

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



ИССЛЕДОВАНИЕ СТРИМЕРНО-ЛИДЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗДУХЕ ПРИ НАЛИЧИИ БАРЬЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Магистерская диссертация студента

дневного отделения

Скляренко Романа Вадимовича

Научный руководитель:

к.т.н. Самусенко Андрей Викторович

Рецензент:

м.н.с. Чусов Александр Николаевич

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

Введение	4
1. Обзор литературы.....	6
1.1. Общие сведения по теории искрового электрического пробоя	6
1.1.1. Лавинный механизм ударной ионизации	6
1.1.2. Стримерный разряд.....	7
1.1.3. Лидерный разряд.....	10
1.2. Влияние барьерной изоляции на стримерные и лидерные процессы в воздухе	12
2. Техника и методика эксперимента	18
2.1. Описание экспериментальной установки и оборудования.....	18
2.2. Барьерная изоляция	20
2.3. Методика проведения экспериментов. Статистическая оценка результатов испытаний.....	21
3. Барьеры расположены перпендикулярно заземленной плоскости.....	23
3.1. Конфигурация барьеров и последовательность действий эксперимента.....	23
3.2. Анализ полученных результатов.....	25
3.2.1. Зависимость напряжения пробоя от расстояния между электродом и барьером.....	25
3.2.2. Зависимость напряжения пробоя от межэлектродного расстояния.....	28
3.2.3. Измерение длины стримеров	28
3.2.4. Поведение и времена возникновения лидерных каналов.	31
3.2.5. Заряд и токи, наведенные стримерами на заземленную плоскость	34
3.2.6. Упрощенное моделирование искажения напряженности электрического поля накопленным барьерами поверхностным зарядом	36
3.3. Выводы.....	41
4. Барьеры расположены параллельно горизонтальной плоскости.....	42
4.1. Конфигурация барьеров и последовательность действий эксперимента.....	42
4.2. Анализ полученных результатов.....	44
4.2.1. Зависимость напряжения пробоя от высоты зазора	44
4.2.2. Поведение лидеров при наличии зазора	46

4.3. Выводы.....	48
5. «Канал» в диэлектрике.....	49
5.1. Конфигурация барьеров, метод создания «сплошного» диэлектрического барьера из отдельных листов и последовательность действий эксперимента	49
5.2. Анализ полученных результатов.....	52
5.2.1. Зависимость напряжения пробоя от ширины канала	52
5.2.2. Упрощенное моделирование распространения и нагрева стримерной ветви в барьерной изоляции при наличии канала	55
5.3. Выводы.....	58
6. Заключение.....	59
7. Список литературы.....	60
Приложение: Удельная поверхностная и объемная сопротивления стёкол	62

Введение

В сильных электрических полях возможны процессы, в которых газообразные диэлектрики перестают играть роль электрической изоляции. Так, при достижении определенного значения напряженности электрического поля, возникает явление электрического пробоя, в частности – искрового пробоя. Искровой электрический пробой, а также предшествующие ему стадии лавинного, стримерного и лидерного разряда, с точки зрения физики - это прежде всего потеря промежутком между электродами изоляционных свойств и возникновение между ними проводящего канала. Данный процесс нарушает нормальное функционирование высоковольтных устройств, вследствие чего существует актуальная задача: суметь предсказать и предотвратить появление разрядной активности.

Наличие твердых диэлектрических элементов влияет на разрядные процессы. В высоковольтных устройствах диэлектрические барьеры используются для защиты системы от пробоев, влекущих повреждение деталей и нарушение работы самого аппарата. Они препятствуют развитию стримеров и осложняют стримерно-лидерный переход. Создаваемая таким образом «барьерная изоляция» позволяет снизить напряжение пробоя при неизменном межэлектродном расстоянии, что важно для создания компактных высоковольтных устройств. Однако, как будет показано в данной работе, барьерная изоляция не всегда повышает напряжение пробоя – возможен и противоположный результат, облегчающий стримерно-лидерный переход.

Вследствие наличия множества форм диэлектрических барьеров, а также различного их расположения относительно оборудования, они не всегда удовлетворяют необходимым требованиям защиты высоковольтных устройств, что ведет к появлению разрядной активности. Использование существующих методов по определению напряжения пробоя в воздухе для систем с наличием барьерной изоляции также стоит под вопросом. С научной точки зрения, влияние различных форм барьерной изоляции изучено слабо – природа и характеристики процессов известны далеко не полностью. Знание же этой информации поможет производить более выгодную и электропрочную изоляцию, не допускающую развития нежелательной разрядной активности, а также более точно давать оценку выдерживаемых напряжений.

Самые простые конфигурации диэлектриков уже изучены, однако, остается открытым вопрос существования специфических «опасных» конфигураций, информации о которых на данный момент мало. Таковы, в частности, случаи наличия узких воздушных каналов, а также зазоров различной ширины в диэлектрике. В данной работе были поставлены эксперименты с использованием таких конфигураций, а именно рассматривались следующие типы барьерной изоляции: один или два (образующие

воздушный зазор) барьера, расположенные перпендикулярно заземленной горизонтальной плоскости вдоль возникновения разрядной активности; барьерная изоляция, образующая зазор, расположенный параллельно заземленной горизонтальной плоскости; барьер, имеющий «канал» - протяженную выемку. Таким образом, изучалось влияние диэлектрических барьеров, расположенных в системе высоковольтный электрод-сфера – заземленная плоскость, на напряжение стримерно-лидерного перехода, на поведение и характеристики стримеров и лидеров, при воздействии на систему стандартного грозового импульса.

Общие методы испытаний при наличии барьерной изоляции, условия проведения этих испытаний и требования к объекту испытания, а также рекомендации по оценке результатов испытаний в данной работе проводятся согласно ГОСТ 1516.2-97, что важно для **достоверности** полученных результатов и дальнейшего их использования в других работах.

Актуальность работы связана с вопросами использования барьерной изоляции для предотвращения нежелательной разрядной активности. Учитывая стремление сделать высоковольтные устройства более компактными, широких воздушных промежутков в них почти не остается; в таких условиях представляет интерес тот факт, что ограничение воздушного промежутка между электродами твердым диэлектриком может не повышать, а снижать напряжение пробоя. Важным вопросом является получение новых закономерностей и рекомендаций для воздушных зазоров в высоковольтной изоляции.

Таким образом, можно выделить основную **цель работы**:

- Выявить влияние воздушных зазоров в барьерной изоляции различной конфигурации на напряжение пробоя, на поведение стримеров и лидеров в воздухе, при воздействии на систему стандартного грозового импульса.

Для достижения данной цели, ставятся следующие **задачи**:

- Накопление экспериментальной базы данных по особенностям предпробойных и пробойных процессов при наличии воздушных зазоров между твердыми диэлектрическими элементами в воздухе при воздействии на систему грозовыми импульсами напряжения;

- Объяснение результатов экспериментов, с привлечением компьютерного моделирования;

- Выработка рекомендаций по выбору воздушных зазоров в высоковольтной изоляции.

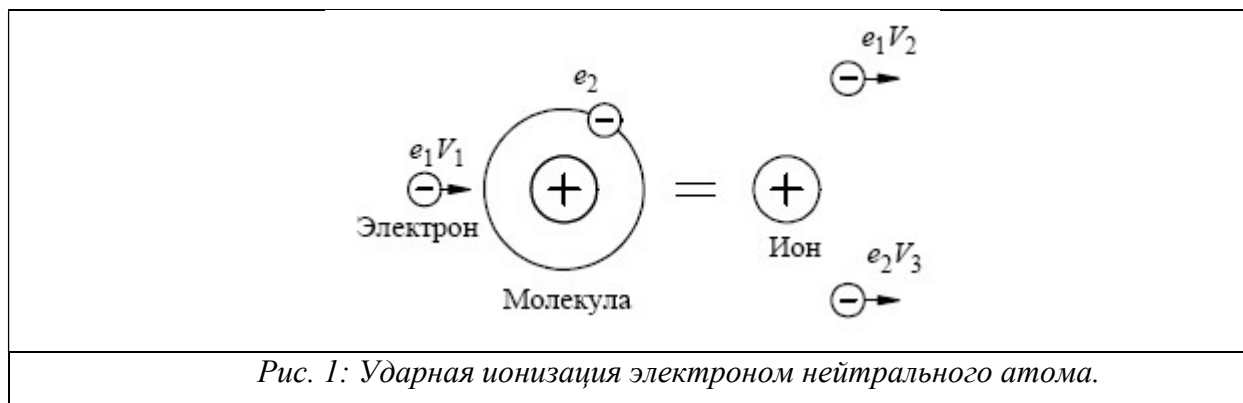
1. Обзор литературы

1.1. Общие сведения по теории искрового электрического пробоя

В данной главе описываются основные сведения по теории искрового электрического пробоя: лавинный механизм ударной ионизации, стримерные и лидерные разряды, а также процессы лавинно-стримерного и стримерно-лидерного переходов. Используются источники [1], [2], [3].

1.1.1. Лавинный механизм ударной ионизации

Элементарным механизмом, определяющим протекание всех разрядных явлений в газовой изоляции, является ударная ионизация. Ударная ионизация – процесс ионизации нейтральных молекул или атомов путем соударения заряженной частицы с нейтральным атомом или молекулой, вследствие которого появляется один или несколько новых электронов и ион (Рис. 1).



Ионизационные процессы развиваются по типу лавины – они начинаются с одного электрона (в пространстве из-за космического излучения, рекомбинации и прочих механизмов всегда есть свободные электроны), разгоняемого электрическим полем. Если поле достаточно велико, через некоторое время происходит ионизация, электронов становится два. Каждый из них через некоторое время вновь ионизует, появляются новые свободные электроны, которые приобретают во внешнем электрическом поле достаточную энергию для продолжения ионизации и образования новых электронов. Таким образом, число электронов «лавинообразно» возрастает (Рис. 2а).

Упругие удары о молекулы разворачивают электрон в случайном направлении, а электрическое поле стремится повернуть скорость электрона вдоль силовой линии поля. В результате электроны постепенно смещаются в поперечном (относительно силовой линии) направлении, происходит диффузия (Рис. 2б). Таким образом, в этих условиях лавина напоминает «облако» электронов, движущихся сквозь газ нейтральных молекул.

Ионы движутся примерно в 100 раз медленнее электронов, и их движением по

сравнению с движением электронов можно пренебречь. Ионы «остаются на месте», они образуют своеобразный след лавины в виде конуса.

Поскольку электроны и ионы в приложенном электрическом поле движутся в противоположные стороны, возникает разделение зарядов – головка лавины содержит почти одни электроны и заряжена отрицательно, а след лавины содержит только ионы и заряжен положительно (Рис. 2в).

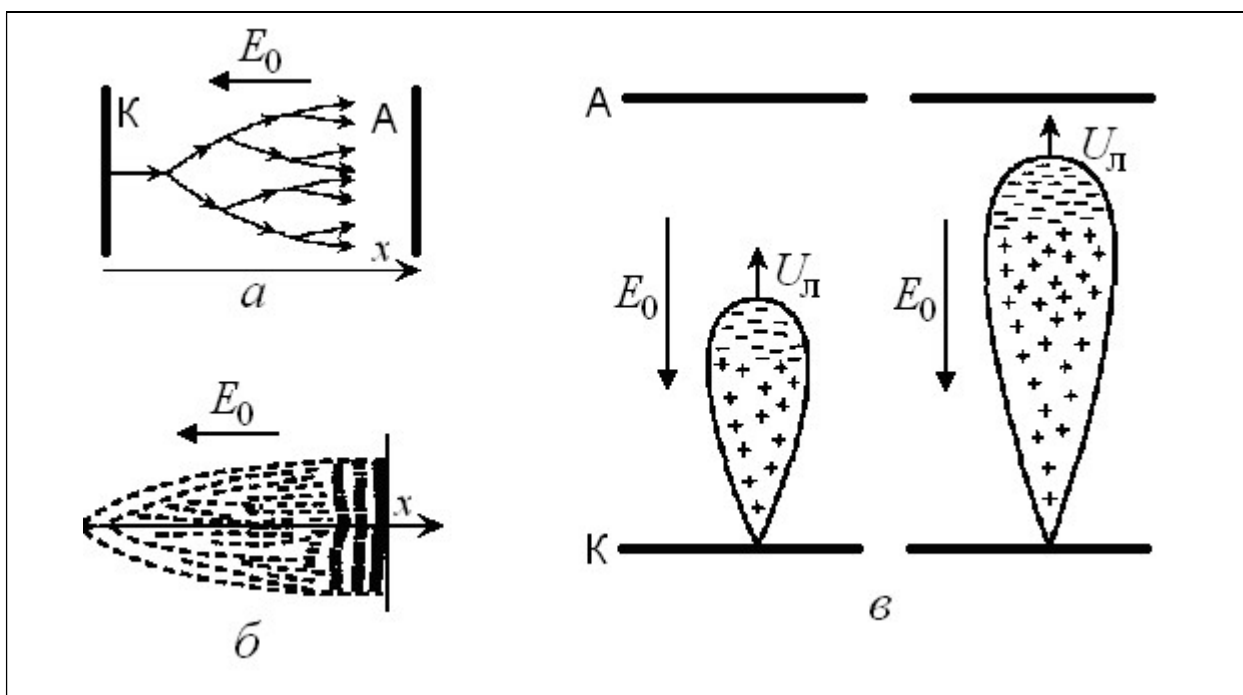


Рис. 2: Схема лавинного размножения электронов. а - схема лавинного размножения электронов в промежутке в разряженном газе между катодом К и анодом А; б - схема диффузионного расплывания электронной лавины, которая рождается от электрона, вышедшего из определенного места катода; в - схематические очертания лавины и распределения зарядов в два последовательных момента времени. Стрелками указаны направления внешнего поля E_0 и скорости $U_{\text{л}}$ движения головки лавины.

Пока объемный заряд электронов и ионов слабо влияет на электрическое поле – можно считать, что приложенное внешнее электрическое поле не искажается – данная фаза лавины называется Таунсендовским приближением.

1.1.2. Стримерный разряд

При достаточно большой напряженности электрического поля в воздухе, из-за экспоненциального роста количества электронов, объемный заряд лавины начинает искажать внешнее поле и Таунсендовское приближение перестает работать. Происходит так называемый лавинно-стримерный переход - лавина перерождается в стример.

Стримеры - квазинейтральные проводящие разветвленные плазменные структуры,

растущие за счет усиления поля на оконечностях каналов, которые образуются вдоль следа первичной лавины. В усиленном первичной лавиной поле зарождаются и развиваются вторичные лавины, которые втягиваются в канал стримера, образуя новые участки плазмы. Вторичные лавины зарождаются за счет ионизации газа излучением при рекомбинации и релаксации возбужденных частиц в стримере. Канал удлиняется, причем этот процесс носит волнообразный характер, что позволяет говорить о стримере как о волне ионизации газа.

В зависимости от того, к электроду какой полярности направлены стримеры, различают катодонаправленные (положительные, стример зарождается у самого анода в области наибольшего пространственного заряда) и анодонаправленные (отрицательные, стример образуется, когда лавина еще недалеко ушла от катода) стримеры. В настоящей работе происходит проводятся исследования только со стримерами положительной полярности, поэтому рассмотрим структуру сформировавшегося стримера, который прорастает от высоковольтного острия-анода к плоскому заземленному катоду. Для такой системы поле в межэлектродном промежутке сильно неоднородно и на некотором расстоянии от заостренного анода падает до величины, которой не хватает для ионизации воздуха. Между тем, при достаточно высоком потенциале анода, стример растет и в слабом поле и вполне может перекрыть промежуток, т.е., стример сам создает себе сильное поле, необходимое для ионизации.

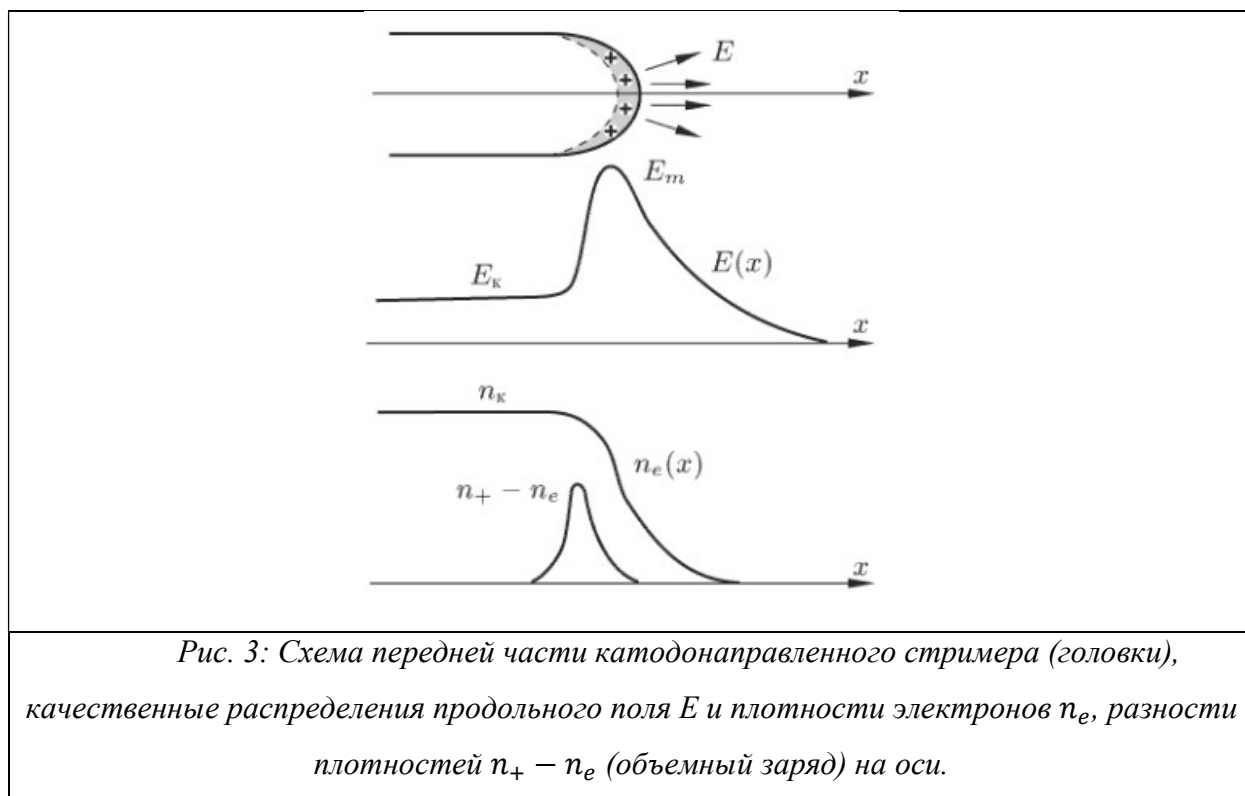
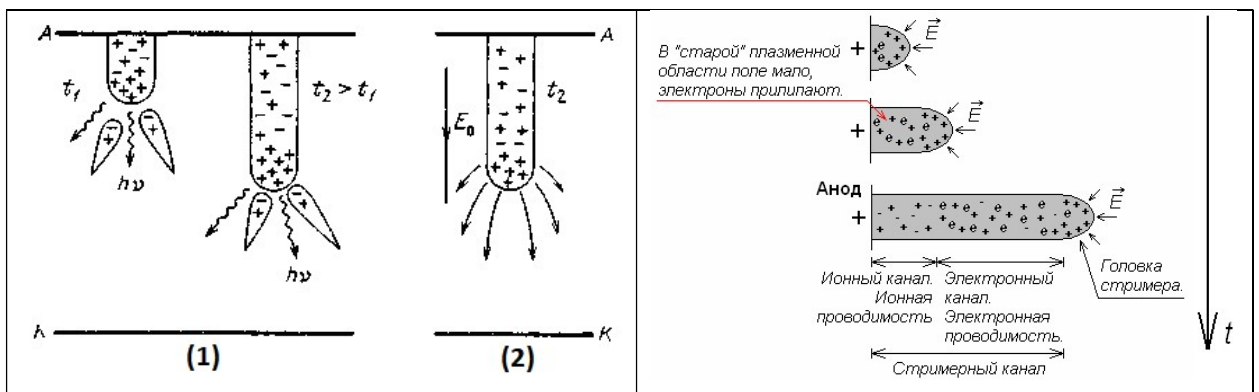


Рис. 3: Схема передней части катодонаправленного стримера (головки), качественные распределения продольного поля E и плотности электронов n_e , разности плотностей $n_+ - n_e$ (объемный заряд) на оси.

Основной ионизационный процесс протекает в области сильного поля у стримерной головки, который создается ее собственным зарядом (Рис. 3). E_m – максимальное поле

стримера, достигающее в передней точке головки. Перед головкой, где объемный заряд мал, поле падает. Тот радиус, на котором поле максимально, называют радиусом головки. С ним примерно совпадает и начальный радиус приближенно цилиндрического канала, который тянется за головкой. Переднюю часть условно полусферической поверхности головки можно называть фронтом волны ионизации. За фронтом, т.е. в сторону канала, в основном и сосредоточен заряд стримерной головки. Поле там уменьшается, падая до малой по сравнению с E_m величины E_k в канале. Силовые линии, радиально расходящиеся перед головкой, выпрямляются внутри головки, приобретая осевое направление внутри плазменного канала стримера.

Процесс прорастания положительного стримера – непрерывный. В области сильного поля перед головкой идет ионизация молекул воздуха ударами электронов. Необходимые для этого начальные затравочные электроны подготавливаются стримером заранее. Тут важным является явление фотоионизации – затравочные электроны появляются благодаря излучению квантов в головке стримера (Рис. 4а), где одновременно велики и плотность электронов, и поле, снабжающее их энергией, необходимой для возбуждения молекул. Электроны, образованные в результате фотоионизации, могут появляться на значительном расстоянии от головки. Если стример положительный, такие электроны притягиваются к положительно заряженной головке и, таким образом, перемещаются в область все более и более сильного электрического поля. Возникает быстро растущая лавина.



а) Схема распространения катодонаправленного стримера. (1) - стример в два последовательных момента времени t_1 и t_2 , показаны вторичные лавины, стремящиеся к положительной головке стримера, волнистые стрелки — фотоны; (2) — линии напряженности электрического поля.

б) Структура катодонаправленного стримера

Рис. 4: Схематическое изображение стримеров

Рождение электронов у катода или далеко от ионного следа интереса в данном случае не представляет, так как ведет к образованию лавины, аналогичной первой. Вырванные фотонами электроны инициируют вторичные лавины, которые втягиваются в след, так как результирующее поле направлено именно таким образом. Поскольку одновременно развивающихся лавин очень много, они сплошным образом заполняют пространство перед головкой, образуя новую плазменную область.

В области, где газ только что ионизовался – непосредственно перед головкой - происходит разделение зарядов. Электроны утекают в сторону головки, нейтрализуя ее положительный заряд. Головка становится нейтральной и появляется новый участок канала. В то же время смещение электронов обнажает положительный заряд в только что ионизовавшейся области – головка смещается вперед (*Рис. 4б*).

В отличие от лавины, скорость продвижения стримера оказывается не привязана к реальной скорости движения электронов. В самом деле, начальная электронная плотность подготавливается излучением стримера, которое почти мгновенно перекрывает значительное расстояние. А лавинный процесс начинается, когда в данной области значительно повысится электрическое поле. Таким образом, скорость распространения стримера оказывается связана со скоростью ионизации излучением и скоростью распространения электрического поля.

Стример движется вперед, положение головки смещается, и через короткое время область высокоионизованного газа оказывается не на переднем фронте, где поле высоко, а внутри плазменной области, где напряженность поля низка. Из-за нехватки напряженности, ионизация электронным ударом здесь идти не может. Из-за прилипания электронов к молекулам кислорода, концентрация электронов начинает падать, вследствие чего плазма в стримерных каналах постепенно теряет проводимость. Проводимость ионного канала на два порядка ниже проводимости головки стримера.

