

УДК 537.523; 533. 915

Моделирование триггерной молнии в атмосфере

Аполлонов В. В.,* Плетнев Н.В.**

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской Академии наук,

ИОФ РАН, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991, Россия

**e-mail: vapollo@kapella.gpi.ru*

**e-mail: pletnev@kapella.gpi.ru*

Аннотация

В режиме электрического пробоя в атмосфере проведены эксперименты по коммутации промежутков произвольной геометрической формы длиной до ~1.9м, образованных взрывающейся проволокой из меди. На основании экспериментальных результатов обсуждается механизм электрического пробоя и условия зарождения стримера при средней напряженности электрического поля в разрядном промежутке 5.3-17кВ/м. Проводятся оценки геометрических размеров отдельных плазменных образований перегретых медных капель. Обсуждается механизм образования продуктов взрыва проволоки - крупных аэрозолей с участием частиц меди и оксида меди (CuO, Cu₂O) и характер протекания электрического тока при пробое. Сделана оценка температуры канала и средней скорости его расширения. Показано, что при удельной вложенной в канал энергии ~600Дж/м электрический пробой моделирует реальные процессы, идущие в триггерной молнии - искусственной молнии, использующей запуск малых ракет для образования канала из тонкой проволоки в направлении грозового облака.

Ключевые слова: формирование проводящего канала в атмосфере, взрывающаяся проволока, пауза тока, электрический пробой, стример, аэрозоль.

Введение

В настоящее время во многих лабораториях продолжают исследования по получению управляемого канала высокой проводимости в атмосфере [1-6] для реализации эффективной системы лазерной молниезащиты [7-11] или электромагнитного воздействия [12], способного пропускать ток, соответствующий режиму короткого замыкания [13] в естественной или искусственной электрической цепи. В основе лазерных систем молниезащиты лежит принцип создания проводящих каналов ионизованного воздуха для управляемого разряда молнии, связанного с лучом лазера направленного в штормовые (ливневые) облака, для соединения грозового облака с заземленным металлическим стержнем - классическим молниеотводом [1,2]. В таких системах используются мощные лазеры фемтосекундного [14-17] или наносекундного [7-11,18] диапазона длительностей, различного принципа действия: газовые электроразрядные [8-11], твердотельные с оптической накачкой и синхронизацией мод [14-17] с различной рабочей средой для получения излучения в широком диапазоне длин волн от УФ [1,18] до среднего ИК [8-11]. В работах [8-11] в основу создания проводящих каналов положена длинная лазерная искра. Максимальная длина управляемого лазерной искрой электрического разряда ~ 16 м при напряжении 3МВ была получена в России и в Японии [11] при использовании импульсных CO₂ лазеров с энергией до 0.5 кДж со сферической

оптикой. В этом случае удалось существенно снизить пробивное напряжение (более чем в два раз).

Как было показано в работах [12,19,20], для создания канала высокой проводимости в атмосфере, способного коммутировать искусственный или естественный разряд (молнию) газ должен быть нагрет до температуры 4000-8000К, когда начинается процесс термической ионизации газа. Это положение имеет принципиальное значение. Как отмечено в работе [19] важно не только создать, но и сохранить необходимую для пробоя концентрацию электронов в атмосферном канале и по мере разогрева процесс термической ионизации газа становится главным механизмом <<производства>> электронов в канале. Именно здесь коренится главная причина того, почему стримерный механизм при наличии высокой концентрации электронов в канале с низкой температурой непосредственно привести к ЭП не может [19].

По оценкам [12] для создания в сухом воздухе проводящего канала диаметром 1см с температурой 4000К верхний уровень энергии излучения в импульсе (радиоимпульс) составляет для длины канала: 4м-6.48кДж; 20м-32.4кДж; 40м-64кДж; 41284м-677.922МДж. При нагреве сухого воздуха от 2000 до 4000К проводимость повышается от 10^{-6} до 1См ($1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$). По данным [12] воздушный канал с диаметром 1см, нагретый до температуры 4000К, сохраняет остаточную проводимость в течение 50мс после прохождения микроволнового импульса.

К настоящему времени единственным реализованным экспериментальным результатом ЭП в атмосферном канале большой длины является канал,

инициируемый взрывом проволоки (ВП) длиной до $\sim 300\text{м}$ в триггерной молнии [21-27] и в лабораторных экспериментах до $\sim 60\text{м}$ [28-31]. Развитие лидера скользящего неуправляемого разряда вдоль тонкой диэлектрической пленки, покрывающей заземленную металлическую плоскость и вдоль проводящей поверхности [19] в настоящей работе мы не рассматриваем, так как в этом варианте лидерного процесса нет стримерной зоны [19]. Результирующая погонная емкость плазменного канала в этом случае может быть на 2-3 порядка больше, чем у такого же канала в газе [19]. Как известно, в экспериментах удавалось формировать скользящие искровые каналы в воздухе длиной в несколько метров при напряжении менее $10\div 20\text{кВ}$.

Новый подход к формированию токопроводящего канала может быть реализован с помощью технологии лазерного запуска, предложенный в проекте “Импульсар” [4] и более подробно описанный в работах [6,30]. Перемещение “Импульсара” под действием излучения высокочастотного импульсно-периодического (И-П) лазера с энергией импульсов достаточной для реализации пробоя в фокусе оптической системы лазерного реактивного двигателя (ЛРД) обеспечивает формирование непрерывного токопроводящего канала в воздушной среде за счет создания смеси аэрозоля [4] с атмосферным воздухом и ее последующей ионизации.

В работе [29] при импульсе напряжения 270кВ осуществлена коммутация промежутка длиной 60м при использовании ВП из меди в эмалевой оболочке (ЭО) диаметром $\varnothing 200\text{мкм}$. Полученная напряженность среднего электрического поля (E_c) при ЭП составила 4.5кВ/м . Аналогичный результат $E_c \approx 5.3\text{кВ/м}$ (уточненные значения) были получены в наших работах при использовании ВП из меди в ЭО $\varnothing 90\text{мкм}$ [31].

При максимальной запасенной энергии ~ 2.4 кДж осуществлена управляемая коммутация промежутка длиной 1,9м при зарядном напряжении $U_0=10.3$ кВ. Следует отметить, что первые результаты работы [31] были нами сообщены ранее в [5].

Для возбуждения с некоторой вероятностью искусственных молний (триггерные молнии), фотография которой приводится в конце статьи, используется запуск малых ракет с диэлектрическим или металлическим корпусом длиной около 1м [21-27]. Малогабаритная ракета стартует с земли или с поверхности судна со скоростью 200м/с, поднимая за собой тонкую заземленную стальную или медную проволоку $\varnothing 200$ мкм на высоту 200-300м [21,22]. Катушка с проволокой находится на поверхности земли или на ракете. Команду на старт дают, когда напряженность электрического поля у поверхности земли 4-10кВ/м [21,22]. Это гарантирует возбуждение отрицательной молнии в 60–70 % запусков.

В данной работе проведено исследование управляемого ЭП в атмосферном канале длиной до ~ 1.9 м, содержащем частицы аэрозолей [32] меди и оксида меди (CuO , Cu_2O) [33], образованные ВП из меди $\varnothing 90$ мкм в ЭО. При максимальной запасенной энергии в эксперименте 4.1кДж максимальная величина тока при ЭП превышала 3.6кА, что сравнимо с величиной тока на главной стадии молнии [13]. Диаметр канала проводимости превышал 3см. Поэтому в нашем эксперименте можно моделировать процессы, происходящие в канале молнии на стадии формирования стреловидного лидера (который не имеет ветвлений) и на главной стадии триггерной молнии, замыкаемой ВП [13, 21-27]. Характер изменения тока в триггерной молнии (амплитуда, длительность и форма тока), динамика формирования проводящего

канала и его температура [21,22] по основным параметрам хорошо моделируются в условиях нашего эксперимента. Достоинством метода является также то, что при исследовании динамики развития канала методом скоростной фоторегистрации и макросъемки на минимальном расстоянии ~ 25 см отсутствует опасность поражения током, что практически невозможно при исследовании молнии в природных условиях [13].

