно вдвое. Это свидетельствует о смене газодинамического режима течения и может косвенно указывать на завершение процесса формирования тороидального вихря как автономной плазмодинамической структуры [Архипов и др., 2014; Базелян, 2008].

На рисунке 4 приведен видеокادر срабатывания взрывного генератора излучения. Видно, что характерный размер плазменного образования к моменту времени  $t > 40$  мс превышает 1 м. Видеокамера со скоростью съемки 25 кадров в секунду регистрировала, как правило, 2–3 кадра, один из которых обычно был полностью засвечен.



Рис. 4. Видеокادر срабатывания взрывного генератора. Диаметр тела свечения ~1,2 м

Для инициирования молнии необходимо создать ионизированный (проводящий) канал длиной в несколько десятков метров вблизи грозовой ячейки облака по направлению к земле или близлежащей грозовой ячейке того же или другого облака, чтобы от его концов смогли возбудиться жизнеспособные лидеры. Канал должен быть хорошо проводящим и иметь диаметр, превышающий характерный размер мелкомасштабной турбулентности атмосферы. Плазма сформированного канала быстро (за  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с) поляризуется в поле грозовой ячейки облака, что способствует формированию лидеров молнии из обоих концов канала.

### **Примеры реализации способа инициирования молниевых разрядов**

Реализация предложенного способа инициирования молниевых разрядов будет понятна из следующих примеров, касающихся молниезащиты объектов.

**Пример 1:** перекрытие ионизированных областей в атмосферном воздухе от срабатывания боеприпасов плазменно-оптического действия осуществляется изменением направления полета каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего (рисунок 5).

Станция грозовой разведки 1 отслеживает перемещение грозового облака 2 с грозовой ячейкой в сторону защищаемого объекта 3 и контролирует напряженность электрического поля на уровне поверхности земли. Угловые координаты грозовой

ячейки, направление и скорость движения облака, текущее расстояние до него непрерывно поступают в вычислительный блок 4. Эти данные обрабатываются вычислительным блоком 4 с учетом координат места позиционирования скорострельной артиллерийской установки 5 и мачты молниеотвода 6. Результаты вычислений в виде команд целеуказания по азимуту и углу возвышения, по времени срабатывания взрывателя боеприпаса и угловым скоростям поворота ствола поступают на приводы скорострельной артиллерийской установки 5.

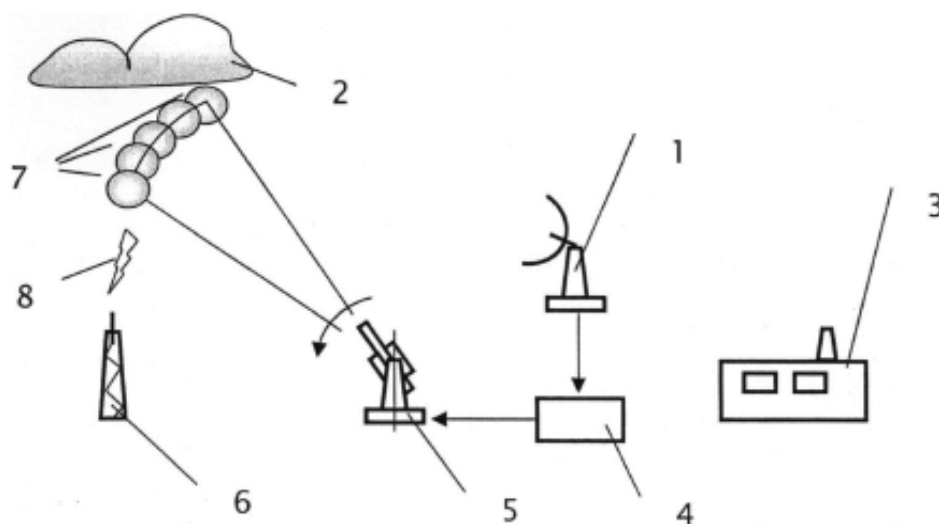


Рис. 5. Схема реализации способа иницирования молниевых разрядов с обеспечением перекрытия ионизированных областей изменением направления полета каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего

При достижении напряженности приземного электрического поля порогового значения (например, 200 В/см) станция грозовой разведки 1 выдает команду на отстрел серии боеприпасов плазменно-оптического действия. Каждый боеприпас при выходе из ствола индуктивным способом получает информацию о задержке срабатывания встроенного дистанционного взрывателя, рассчитанной вычислительным блоком 4.