1.1.3. Лидерный разряд

Если температура газа в каналах стримера превышает критический уровень, при котором эффект прилипания подавляется, запускается процесс нарастающего повышения температуры и проводимости, приводящий к стримерно-лидерному переходу.

Лидер и стример — образования одного типа. Оба — плазменные каналы, самоподдерживающимся образом прорастающие в сравнительно низком внешнем поле, не достаточном для ионизации газа. Параметры вершинных частей каналов (плотности электронов, радиусы) сопоставимы, различаются на один-два порядка. Плазма стримера склонна к быстрой потере проводимости (особенно в воздухе) из-за прилипания

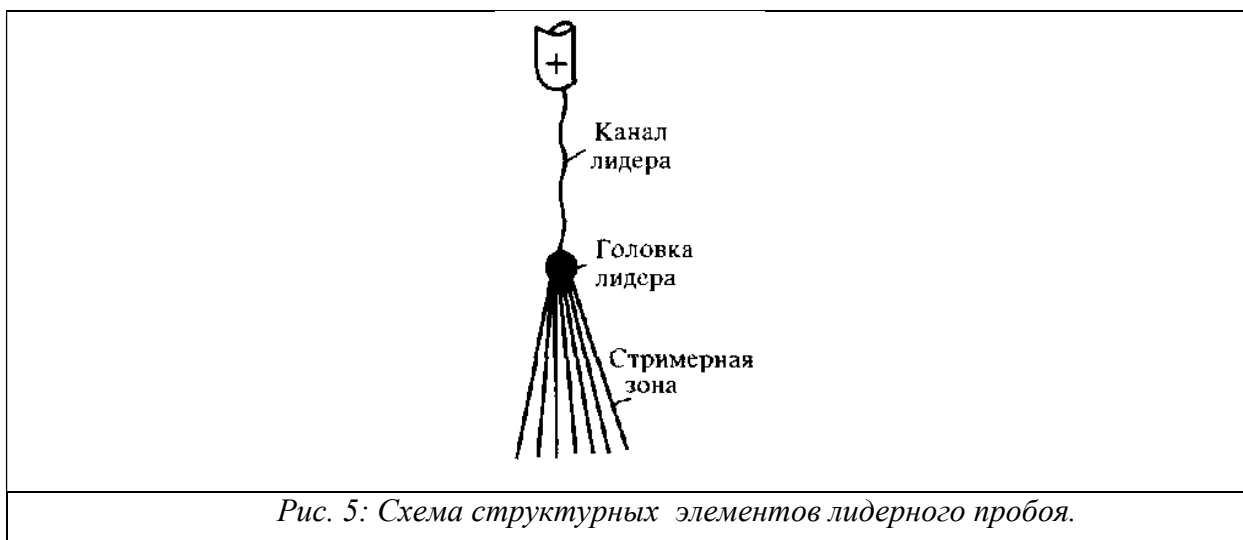
электронов, плазма лидера рекомбинирует значительно медленнее. Различие связано с температурой газа в вершине канала, которая зависит от силы тока и мощности, выделяемой на единице длины. Повышенная температура в лидерной головке подавляет эффект прилипания электронов. Это открывает путь к дальнейшему повышению температуры и ионизации.

Непосредственное образование лидера из лавин канала с достаточным для нагрева газа током обычно не осуществляется, т.к. еще до этого происходит лавинно-стримерный переход. Стоит числу электронов в лавине дорасти до значения в 10^8 , а радиусу лавины до весьма малого значения r_0 , как лавина тотчас превращается в стример с таким же радиусом, слабым током и малой выделяемой погонной мощностью. Для лавинно-лидерного перехода лавине нужно было бы еще подрасти, но лавинно-стримерный переход этот рост пресекает. Поэтому достаточно сильноточный лидерный канал может образоваться только путем объединения нескольких стримеров.

Ток, протекающий по каналу стримера, по отношению к источнику питания может трактоваться как ток смещения, обусловленный изменением емкости и напряжения на промежутке (т.е. конфигурации и суммарной энергии электростатического поля, при появлении проводящего элемента). Особенности емкостного тока позволяют оценить энергию, поставляемую в канал от источника напряжения, без априорных сведений о проводимости и характере изменения во времени.

Когда стримеры достигают противоположного электрода, ситуация принципиально меняется, т.к. весь промежуток соединен проводящими элементами. Экспоненциально растут ток и скорость удлинения канала лидера (до $\sim 10\text{--}10^3\text{ А}$ и 10^4 м/с). Переход лидера в сквозную фазу можно считать достаточным условием пробоя промежутка.

Различаются три основных структурных элемента лидера: канал, головка и стримерная зона (Рис. 5).



Выделяются начальная и сквозная фазы лидерного процесса, принципиально отличающиеся по своим характеристикам. Начальная фаза длится с момента возникновения лидера до контакта стримерной зоны с поверхностью электрода противоположной полярности либо со стримерной зоной встречного лидера. Затем начинается сквозная фаза. Главное отличие начальной фазы в том, что ее стримеры прекращают свое развитие в межэлектродном пространстве, оставляя там весь объемный заряд. В сквозной фазе, по крайней мере часть заряда переносится стримерами на противоположный электрод, покидая промежуток, и потому в значительно меньшей степени ослабляется поле перед головкой лидера. Все ионизационные процессы интенсифицируются, и при неизменном напряжении на промежутке скорость удлинения лидерного канала в сквозной фазе оказывается на один-два порядка больше, чем в начальной фазе.

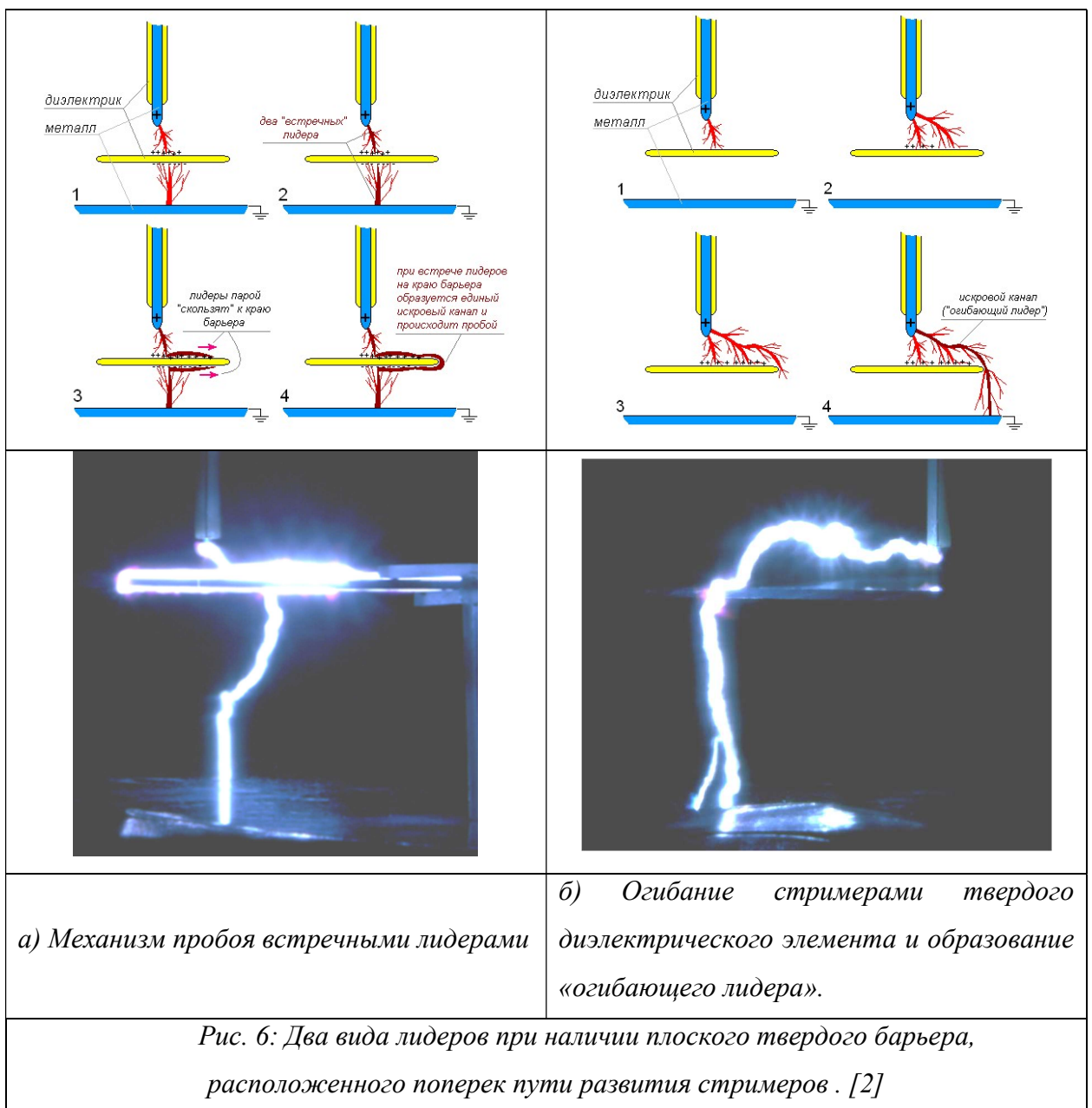
1.2. Влияние барьерной изоляции на стримерные и лидерные процессы в воздухе

Стримеры и лидеры нарушают нормальное функционирование высоковольтных устройств, вследствие чего стоит актуальная задача суметь предсказать и предотвратить их появление. Для предотвращения нежелательной разрядной активности, используют твердые диэлектрические барьеры различной формы, препятствующие развитию стримеров и осложняющие стримерно-лидерный переход. Существуют критерии для определения порогового напряжения возникновения стримеров и стримерно-лидерного перехода [4], [5], которые можно использовать для высоковольтных систем в воздухе и при наличии некоторых форм барьерной изоляции.

Наиболее простые конфигурации твердых диэлектрических барьеров – плоские, расположенные поперек пути развития стримеров (например, *Рис. 7, Рис. 6*) – изучались ранее в работах [2], [5], [6], [7], [8], [9], где были описаны особенности распространения стримеров, рассмотрена зависимость напряжения пробоя от расположения барьера, его геометрических размеров и свойств. В [7] также рассматривались барьеры в форме стакана и колбы, результаты для которых аналогичны плоским барьерам. Так, при достижении головкой стримера поверхности твердого диэлектрика, рост плазменного канала прекращается – таким образом, твердые диэлектрические элементы («барьеры») могут использоваться для остановки развития стримерного разряда. Создаваемая таким образом «барьерная изоляция» позволяет снизить напряжение пробоя (до 60-130% [5]) при неизменном межэлектродном расстоянии, что важно для создания компактных высоковольтных устройств. Однако, как будет показано в данной работе, барьерная изоляция не всегда повышает напряжение пробоя – возможен и противоположный

результат, облегчающий стримерно-лидерный переход. Примерами таких конфигураций могут быть случаи наличия воздушного зазора между барьерами, расположенными параллельно горизонтальной заземленной плоскости (Рис. 32) и наличия «канала» в диэлектрике (Рис. 39). Данные виды барьерной изоляции являются «опасными», незнание их особенностей которых может привести к печальным последствиям.

Отметим, что при наличии барьерной изоляции, находящийся на пути возникновения стримеров, существует два механизма проникновения волны ионизации – «в обход» и «сквозь» барьер, не разрушая его (Рис. 7) [2], [7], [10]; два вида лидеров – встречные (стримеры не обязательно должны замкнуться на противоэлектрод, возможен переход в лидерный канал, который сам дойдет до противоэлектрода) и огибающие (сначала стример доходит до противоэлектрода, затем возможен стримерно-лидерный переход) (Рис. 6) [2], [6].



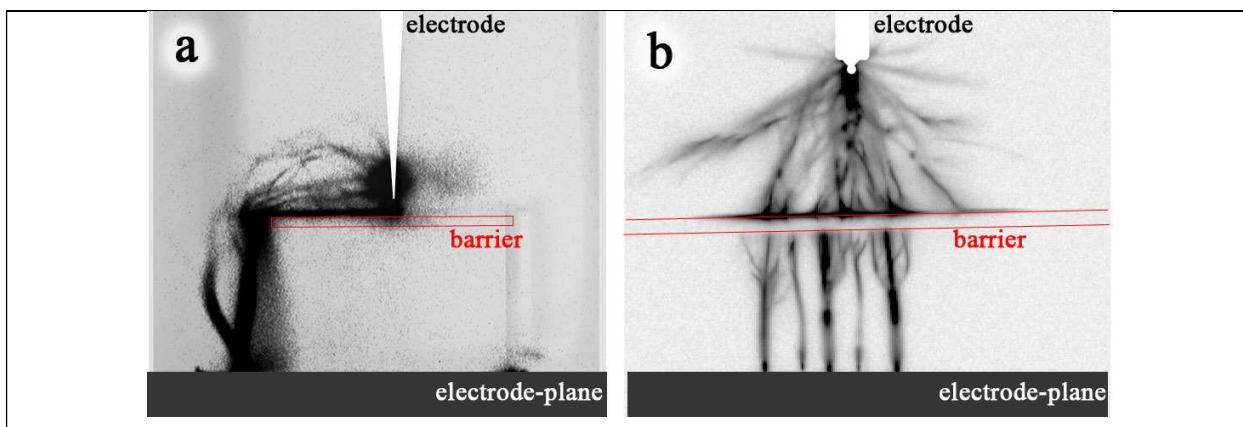
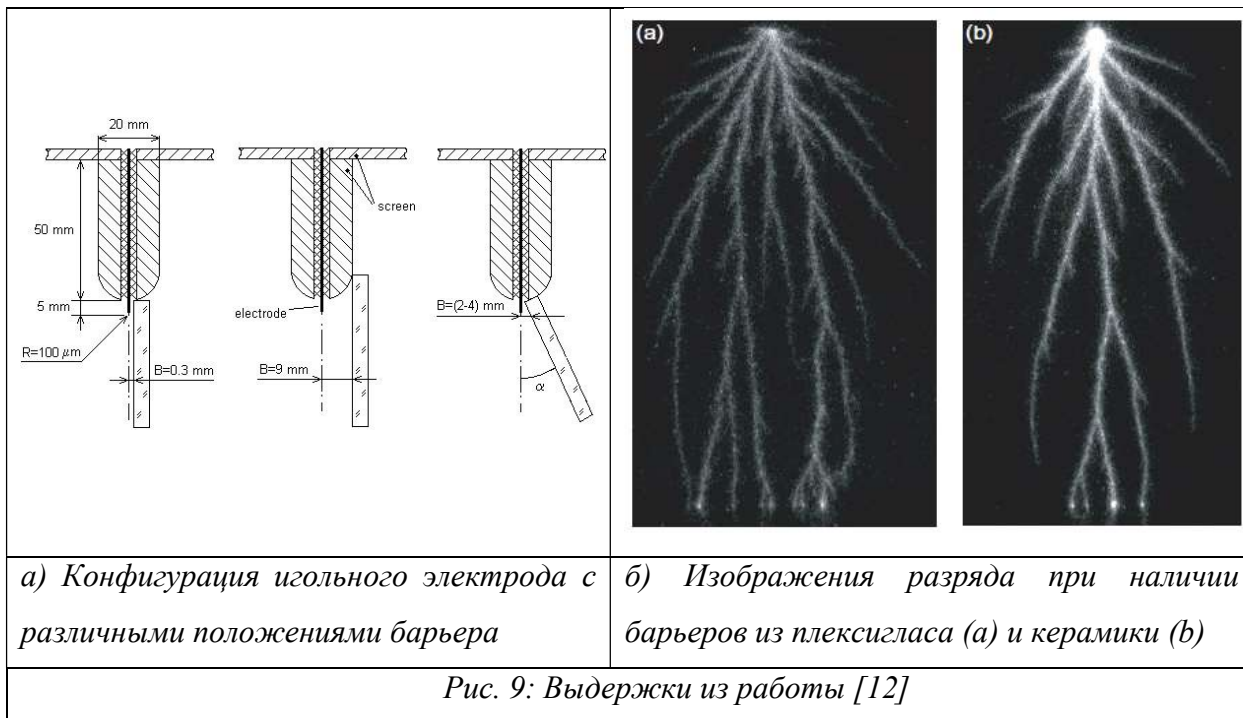
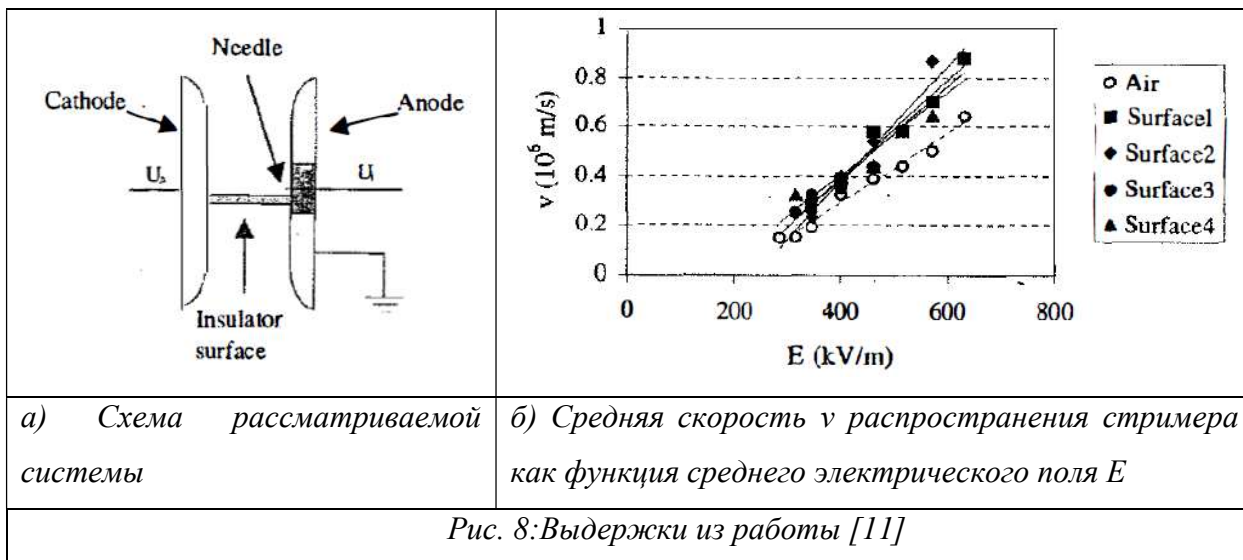


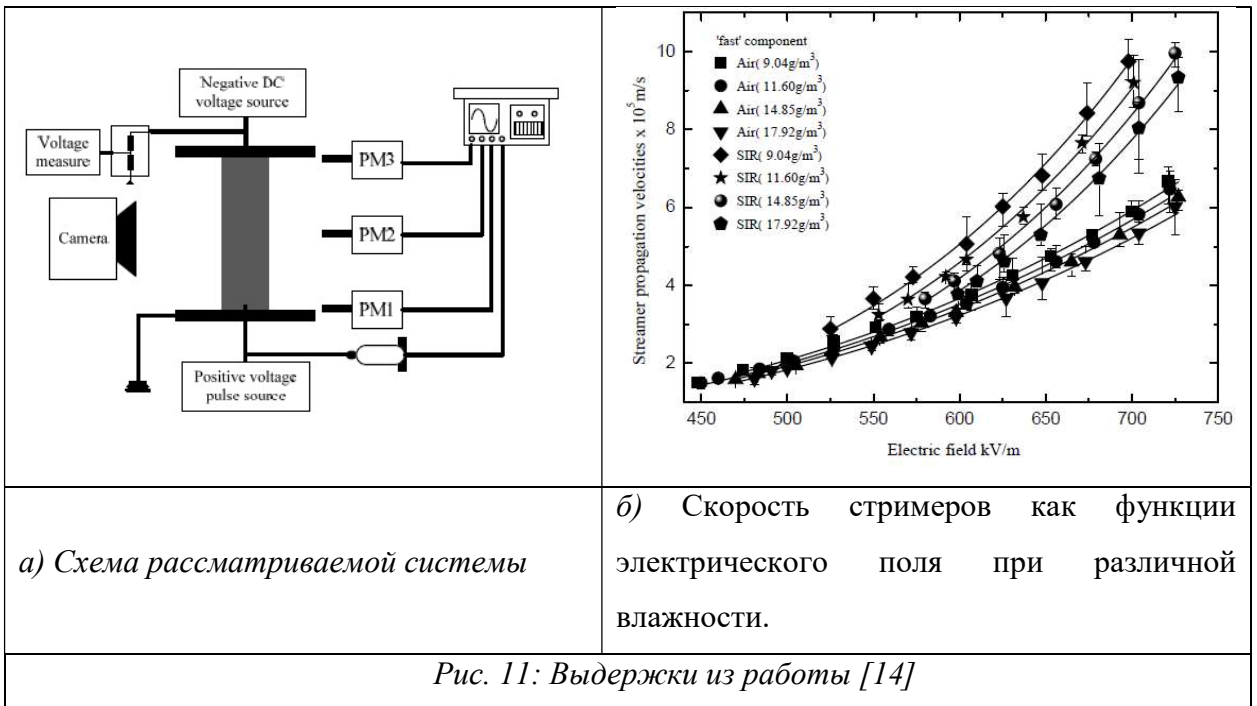
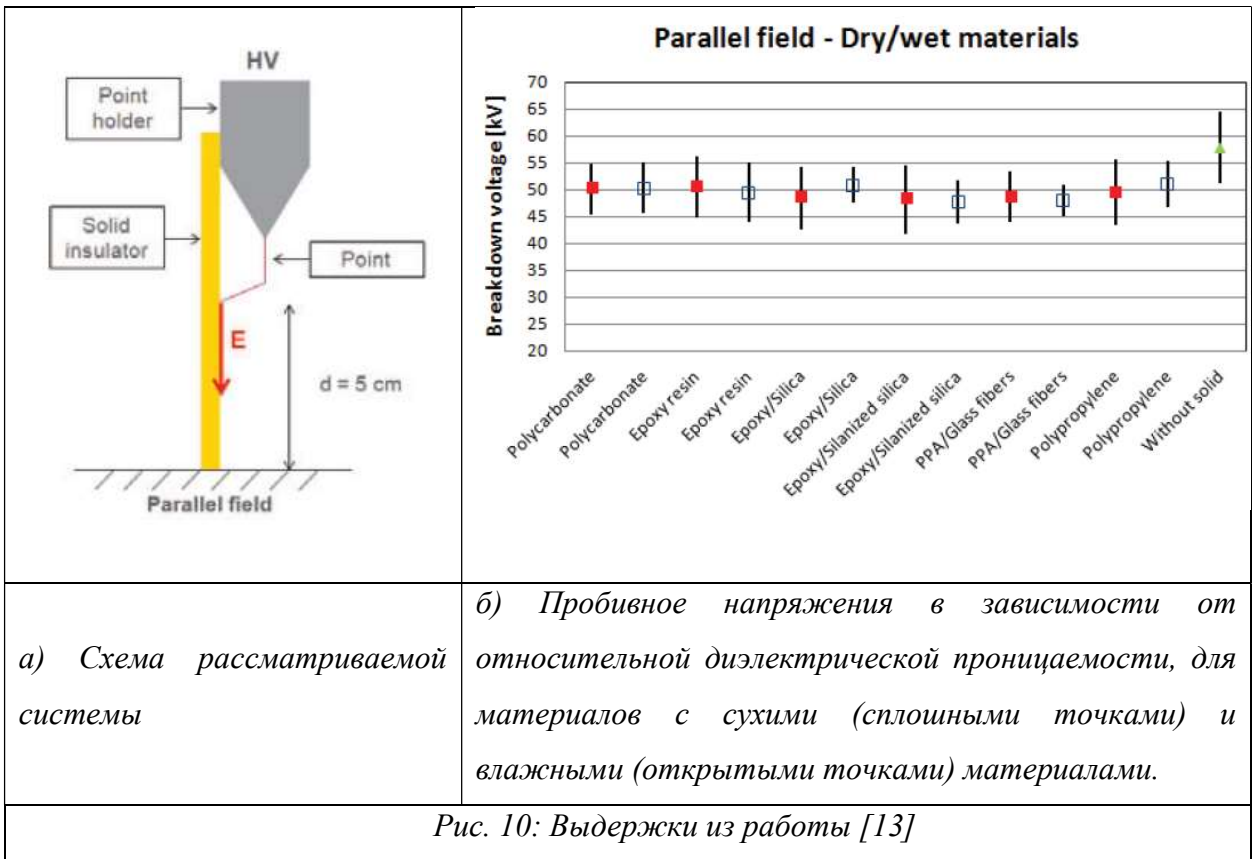
Рис. 7: Системы электродов игла-плоскость и сфера-плоскость с барьером, параллельным плоскому электроду; (a) – стримеры огибают барьер (негатив), (b) – стримеры «проникают» сквозь барьер (негатив). [7]