Формирование управляемых электрических разрядов в канале, образованном взрывом проволоки

В настоящей работе приводится описание результатов экспериментов по изучению механизма ЭП (“restrike”) в канале, образованном ВП из меди $\varnothing 90$ мкм, длиной $L=0.6-1.9$ м при зарядном напряжении и емкости $U_0=7-11$ кВ; $C=3.4-110.7$ мкФ. В ходе выполнения работы мы пришли к выводу, что для получения более точных результатов по значению удельного напряжения пробоя необходимо значительно (на порядок) увеличить значение запасаемой энергии (емкости). В своей работе мы использовали серийный игнитронный разрядник ИРТ-3, который допускает 100% перегрузку по амплитуде импульса тока (до 200 кА), что определяет их высокую надежность и точность измерений. Схема эксперимента значительно упрощается, так как по всем своим характеристикам газовые коммутаторы существенно уступают игнитронным разрядникам при рабочих напряжениях менее 25 кВ.

Существует ряд факторов, которые облегчают механизм ЭП длинных промежутков в атмосфере в канале, образованном ВП. Как было отмечено в работе [20] основным является вопрос о разогреве газа, обеспечивающем термическую его ионизацию в канале искры. В работе [19] отмечается, что в сильноионизированной

плазме поле поставляет энергию всему электронному газу в целом. Ионизуют газ те из них, которые получили достаточно энергии, но не от поля, а в ходе обмена энергией с другими частицами. Поддерживать сильноионизованную равновесную плазму гораздо легче, чем слабоионизованную неравновесную – для этого требуется гораздо более слабое поле. Полю достаточно довести электрон лишь до энергии порядка $kT \approx 1\text{эВ}$ [19].

В экспериментах по созданию управляемого ЭП в атмосфере с учетом возможного влияния вертикальной компоненты электрического поля Земли используется вертикально ориентированная ВП из меди марки ПЭВ-2 в эмалевой оболочке (ЭО), длина и диаметр которой: $L=0.35\text{-}1.9\text{м}$; $\text{Ø}90\text{мкм}$ ($\text{Ø}110\text{мкм}$ - с учетом ЭО). На рис.1 показана схема экспериментальной установки и

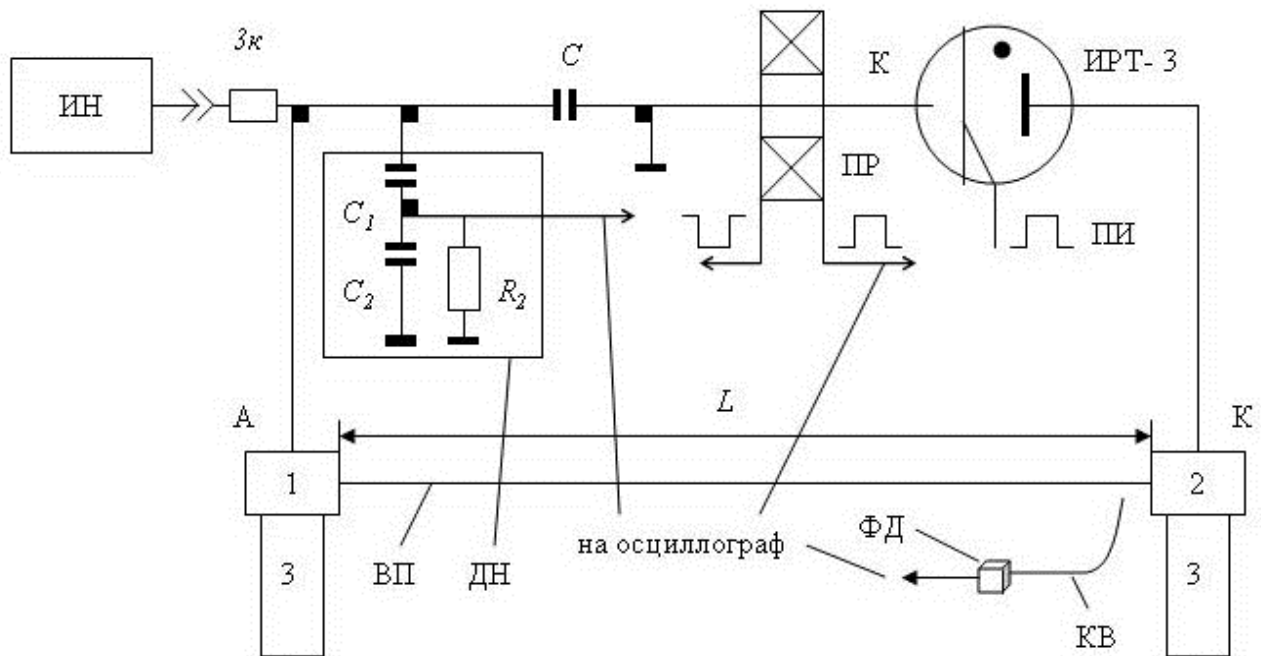


Рисунок 1 - Схема эксперимента по иницированию ЭП в канале ВП в вертикальном положении: 1, 2 – латунные электроды; 3 – эбонитовые изоляторы; ИРТ-3 – игнитрон, коммутатор; ПР - пояс

Роговского; ДН - делитель напряжения; ПИ – пусковой импульс; ВП – взрывающаяся проволока; ФД – фотодиод; КВ – кварцевое волокно; А – анод; К – катод; ИИ – источник зарядного напряжения.

положение датчиков для измерения тока поясом Роговского ПР, напряжения на конденсаторной батарее с помощью делителя напряжения ДН и положение торца полированного кварцевого волокна (КВ) длиной $\sim 2\text{м}$, передающее излучение из канала разряда на быстродействующий pin фотодиод ФД с временным разрешением $\sim 1\text{нс}$. Торцевое волокно располагалось на расстоянии 1,5 - 4см от оси проволоки в области катода или анода разрядного промежутка. При расстоянии от торца волокна до проволоки $\sim 1.5\text{см}$ данная система регистрации позволяла фиксировать более слабое излучение на стримерной стадии после ВП, предшествующее ЭП и сильное излучение на стадии ЭП в канале. Спектральная чувствительность канала позволяла регистрировать излучение также в УФ диапазоне, которое доминирует на стримерной стадии. В отличие от регистрации излучения в разряде молнии [13] потери на поглощение и рассеяние УФ излучения в атмосфере в нашем эксперименте малы. Измерение формы импульса тока производилось с помощью дифференциального экранированного пояса Роговского с временным разрешением $\sim 30\text{нс}$ и постоянной интегрирования $\theta = L_{\Sigma} / 2R \approx 380\text{мкс}$ [34], где L_{Σ} , R суммарная индуктивность и величина интегрирующего сопротивления в отдельном канале, соответственно. Измерение формы напряжения на разрядном промежутке производилось с помощью экранированного делителя напряжения смешанного типа [35], подключенного к аноду батареи конденсаторов. Данный делитель напряжения дает ошибку измерения $\sim 1\%$ при длительности фронта тока $\tau_f \geq 1\text{мкс}$ [35]. Величина сопротивления R_2 , шунтирующего емкость C_2 , выбирается из условия допустимого искажения

измеряемого напряжения по времени, когда это искажение не влияет на оценку процесса по осциллограмме. Роль отсутствующего на схеме сопротивления R_1 играет сопротивление утечки R_f изоляции емкости C_1 . При этом «плечи» делителя имеют не одинаковые постоянные времени $R_f \cdot C_1 \neq R_2 \cdot C_2$. Достоинством данного делителя является то, что он не шунтирует слаботочный источник зарядных напряжений. В качестве регистрирующего прибора в работе использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS 220. Конденсатор, емкостью $C=3.4-110.7\text{мкФ}$ заряжался от высокоточного источника зарядных напряжений в диапазоне $U_0=7-11\text{кВ}$.

Принципиальная схема источника зарядных напряжений, в которую нами внесено ряд изменений, приведена в работе [36]. Выходное напряжение источника с автоматической системой зарядки конденсаторной батареи до заданного напряжения и его поддержания с точностью 0.5%, регулируется плавно в пределах 2-12кВ. Максимальный зарядный ток 5мА. Измерение зарядного напряжения производилось с помощью электростатического вольтметра С53 и высокоомного делителя напряжения с точностью 0.5%.