Во время стрельбы ствол скорострельной артиллерийской установки 5 осуществляет программное перемещение по азимуту и углу возвышения. В результате каждый последующий боеприпас из серии вылетает из ствола по новому направлению. При подлете боеприпасов к заданной точке пространства (например, нижней кромке грозового облака) через расчетное время срабатывает дистанционный взрыватель и боеприпас плазменно-оптического действия подрывается.

Поскольку в данном примере время срабатывания всех боеприпасов в серии установлено одно и то же, а ствол скорострельной артиллерийской установки во время стрельбы поворачивается с расчетной угловой скоростью, траектория точек подрыва 7 серии боеприпасов представляет собой дугу окружности.

Вокруг каждой точки подрыва образуется область ионизации атмосферного воздуха. Начальная ионизация воздуха обеспечивается коротковолновыми фотонами ультрафиолетового диапазона, генерируемыми высокотемпературной ударно-сжатой плазмой, образующейся при срабатывании боеприпаса. В дальнейшем она поддерживается и усиливается электронными лавинами, развивающимися в сильном электрическом поле грозового облака.

В рассматриваемом примере перекрытие ионизированных областей вокруг точек подрыва 7 обеспечивается угловым перемещением ствола во время стрельбы, а время срабатывания боеприпасов определяет дистанцию (наклонную дальность), на которой формируются зоны подрыва.

В результате вблизи мачты молниеотвода 6 создается пространственно-ориентированный протяженный проводящий канал диаметром порядка 2...5 метров. Для формирования канала протяженностью 100 метров требуется примерно 20 боеприпасов.

В электрическом поле грозовой ячейки проводящий плазменный канал поляризуется и с его противоположных концов возбуждаются лидеры. Поскольку проводящий плазменный канал формируется вдоль линии, соединяющей грозовую ячейку и мачту молниеотвода 6, в этом же направлении будет прорасти и нисходящий лидер от проводящего канала. Тем самым обеспечивается высокая вероятность ориентированного удара молниевом разряда 8 между грозовой ячейкой грозового облака 1 и молниеотводом 6 через плазменный канал в виде дуги.

**Пример 2:** перекрытие ионизированных областей в атмосферном воздухе от срабатывания боеприпасов плазменно-оптического действия осуществляется изменением времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего (рисунок 6).

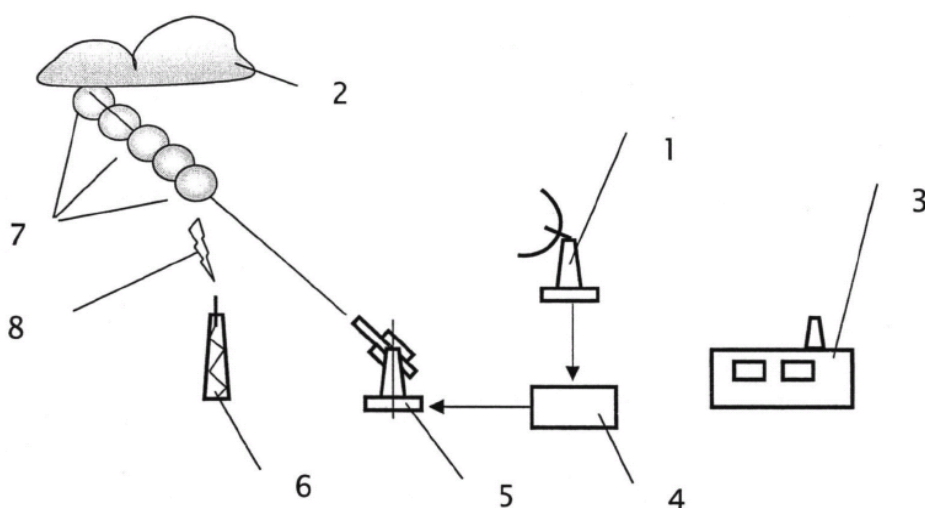


Рис. 6. Схема реализации способа инициации молниевых разрядов с обеспечением перекрытия ионизированных областей изменением времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего