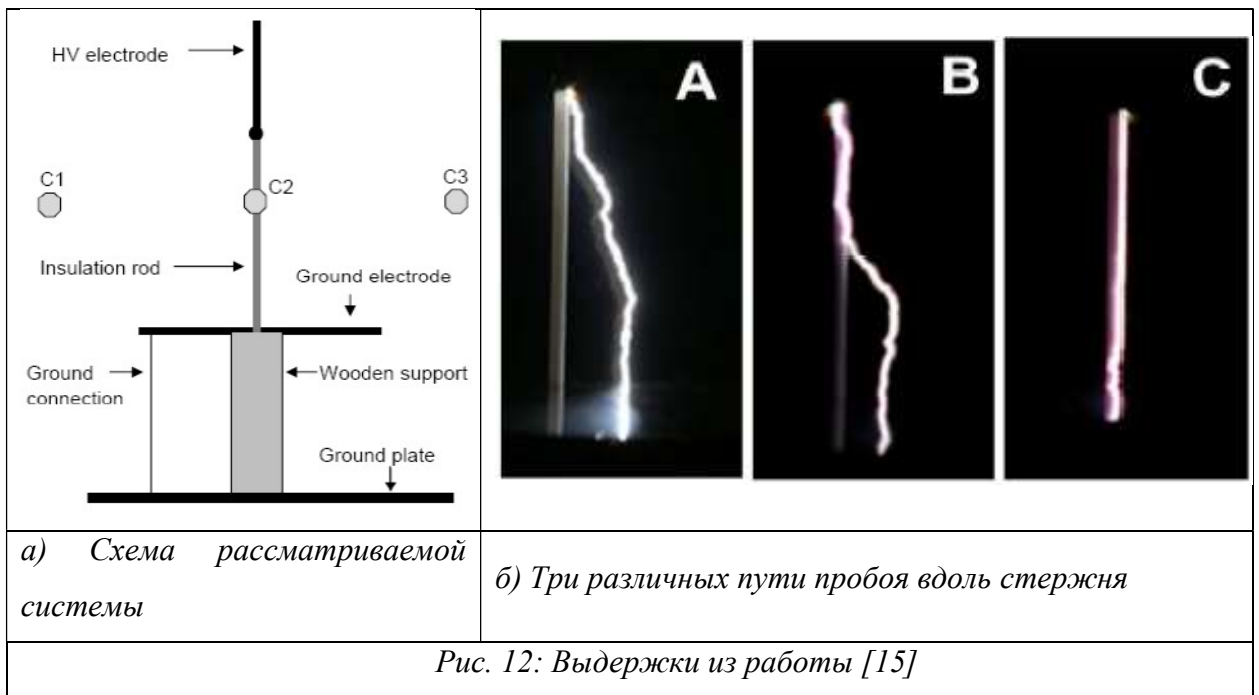
В данной работе, для описанных выше конфигураций барьерной изоляции (*Рис. 32* и *Рис. 39*), фигурируют случаи встречных лидеров, развивающихся «в обход» барьерной изоляции.

Также интерес представляют работы по исследованию разрядной активности с другим вариантом расположения барьеров – не параллельных заземленной плоскости, а перпендикулярных ей (*Рис. 14*). При таком размещении барьеры не перегораживают межэлектродный промежуток и не препятствуют распространению стримеров от активного электрода к заземленной плоскости, осуществляется случай «оггибающих» лидеров (т.е. пробой возможен только после замыкания стримерами межэлектродного промежутка; важно не запутаться в терминологии - ни о каком реальном «оггибании» чего-либо для данной конфигурации барьеров речи не идет). Похожая система рассматривалась в работах [11], [12], [13], [14], [15]. В [11] говорится об увеличении минимального значения напряженности электрического поля по сравнению со случаем без барьера, что ведет к увеличению скорости стримеров и интенсивности ионизации в присутствии изолирующей поверхности (*Рис. 8*). Экспериментальные результаты, полученные в [12], показывают, что основной фактор, определяющий размеры и структуру стримерной зоны, является распределением электростатического поля у высоковольтного электрода, которое в свою очередь зависит от характеристик диэлектрического барьера: положения барьера относительно высоковольтного электрода, материала барьера (*Рис. 9*) и его толщины. Работы [13] и [14] интересны изучением разрядной активности в условиях сухого или влажного барьера-пластины и различной влажности или давления газа для барьера-цилиндра соответственно. В [13] получено, что на пробой в первую очередь влияет твердая диэлектрическая проницаемость, тогда как химическая природа и присутствие воды

оказывают незначительное влияние (Рис. 10); в [14] результаты испытаний показали, что в одном и том же электрическом поле скорость распространения стримера обратно пропорциональна давлению воздуха или влажности (Рис. 11) – стримерам легче распространяться при низких значениях данных величин. В [15] исследуются пути пробоя при наличии различных диэлектрических материалов в форме цилиндрических стержней между электродами – вдоль поверхности по всей длине стержня; частично вдоль поверхности стержня, и затем «покидающих» его; не касаясь стержня (Рис. 12).







Данные работы рассматривают случай наличия одного диэлектрического барьера, расположенного перпендикулярно заземленной плоскости, и в условиях расположения высоковольтного электрода вблизи или при соприкосновении с барьером.

Новизна нашей работы заключается в рассмотрении случаев с одним барьером и двумя, образующими зазор: исследуется зависимость напряжения пробоя в большом интервале расстояний (2-90 мм) барьер – электрод-сфера; показано, что критерии, предсказывающие порог стримерно-лидерного перехода в воздушном пространстве [4], дают заметную погрешность в случае барьеров, расположенных параллельно развитию разрядной активности; изучаются такие характеристики, как длины и переносимые токи стримеров при наличии барьеров и без них; предлагается гипотеза, объясняющая полученные результаты.

Таким образом, вопрос исследования диэлектрических элементов для предотвращения нежелательной разрядной активности является развивающейся тематикой. Однако, на данный момент в достаточной мере не изучены многие конфигурации барьерной изоляции, имеющие место быть при производстве высоковольтного оборудования. Поэтому, актуальным является продолжение исследований, получение новых зависимостей и закономерностей, а также выработка рекомендаций по выбору наиболее выгодных форм высоковольтной изоляции.

2. Техника и методика эксперимента

Для исследования стримерно-лидерных процессов необходимо создать условия для возникновения искрового электрического пробоя, а именно: напряженность электрического поля должна быть достаточной для процессов ионизации в воздухе. В данной работе рассматриваются результаты испытаний стандартными грозowymi импульсами напряжения положительной полярности. Используется система электродов сфера-плоскость, электрическое поле в которой сильно неоднородно.

Результаты экспериментов представлены следующими характеристиками: осциллограммы токов, фотографии стримеров и лидеров (по которым определяется длина, а также анализируется структура плазменных каналов), напряжение пробоя. Используемые экспериментальные методики включают в себя измерение ампер-секундных характеристик, съемку происходящих процессов на высокочувствительные видеокамеры и соответствующие ГОСТ методики определения пробивной прочности газовых промежутков.

В данном разделе описаны используемые оборудования и диэлектрические барьеры, методика проведения экспериментов.

2.1. Описание экспериментальной установки и оборудования

Рассматривается система электродов сфера-плоскость в воздушном пространстве при наличии твердых диэлектрических элементов различных конфигураций, расположение которых будет более подробно описано в соответствующих разделах. В ходе проведения экспериментов необходимо использование высоких импульсных напряжений, для получения которых высоковольтный электрод – сфера подключен к генератору импульсного напряжения ГИН-500. ГИН-500 – испытательная установка, работающая по принципу схемы умножения напряжения Маркса (*Рис. 13а*), формирующего стандартные униполярные грозowymi импульсы со следующими параметрами (*Рис. 13б*): длительность переднего фронта $\tau_{\phi} = 1,2 \pm 0,1$ мкс, заднего – $\tau_{и} = 50 \pm 1$ мкс, амплитуда импульсов (далее для краткости – напряжение) U_{max} от 40 до 500 кВ.

Основная часть импульсного генератора, работающая по принципу схемы умножения Маркса – конденсаторы, которые заряжаются параллельно, а разряжаются на нагрузку при последовательном соединении при помощи коммутирующих разрядников. Т.е. если ГИН состоит из k конденсаторов, каждый из которых заряжается до напряжения U , то на выходе ГИН можно получить номинальное напряжение $k*U$ – униполярное напряжение, прикладываемое к объекту испытаний, имитирующее воздействие грозowego импульса.



Размер высоковольтного электрода-сферы, от которого зависит степень неоднородности напряженности электрического поля, определяет порог возникновения стримеров и практически не влияет на их дальнейшее развитие. Поэтому, рассмотрев разрядную активность при различных радиусах, было решено использовать во всех экспериментах электрод-сферу диаметром 18 мм – образующееся электрическое поле получается достаточно неоднородным для возникновения разрядной активности уже при напряжении в 50 кВ. Ко второму электроду подключен цифровой осциллограф Tektronix для измерения токов, протекающих через заземленную плоскость – так можно дать оценку величине заряда, переносимого стримерами, сравнить на осциллограммах полученные результаты для различных случаев. Измерение тока фактически сводится к измерению напряжения, которое этот ток создает при прохождении через калибровочное сопротивление – шунт [3].

Для регистрации изображений возникающих стримеров и лидеров используются высокочувствительные камеры VSC-746, расположенных на расстоянии около метра от экспериментальной установки. Перед началом проведения эксперимента производится настройка: для четкости фотографий настраивается фокус камер; во избежание засветки диафрагма объектива максимально закрывается. Технические характеристики камер следующие: отношение сигнал/шум - 46 Дб; минимальная чувствительность, при условии отношения сигнал/шум 10 – 0.005 люкс; разрешение матрицы 720x576; частота съемки – 50 полукадр/с.

Видеокамеры подключены к персональному компьютеру, на который записывается видео. С него же можно управляться видеосъемкой. Поскольку стример и лидер – быстрые явления, регистрация их на камеру требует большой экспозиции. Полученные во время проведения экспериментов снимки отражают интегральную картину развития стримеров и лидеров, поскольку время экспозиции камер больше, чем длительность импульсов. Так, например, при съемке стримерной активности, на кадре остаются нитевидные изображения – «пути» головок стримеров, иначе говоря - формы каналов стримеров. По полученным фотографиям возможно изучение длины и топологии стримеров, поведение лидеров.

В 3.2.6 необходимо измерение распределения плотности заряда на поверхности диэлектрического барьера. Для этого используется измеритель напряженности поля ИПЭП-1, позволяющий измерять искомую величину в пределах от $2 \cdot 10^{-8}$ Кл/м² до 10^{-5} Кл/м² с расстояния 2 см с погрешностью в 5%.

Таким образом, для получения разрядной активности в воздухе при наличии барьерной изоляции, на высоковольтный электрод-сферу при помощи ГИН-500 генерируется стандартный грозовой импульс положительной полярности. Для изучения высоковольтных процессов используются осциллограф, высокочувствительные камеры, измеритель напряженности поля ИПЭП-1 и персональный компьютер.

2.2. Барьерная изоляция

Основной частью работы является исследование влияния различных конфигураций барьеров на разрядную активность в воздухе. Конструкции из диэлектриков собирались таким образом, чтобы получить воздушные зазоры и каналы, представляющие научный интерес и, как будет показано далее, опасность для высоковольтных устройств, использующую барьерную изоляцию. Барьеры располагались на заземленной плоскости и не касались высоковольтного электрода.

В рамках проведения экспериментов, можно выделить следующие требования к конструкции барьеров:

- удобство использования барьеров – вес, размеры, простота формы, возможность комбинировать и собирать различные конструкции;
- возможность самонейтрализации заряда, накопленного барьером, за интервал времени между импульсами в серии. Накопленный заряд влияет на результаты последующих испытаний, поэтому его присутствие нежелательно;
- возможность измерения величины заряда, накопленного барьерами (что совершенно противоположно предыдущему требованию, однако оказалось необходимым в отдельных эпизодах исследования, описанных в главе 3.2.6).

Используемые барьеры представляют собой листы стекла толщиной 1 см, шириной 50x50 см и 25x50 см. Выбор материала барьеров связан с тем, что время максвелловской релаксации стекла находится в промежутке между длительностью стандартного грозового импульса и интервалом между подачей импульсов (Приложение: Удельная поверхностная и объемная проводимость стёкол). Поэтому на масштабе импульса напряжения данный материал является диэлектриком, однако между импульсами напряжения накопленный электрический заряд успевает нейтрализоваться. Это важно для обеспечения независимости испытаний (отсутствия влияния предыдущих испытаний на результаты последующих). Также, стеклянные изоляторы используются в высоковольтных линиях электропередач, электровакуумных приборах, корпусах конденсаторов и других электронных компонентов из-за высокой электрической прочности, устойчивости к поверхностному пробою, сравнительно малых диэлектрических потерь и термостойкости. Для экспериментов, где важна регистрация поверхностного заряда, используются барьеры из лексана толщиной 0.4 см, шириной 50x50см.

2.3. Методика проведения экспериментов. Статистическая оценка результатов испытаний

Методика проведения экспериментов введена по аналогии с ГОСТ 1516.2-97: «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции» [16]. Данный стандарт устанавливает общие методы испытаний изоляции электрооборудования, условия проведения этих испытаний и требования к объекту испытания, а также рекомендации по оценке результатов испытаний.

В ходе проведения экспериментов в воздушном пространстве при наличии барьерной изоляции производятся испытания стандартными грозовыми импульсами напряжения (глава 2.1) - подается серия импульсов положительной полярности, состоящая из пяти импульсов. Шаг между сериями – 2-3 кВ.

Актуальным является вопрос о корректной статистической обработке данных экспериментов. Свойства стримеров зависят от напряженности электрического поля, при которой они начали появляться. В свою очередь, возникновение и развитие стримеров до некоторой степени случайно. В результате напряжение стримерно-лидерного перехода является случайной величиной. Более того, и порог (напряжение) возникновения стримеров зачастую является случайной величиной из-за дефицита затравочных электронов. Таким образом, определение напряжения, которое может выдержать высоковольтное устройство – задача статистики, для решения которой (получения с необходимой точностью функции распределения случайной величины) необходимо проведение большого числа

экспериментов. На практике чаще всего ограничиваются определением уровня напряжения, при котором вероятность пробоя (стримерно-лидерного перехода) равна 50%. Также принято использовать гипотезу о нормальной интегральной функции распределения для зависимости вероятности пробоя от напряжения. В настоящей работе эти допущения используются.

Статистическую оценку результатов испытаний можно применять, когда результаты каждого приложения напряжения являются независимыми от предыдущих. Основной задачей статистической оценки результатов испытания изоляции является определение выдерживаемого напряжения с нормированной доверительной вероятностью. В данной работе испытания проводятся при самовосстанавливающейся изоляции – воздухе, а использование материала барьеров – стекла – дает возможность самонейтрализации накопленного на них заряда за промежутки времени, меньшие чем времена подачи грозных импульсов. Для экспериментов, где важна регистрация поверхностного заряда (глава 3.2.6) и используются диэлектрики из лексана, в серии подается один импульс, после проведения испытания производится «снятие» и последующая «очистка» заряда с барьера.

Существует три основных типа испытаний на электропрочность с точки зрения выбора последовательности импульсов: ступенчатый, «вверх-вниз» и 100%-го разряда. В данной работе используется *ступенчатый метод* испытания, который предусматривает приложение к объекту серий напряжения, одинаковых по форме и различных по значениям, в каждой из которых определяется число разрядов.

Таким образом, напряжение пробоя определялось следующим образом: подавалось несколько серий грозных импульсов (в рамках серии амплитуда импульсов напряжения одна и та же) с шагом по напряжению в 2-3 кВ; в рамках каждой серии вычислялась доля пробоев; далее, исходя из предположения о нормальном распределении выборки, искались доверительные интервалы для параметра $U_{50\%}$ – напряжении, при котором вероятность пробоя равна $\frac{1}{2}$. В дальнейшем для краткости эта величина будет называться просто «напряжением пробоя». Уровень доверия при построении доверительных интервалов был взят равным 95%.

Благодаря такому подходу, полученные результаты по напряжению пробоя для различных варьирующихся параметров можно сравнить, строить различные зависимости, есть возможность воспроизведения экспериментов.

При проведении испытаний с использованием различных конфигураций барьерной изоляции варьировались: величины воздушных зазоров, ширина канала, расстояния электрод-сфера - барьер и электрод-сфера - заземленная плоскость.

3. Барьеры расположены перпендикулярно заземленной плоскости

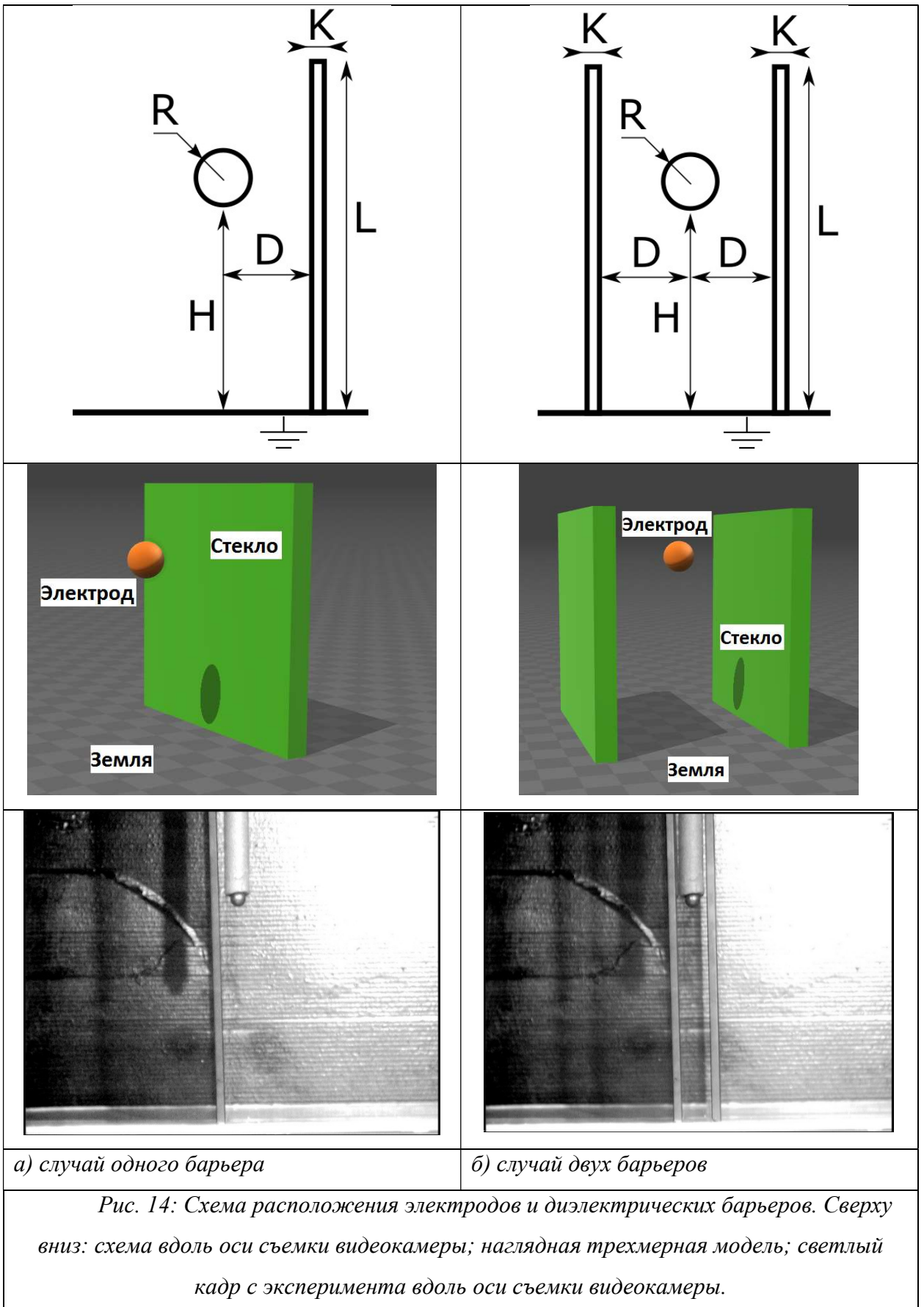
В данном параграфе рассматривается система электрод-сфера – заземленная плоскость в воздушном пространстве при наличии одного или двух диэлектрических барьеров-листов, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости (*Рис. 14*). С практической точки зрения данная система близка к типичной конфигурации, в которой оборудование под высоким потенциалом (линии передачи, терминалы коммутационных аппаратов), отделены от земли опорными изоляторами (в форме столбов, пластин, цилиндров) и существует возможность искрообразования, ведущая к повреждению устройств и твердой изоляции. Поэтому в промышленном секторе, производящем высоковольтное оборудование и изоляционные материалы для применений с высоким напряжением, необходимо знать, действительно ли используемая изоляция повышает напряжение пробоя, а также поведение разрядной активности в случае аварии [15]. Такая информация играет важную роль в понимании деградации поверхности изоляционных материалов и условиях использования высоковольтных устройств, используемых в условиях приложения высокого напряжения.

Принято считать, что наличие барьерной изоляции помогает предотвращать нежелательную разрядную активность в высоковольтных устройствах – повышает, либо не меняет напряжение пробоя. В данном параграфе будет показан противоположный результат – наличие барьеров, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости вблизи высоковольтного электрода, может уменьшать напряжение пробоя, тем самым облегчая стримерно-лидерный переход.

3.1. Конфигурация барьеров и последовательность действий эксперимента

Рассматривается три случая:

- 1) один барьер, расположенный перпендикулярно заземленной плоскости (*Рис. 14а*);
- 2) два барьера, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости (*Рис. 14б*);
- 3) без барьеров.



Барьеры представляют собой квадратные листы стекла толщиной $K=1$ см, шириной $L=50$ см. В ходе выполнения экспериментов варьировалось расстояние электрод-барьер D и расстояние электрод-заземленная плоскость H . Радиус электрода $R=0.9$ см.

Эксперимент представляет собой серию опытов. Каждый опыт выполняется со следующей последовательностью действий:

- Установка двух барьеров в межэлектродном промежутке;
- Запуск видеосъемки;
- Подача высоковольтного импульса;
- Сохранение кадров с разрядной активностью и соответствующими напряжениями.

Затем убирается один барьер и последовательность действий повторяется.

Затем убирается оставшийся барьер и последовательность действий повторяется.