При включении внешним пусковым импульсом управляемого разрядника - игнитрона ИРТ-3 заряженный конденсатор разряжался через ВП из меди $\text{Ø}90\text{мм}$. Схема формирования импульса для запуска игнитрона приведена в работе [34]. Как показали наши эксперименты, наличие ЭО помогает формировать в атмосфере тонкий, цилиндрической формы канал пробоя с диаметром проводящей зоны тока 4-30мм. Фотографии канала получены путем фотосъемки через синий-ФС-1 или голубой фильтр совместно с нейтральным фильтром НС-9 с помощью цифровой камеры OLYMPUS C-5050ZOOM. При выдержке 1-1,6с фотоснимки несут

интегральный характер, так как экспозиция при фотосъемке определяется длительностью самого разряда. Более подробно параметры фотосъемки описаны в работах [30, 31].

На рис. 2а приведена фотографии канала ЭП в атмосфере, образованного ВП (Ø90мм, длина 133см) при $U_0=8.6\text{кВ}$ и $C=110.7\text{мкФ}$ при запасенной энергии 4.1кДж.

Результаты обработки изображения в системе цветowych координат HSB приведены на рис. 2б.

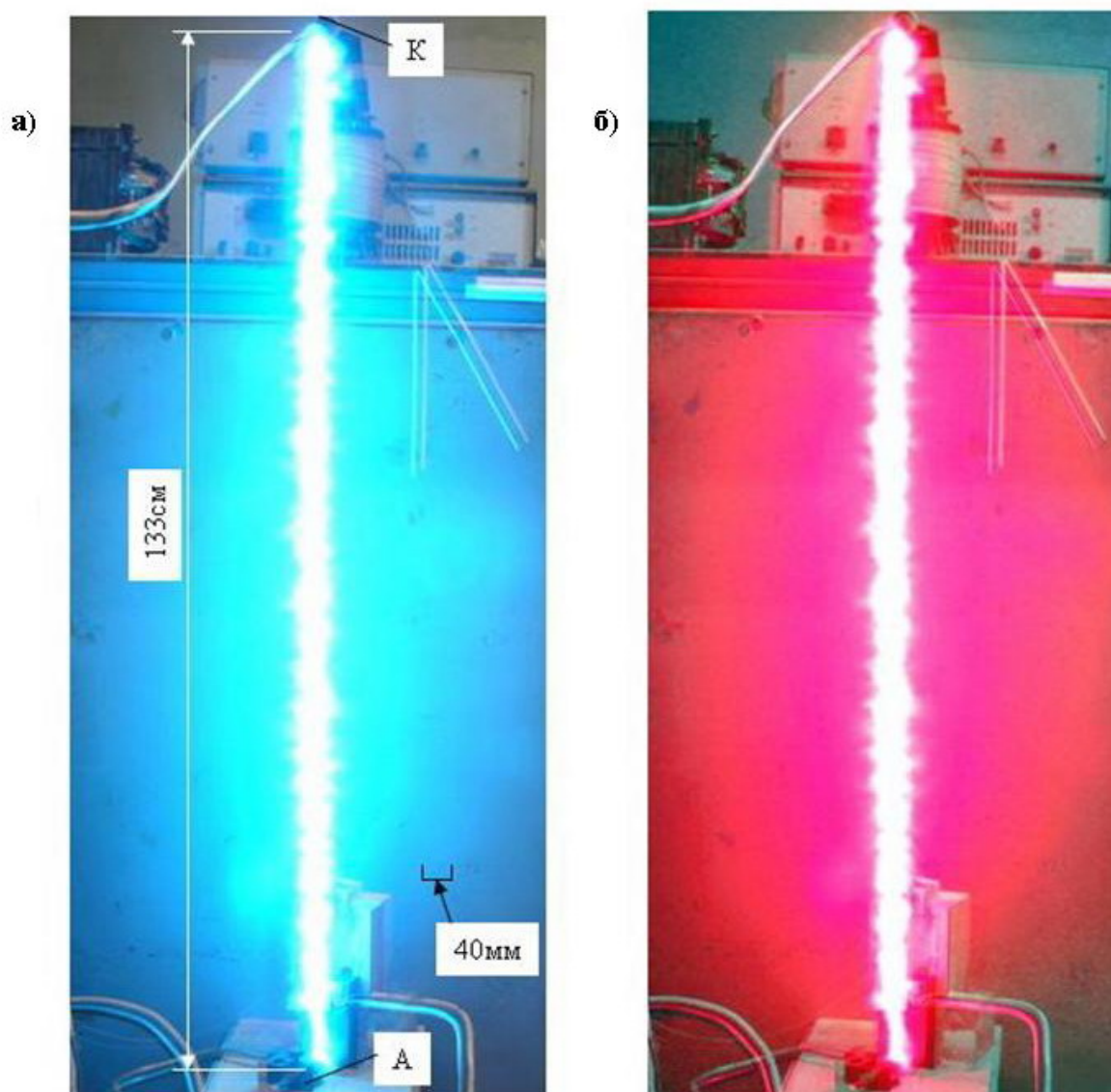


Рисунок 2. Электрический пробой в атмосфере: (а)- Фотографии канала управляемого ЭП, образованного ВП длиной 133см при запасенной энергии 4.1кДж; (б)- Результат обработки изображения в системе цветowych координат HSB.

Максимальная длина ЭП в канале, образованном ВП зависит от величины зарядного напряжения [29] или емкости конденсаторной батареи. При зарядном напряжении $U_0=10.3\text{кВ}$, максимальной емкости $C=110.7\text{мкФ}$ и длине проволоки $\sim 1.9\text{м}$ к моменту ЭП напряжение на конденсаторной батарее уменьшается на $\sim 2-3\%$. На ВП в этом случае тратится энергия $\sim 80\text{Дж}$. Определение значения удельного напряжения пробоя в канале $E_c=U_a/L$ упрощается, так как в числителе величина $U_a\approx 0.97U_0$. В зависимости от величины зарядного напряжения и длины проволоки возможен режим ВП без пробоя. На рис.3а приведена фотография канала, образованного ВП ($\text{Ø}90\text{мкм}$, длина 190.5 см) при $U_0=10.3\text{кВ}$ и $C=39.5\text{мкФ}$ в отсутствии ЭП. На фото видно, что структура канала носит прерывистый характер. Она состоит из отдельных изолированных плазменных очагов перегретых капель материала проволоки [37,38], что связано с развитием перетяжечной неустойчивости. В соответствии с классификацией данной У. Чейсом [39] ВП с типичной скоростью ввода энергии $< 0.1\text{кДж/г}\cdot\text{нс}$ относится к медленному режиму, что соответствует нашему эксперименту. В данном режиме в процессе ВП магнитное давление превышает термодинамическое и развитие магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости, возникающее по завершении плавления, опережает ввод энергии [38,39]. Резкий рост омического сопротивления и расширение в процессе ВП здесь вызваны гидродинамическим процессом дробления проводника на разлетающиеся макроскопические капли жидкого металла. Причины данного явления связаны с

действием капиллярных сил на неровной поверхности [40,41]. На рис. 3б приведена фотография ЭП в канале, образованном ВП ($\varnothing 90\text{мм}$, длина 189.5см) при начальной запасенной энергии $\sim 2.1\text{кДж}$.