В отличие от примера 1, ствол скорострельной артиллерийской установки (автоматической пушки) 5 не изменяет своего углового положения и нацелен на грозовую ячейку в нижней части грозового облака 2. Боеприпасы на выходе из канала ствола пушки 5 получают различные значения времени срабатывания, например,

$$t_1 > t_2 > t_3 > \dots > t_n$$

где  $t_1$  – время срабатывания 1-го боеприпаса в серии,  $t_2$  – время срабатывания 2-го боеприпаса и т.д. В результате точки подрыва 7 боеприпасов располагаются на одной линии и при соответствующем выборе значений времени срабатывания каждого боеприпаса в серии ионизированные области воздуха вокруг точек под-

рыва перекрываются и тем самым формируется проводящий плазменный канал, ориентированный от грозовой ячейки в сторону мачты молниеотвода 6 вблизи артиллерийской установки 5.

Дальнейшее развитие процессов инициирования молнии происходит аналогично примеру 1 и приводит к возникновению молниевых разряда 8.

В примере 2 формируется прямолинейный плазменный проводящий канал вдоль линии прицеливания артиллерийской установки 5.

**Пример 3:** перекрытие ионизированных областей в атмосферном воздухе осуществляется одновременным изменением направления полета и времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего (рисунок 7).

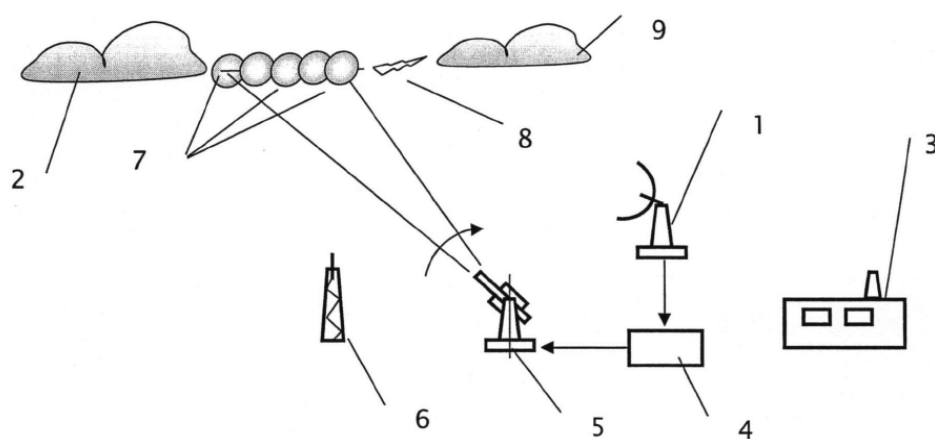


Рис. 7. Схема реализации способа инициирования молниевых разрядов с обеспечением перекрытия ионизированных областей одновременным изменением направления полета и времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего

В отличие от примеров 1 и 2, имеет место сразу два механизма формирования протяженного проводящего плазменного канала за счет углового перемещения ствола артиллерийской установки 5 и за счет установки разного времени срабатывания боеприпасов в серии. В результате согласованного использования двух механизмов можно получить любую желаемую ориентацию плазменного проводящего канала, например горизонтальную, как это показано на рисунке 3. В этом случае для обеспечения защиты объекта 3 точки подрыва 7 боеприпасов плазменно-оптического действия располагаются вдоль линии, соединяющей разнополярно заряженные облака 2 и 9, что обеспечивает инициализацию молниевых разрядов 8 между ними.

### Резюме

Приведенные примеры показывают возможность реализации предложенного способа инициирования молниевых разрядов на современном уровне техники.

Кроме молниезащиты объектов, предложенный способ может быть использован для искусственных воздействий на облачные процессы с целью регулирования их электрической активности.