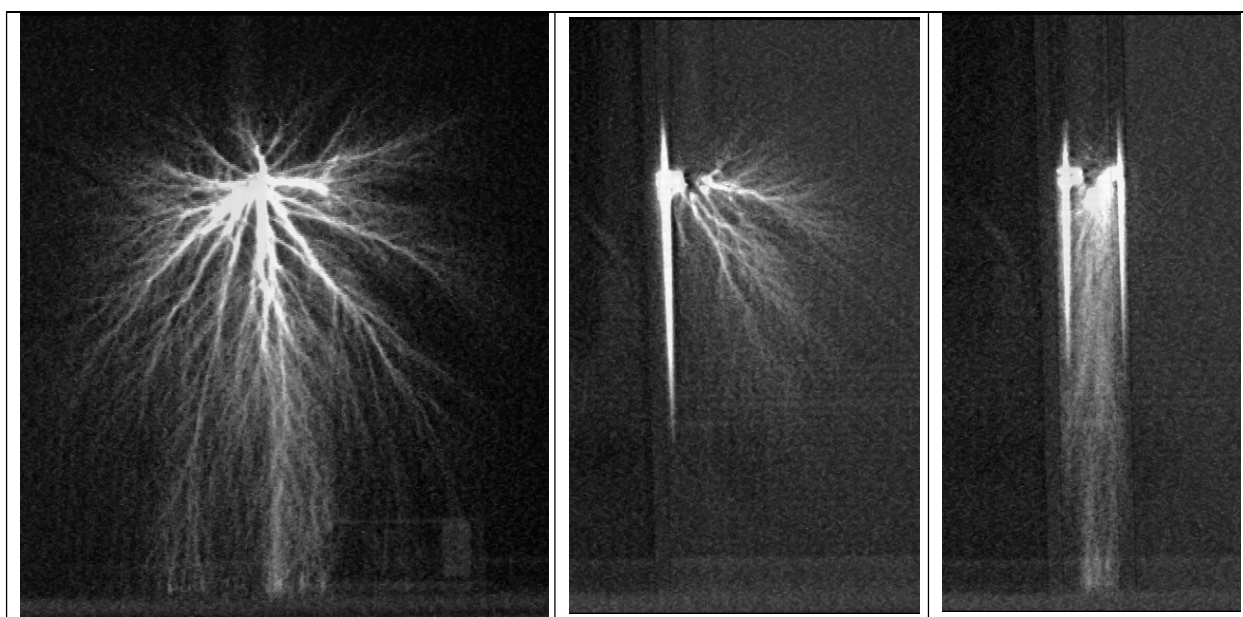
При успешном прохождении опыта и при необходимости, напряжение поднимается, варьируются необходимые величины (зазоров и прочего), и все повторяется сначала.

3.2. Анализ полученных результатов

Рассмотрим и сравним для трех систем: зависимость стримерно-лидерного перехода от расстояния между электродом и барьером и межэлектродного расстояния; длины стримеров и поведение лидеров; заряды и токи, наведенные стримерами; для объяснения и визуализации полученных результатов решим упрощенную задачу в пакете COMSOL Multiphysics.

3.2.1. Зависимость напряжения пробоя от расстояния между электродом и барьером

При подаче импульсного напряжения, возникает разрядная активность, фотографии которых приведены на *Рис. 15* и *Рис. 16*.

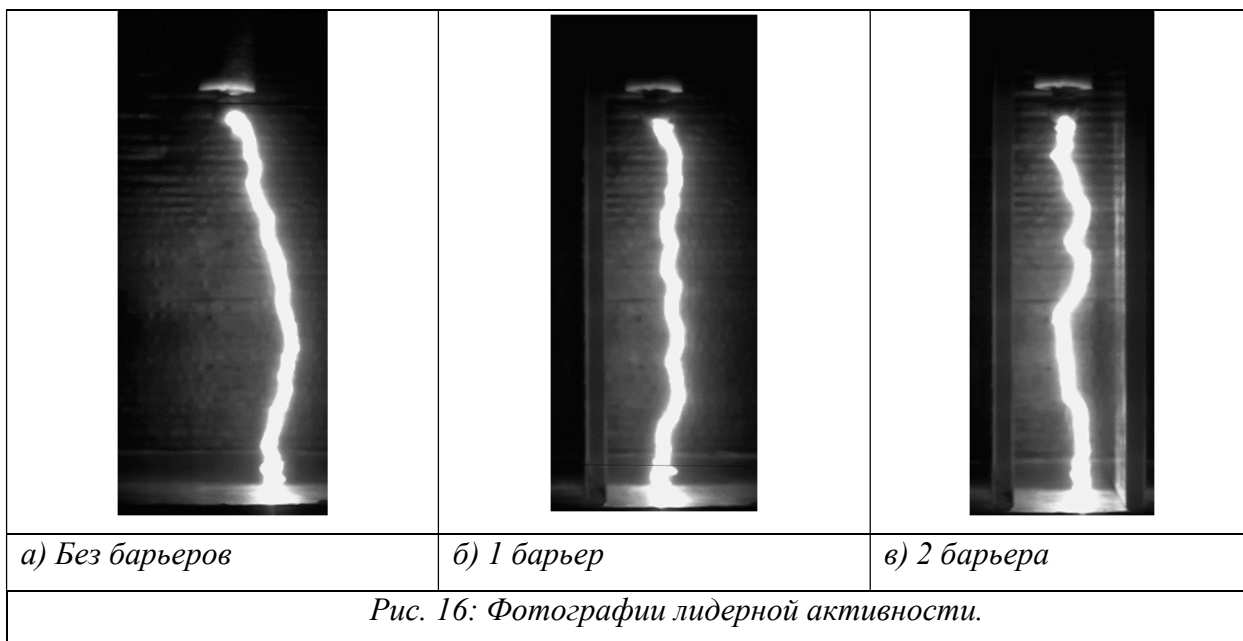


а) Без барьеров

б) 1 барьер

в) 2 барьера

Рис. 15: Фотографии стримерной активности. Фотографии стримеров наложены на «светлый» кадр.



Известно, что существуют критерии [4], позволяющие предсказать возникновение стримерно-лидерного перехода в воздушном пространстве и при наличии диэлектрического барьера, расположенного на пути распространения стримерной активности. Зададимся вопросом, работают ли данные критерии для системы с наличием барьеров, перпендикулярных заземленной плоскости?

На *Рис. 17* показана зависимость напряжения пробоя от расстояния барьер-электрод для случаев без барьера, с одним барьером и двумя барьерами.

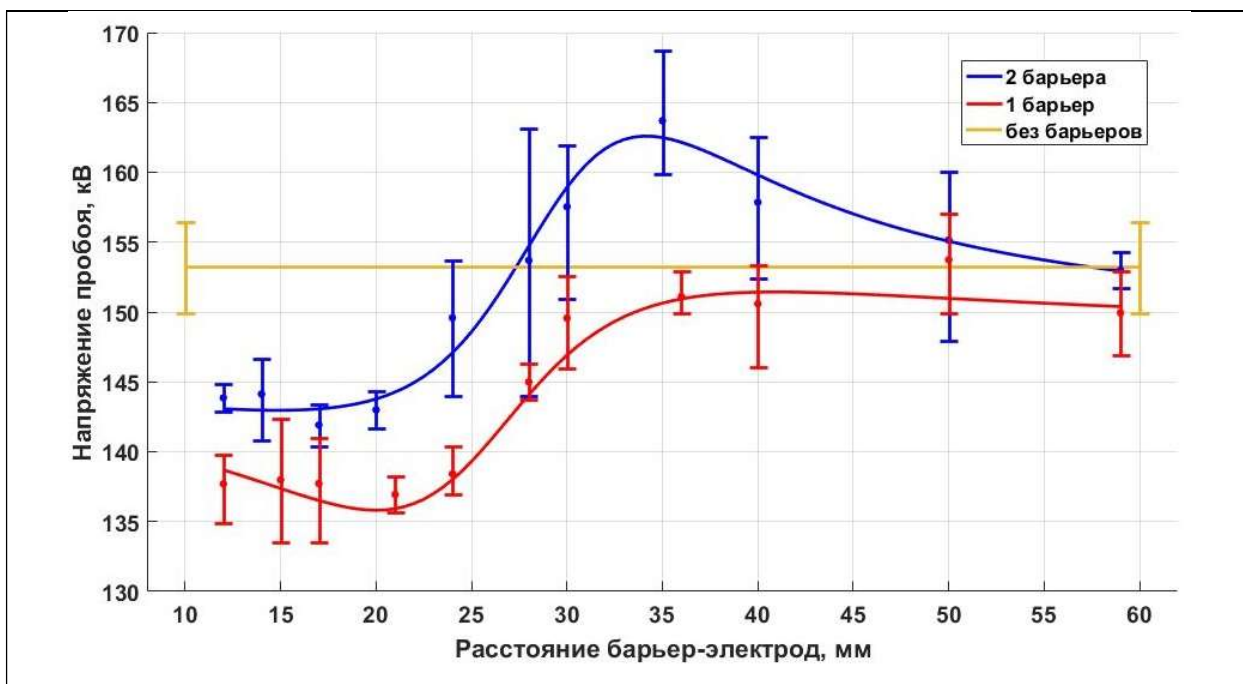


Рис. 17: Зависимость напряжения пробоя от расстояния барьер-электрод. Для сравнения показан уровень, соответствующий напряжению пробоя в отсутствие барьеров («без барьеров»). Расстояние электрод-заземленная плоскость 25 см.

Из *Рис. 17* следует, что при близком расположении одного барьера или наличии узкого зазора между двумя барьерами напряжение пробоя падает (до 11% и до 6% соответственно) по сравнению со случаем отсутствия барьеров. По мере удаления барьера или барьеров, напряжение пробоя возрастает и после определенного расстояния выходит в насыщение – уровень насыщения соответствует значению напряжения пробоя без барьеров. Отдельно отметим, что в случае двух барьеров имеется интервал, в котором напряжение пробоя превосходит случай «без барьеров» – не более чем на 6%, но доверительные интервалы свидетельствуют о наличии эффекта. В остальном, зависимости для одного и двух барьеров имеют схожее поведение.

Известна эмпирическая закономерность [3] – длина стримеров L есть линейная функция от напряжения U ; увеличение напряжения на 5 кВ приводит к увеличению длины стримеров примерно на 1 см:

$$L(U) = \frac{U - U_0}{E_0}, E_0 \approx 5 \text{ кВ/см} \quad (1)$$

где E_0 – максимальная напряженность электрического поля стримера, достигающаяся в передней точке головки; $U_0 = 25$ кВ эквивалентно требуемому потенциалу головки стримера для пробоя.

Если считать, что напряжение пробоя соответствует уровню напряжения, при котором стримеры замыкают межэлектродный промежуток, из (1) следует выражение для напряжения пробоя U_{breakd} в сильно неоднородных полях:

$$U_{\text{breakd}} = U_0 + E_0 * H \quad (2)$$

Здесь H – межэлектродное расстояние. Исходно эта закономерность выявлена для систем с воздушной изоляцией. Однако можно распространить формулу (2) и на случай барьерной изоляции, если под H понимать не межэлектродное расстояние, а кратчайший путь по воздуху между электродами [5]. В таком случае выражение (2) является оценкой «снизу» для напряжения пробоя (Говоря про «оценку снизу» снизу имеется ввиду тот факт, что не всегда замыкание стримерами межэлектродного промежутка ведет к пробояю, что будет показано ниже).

Полученные нами результаты не соответствуют выражению (2). По формуле (2) напряжение пробоя есть линейная функция от напряжения и кратчайшего межэлектродного расстояния по воздуху. В нашем случае это расстояние не изменяется, однако эксперименты показывают, что расширение зазора заметно влияет на напряжение пробоя.

Используя формулу (2) получаем оценку для напряжения пробоя:

$$U(25 \text{ см}) = 150 \text{ кВ}$$

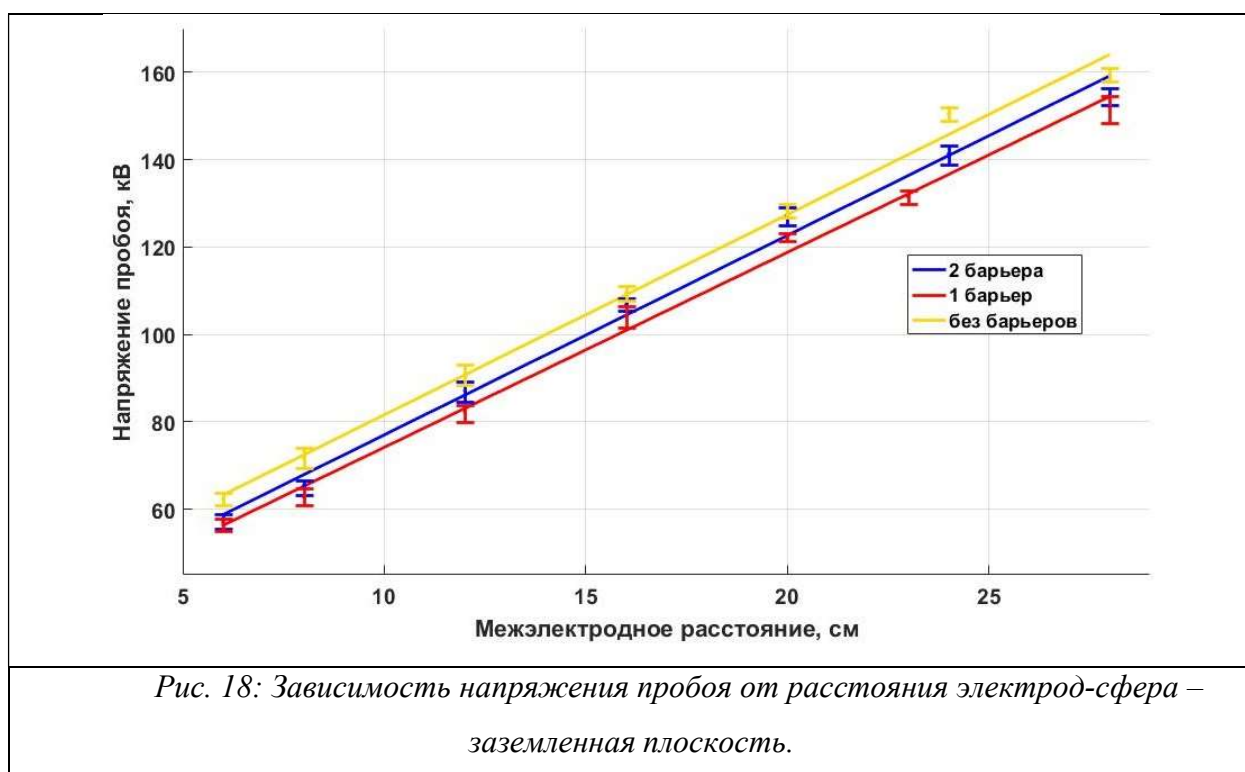
что почти соответствует (и является оценкой «снизу») с измеренным напряжением пробоя

для случая без барьеров. Как видно из *Рис. 17*, оценка не соответствуют напряжению пробоя при наличии барьеров, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости, при расстояниях D меньше 30 мм.

Для выяснения физического механизма влияния барьеров на напряжения пробоя, в пунктах 3.2.3, 3.2.4 и 3.2.5 были рассмотрены основные характеристики стримерного разряда и лидеров: траектории лидеров, длины стримеров и наведенные ими на заземлённую поверхность токи.

3.2.2. Зависимость напряжения пробоя от межэлектродного расстояния

Проводился эксперимент при варьировании межэлектродного расстояния и неизменном расстоянии барьер-электрод $D=1.5$ см.



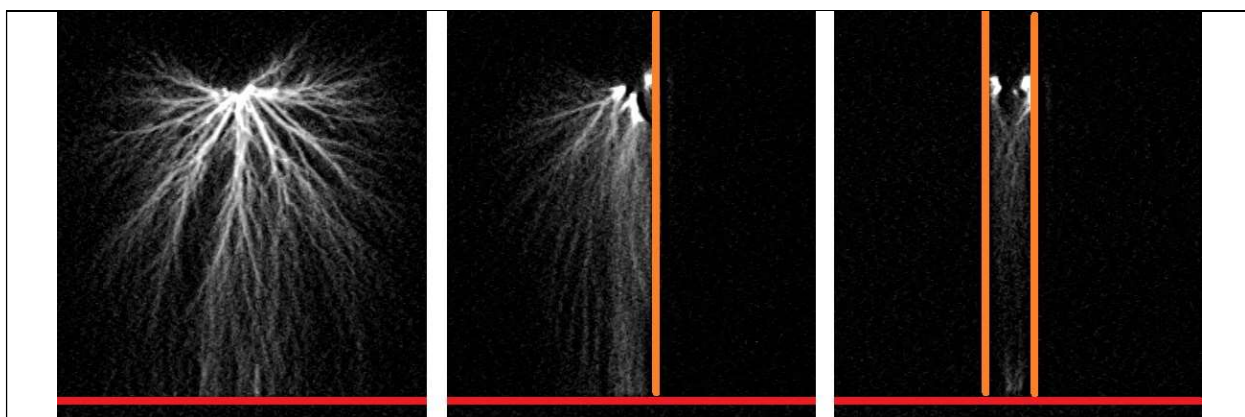
Наблюдаем, что при увеличении межэлектродного расстояния H напряжение растет, причем зависимость похожа на линейную в первом приближении для трех случаев. Данный результат совпадает с видом зависимости напряжения пробоя от межэлектродного расстояния в воздухе, которое также является линейным в первом приближении [4]. Отметим, что наличие одного или двух барьеров уменьшает напряжение пробоя, причем самым «опасным» является случай одного барьера.

3.2.3. Измерение длины стримеров

Для стримерно-лидерного перехода необходимо замыкание стримерами пары электродов. Поэтому можно предположить, что падение напряжения пробоя при наличии одного или двух барьеров вызвано тем, что при наличии барьеров стримерам требуется

меньшее напряжение, чтобы достичь противоэлектрода. Для проверки данной гипотезы рассмотрим результаты обработки фотографий стримеров.

Настройки камеры на всем протяжении эксперимента не изменялись, что позволяет сопоставлять фотографии стримеров между собой не только качественно, но и количественно – исходя из уровня яркости (Рис. 19). Устанавливая порог бинаризации (Рис. 20), можно было сравнить длину наиболее удаленных и слабосветящихся ветвей (в дальнейшем «все ветви»), а также длину более ярких участков («яркие ветви»). Последнее представляет интерес, поскольку повышенная яркость косвенно свидетельствует о более высокой проводимости данных участков.



а) без барьеров.

б) при наличии одного барьера.

в) при наличии двух барьеров.

Рис. 19: Примеры фотографий стримеров после обработки для случаев без барьеров, с одним и двумя барьерами. «Все ветви», стримеры достигают заземленную плоскость во всех трех случаях. Расстояние электрод-заземленная плоскость 20см. Напряжение 115 кВ.

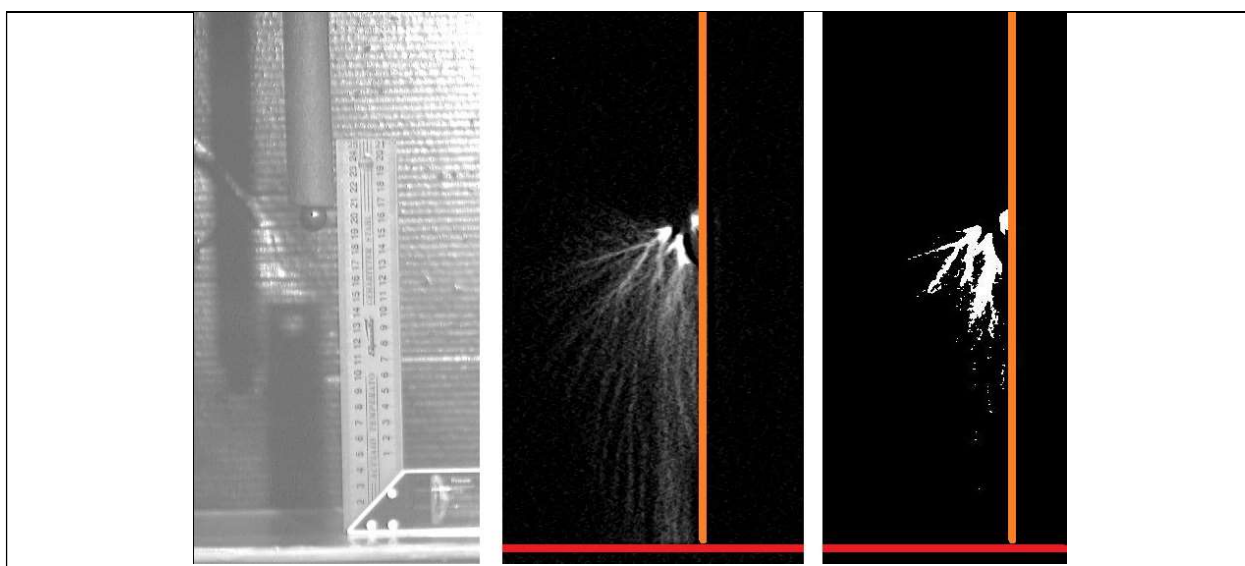
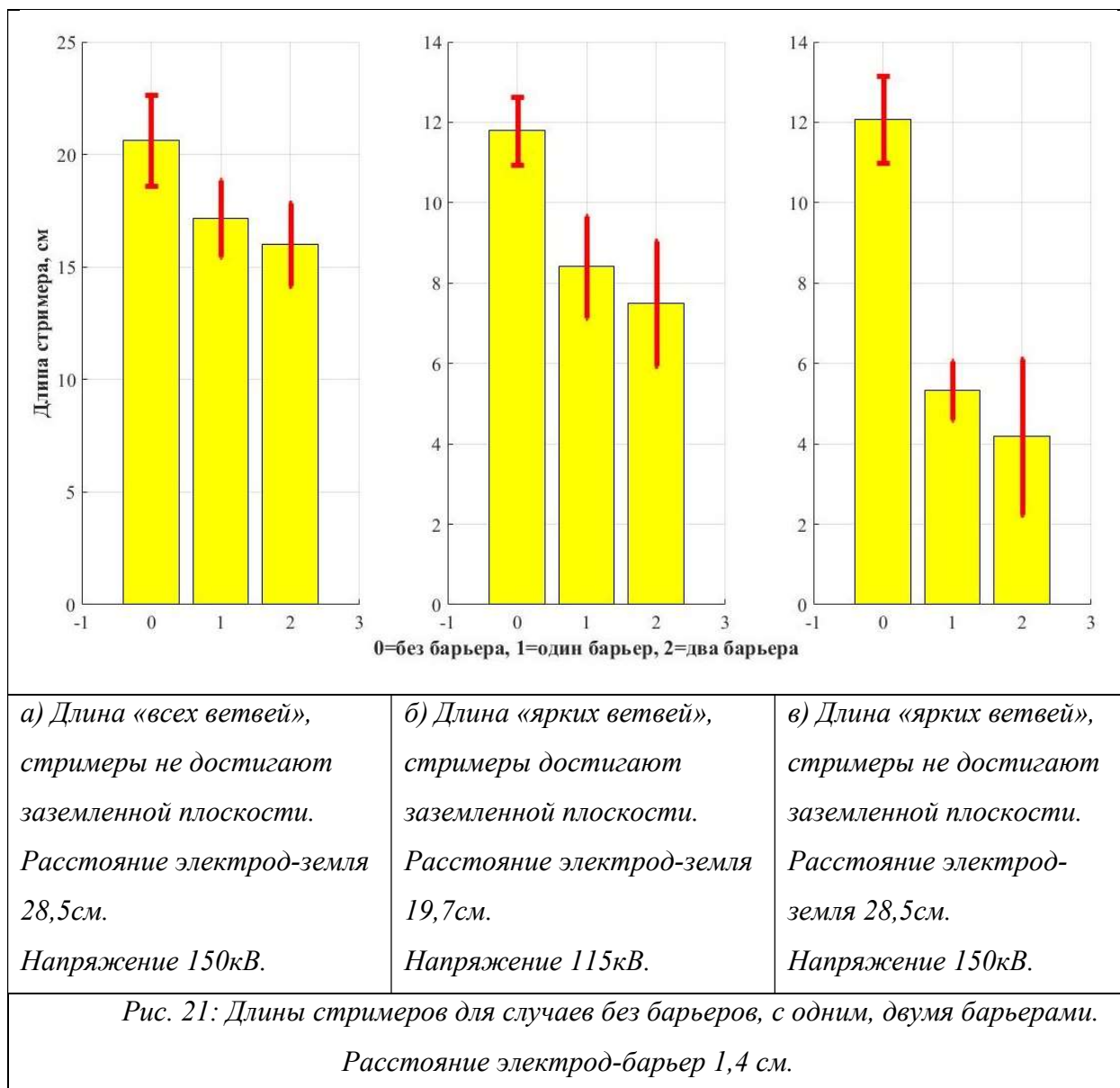


Рис. 20: Фотография системы электродов с линейкой и пример бинаризации фотографии при наличии одного барьера для получения картины «ярких ветвей».