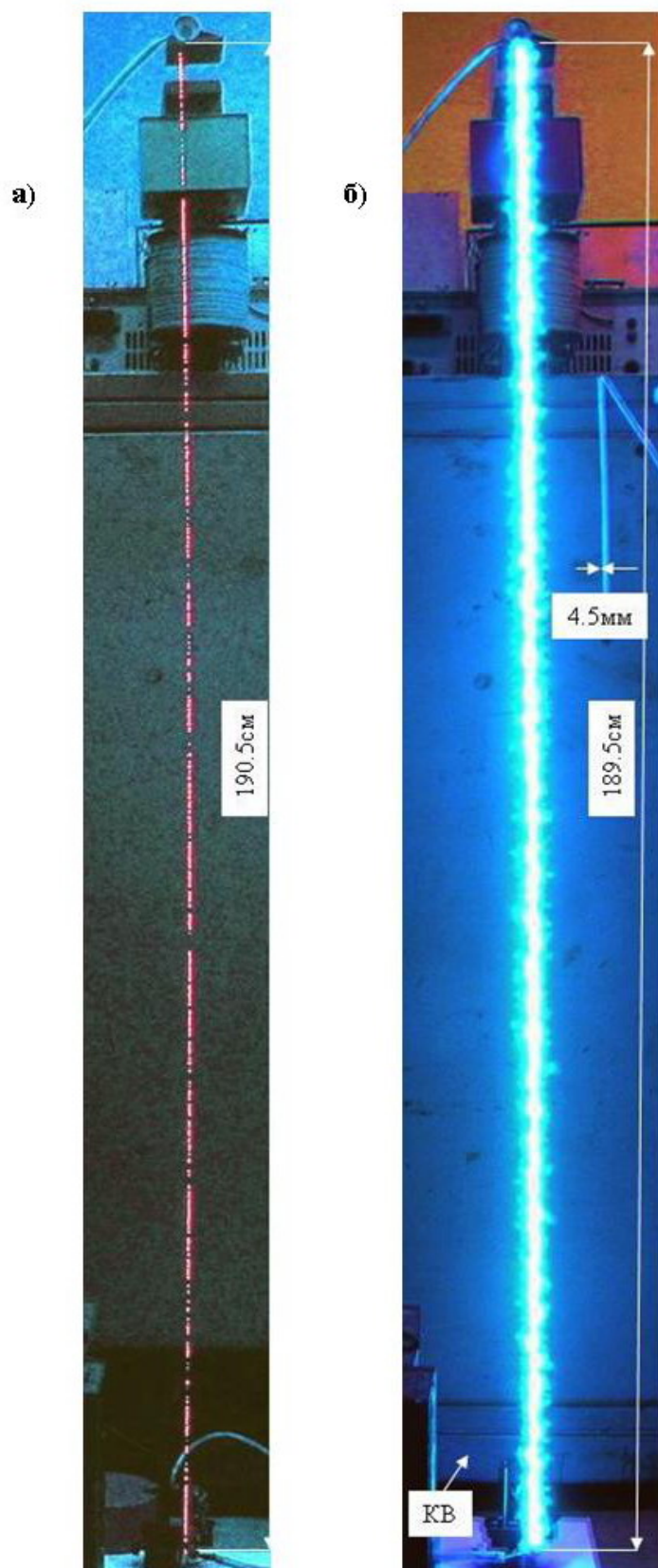


Рисунок 3. а) - Фотография канала, образованного ВП ($\varnothing 90$ мкм, длина 190.5см) при $U_0=10.3$ кВ и $C=39.5$ мкФ в отсутствии ЭП; б)- Фотография ЭП в канале, образованном ВП ($\varnothing 90$ мкм, длина 189.5см) при начальной запасенной энергии ~ 2.1 кДж.

При фотографировании использовался синий ФС-1 и нейтральный светофильтры. На некоторых фото наблюдается винтообразный характер протекания электрического тока в процессе пробоя, такой же, как в реальной триггерной молнии [23]. Максимальный диаметр канала при пробое ~ 30 мм. Как показано в работе [42,43], при ЭП в длинном канале происходит его монотонное расширение, поэтому при оценке геометрии разряда правильнее выбрать среднюю скорость его расширения, а не значение его радиуса в какой-то определенный момент времени. Скорость расширения от удельной вложенной на единицу длины разряда энергии W зависит линейно [43]. В настоящей работе данный параметр определялся методом перехватывающего кольцевого электрода, расположенного симметрично относительно ВП, с внутренним диаметром, изменяемым в диапазоне 15-30мм. Суть эксперимента сводилась к тому что, что при расширении канала в процессе пробоя, разряд замыкался на заземленный электрод. Процесс замыкания контролировался по осциллограмме тока в основном канале. Зная интервал времени замыкания и диаметр кольца можно определить среднюю скорость его расширения. По этому вопросу будет отдельная публикация. При удельной вложенной энергии ~ 800 Дж/м средняя скорость расширения канала составила ~ 400 м/с. Диаметр проводящей зоны канала ~ 30 мм. На рис.4а представлены осциллограммы напряжения и тока при отсутствии ЭП в канале ВП $\varnothing 90$ мкм, длиной 190.5см. Количество энергии, затраченной на ВП, рассчитанное по осциллограммам тока и напряжения в данном опыте ~ 80 Дж. На рис.4б

представлены осциллограммы тока и свечения в отсутствие ЭП в канале ВП Ø 90мкм, длиной 190.5см при тех же параметрах разрядной цепи.

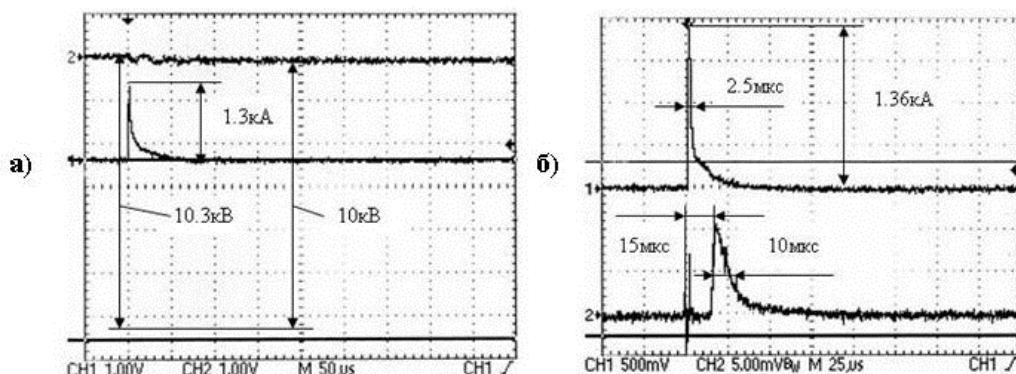


Рисунок 4. а) - Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) при отсутствии ЭП в канале ВП;
 б)- Осциллограммы тока (1) и свечения (2) в отсутствие ЭП в канале ВП.

Расстояние от торца волокна до оси проволоки в системе оптической регистрации ~1.5см. В этом случае наблюдается сигнал небольшой амплитуды ~10мВ в виде импульса длительностью ~10мкс, который появляется со временем задержки ~15мкс от начала ВП. В интервале 0-15мкс после ВП излучение в видимой области мало (регистрируется излучение с длиной волны в диапазоне 2,5-0,5мкм) [44]. На рис.5а представлены осциллограммы напряжения и тока при наличии ЭП в канале ВП Ø90мкм, длиной 189.5см при тех же параметрах разрядной цепи. К моменту пробоя величина напряжения на разрядном промежутке $U_a \approx 10кВ$ создает поле в канале $E_c \approx 53В/см$. ЭП можно назвать импульсным дуговым разрядом, который имеет падающую вольтамперную характеристику. Как указывалось в монографии [45] Стекольниковым на стр.187 по характеру поведения напряжения и тока главную фазу молнии можно также назвать импульсным дуговым разрядом. Импульс тока ЭП имеет колокообразную форму с длительностью по полувысоте ~100мкс и

максимальным значением тока ~ 2 кА. Следует отметить, что интегрирующая цепочка в поясе Роговского с постоянной интегрирования $\theta \approx 380$ мкс, дает ошибку измерения (при 15% сколе вершины) при длительности импульса тока более 30мкс. По этой причине на осциллограмме тока при ЭП на заднем фронте имеются искажения. В период паузы, длительность которой составила ~ 225 мкс, значение тока близко к нулю (~ 10 -70А). Количество энергии, затраченной на ВП ~ 70 Дж при максимальном значении импульса тока $\sim 1,3$ кА. Минимальное значение сопротивления канала в процессе пробоя $\sim 4,4$ Ом, что соответствовало удельной проводимости ~ 800 Ом⁻¹ · м⁻¹ (для диаметра канала $D=26$ мм). Расчет проводился по формуле $\sigma = 1/\rho = 4/\pi D^2 R$, где σ - удельная проводимость; ρ - удельное сопротивление; R - сопротивление единицы длины канала. В отличие от работ [42,43] разряд медленный и индуктивной составляющей при оценке падения напряжения на разрядном канале можно пренебречь. По значению соответствующей максимальной проводимости в разрядном канале для модели равновесного состава плазмы [46] в атмосфере можно оценить значение максимальной температуры при ЭП, которая составила $T \approx 8000$ К. В процессе пробоя при напряжении на конденсаторной батарее $\sim 2,5$ кВ ток дуги обрывается, величина остаточного напряжения на конденсаторе определяется только параметрами разрядной цепи. На рис.5б представлены осциллограммы тока и свечения при наличии ЭП в канале ВП диаметром 90мкм, длиной 189,5см при тех же параметрах разрядной цепи. При расстоянии от торца волокна до оси проволоки ~ 4 см и чувствительности 50мВ/дел регистрируется только импульс излучения длительностью ~ 100 мкс соответствующий дуговой фазе ЭП, который повторяет форму и длительность импульса тока ЭП с небольшой задержкой 1-10мкс. Более слабое

излучение, соответствующее стримерной и лидерной фазам пробоя при данных условиях эксперимента система регистрации не чувствует.