Задача упрощения предложенного способа инициирования молниевых разрядов решается обработанностью и функциональной простотой используемых технических средств.

Задача удешевления способа инициирования молниевых разрядов решается конструктивной простотой применяемых технических средств и низкой стоимостью расходуемых боеприпасов плазменно-оптического действия.

Задача повышения надежности способа решается тем, что образующийся в результате синхронного подрыва серии боеприпасов плазменно-оптического действия проводящий плазменный канал имеет значительное сечение (~5 м) и время жизни, в силу чего, слабо подвержен влиянию нежелательных факторов, например локальной турбулентности атмосферы.

Задача расширения возможностей способа инициирования молниевых разрядов решается тем, что согласованным выбором угловой скорости поворота ствола скорострельной артиллерийской установки и времени срабатывания боеприпасов в серии можно реализовать любую оптимальную ориентацию и форму плазменного проводящего канала и, тем самым, дополнительно повысить надежность искусственного инициирования молниевых разрядов.

### Литература

1. Архипов В.П., Березинский И.Н., Березинский Н.А., Камруков А.С., Козлов Н.П., Пашкевич М.Ю., Трофимов А.В., Федченко Л.М., Шереметьев Р.В. RU 2525842 С1. Способ инициирования молниевых разрядов. 20.08.2014. Бюл. №23.
2. Базелян Э.М. Активные молниеотводы. «Электротехнический рынок». №4 (22), июль-август 2008.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.Л. Механизм притяжения молнии, проблема лазерного управления молнией // УФН. 2000. Т. 170. №7, С.753.
4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты М: Физматлит, 2001. 320 с.
5. Буланов С.С., Есиев Р.У., Камруков А.С., Козлов Н.П., Морозов М.И., Росляков И.А. Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения. ЖТФ 2010, т. 80, вып. 11, стр. 87–94.
6. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. Москва, Издательство МЭИ, 2004.
7. Arterm-M.ru.
8. Hartono Z.A. and Robiah I. ESE: The device for a modern answer to lightning protection. The Sunday Star on October 4, 2009.
9. Rakov V., Uman M. Lightning. Physics and effects. 2003. Cambridge University Press. 687 p.
10. The International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) at Camp Blanding, Florida.

DOI: 10.23671/VNC.2015.3.55272

## **A NEW METHOD OF LIGHTNING DISCHARGE INITIATION FOR THE PURPOSES OF LIGHTNING PROTECTION OF IMPORTANT MOBILE AND STATIONARY OBJECTS**

**© 2015 V.P. Arkhipov<sup>1</sup>, I.N. Berezinskiy<sup>2</sup>, N.A. Berezinskiy<sup>3</sup>, Sc. Candidate (Phys.-Math.), A.S. Kamrukov<sup>1</sup>, Sc. Candidate (Tech.), N.P. Kozlov, Sc. Doctor (Tech.), M.Yu. Pashkevich<sup>3</sup>, Sc. Candidate (Tech.), A.V. Trofimov<sup>1</sup>, Sc. Candidate (Tech.), L.M. Fedchenko<sup>2</sup>, Sc. Doctor (Geog.), R.V. Sheremetiev<sup>3</sup>, Sc. Candidate (Phys.-Math.)**

<sup>1</sup>Bauman Moscow state technical university (BMSTU), e-mail: kamrukov@mail.ru;

<sup>2</sup>High-mountain geophysical institute, Russia, 360030, Republic of Kabardino-Balkaria, Nalchik, Lenin avenue, 2, e-mail: vgikbr@yandex.ru;

<sup>3</sup>High-mountain research experimentation center of aerotechnics and weapons, Russia, 360030, Republic of Kabardino-Balkaria, Nalchik, Lenin avenue, 2, e-mail: vniic@rambler.ru

Lightning produced by conductive plasma channel between the thunderstorm cells or between the cell and the ground near the object to be protected from lightning. Channel created by synchronous detonation of series of artillery shells with plasma-optical action with overlapping scopes of explosions.

**Keywords:** initiation, lightning, storm clouds, thunder cell, damage from lightning, lightning protection