Обработка результатов эксперимента показала, что наличие барьеров влияет на длину стримеров (Рис. 21). При наличии одного или двух барьеров длина «всех ветвей» уменьшается со сравнением случая без барьеров. (Рис. 21а). Это верно и для «ярких ветвей», причем независимо от того, доходят стримеры до заземленной плоскости или нет (Рис. 21б, с). Отметим, что различие по длине между случаями наличия двух барьеров и одного барьера находится в пределах доверительных интервалов, результаты же для случаев при наличии одного или двух барьеров от случая без барьера в доверительные интервалы не укладываются – таким образом, выявленное различие статистически значимо.



Таким образом, барьеры, расположенные перпендикулярно заземленной плоскости, препятствуют росту стримерных каналов. Замыкание стримерами пары электродов происходит при меньшем напряжении в случае без барьеров, что вступает в противоречие с выдвинутой ранее гипотезой о том, что влияние барьеров на длину стримеров объясняет изменение напряжения пробоя. Здесь, однако, следует учесть, что замыкание само по себе

не приводит к пробоям, требуется прогреть стримерные каналы до критической температуры, после которой переход в лидер становится неизбежен. С другой стороны, увеличения протяженности ярких ветвей при наличии барьеров также не наблюдается.

3.2.4. Поведение и времена возникновения лидерных каналов.

На *Рис. 22* приведены фотографии пробоя при различных расстояниях барьер – электрод-сфера для случаев с одним и двумя барьерами.

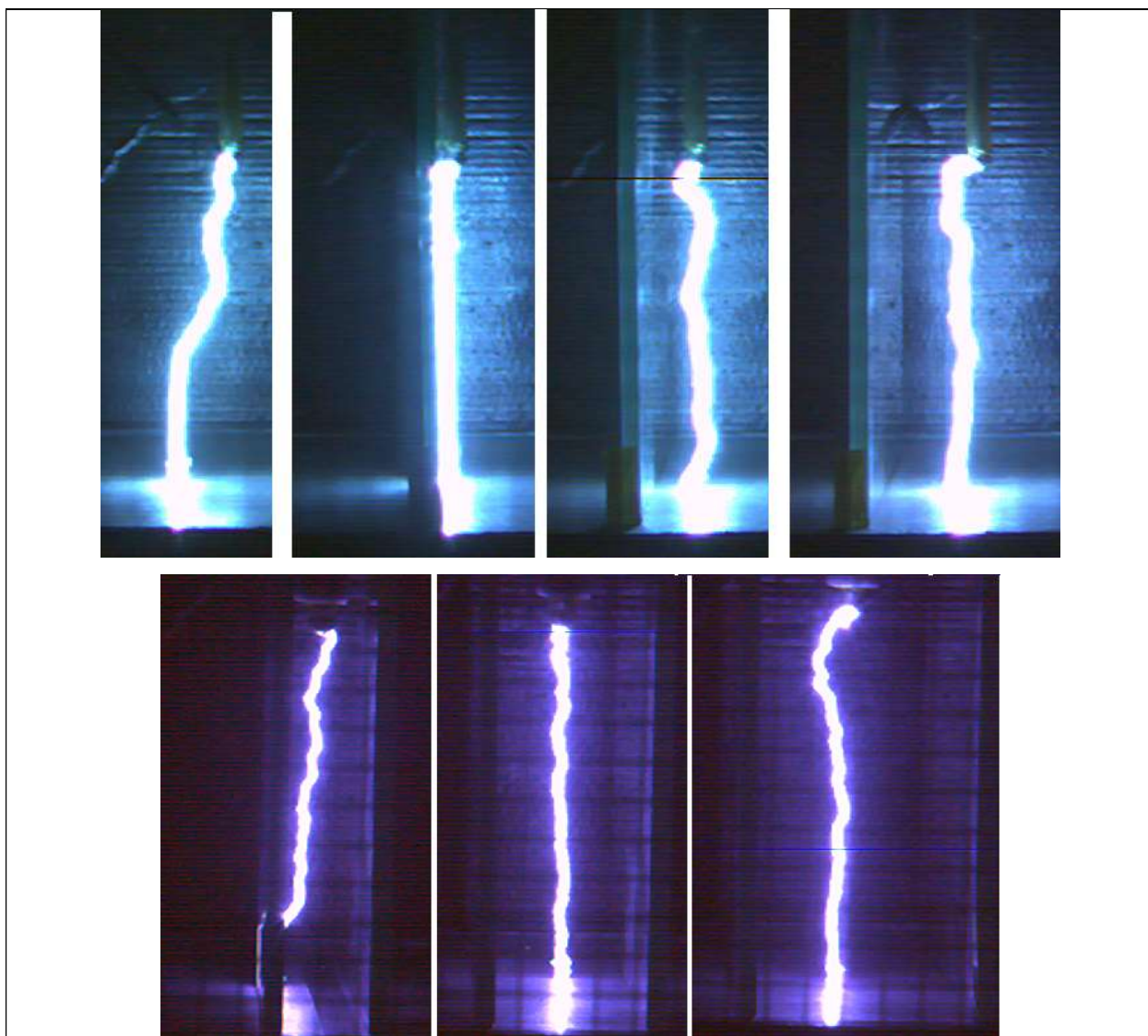
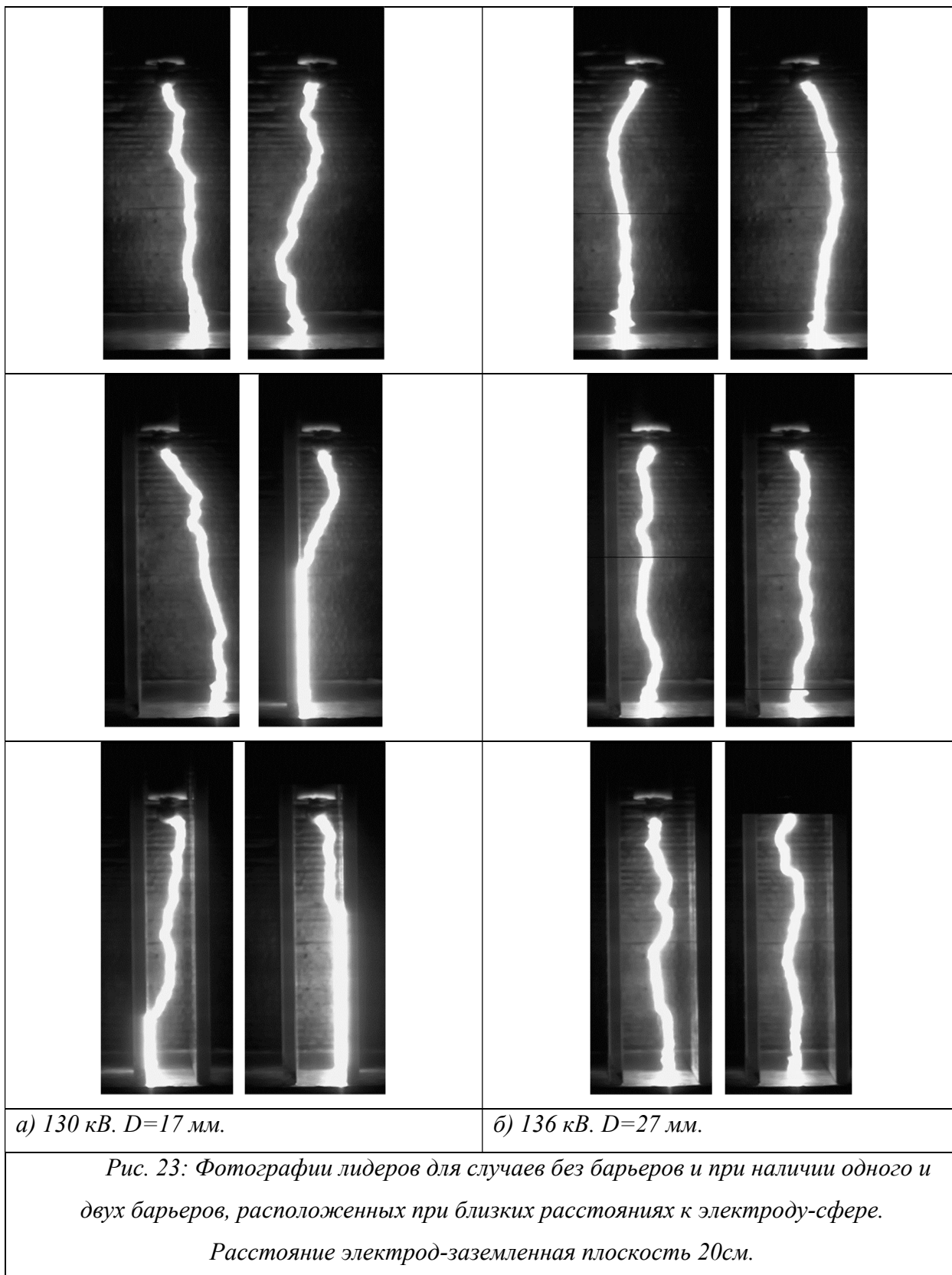


Рис. 22: Фотографии лидеров. Первый ряд, слева направо: без барьера; один барьер: $D=1$ см, $D=3.5$ см, $D=6$ см. Второй ряд, слева направо: два барьера: $D=2$ см, $D=4$ см, $D=5.5$ см.

Расстояние электрод - заземленная плоскость равно 20 см.

Наблюдаем, что, при близком расположении барьеров к электроду-сфере, возможно движение лидеров вдоль поверхности диэлектрика. По мере увеличения расстояния D , искровой канал в основном проходит по кратчайшему расстоянию по воздуху. Рассмотрим более подробно фотографии лидерной активности для небольших расстояний барьер –

электрод-сфера (Рис. 23). Отметим, что для данной конфигурации барьеров при межэлектродном расстоянии 20 см особенность падения напряжения пробоя наблюдается при расстояниях барьер-электрод менее 37 мм.



Наблюдаем, что при близком расположении барьеров к электроду-сфере, искровой канал может идти, не касаясь диэлектрика, так и вдоль его поверхности. Можно

предположить, что при наличии барьера образуется некая форма лидера скользящего разряда – лидерного канала, распространяющегося вдоль поверхности диэлектрика, особенностью которого является меньшее напряжение, необходимое для возникновения и развития, по сравнению со случаем в воздухе [3]. Однако, из полученных фотографий и значений напряжения возникновения пробоя видно, что это не так – при возникновении лидеров, распространяющихся как вдоль поверхности диэлектриков, так и не касаясь их, подаваемое напряжение на высоковольтный электрод одинаково. Скорее всего, движение лидеров вдоль поверхности одного или двух барьеров происходит из-за ограниченного этими барьерами свободного воздушного пространства. Это подтверждается фотографиями пробоев в случае без наличия барьеров – лидер имеет свойство отклоняться от «кратчайшего» расстояния между электродами.

Также можно задаться вопросом: влияет ли наличие барьеров на время, проходящее между началом грозового импульса и пробоем.

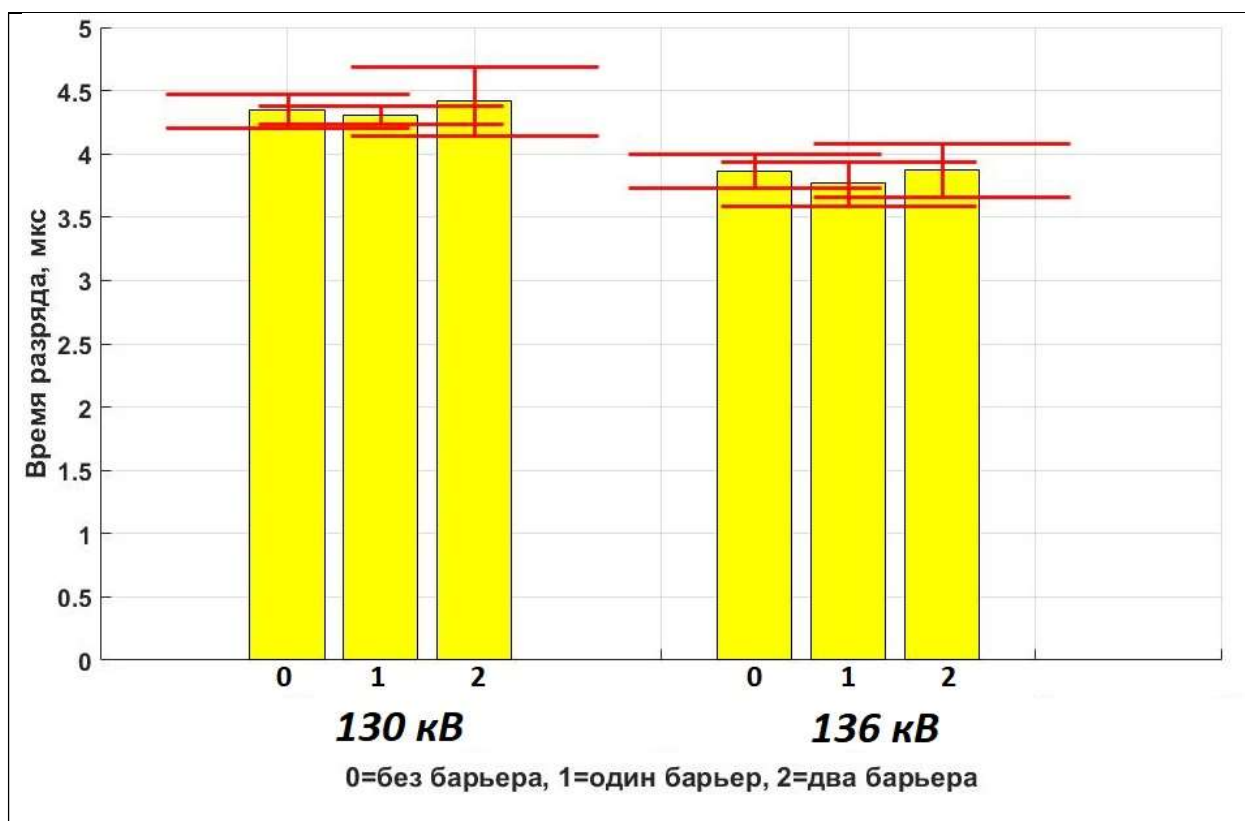


Рис. 24: Время возникновения пробоя для случаев без барьеров и при наличии одного, двух барьеров.

$U=130$ кВ $D=17$ мм и $U=136$ кВ $D=27$ мм.

Наблюдаем из *Рис. 24*, что различия между временами возникновениями лидеров для трех случаев не наблюдается. Наличие барьеров не влияет на время между началом импульса и стримерно-лидерным переходом.

3.2.5. Заряд и токи, наведенные стримерами на заземленную плоскость

Падение напряжения пробоя для вышеуказанных систем можно попробовать связать со следующим предположением: наличие барьера обеспечивает большую величину переносимого заряда стримерами, иначе говоря повышенную проводимость стримерных каналов, вследствие чего каналы быстрее нагреваются и происходит стримерно-лидерный переход.

Чтобы проверить это предположение, при помощи осциллографа регистрировались токи, наведенные стримерами на заземленную плоскость для случаев с одним барьером и без барьеров (Рис. 25). Набиралась статистика для различных напряжений.

При проведении эксперимента использовались следующие параметры: расстояние электрод-земля $H=19.5$ см; расстояние барьер-электрод $D=1.8$ см; подаваемое на электрод-сферу напряжение 100 кВ (возникает стримерная активность) и 115 кВ (возникает стримерная и лидерная активности).

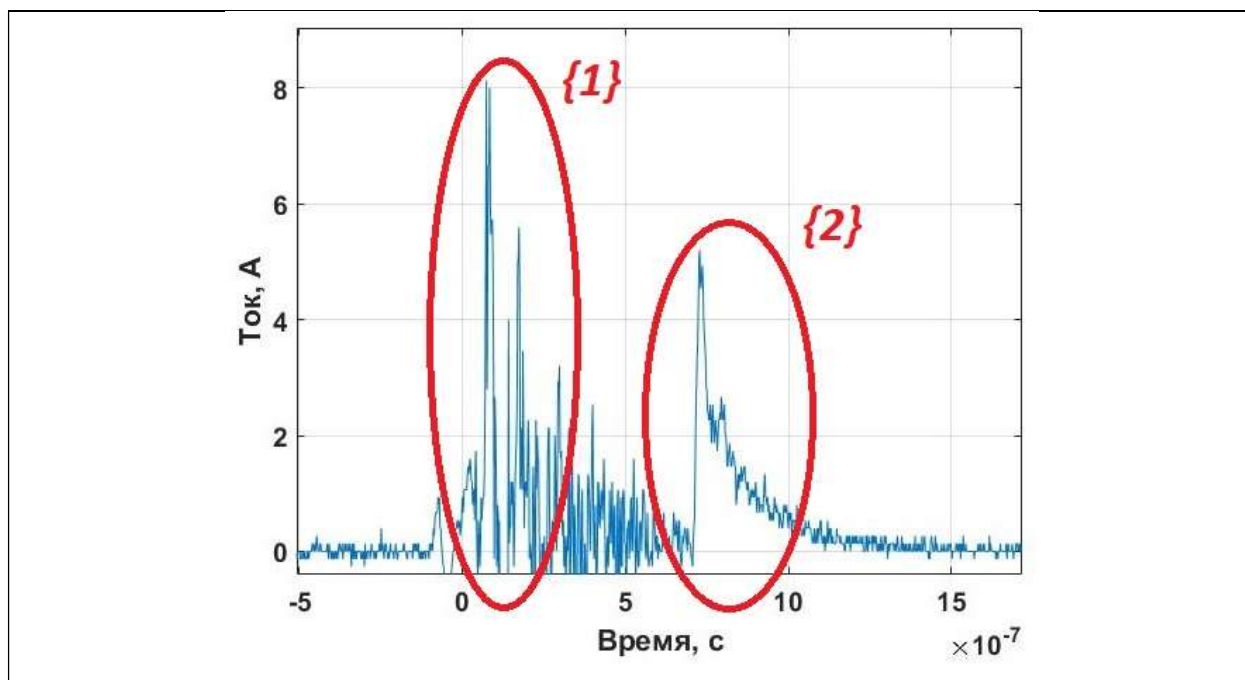


Рис. 25: Осциллограмма тока для случая одного барьера. Напряжение на электроде 115 кВ.

Рассмотрим более подробно Рис. 25. Первый пик {1} — ток смещения, вызванный увеличением напряжения на емкости между электродом-сферой и плоскостью, этот пик не несет информации о стримерных процессах. Второй {2} соответствует току, наведенному стримерами на заземленную поверхность. Проинтегрировав этот импульс, получаем заряд, наведенный стримерами на электрод-плоскость. В случае пробоя можно зарегистрировать величину тока в стадии замкнувших электроды стримеров.

В данной части не работы не рассмотрен случай с двумя барьерами, т.к. в этом случае

импульсы тока, соответствующие стримерам, накладываются на пик, связанный с током смещения, что делает невозможным их выделение и обработку. Поэтому набиралась выборка для двух случаев: с одним барьером и без барьеров.

При наличии одного барьера величина наведенного стримерами заряда получилась меньше на 40% и 28% по сравнению со случаем без барьеров для напряжений 100 кВ и 115кВ соответственно. Т.е. если Q_0 – заряд, наведенный стримерами на заземленную поверхность в случае без барьера, а Q_1 – для случая с одним барьером, то верно:

$$100\text{кВ: } Q_0 \approx 0.6Q_1$$

$$115\text{кВ: } Q_0 \approx 0.7Q_1$$

Сравнение величин токов и зарядов в случае стримерно-лидерного перехода затруднено из-за наличия системы защиты в ГИИ – второй пик {3}, соответствующий току, наведенному лидерами на заземленную поверхность, «срезается» (Рис. 26). Однако, можно сравнивать величины токов, соответствующих замкнувших электроды стримеров перед стримерно-лидерным переходом {4}, а именно – минимум тока между возникновением стримеров и пробоем.

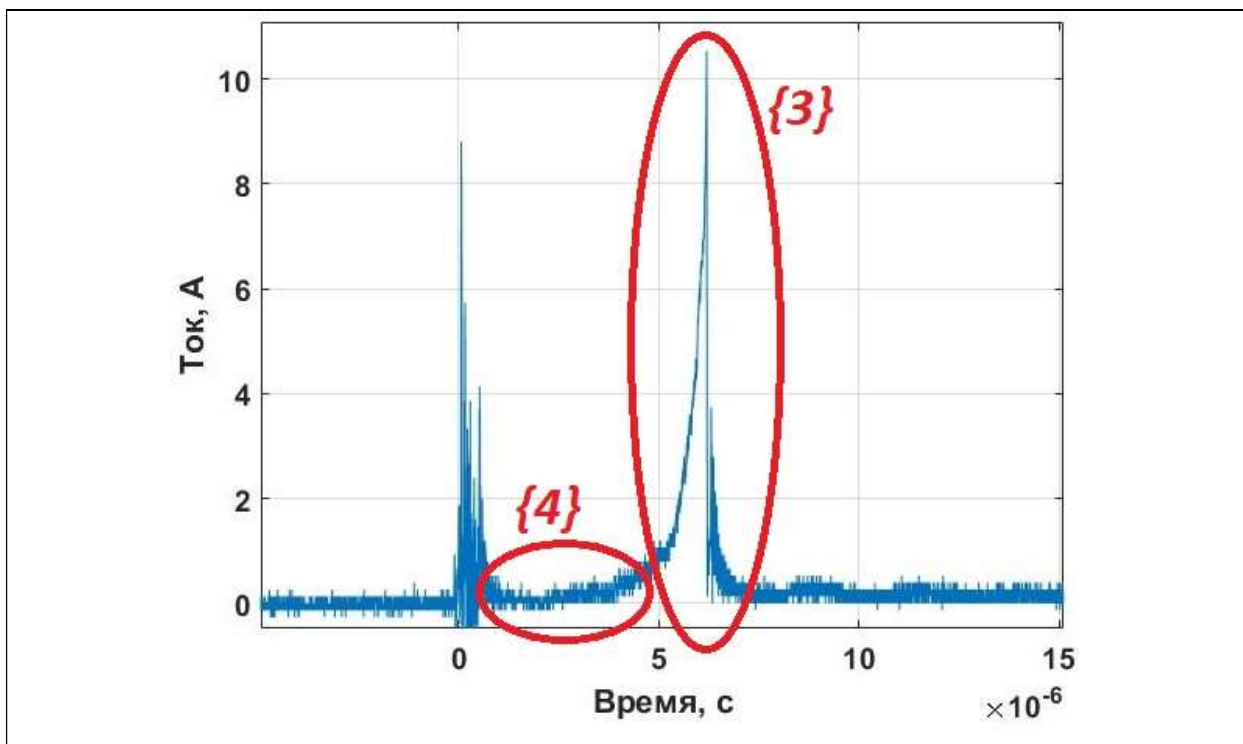


Рис. 26: Осциллограмма тока для случая одного барьера. Случай стримерно-лидерного перехода. Напряжение на электроде 115 кВ.

Получаем, что токи в замкнутых каналах стримеров перед пробоем при напряжении 115 кВ примерно равны:

$$I_0 \approx I_1$$

Здесь I_0 соответствует случаю без барьеров, I_1 – с одним барьером.