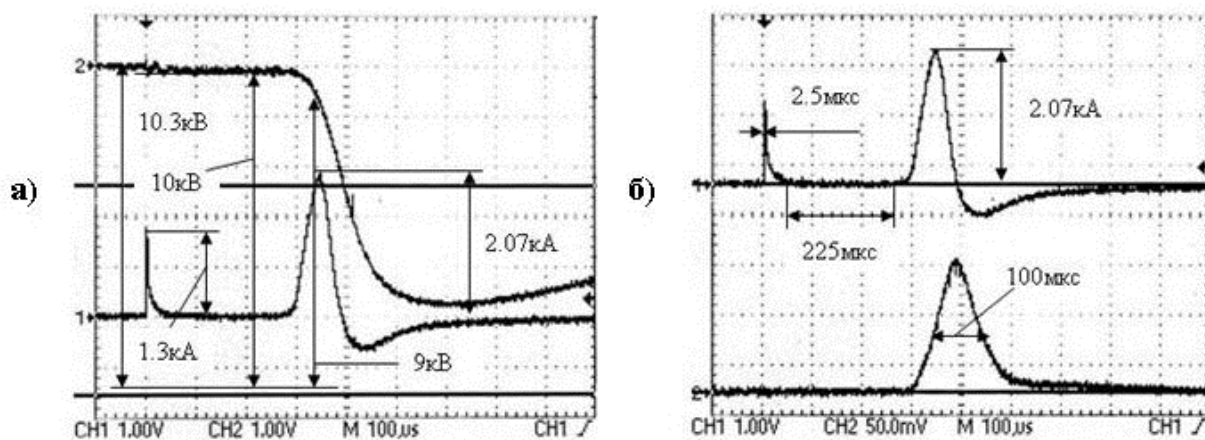


Рисунок 5. а) - Осциллограммы тока и напряжения при наличии ЭП в канале ВП;

б)- Осциллограммы тока (1) и свечения (2) при наличии ЭП в канале ВП.

Следует отметить, что ЭП происходит по траектории - прямой, ломаной линии, окружности, задаваемой ВП и не имеет ветвлений. Фотографии возможных траекторий пробоя приведены в работе [31].

В работе [19] приводятся минимальные требования к ионизованному образованию, чтобы оно могло положить начало стримеру. Для однородного плазменного очага радиусом R_s , помещенного в однородное поле E_0 должно содержаться не менее $N_e = 3\varepsilon_0\pi R_s^2 E_0 / e$ электронов. Если учесть, что радиус такого образования должен быть не меньше, чем $1/\alpha$ (α -эффективный коэффициент ионизации), то мы приходим к следующей оценке нижнего предела для количества электронов, при котором может возникнуть стример [19]: $N_{e\min} = 3\varepsilon_0\pi E_0 / (e\alpha^2)$. Для воздуха атмосферного давления при напряженности поля пробоя $E_0 = 31,4$ кВ/см и эффективном коэффициенте ионизации α , минимально допустимая длина ионизации $R_s \approx 0.8$ мм ($R_s \approx 1/\alpha$). Концентрация

электронов n_{emi} в воздухе атмосферного давления должна составлять $\sim 4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Если начальный размер плазменного образования, находящегося в однородном поле, удовлетворяет сформулированным требованиям, от него вдоль поля в обе стороны побегут волны ионизации, оставляя за собой плазменный канал.

Рассмотрим структуру канала и динамику образования плазменных очагов в канале ВП в отсутствии пробоя. Как было отмечено в работах [38,44] в процессе ВП на плавление и частичное испарение определенной массы медной проволоки затрачивается количество пороговой энергии E_t меньшей, как минимум в два раза – 50% от энергии сублимации E_s , необходимой для ее полного испарения. Для медной проволоки $\varnothing 90 \text{ мкм}$ и длиной 180 см энергия сублимации $E_s \approx 600 \text{ Дж}$. Как показано в работе [38] в режиме ВП при переходе проволоки в жидкую фазу силы сопротивления резко падают, и оказывается возможным развитие перетяжечной неустойчивости. Выделение джоулева тепла сосредотачивается в перетяжках, и в этих местах может происходить испарение металла. Испарение происходит локально в течение малого промежутка времени. До разрушения проводника успевает испариться лишь незначительная часть вещества. По нашим данным для ВП из меди диаметром $\varnothing 90 \text{ мкм}$, длиной 150 см и 190 см в эмалевой оболочке достаточно энергии $E_t \sim 60 \text{ Дж}$ и $\sim 70 \text{ Дж}$ соответственно, что составляет $\sim 10\%$ от энергии сублимации. Данная величина энергии при фиксированных параметрах проволоки и фиксированном напряжении почти не меняется в диапазоне, достаточном для осуществления режима ВП. Причиной этого является возникновение паузы тока [47-49], во время которой значение разрядного тока уменьшается более чем в сто раз. Более подробно об этом написано в работе [31]. На рис.6а приведен фрагмент фотографии канала (с

пространственным разрешением $\approx 0.5\text{мм}$) в режиме макросъемки, образованного ВП диаметром $\varnothing 90\text{мкм}$ при отсутствии ЭП. Количество энергии, затраченной на ВП в данном опыте $\sim 80\text{Дж}$. На фото видны структуры двух типов: первичные светящиеся плазменные образования паров металла, которые создают линейные агрегаты [32] в электрическом поле канала ВП, и отдельные светящиеся плазменные образования, некоторые из которых имеют правильную сферическую форму. Диаметр плазменных образований составляет от долей миллиметра до $\sim 2\text{мм}$. В центре образований видны горячие точки с высокой температурой, в которых пары металла находятся в метастабильном перегретом состоянии [50]. Температура данных областей находится в диапазоне $T \approx 3000\text{-}5000^\circ\text{C}$. В канале ВП присутствуют также мельчайшие частицы, включая наночастицы (не видимые на фотографии), аэрозолей меди и оксида меди (CuO , Cu_2O) сферической формы диаметром ($0.05\text{-}20\text{мкм}$) [33]. При удельном напряжении, превышающем пробойное значение реализуются требования к ионизованному образованию для начала ЭП в канале разрядного промежутка, образованном ВП. На рис.6б приведена фотография в режиме макросъемки фрагмента канала, образованного ВП $\varnothing 90\text{мкм}$, длиной 100см при $U_0=11\text{кВ}$ и $C=3.4\text{мкФ}$ при вложенной удельной энергии 140 Дж/м при наличии ЭП в канале. Средний диаметр разрядного канала составил $\sim 10\text{мм}$. На рис. 6б виден сохранившийся элемент ЭО в разрядном канале. Хорошо видны неустойчивости в разрядном канале (не приводящие к обрыву тока).

После ВП на листе белой бумаги нами были обнаружены частицы сферической формы черного цвета, фотографии которых (с разрешением 20мкм) приведены в работе [31]. Размеры шариков колеблются в широких пределах ($20\text{-}330\text{мкм}$).

Сферическая форма частиц объяснима преобладающим действием сил поверхностного натяжения на частицы расплавленной меди при их формировании.

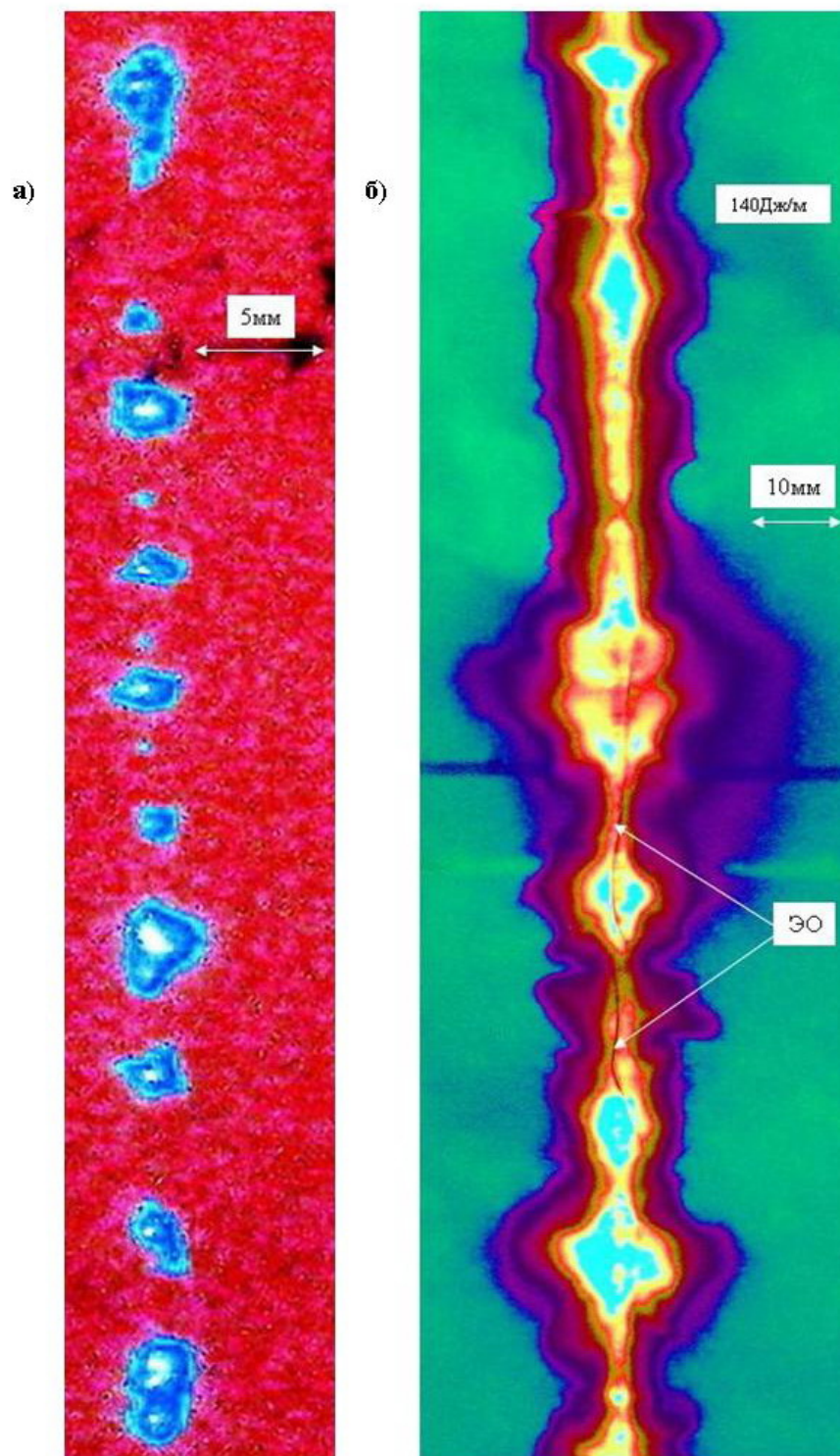


Рисунок 6. а) – Фотография канала, образованного ВП при отсутствии электрического пробоя;
б) - Фотография фрагмента канала, образованного ВП при вложенной удельной энергии 140 Дж/м при наличии ЭП в канале. ЭО - эмалевая оболочка.

Большой разброс диаметров частиц объясняется процессом дробления и объединения расплавленных капель в процессе ВП [51]. Черный цвет шариков обусловлен образованием оксида меди на их поверхности в результате взаимодействия меди с кислородом воздуха. Процесс окисления является обратимым, так как при нагреве оксида меди до $T \approx 1200\text{K}$ он восстанавливается и снова превращается в медь [33]. Следует отметить, что в процессе ВП из-за процесса окисления образовавшихся частиц концентрация кислорода в канале резко уменьшается. В работе [52] приведен график зависимости среднего электрического поля в канале катодонаправленного стримера в зависимости от содержания O_2 в Ar . При уменьшении концентрации кислорода в канале до нуля величина среднего электрического поля уменьшается до значения $E_c \approx 400\text{В/см}$. Физически это можно объяснить ликвидацией одного из каналов гибели электронов (прилипания электронов) в отсутствие электроотрицательных молекул.

В виду важности влияния крупных капель аэрозоля диаметром (20-330мкм) на процесс формирования ЭП в канале ВП обсудим механизм их образования. В работе [31] в процессе ВП были обнаружены длинные $\sim 10\text{см}$ фрагменты эмалевой оболочки (ЭО). На фото [31] в виде черных точек – сквозных отверстий в оболочке показаны места, через которые расплавленные капли металла проволоки покидали оболочку. Расстояние между двумя соседними прожогами $\sim 2\text{мм}$. Так как это очень быстрый процесс $\sim 1\text{мкс}$, форма оболочки осталась целой с небольшими локальными разрушениями. Как указывалось в работе [32] одной из причин, препятствующей полному испарению капель меди в процессе ВП является образование на их поверхности окисной пленки – оксида меди. Кроме того, покрытые слоем оксида

капельки металла не сливаются при соприкосновении друг с другом, а дают агрегаты из твердых частиц [32].

В работе [49] высказано предположение о винтообразном характере протекания электрического тока на начальной стадии в процессе ЭП. В процессе нагрева и плавления развивается винтовая неустойчивость, связанная с тем, что на этой стадии проволока стремится увеличить свою индуктивность [35], приобретая форму спирали. Далее в процессе плавления, когда проволока находится в жидкой фазе, развивается перетяжечная неустойчивость [38], которая рвет проводник на отдельные фрагменты за время ~ 1 мкс. При ЭП в период паузы тока между отдельными фрагментами и их линейными агрегатами, находящимися при высокой температуре, в обе стороны распространяются волны ионизации - стримерная стадия, переходящая в лидерную стадию, которая заканчивается дуговой (главной) стадией пробоя, точно так же, как и в триггерной молнии. В работе [31] по длительности пичка и пьедестала на осциллограмме излучения сделана оценка скорости распространения стримера $v_c \approx 6 \cdot 10^7$ см/с и скорости распространения лидера $v_l \approx 1,9 \cdot 10^6$ см/с по каналу длиной 142 см, что хорошо согласуется с данными работы [19]. Импульс тока в стадии пробоя однополярный (даже при введении большой индуктивности) и имеет форму близкую к форме тока молнии в ее главной стадии [13,53].

Для проверки влияния размеров отдельных плазменных образований в канале на механизм ЭП в работе [31] нами были проведены эксперименты с ВП диаметром 90 мкм, длиной 35.5-43 см при $U_0 = 11$ кВ и $C = 4.5$ мкФ. Из технологии, описанной в [33] известно, что при ВП из меди с аналогичными параметрами присутствуют в

достаточном количестве наночастицы вещества меди и ее оксидов и полностью отсутствуют крупные частицы, что существенно нарушает второе условие развития стримерного пробоя в канале. И как следствие в пятикратно уменьшенном промежутке ЭП отсутствовал. ЭП наступал лишь при длинах проволоки более 58см, когда начинало выполняться условие на размер плазменных образований в канале ВП для реализации стримерного пробоя.

Для проверки влияния пробивного напряжения на длительность паузы тока при ЭП нами были проведены эксперименты с ВП ($\varnothing 90$ мкм, длина 130см) и $C=39.5$ мкФ, при изменении зарядного напряжения U_0 от 7.4кВ до 9кВ. На осциллограммах тока видно, что с уменьшением удельного пробивного напряжения увеличивается длительность паузы тока. Что хорошо согласуется с результатами работ [49, 54] и подтверждает стримерно - лидерный механизм ЭП [49] в канале, образованном ВП.