Данный ток характеризует сопротивление стримерных каналов (поскольку сравнение выполнено при одном напряжении), поэтому можно сделать вывод о том, что интегральное сопротивление стримерных каналов, соединяющих электроды, не зависит от наличия барьера, и объяснить разницу в напряжении пробоя фактором сопротивления каналов, не удастся.

Таким образом, наличие барьера уменьшает величину заряда, наводимого стримерами на заземленную поверхность, что противоречит предположению о повышенной проводимости соответствующих стримеров.

3.2.6. Упрощенное моделирование искажения напряженности электрического поля накопленным барьерами поверхностным зарядом

Для объяснения представленных выше результатов, была выдвинута следующая гипотеза: стримеры, встречая на своем пути диэлектрический барьер, передают ему свой заряд, распределяя его по поверхности. По мере накопления этот заряд начинает искажать электрическое поле в воздушном промежутке, что меняет условия развития стримеров и, в конечном счете, уменьшает напряжение пробоя, длину стримеров и наведенные на заземленную плоскость токи. Без расчетов затруднительно показать, какое именно влияние на развитие стримеров будет оказывать накопленный поверхностный заряд. Поэтому, для анализа данной ситуации, было проведено упрощенное моделирование в программе COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics - программная среда, обеспечивающая все этапы моделирования (определение геометрических параметров, описание физики, визуализация результатов), позволяющая моделировать физические процессы, которые могут быть представлены в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Проводилось моделирование распределения напряженности электрического поля, образованного из-за наличия в системе высоковольтного электрода-сферы и накопленного заряда на барьерах.

Геометрия модели (*Рис. 27*) была взята по возможности близкой к условиям эксперимента (*Рис. 14*): трехмерная постановка; в воздушном пространстве (диэлектрическая проницаемость – 1) располагается электрод-сфера радиусом $R=0.9$ см; расстояние электрод-сфера – заземленная плоскость $H=20$ см; размеры диэлектрических пластин – $L \times L \times K = 50 \times 50 \times 0.4$ см; расстояние барьер-электрод $D=1.8$ см.

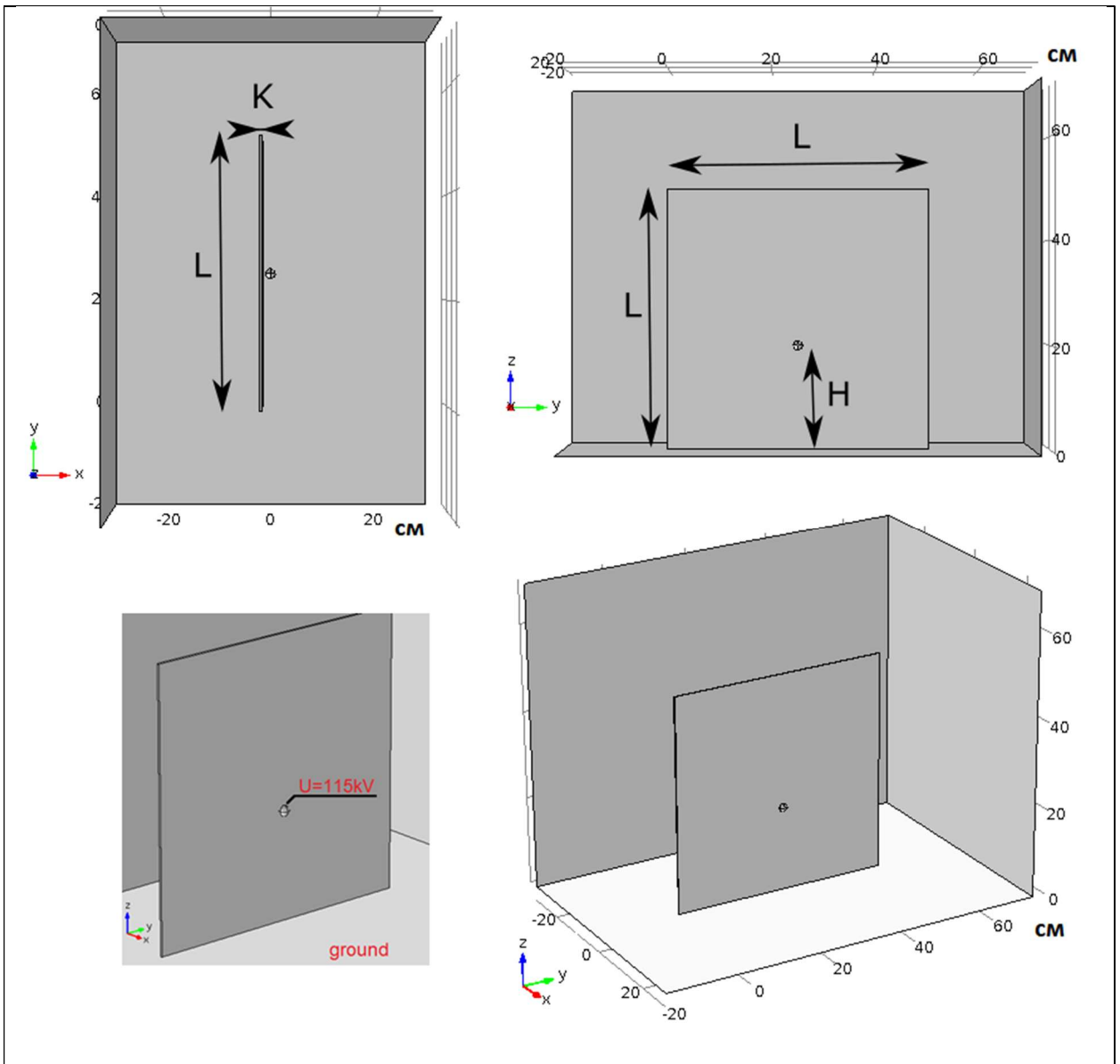


Рис. 27: Геометрия модели в Comsol. Случай наличия одного барьера. Вид вдоль оси Z, вдоль оси X, трехмерная модель полностью и граничные условия.

Решается задача электростатики – уравнение Пуассона с граничными условиями, описывающими влияние поверхностного заряда:

$$\Delta\varphi = 0 \quad (3)$$

где Δ - оператор Лапласа, φ - электростатический потенциал.

Рассматривается ситуация, когда барьеры уже накопили заряд, а на электроде еще есть напряжение.

$$E = -\nabla\varphi \quad (4)$$

$$D = \varepsilon_0\varepsilon_r E \quad (5)$$

где E – напряженность электрического поля; ε_0 – электрическая постоянная; ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость; D – электрическая индукция.

На заземленную плоскость задается условие $\varphi = 0$, на высоковольтный электрод -

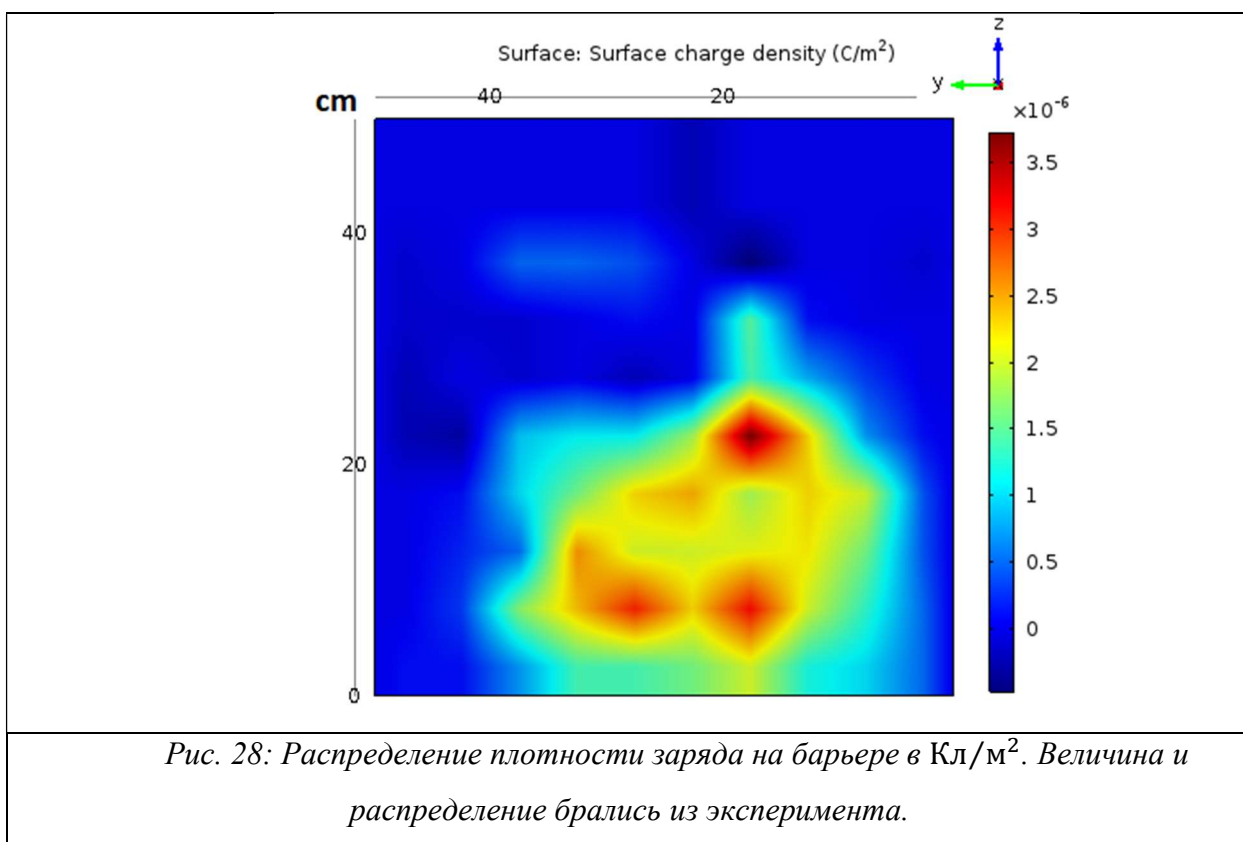
$\varphi = U$, где U – подаваемое напряжение.

Плотность заряда на барьере задается выражением:

$$n(D_1 - D_2) = \rho_s \quad (6)$$

где n – нормаль к поверхности; D_1 и D_2 – электрическая индукция, направленная «внутри» и «от» поверхности барьера; ρ_s – плотность заряда на барьере (берется из эксперимента).

Для определения распределения поверхностного заряда проводился эксперимент при наличии одного диэлектрического барьера (Рис. 28). Плотность заряда измерялась с помощью измерителя напряженности поля ИПЭП-1 до и после эксперимента. Измерение заряда проводилось с шагом в 5 см, при моделировании в качестве распределения поверхностного заряда использовалась интерполяция данных этих измерений.



Во всех ранее проведенных экспериментах использовался барьер из стекла. Однако в данном эксперименте и моделировании был использован лист поликарбоната в силу большого времени максвелловской релаксации – на стекле заряд нейтрализуется слишком быстро, чтобы можно было провести измерение.

Рассмотрим контурные графики распределения напряженности электрического поля (Рис. 29) для случаев без барьеров и с одним, двумя барьерами, а также график зависимости электрического поля от пути АВ (Рис. 30).

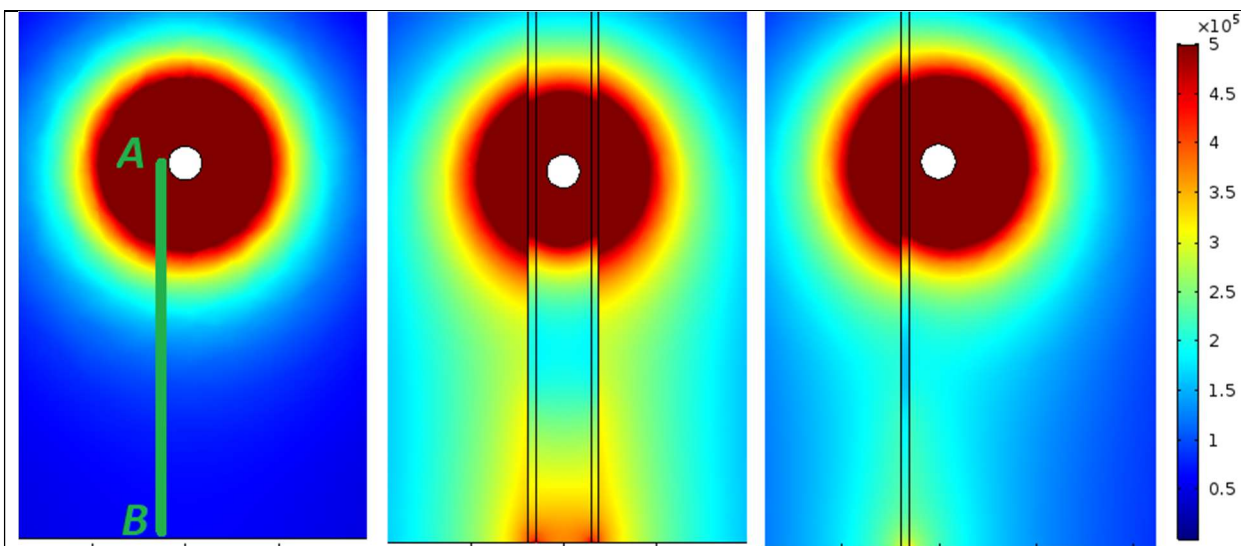


Рис. 29: Контурный график напряженности электрического поля для случаев без барьера, с двумя и с одним.

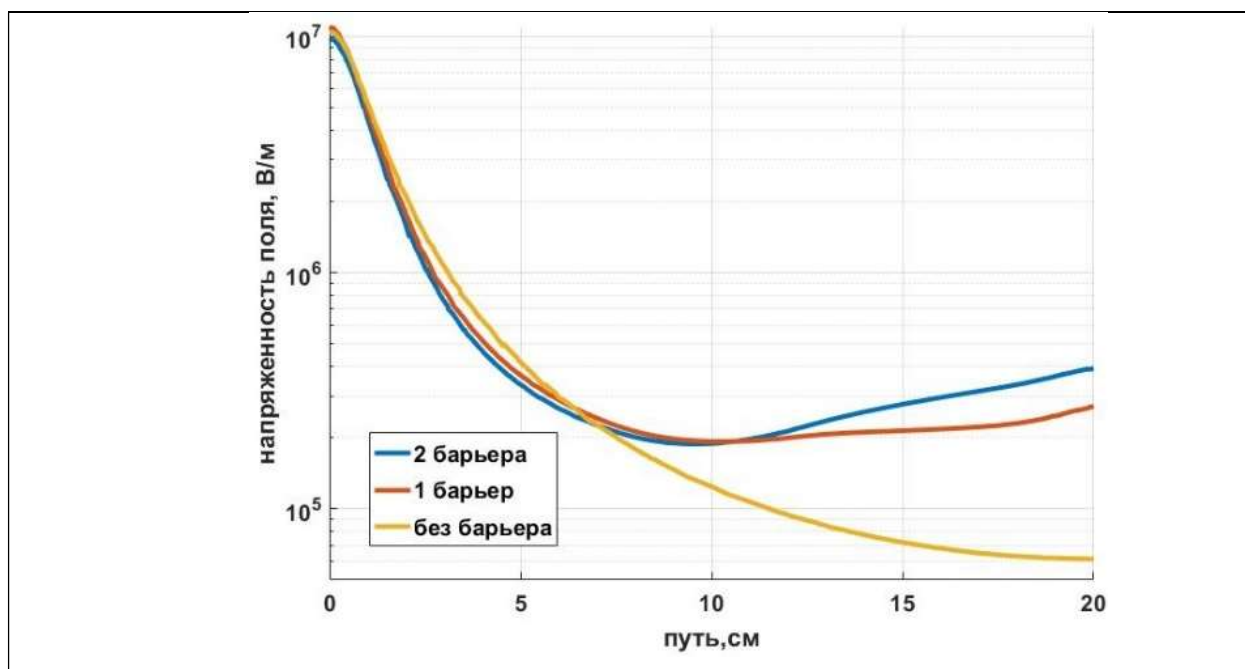


Рис. 30: График распределения напряженности электрического поля по пути АВ.

Из Рис. 29 и Рис. 30 видим, что при наличии одного или двух «заряженных» барьеров, напряженность электрического поля уменьшается у электрода-сферы и увеличивается в области у заземлённой плоскости по сравнению со случаем отсутствия барьеров.

Следует заметить, что полученный результат распределения напряженности электрического поля в упрощенной модели COMSOL - оценка "снизу". Это связано с тем, что после того как стримеры передали заряд на барьер и напряжение на электроде-шаре стало равно нулю (импульс прошел), от заряженного барьера возможно образование вторичных стримеров: от барьера обратно на электрод, что уменьшает снимаемый заряд с

лексана. Данный эффект был описан в [2], где было замечено, что после того как электрод с диэлектрическим покрытием подвергся серии импульсов, на его поверхности можно наблюдать остаточные самопроизвольные вспышки микрозарядов вблизи поверхности диэлектрического покрытия. Это свидетельствует о большом уровне локальной напряженности поля, создаваемого поверхностным зарядом вблизи поверхности диэлектрика, ведь разрядные процессы возможны, если напряженность поля превышает, по крайней мере, значение 24,5 кВ/см. Таким образом, заряженный барьер способен к саморазряду. Это соотносится с физическими представлениями о разряде в присутствии изоляции - собственное поле напыляемого заряда может быть равно приложенному полю.

Для наглядности продемонстрируем, как накопленный заряд на барьере лексана искажал бы поле, если бы в измерении мы получали трехкратно пятикратно увеличенный заряд. Результат показан на *Рис. 31*: при искусственном увеличении заряда в три и более раз эффект виден лучше.

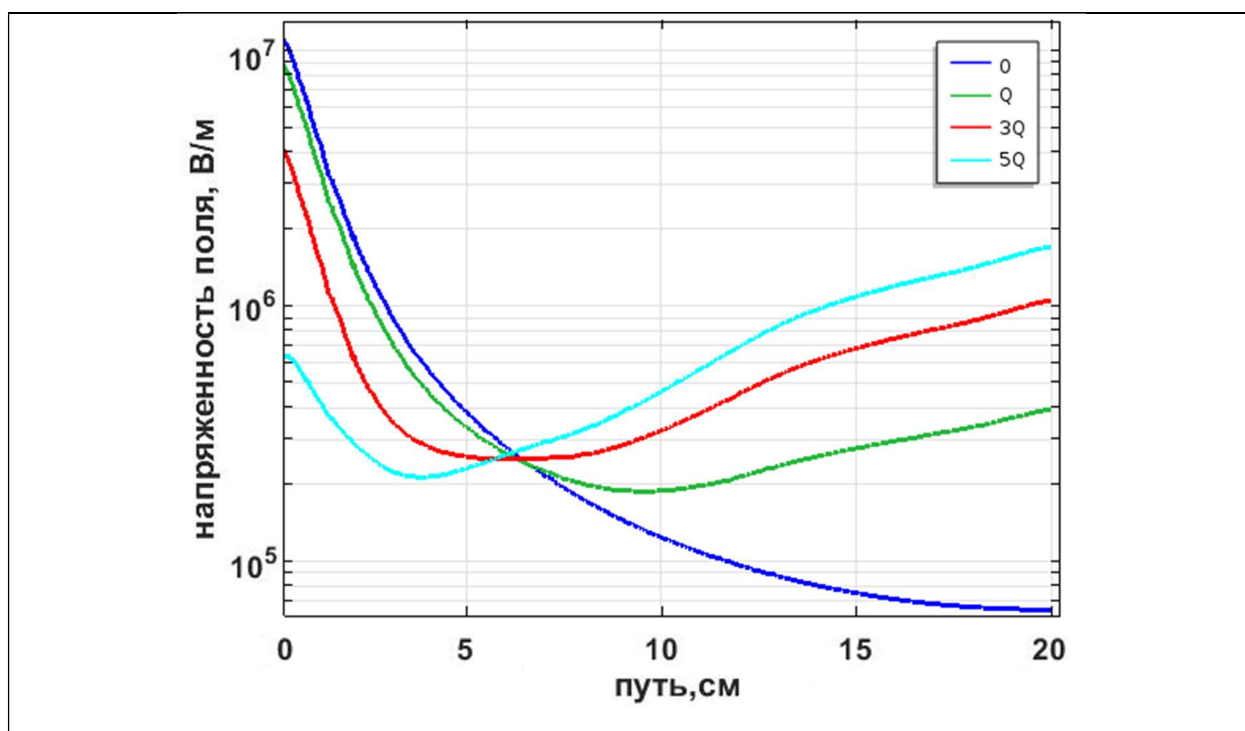


Рис. 31: График зависимости электрического поля от пути АВ при наличии двух барьеров для случаев: барьера нет (0); задается плотность распределения заряда на барьере равная полученному в эксперименте (Q); задается 3Q; задается 5Q.

Дадим объяснение полученным ранее результатам экспериментов, используя итоги упрощенного моделирования искажения напряженности электрического поля накопленным барьерами поверхностным зарядом (*Рис. 29, Рис. 30, Рис. 31*).

Из-за уменьшенной напряженности электрического поля, стримеры развиваются медленнее в области электрода-сферы, что ведет к уменьшению длин стримеров (*Рис. 21*) при наличии барьеров. Также, уменьшение поля у электрода-сферы и факт передачи

стримерами заряда на барьеры объясняет уменьшение наведенных токов на заземленную плоскость (глава 3.2.5). В свою очередь, уменьшение напряжения пробоя при наличии барьеров связано с повышенным значением поля у заземленной плоскости – когда стримеры доходят до данной области, усиленное поле ведет за собой усиленную ионизацию, что ускоряет нагрев каналов и ведет к ускоренному стримерно-лидерному переходу (глава 3.2.1). Данный результат интересно сравнить с работой [12], в которой рассматривается схожая конфигурация барьерной изоляции, но только при наличии одной диэлектрической пластины. В этой работе не рассмотрен случай, когда стримеры еще не достигли заземленной плоскости – не говорится о уменьшении длины стримеров. Однако, было получено, что при наличии барьера, перпендикулярно расположенного заземленной плоскости, стримеры достигают земли (при достаточном напряжении на электроде) быстрее, чем в случае без барьера, что согласовывается с полученным результатом повышенной величины напряженности электрического поля у заземленной поверхности.

3.3. Выводы

Наличие одного или двух твердых диэлектрических барьеров, расположенных вдоль пути распространения разрядной активности, влияют на характеристики стримеров и на стримерно-лидерный переход. Так, по сравнению со случаем без барьеров, возможно: уменьшение (и увеличение в определенном интервале расстояний для двух барьеров) напряжения пробоя; уменьшение длины стримеров, если они не достигают противоэлектрода, длина «ярких ветвей» стримеров также уменьшается; уменьшение наведенных токов стримеров. Выявлено, что использование критериев, предсказывающих возникновение стримерно-лидерного перехода в воздушном пространстве для системы с наличием барьеров, может приводить к ошибке до 11%.

Предлагается следующее объяснение: при столкновении стримеров с барьером, они передают ему заряд, который начинает искажать внешнее электрическое поле. При достаточном накопленном заряде, поле у электрода уменьшается – происходит замедление развития стримеров вблизи электрода, а у заземленной поверхности увеличивается – когда стримеры подходят близко к заземленной плоскости, усиленное поле ведет за собой усиленную ионизацию, что ускоряет нагрев каналов и ведет к ускоренному стримерно-лидерному переходу. Данная гипотеза подтверждается результатами компьютерного моделирования.

4. Барьеры расположены параллельно горизонтальной плоскости

Случай барьеров, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости, показал, что напряжение пробоя зависит от величины зазора, причем чем уже зазор – тем меньшее напряжение необходимо для возникновения стримерно-лидерного перехода. Исходя из этого, было решено проверить: если зазор будет располагаться не вдоль пути распространения стримеров от высоковольтного электрода, а перпендикулярно – повлияет это на стримерно-лидерный переход и каким образом (*Рис. 32*)? Для такой системы стримеры встречают на пути препятствие в виде диэлектрического барьера. Интересно, будет ли это влиять на напряжение пробоя и в каком направлении будут распространяться лидеры.