С увеличением запасенной энергии до 4.1кДж при фиксированной длине максимальное значение тока ЭП достигает величины ~ 4 кА. Время протекания тока увеличилось лишь в три раза по сравнению с результатами, приведенными в работе [30]. В работе [43] показано, что в случае протяженных разрядов длиной ~ 100 см в течение первого квазипериода разрядного тока вкладывается 64% всей запасенной в батарее энергии. При удельном пробивном напряжении $E_c \approx 5.3$ кВ/м и максимальной длине канала ЭП ~ 1.9 м удельная вложенная в канал энергия составила ~ 600 Дж/м при запасенной энергии ~ 2.1 кДж. Минимальное сопротивление единицы длины канала разрядного промежутка составило ~ 2.3 Ом/м, что соответствует удельной проводимости ~ 800 Ом $^{-1} \cdot$ м $^{-1}$.

Следует отметить, что полученное нами значение минимального удельного пробивного напряжения $E_c \approx 5.3 \text{ кВ/м}$ попадает в диапазон, когда напряженность электрического поля у поверхности земли 4-10кВ/м гарантирует возбуждение отрицательной триггерной молнии. На рис.7 приведена фотография триггерной молнии, инициируемой запуском малой ракеты с тонкой медной проволокой $\varnothing 200 \text{ мкм}$ в Camp Blanding, Florida, на которой часть канала молнии длиной $\sim 300 \text{ м}$ замыкается ВП (на ее ранней лидерной стадии) при отсутствии каких либо ветвлений.

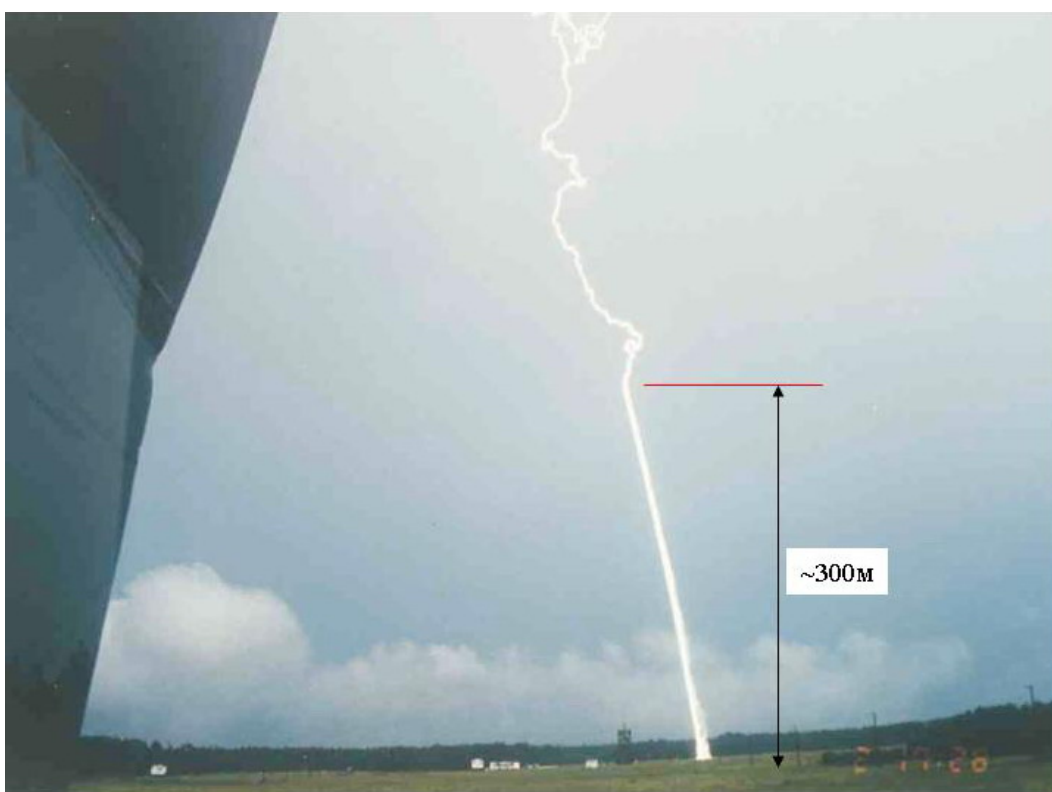


Рисунок 7 - Фотография триггерной молнии из работы [27]

Выводы

В экспериментах получен режим управляемого ЭП промежутков длиной 0.6-1.9м в канале, образованном ВП. Минимальная средняя напряженность электрического поля

$E_c \approx 5.3 \text{ кВ/м}$ (значительно меньшая, чем 40 кВ/м [19] в канале длинной искры).

Механизм стримерно - лидерного ЭП, обусловлен следующими факторами:

1) наличием в канале совокупности дисперсионных и конденсационных аэрозолей горячих частиц оксида меди (CuO , Cu_2O) и меди с окисленной поверхностью диаметром менее 300 мкм , существующих в течение длительного времени ($1-10 \text{ мс}$) вследствие их малой подвижности;

2) наличием перегретых капель металла в центре плазменных образований, находящихся в метастабильном неустойчивом состоянии при температуре $T \sim 3000-5000^\circ\text{C}$, которые играют роль горячих точек [50] в процессе термоэлектронной эмиссии;

3) образованием крупных линейных агрегатов частиц аэрозолей [32] и пониженным содержанием кислорода в канале в результате их быстрого окисления при ВП.

Как показали эксперименты, исследованный нами ЭП в атмосфере, точно также как и в канале триггерной молнии, в своей заключительной (главной) фазе представляет собой дуговой разряд с максимальной равновесной температурой, не превышающей в данных условиях эксперимента 8000 К . Следует отметить также, что режим ЭП с увеличенным запасом энергии представляет значительный интерес при моделировании воздействия сильной цилиндрической ударной волны при движении тел с очень большими скоростями более 15 км/с .

Авторы благодарны Сороченко В. Р. за обсуждение экспериментальных результатов, Казанцеву С. Ю., Фирсову К. Н., Пономареву Н. Б. за помощь в работе и Першину С. М. за полезные замечания. Авторы признательны Ракову В. А. (Professor of the

University of Florida's (UF) Department of Electrical and Computer Engineering) за фотографии триггерных молний, одна из которых опубликована в работе [27].

Библиографический список

1. Diels J.C. Zhao X. M. Discharge of lightning with ultrashort laser pulses // *Patent No. 5,175,664, US, Appl. No: 804, 268, Filed: Dec.5, 1991, Date of Patent: Dec.29, 1992.*
2. Mourou G., Braun A., Diels J.-C., Bouvier M., Zhao X. M. Apparatus and method for enabling the creation of multiple extended conduction paths in the atmosphere // *Patent No. 5,726,855, US, Appl. No: 515,761, Filed: Aug.15, 1995, Date of Patent: Mar.10, 1998.*
3. Schillinger H, Sauerbrey R. Electrical conductivity of long plasma channels in air generated by self-guided femtosecond laser pulses // *Applied Physics, 1999, В 68, pp.753-756.*
4. Способ создания токопроводящих каналов в непроводящей среде. Патент РФ № 2400005. Аполлонов В.В., Аполлонова З. П., Вагин Ю.С., Вагина Т. Г. Заявка № 2009118874/06 от 20.05.2009. Бюл. №26, 20. 09. 2010.
5. Apollonov V.V., Pletnev N.V. Super-long conductive canal for energy delivery. Experimental and theoretical modeling // *SPIE Pros. XVIII Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Lasers. 30-3 Aug. – Sept. Sofia. Bulgaria, 2010, V. 7751, pp.775118-1-775118-5.*
6. Apollonov V.V., Pletnev N.V. Super long conductive channel production by Impulsar // *J. of Marine Science and Technology, Taiwan, 2012, 20(6), pp.670-674.*
7. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кадзов Г.Д., Парфенов В.А., Пахомов Л.Н., Петрунькин В.Ю., Подлевский В.А., Селезнев Ю.Г. О возможности повышения

эффективности защитного действия молниеотводов с помощью лазерной искры // Электричество. 1980. №2. С. 47-48.

8. Аполлонов В.В., Василяк Л.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Поляков Д.Н., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Направление электрического разряда сплошной лазерной искрой при фокусировке излучения CO₂ - лазера коническим зеркалом // Квантовая электроника. 2002. №32(2). С.115-120.

9. Apollonov V.V. Feasibility study of a CO₂-laser based lightning-protection system realization // Optical Engineering, 2005, 44(1), pp.014302-1-014302-9.

10. Apollonov V.V., Baitsur G.G., Ermachenko A.V. et al. High-power molecular lasers pumped by a volume self- sustained discharge // Journal of the Optical Society of America B, 1991, 8(2) pp.220-229.

11. Kinoshita F., Morooka Y., Uchiumi M., Tanaka T., Chang Y.- M., Muraoka K., Tsuji T., Honda C., Miki M., Wada A., Shindo T. Laser- Triggered Lightning under Optimized Laser Beam Conditions // Proc. XII Intern. Conf. on Gas Discharge and their Applications. Greifswald, Germany, 1997, pp.II-475- II-478.

12. Paustian P.J. Microwave facilitated atmospheric energy projection system // Patent No. 6,054, 694, US, Appl. No: 08/834,421, Filed: Apr.16, 1997, Date of Patent: Apr. 25, 2000.

13. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащита. - М.: Физматлит, 2001.- 320с.

14. Kasparian J., Rodriquez M., M'ejean G., Yu J., Salmon E., Wille H., Bourayou R., Frey S., André Y.-B., Mysyrowiez A., Sauerbrey R., Wolf J.-P., Wöste L. Light Filaments for Atmospheric Analysis// Science, 2003, 301, pp.61-64.

15. Diels J.-C., Rudolph W. Ultrashort Laser Pulse Phenomena: fundamentals, techniques, and applications on femtosecond time scale. - Burlington: Acad. Press, 2006. – 652 p.
16. Berge L., Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf J.-P. Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media // *Rep. Prog. Phys.*, 2007, 70, pp.1633-1713.
17. Winn W., Rison W., Aulich G., Hunyady S. Teramobile Laser and Lighting // Report No. FA9451-04-C-0392. - *New Mexico*: Institute of Mining & Technology, 2005.- 26 p.
18. Зворыкин В.Д., Левченко А.О, Устиновский Н.Н. Управление протяженными высоковольтными электрическими разрядами в атмосферном воздухе УФ излучением KrF-лазера // *Квантовая электроника*. 2011. 41(3). С. 227 -233.
19. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд.- М.: МФТИ, 1997.- 320 с.
20. Александров Г.Н. О механизме искрового разряда с отрицательно заряженного острия. Молния // *Журнал технической физики*. 1967. № 37. С. 288-293.
21. Uman M. A. The Lightning Discharge. – Orlando: Academic Press, 1987.-377 p.
22. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. – Cambridge University Press, 2003.- 687 p.
23. Newman M.M., Stahmann J.R., Robb J.D., Lewis E.A., Martin E.A., Zinn S.V. Triggered Lightning Strokes at Very Close Range // *J. Geophys. Res.*, 1967, 72, pp. 4761-4764.
24. Hubert P.P., Laroche A., Eybert-Berard, Barret L. Triggered lightning in New Mexico // *J. Geophys. Res.*, 1984, 89, pp. 2511-2521.
25. R.J. Fisher R.J., G.H. Schnetzer G.H., R. Thottappillil R., Rakov V. A., Uman M. A., Goldberg J. D. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama // *J. Geophys. Res.*, 1993, 98, pp. 22,887-22,902.

26. Wang D., Rakov V. A., Uman M.A., Fernandez M. I., Rambo K. J., Schnetzer G. H., Fisher R. J. Characterization of the initial stage of negative rocket-triggered lightning // J. Geophys. Res., 1999, 104, pp.4213-4221.
27. The International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT). <http://www.lightning.ece.ufl.edu>.
28. Sinton R., Herel R., Enright W., Bodger P. Observations of the long distance exploding wire restrike mechanism // J. Appl. Phys., 2010, 108, 053304-1- 053304 -5.
29. Sinton R., Herel R. van, Enright W., Bodger P. Generating extra long arcs using exploding wires // J. Appl. Phys., 2011, 110, pp. 093303-1- 093303-4.
30. Аполлонов В.В., Плетнев Н.В. Формирование протяженных направленных каналов пробоя в атмосфере // Квантовая электроника. 2012. №42(2). С.130-139.
31. Аполлонов В.В., Плетнев Н.В. Формирование протяженных направленных каналов пробоя в атмосфере, образованных взрывающейся медной проволокой // Журнал технической физики. 2013. №83(12). С. 67-80.
32. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. - М.: АН СССР, 1955. - 349 с.
33. Компания АРТ. Металлические нанопорошки. <http://www.nanosized-powders.com>.
34. Герасименко Н.И., Грашина Н.А., Медведков А.Г., Мещеряков А.Б., Плетнев Н.В. Цветная сверхскоростная фотосъемка импульсных электрических разрядов // Приборы и техника эксперимента. 1988. №1. С.212-215.
35. Гончаренко Г.М. Установки для нагрева газов импульсными токами: Труды МЭИ. Выпуск 45. Электроэнергетика.- М.: МЭИ, 1963. - 169 с.
36. Насонов А.Г., Ланцман Л.С. Высоковольтный стабилизированный источник зарядных напряжений // Приборы и техника эксперимента. 1984. №2. С.134-135.

37. Кварцхава И.Ф., Плюто А.А., Чернов А.А., Бондаренко В.В. Электрический взрыв металлических проволок // Журнал теоретической и экспериментальной физики. 1956. №30. С.42-53.
38. Абрамова К.Б., Валицкий В.П., Вандакуров Ю.В., Златин Н.А., Перегуд Б.П. Магнитогидродинамические неустойчивости при электрическом взрыве // ДАН СССР. 1966. Т.167. С. 778-781.
39. Обзор литературы по моделированию процессов взрыва тонких металлических проволочек. Часть 1. Основные процессы электрического взрыва проводников в вакууме: препринт / Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Романова В.М., Глазырин И.В., Котова О.Г., Слесарева А.Н. / Препринт / ФИАН. 2004. №9.
40. Лебедев С. В. Взрыв металла под действием электрического тока // Журнал теоретической и экспериментальной физики. 1957. № 32. С.199-207.
41. Лебедев С.В., Савватимский А.И. Металлы в процессе быстрого нагревания электрическим током большой плотности // Успехи физических наук. 1984. № 144. С. 215-250.
42. Александров А.Ф., Зосимов В.В., Курдюмов С. П., Попов Ю. П., Рухадзе А. А., Тимофеев И.Б. Динамика и излучение прямых сильноточных разрядов в воздухе // Журнал теоретической и экспериментальной физики. 1971. № 61. с.1841-1854.
43. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. - М: Атомиздат, 1976. - 184с.
44. Перегуд. Б.П., Абрамова К.Б. Экспериментальное исследование электрического взрыва // ДАН СССР. 1964. № 157. С. 837-840.
45. Стекольников И.С. Молния. - М.-Л.: АН СССР, 1940.- 327с.

46. Андриатис А.В., Василевский С.А., Соколова И.А. Описание пакета программ SOVA, предназначенного для расчета равновесного состава и коэффициентов переноса низкотемпературной плазмы в высших приближениях метода Чепмена – Энскога // Электронный журнал «Физико-химическая кинетика в газовой динамике», 2005, № 3: <http://chemphys.edu.ru/volume/8/> (Дата публикации 27.09.2005)
47. Протопопов Н.А., Кульгавчук В.М. К теории механизма возникновения паузы тока и ударных волн при нагреве металла импульсами электрического тока большой плотности // Журнал технической физики. 1961. № 31. С. 557-564.
48. Vlasto's A.E. Current Pause in Exploding –Wire Discharges // *J. Appl. Phys.*, 1967, 38, pp.4993-4998.
49. Vlasto's A.E. Restrike Mechanisms of Exploding Wire Discharges // *J. Appl. Phys.* 1968, 39, pp. 3081-3087.
50. Мартынюк М.М. Роль испарения и кипения жидкого металла в процессе электрического взрыва проводника // Журнал технической физики. 1974. № 44. С. 1262-1270.
51. Гаврилов В.Н., Литвинов Е.А. Получение частиц методом электрического взрыва проводника // Прикладная механика и техническая физика. 1993. № 34. С. 28-35.
52. Базелян Э.М., Гончаров В.А., Горюнов А.Ю. Безлидерный пробой в электроположительном газе // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1985. № 2. С. 154-158.
53. Александров Г.Н. Главная стадия разряда молнии: механизм и выходные характеристики // Журнал технической физики. 2006. № 76. С.101-105.

54. Vlastos A.E. Dwell times of thin exploding wires // *J. Appl. Phys.*, 1973, vol. 44, pp. 2193-2196.