С практической точки зрения, данная барьерная изоляция представляет интерес при нынешнем стремлении сделать высоковольтные устройства более компактными, вследствие чего появляются воздушные зазоры небольших размеров вкупе с диэлектрическими элементами, не обязательно направленные вдоль распространения разрядной активности. В данном параграфе будет показано, что такая конфигурация является «опасной» - ее использование ведет к понижению напряжения пробоя, причем возникающие лидерные каналы движутся преимущественно в направлении существования зазора.

4.1. Конфигурация барьеров и последовательность действий эксперимента

Рассматривается система, когда между электродами находится конструкция из стекла с горизонтальным зазором (*Рис. 32* и *Рис. 33*). Конфигурация барьеров представляет собой следующую структуру: на заземленной плоскости располагается сложенные друг на друга 4 листа стекла. Используя диэлектрические «столбики», создается зазор при помощи дополнительного «пол-листа» стекла.

Барьеры представляют собой квадратные листы стекла толщиной $K=1$ см, шириной $L=50$ см. «Пол-листа» стекла имеют толщину $K=1$ см и размеры $L/2 \times L$ 25x50 см. Радиус электрода $R=0.9$ см. Межэлектродное расстояние $H=7$ см. Расстояние «пол-листа» - высоковольтный электрод $D=2$ см.

В ходе проведения эксперимента варьируется высота зазора Z путем изменения диэлектрических столбиков.

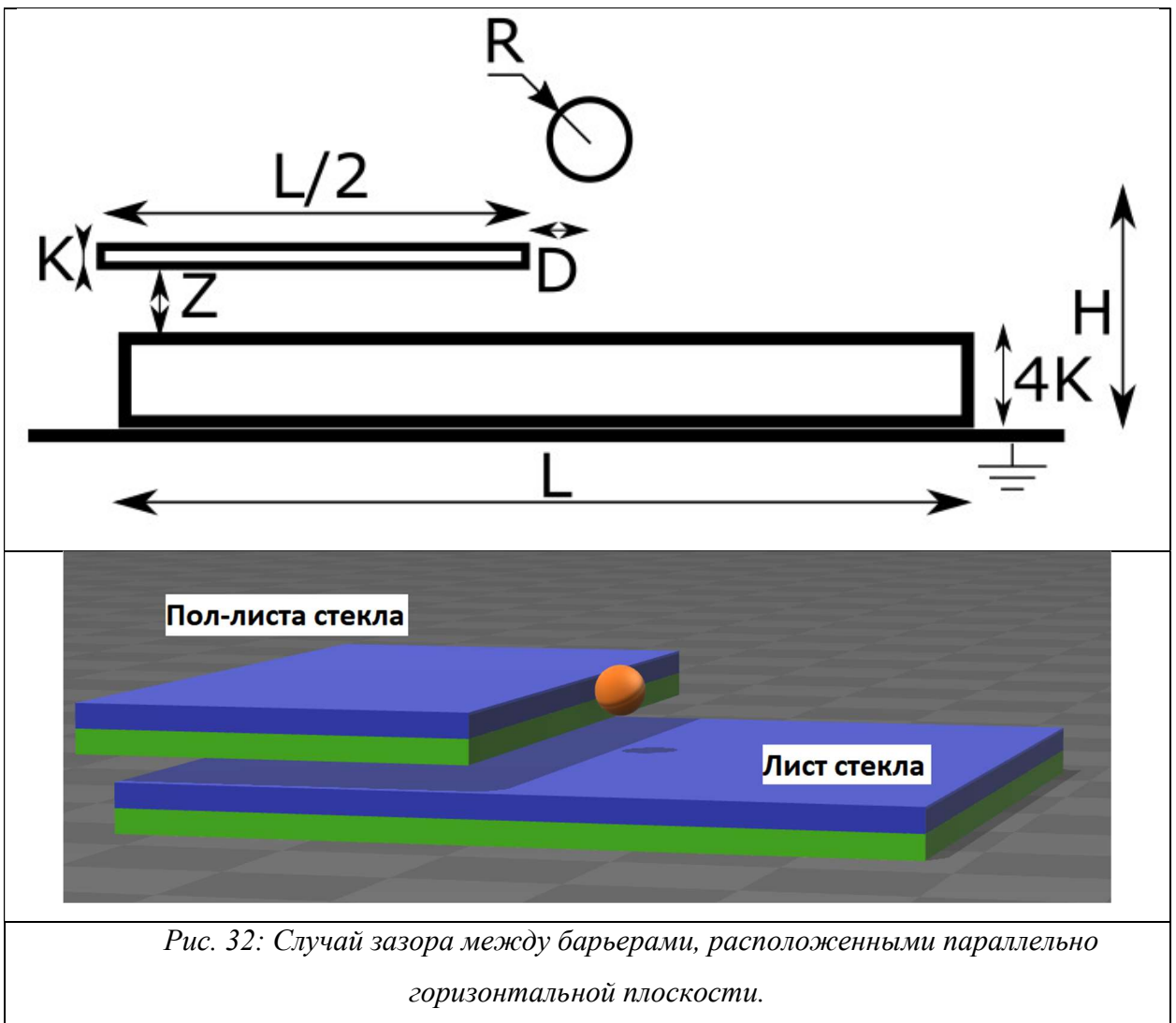
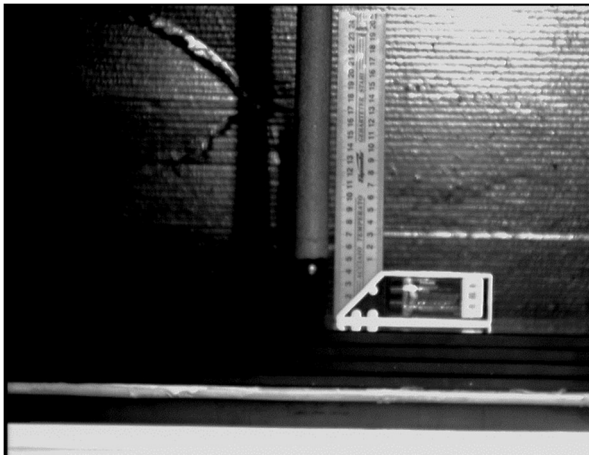



Рис. 32: Случай зазора между барьерами, расположенными параллельно горизонтальной плоскости.

Эксперимент выполняется со следующей последовательностью действий:

- Установка высоты зазора Z ;
- Запуск видеосъемки;
- Подача высоковольтного импульса;
- Сохранение кадров с разрядной активностью и соответствующими напряжениями.

При успешном прохождении опыта и при необходимости, напряжение поднимается, и все повторяется сначала. Напряжение пробоя определялось, как и в пункте 2.3.

	
<p><i>а) 4 листа стекла, зазор отсутствует</i></p>	<p><i>б) 4 листа стекла и «пол-листа» стекла, образующие зазор. Высота зазора $Z=35$ мм. Высота зазора регулируется при помощи диэлектрических «столбиков»</i></p>
<p><i>Рис. 33: Светлые кадры до начала проведения экспериментов</i></p>	

4.2. Анализ полученных результатов

4.2.1. Зависимость напряжения пробоя от высоты зазора

Примеры фотографий стримеров, полученных во время эксперимента, приведены на Рис. 34. Наблюдается, что стримерные каналы могут развиваться как в направлении зазора, так и в другие стороны.

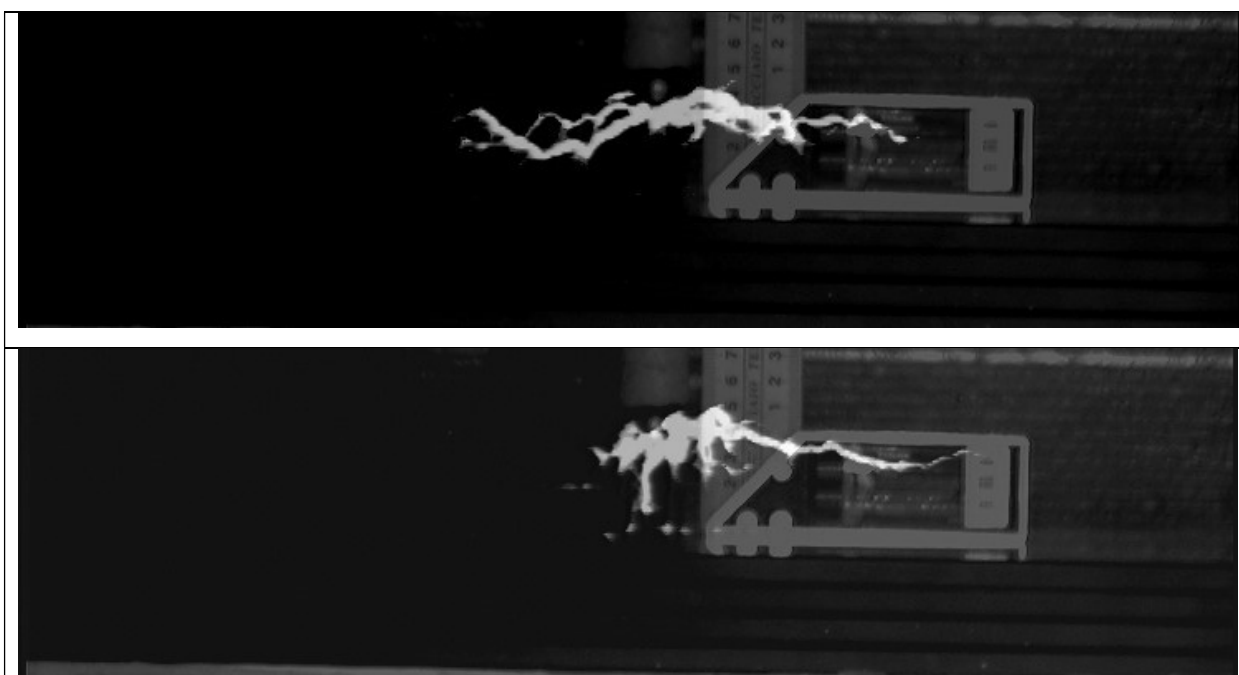


Рис. 34 а: Стримерная активность. Фотографии стримеров наложены на светлый кадр без наличия зазора. Сверху вниз: случай без зазора; $Z=5$ см.

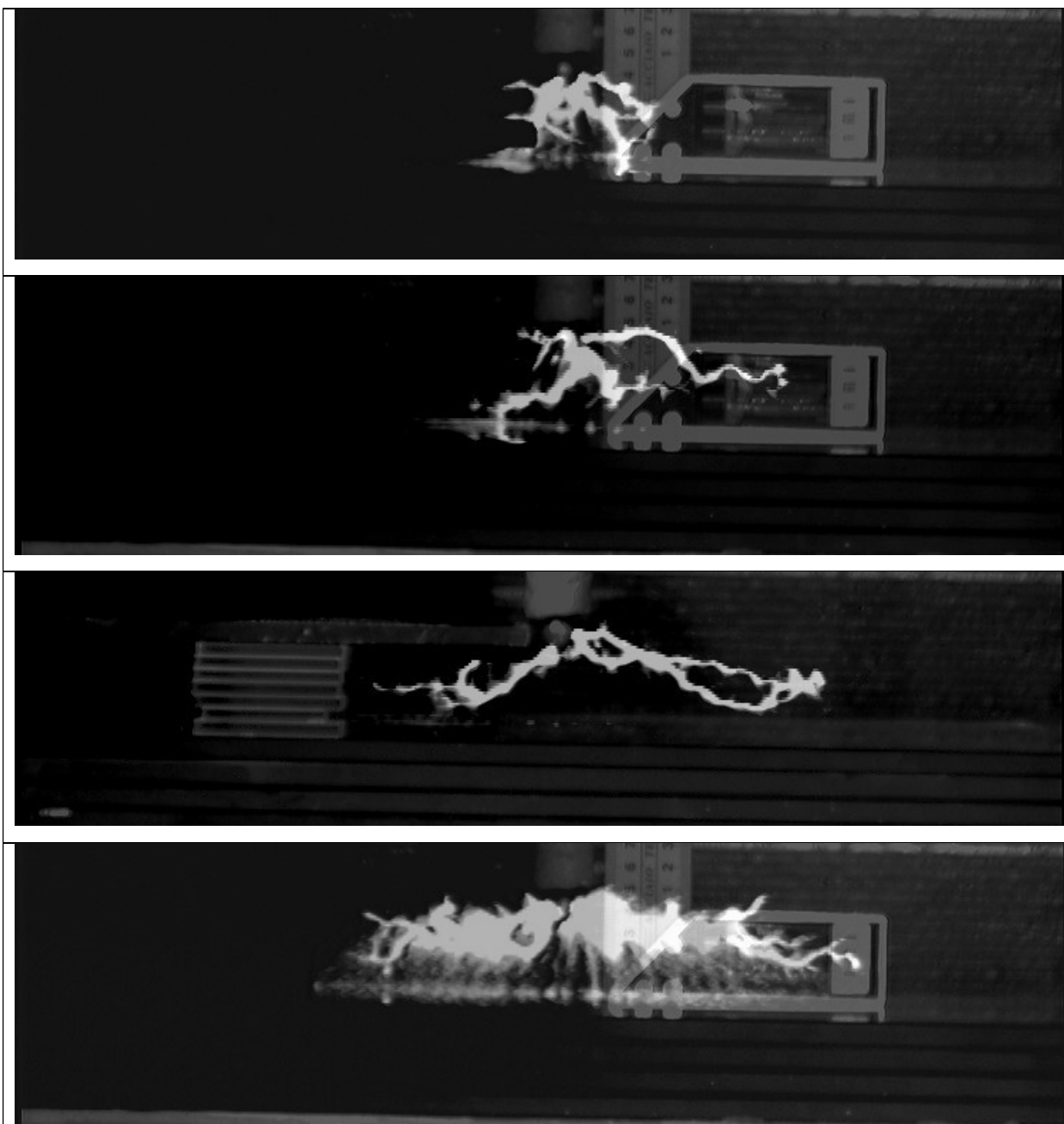


Рис. 34 б: Стримерная активность. Фотографии стримеров наложены на светлый кадр без наличия зазора. Сверху вниз: $Z=10$ см; $Z=20$ см; $Z=35$ см; $Z=50$ см. Случай $Z=35$ мм наложен на светлый кадр с соответствующей высотой зазора.

В итоге была получена зависимость напряжения стримерно-лидерного перехода от высоты Z (Рис. 35).

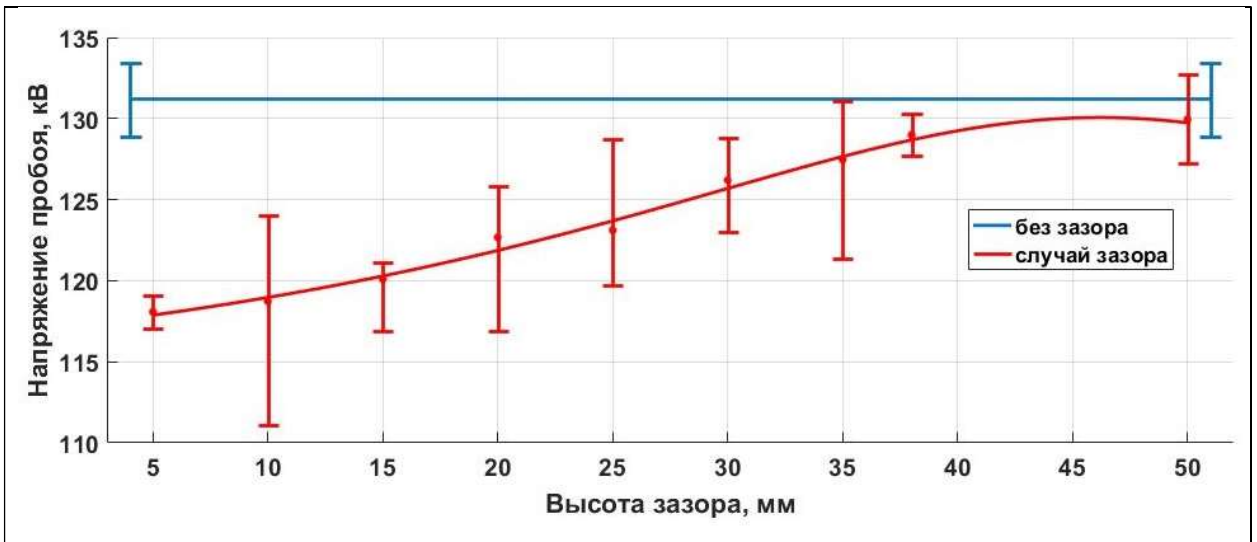


Рис. 35: Зависимость напряжения пробоя от высоты зазора. Синяя зависимость - напряжение пробоя при отсутствии зазора (без половины стекла).

Из Рис. 35 наблюдаем падение напряжения пробоя (до 18%) при наличии воздушного зазора по сравнению со случаем без него. По мере увеличения высоты зазора Z , напряжение пробоя растет и после определенного расстояния выходит в насыщение – уровень насыщения соответствует случаю отсутствия верхней половинки стекла.

Полученный результат можно попробовать объяснить тем, что, развиваясь, стримеры встречают на своем пути препятствия – «пол-листа» барьера и сам барьер на заземленной плоскости - и передают ему свой заряд. При достаточном количестве накопленного заряда, внешнее электрическое поле начинает искажаться, ускоряя процессы ионизации и тем самым – стримерно-лидерный переход, по аналогии с тем, как это было описано в разделе 3.2.6.

4.2.2. Поведение лидеров при наличии зазора

Рассмотрим, как ведут себя лидеры для рассматриваемой конфигурации барьеров (Рис. 36, Рис. 37).



Рис. 36: Фотография пробоя: камера снимает перпендикулярно зазору. Высота зазора $Z=5$ мм. $U=128$ кВ.

Для данной конфигурации барьерной изоляции фигурирует случай встречных

лидеров. Это подтверждается фотографиями (Рис. 37), где видно, что при пробое лидерные каналы «стелются» вдоль поверхности диэлектрика, а не «оггибают» его по воздушному пространству. Также, не применима формула (2) для оценки напряжения пробоя U_{breakd} . Из выражения (2) напряжение пробоя есть линейная функция от напряжения и кратчайшего межэлектродного расстояния по воздуху и для данной системы диэлектриков получается $U_{breakd}(32\text{ см}) = 185\text{ кВ}$. Данное значение не соответствует напряжению пробоя рассматриваемой системы или случаю при отсутствии зазора (без половины стекла). Это связано с тем, что (2) можно использовать при возникновении огибающих лидеров, когда для возникновения пробоя необходимо замыкание стримерами межэлектродного промежутка, а в данном случае пробой идет по механизму встречных лидеров.

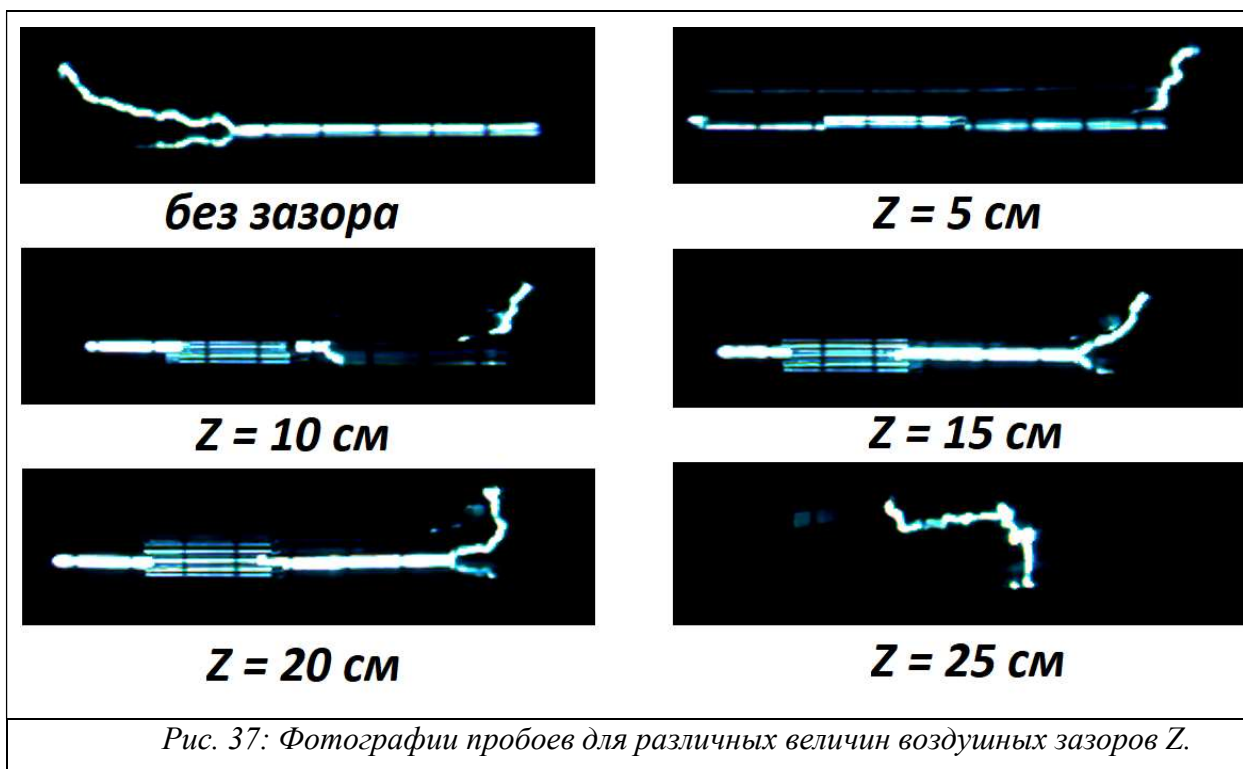


Рис. 37: Фотографии пробоев для различных величин воздушных зазоров Z .

В ходе проведения испытаний было замечено, что в большинстве случаев пробой идет в направлении зазора. Информация с фотографий лидерной активности (Рис. 37) представлена в форме графика, показывающего вероятности направления развития лидера (Рис. 38).



Логично предположить, что в системе без зазора – два электрода и лист стекла между ними – пробой может пройти в любую сторону с равной долей вероятности. Действительно, из Рис. 38 наблюдаем, что при отсутствии зазора (красный цвет) направление движения лидера равновероятно по всем направлениям. При наличии воздушного зазора между барьерами, расположенными параллельно горизонтальной плоскости, траектория движения лидерного канала направлена в сторону зазора. Скорее всего, это связано с усиленной величиной напряженности электрического поля в воздушном зазоре, ускоряющего процессы ионизации и облегчающего стримерно-лидерный переход.

4.3. Выводы

При наличии зазора между горизонтальными барьерами напряжение пробоя ведет себя схожим образом со случаем барьеров, расположенных перпендикулярно заземленной плоскости – падает по мере уменьшения зазора. Замечена тенденция направления движения лидерного канала преимущественно в направлении зазора, чем по другим свободным участкам. Видимо, это связано с усилением напряженности электрического поля в зазоре под влиянием напыляемого стримерами на барьере, вследствие чего облегчается стримерно-лидерный переход.

5. «Канал» в диэлектрике

В данном параграфе изучается влияние наличия канала (несквозного отверстия) в конструкции диэлектрического барьера (Рис. 39), расположенного параллельно горизонтальной заземленной плоскости, на напряжение пробоя и поведение лидеров. Показано, что по мере увеличения ширины канала, напряжение стримерно-лидерного перехода падает, а лидеры распространяются по каналу. Визуализирование полученного результата дается с использованием упрощенного моделирования в пакете COMSOL Multiphysics.

Интерес к данной конструкции диэлектриков связан с возможностью наличия в барьерной изоляции каналов, а также возникновении трещин при неблагоприятных условиях.

5.1. Конфигурация барьеров, метод создания «сплошного» диэлектрического барьера из отдельных листов и последовательность действий эксперимента

Конструкция из диэлектриков составлялась следующим образом (Рис. 39). Нижнее основание, располагающееся на горизонтальной заземленной плоскости, представляло собой два наложенных друг на друга листа стекла, размерами $L \times L = 50 \times 50$ см и высотой $M_2 = 2$ см. Канал образовывался посредством использования дополнительных четырех «полулистов» стекла размерами $L/2 \times L = 25 \times 50$ см, расположенных сверху «сплошных» стекол таким образом, чтобы высота канала была $M_1 = 2$ см. В ходе экспериментов, путем сближения и отдаления «полулистов» стекла, варьировалась ширина трещины D . Межэлектродное расстояние бралось равным $H = 7$ см.

Сразу отметим, что при использовании видеосъемки во всех экспериментах, видеокамеры снимают стримерную и лидерную активности перпендикулярно каналу в барьерной изоляции.

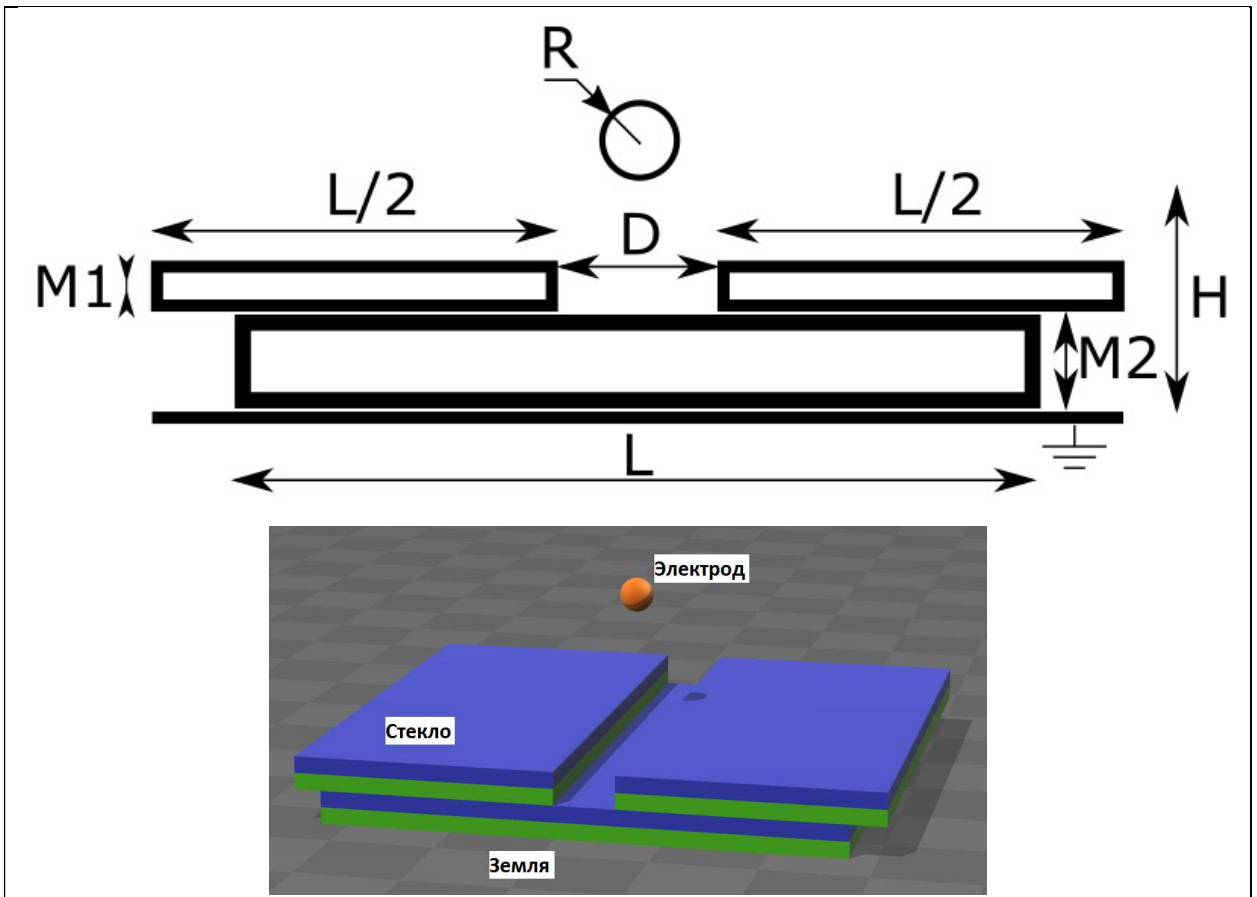
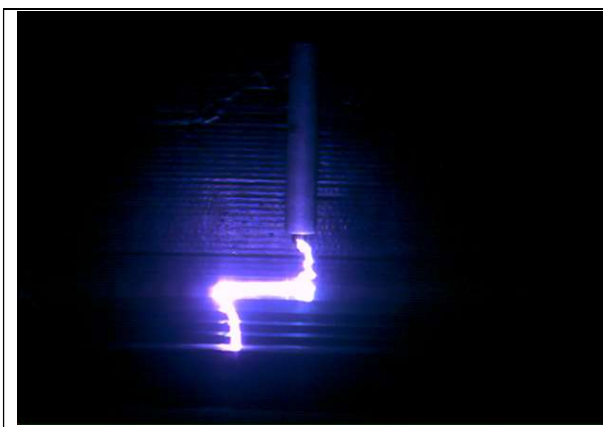





Рис. 39: Схема расположения электродов и диэлектрических барьеров, образующих канал.

Для создания «сплошного» диэлектрика, зазоры между листами стекол (кроме самого канала) заполнялись жидким диэлектриком – вазелиновым маслом. Таким образом, получившуюся диэлектрическую конструкцию можно считать «единым целым». Это делалось для предотвращения нежелательного движения лидеров при пробое не вдоль канала, а в пространстве между стеклами (Рис. 40а), и повреждения барьеров – при этом могут остаться выжженные следы (Рис. 40б), возможно разрушение стекол. Как показали результаты экспериментов, наличие или отсутствие смазки-вазелина не влияет на получаемые величины напряжения пробоя.

При использовании вазелинового масла между горизонтальными стеклами, важным было промазать все таким образом, чтобы не осталось пузырьков и воздушных областей. Иначе, возможен пробой в пространстве между стеклами (Рис. 41а) и раскол стекла (Рис. 41б). Далее будет рассмотрен вопрос о физических причинах раскола.

	
<p>а) Случай пробоя. Лидер идет не вдоль канала, а в пространстве между горизонтальными стеклами. Такую конструкцию барьера считать «сплошной» нельзя.</p>	<p>б) Оставшиеся выжженные следы после эксперимента на барьере.</p>
<p><i>Рис. 40: Проведение экспериментов без использование вазелинового масла для получения «единой» конструкции барьеров.</i></p>	

	
<p>а) Выжженные следы, оставшиеся от лидерных каналов</p>	<p>б) Раскол стекла.</p>
<p><i>Рис. 41: Примеры фотографий после проведения экспериментов при недостаточном использовании вазелинового масла.</i></p>	

В целях безопасности, из-за риска повреждения стекол, эксперимент проводился следующим образом: подавалась серия напряжений, состоящих из пяти импульсов с шагом в 2 кВ. При наличии трех или более пробоев в серии эксперимент прекращается. Это связано с тем, что имелся риск появления трещин и следов на стеклах, что приводит к непригодности использования их в дальнейшем. Даже такой аккуратных подход был опасен, ввиду того что при слишком узких ширинах канала D оставались следы от лидерных каналов и наблюдалось воспламенение вазелинового масла.

В ходе проведения эксперимента варьируется ширина канала D .

Эксперимент выполняется со следующей последовательностью действий:

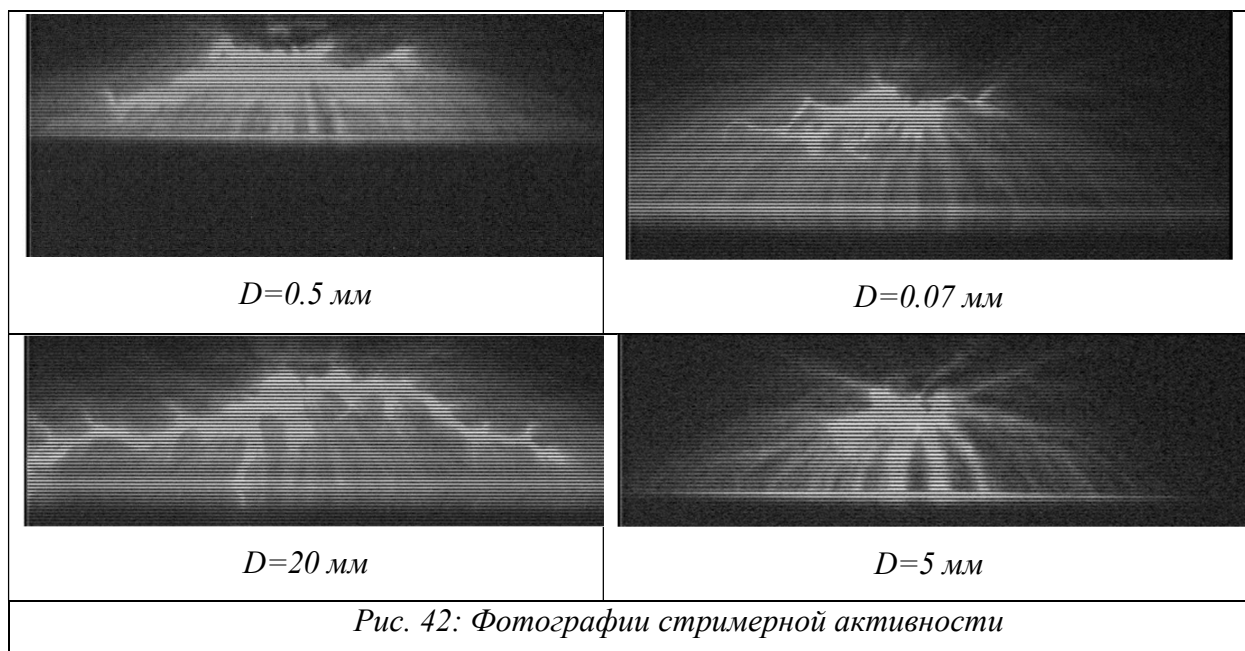
- Установка конфигурации барьеров и «смазывание» (заполнение) зазоров между листами стекол (кроме самого канала) вазелиновым маслом;
- Установка ширины канала D ;
- Запуск видеосъемки;
- Подача высоковольтного импульса;
- Сохранение кадров с разрядной активностью и соответствующими напряжениями.

После проведения испытания, при необходимости, убирались оставленные лидерами выжженные следы, происходило дополнительное смазывание зазоров вазелиновым маслом, напряжение поднималось и испытания проводились далее.

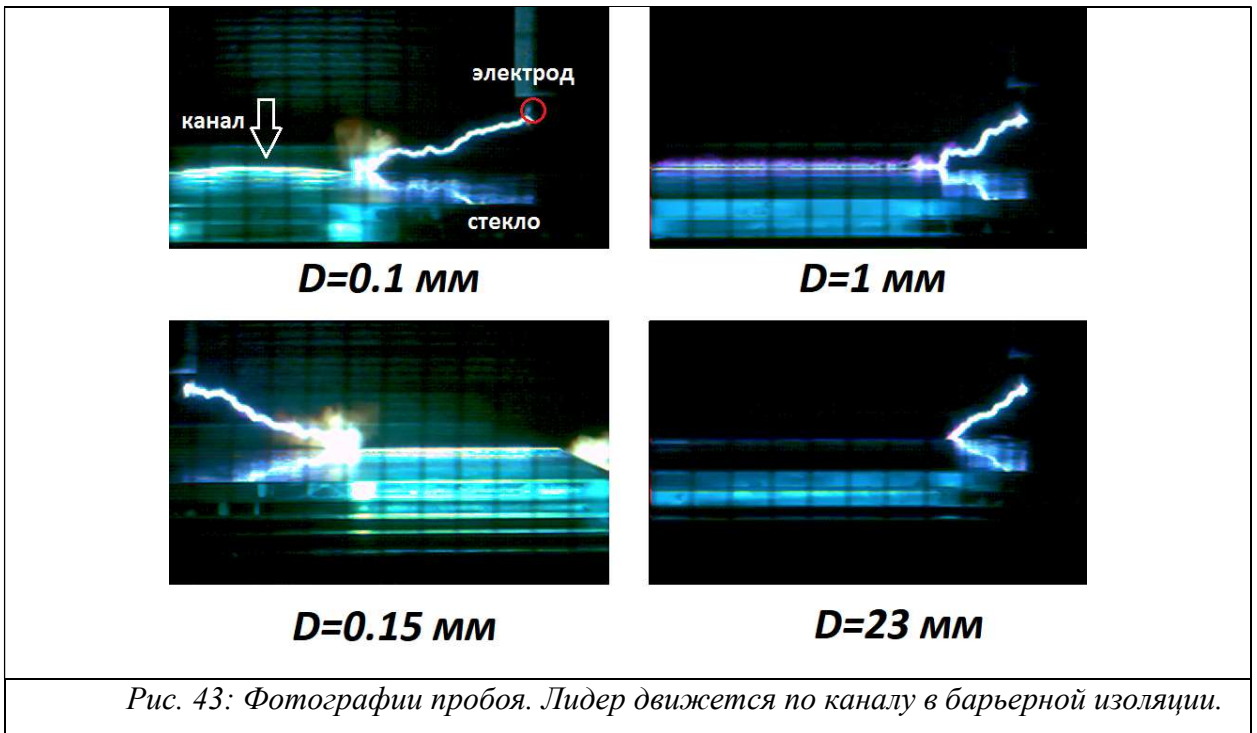
5.2. Анализ полученных результатов

5.2.1. Зависимость напряжения пробоя от ширины канала

Поскольку «толщина» барьерной изоляции в вертикальном направлении равна 4 см, и для возникновения пробоя необходима подача импульсного напряжения свыше сотни киловольт, перед возникновением пробоя наблюдается мощное развитие и распространение стримерных каналов (Рис. 42). Наблюдается, что стримерные каналы могут развиваться как в направлении зазора, так и в сторону от него.



При возникновении пробоя наблюдается, что направление движения лидерного канала четко коррелирует с направлением канала в диэлектрике (Рис. 43).



Рассмотрим зависимость напряжения пробоя от ширины канала (Рис. 44).

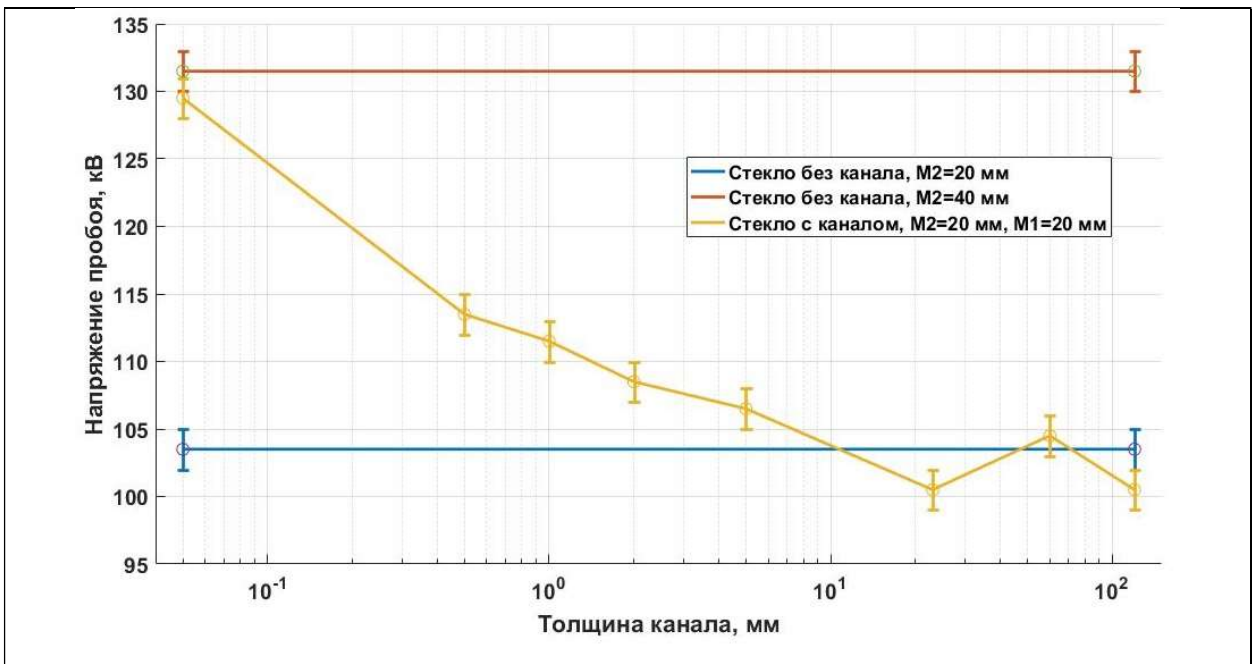


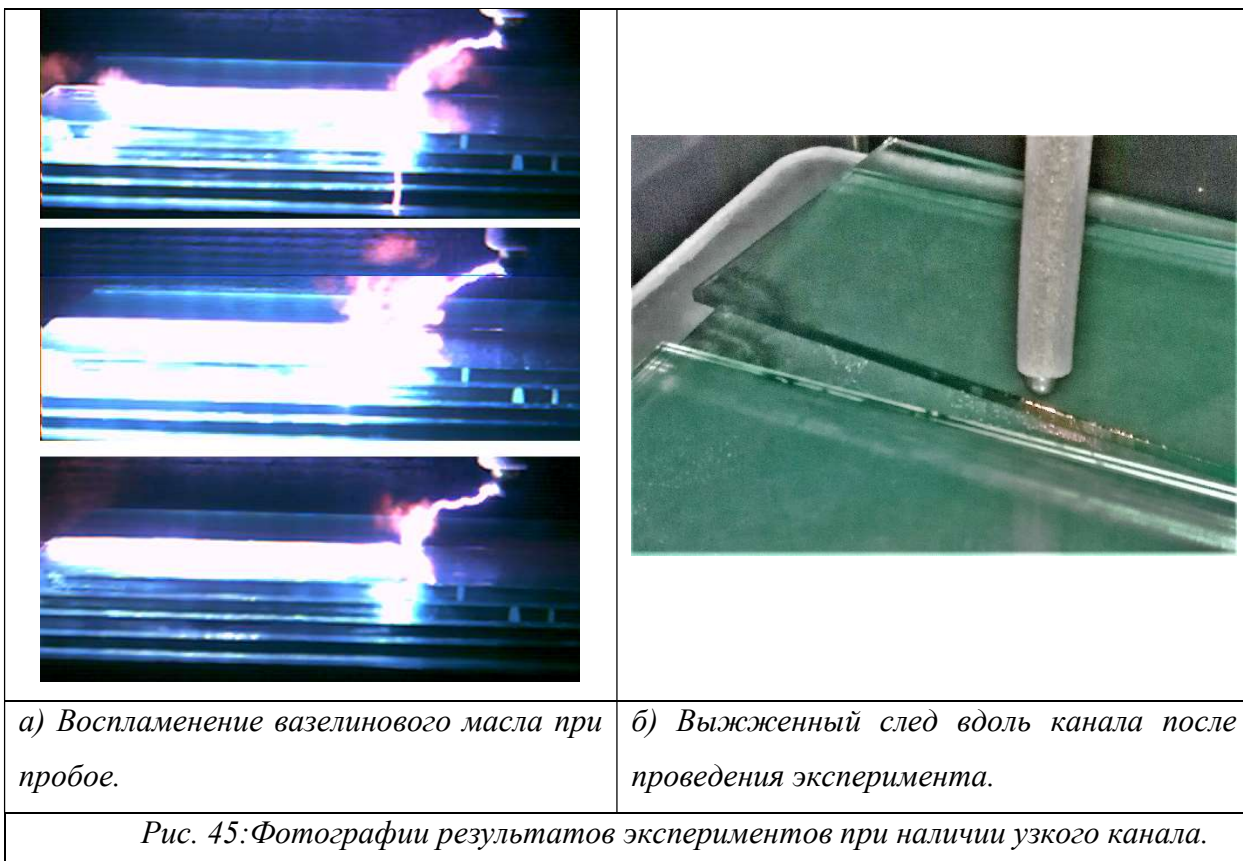
Рис. 44: Зависимость напряжения пробоя от ширины канала. Красный и синий зависимости – напряжения пробоя при отсутствии канала для случаев сплошных стекол высотой 40 мм и 20 мм соответственно.

Наблюдаем, что по мере увеличении ширины канала в диапазоне, сопоставимом с радиусом стримера, напряжение пробоя падает (до 21%), пока не выйдет на стационарный уровень, совпадающим со случаем отсутствия канала и образующих его половинок стекла, т.е. со случаем сплошного барьера толщиной $M2=20$ мм. Когда полулисты стекла, образующие канал, сдвинуты полностью таким образом, что канала нет – напряжение пробоя совпадает со случаем сплошного барьера толщиной $M2=40$ мм. Таким образом

можно сделать предположение, что увеличение ширины канала в барьерной изоляции в достаточной мере увеличивает энергию в системе таким образом, что для стримерно-лидерного перехода необходимо подать меньшее напряжение.

Сравнение случаев барьерной изоляции, образованными сплошным барьером высотой $M2=22.5$ мм и сплошного барьера $M2=6.5$ мм с каналом высотой $M1=16$ мм и шириной более 1 см, дал аналогичный результат – соответствующие напряжения пробоя получились 140 кВ и 105 кВ соответственно (разница 25%). Опять же, делаем предположение, что при наличии не слишком узкого канала напряжение пробоя определяется «минимальной» толщиной барьера $M2$.

При слишком узких ширинах канала, наблюдалось воспламенение масла (*Рис. 45а*), после проведения эксперимента оставались горелые следы (*Рис. 45б*), один раз произошел раскол стекла (*Рис. 41б*). Можно предположить, что при слишком узких каналах (меньше диаметра стримера), поперечное сечение стримера (который попадает в канал) «принимает» форму канала, вследствие чего происходит более сильный нагрев стримеров в канале, что является критерием стримерно-лидерного перехода. При возникновении лидеров, их форма искажается, а соответствующая лидеру температура возрастает. Из-за этого резкого изменения температуры в слишком узких промежутках образуются выжженные следы, также стекло может не выдержать резкого нагрева, вследствие чего возможен его раскол.



Однако, если в узких канал действительно происходит более сильный нагрев стримеров, тогда напряжение пробоя при узкой ширине должно резко падать, а затем возрастать, чего, как мы видим, не происходит. Более подробное и наглядное рассмотрение данного эффекта будет рассмотрено в моделировании задачи в Comsol.

5.2.2. Упрощенное моделирование распространения и нагрева стримерной ветви в барьерной изоляции при наличии канала

Проводилось моделирование нагрева стримерного канала в COMSOL Multiphysics в измененной постановке как канала с фиксированной проводимостью, растущего с заданной скоростью в заданном направлении в барьерной изоляции при наличии канала. Данная упрощенная модель позволяет дать оценку энергии системы и температуре стримерного канала, позволяющие более подробно понять результаты, полученные при проведении экспериментов.

Геометрия модели (Рис. 46) была взята по возможности близкой к условиям эксперимента (Рис. 39): трехмерная постановка; в воздушном пространстве (диэлектрическая проницаемость – 1) располагается электрод-сфера радиусом $R=0.5$ мм, расстояние электрод-земля $H=7.5$ мм; длина пластины $L=25$ мм; высота канала $M1=3$ мм. В ходе решения задачи, варьируются ширина канала D и высотка «сплошных» барьеров $M2$. Таким образом, геометрические размеры в компьютерной модели брались на два порядка меньше, чем при проведении экспериментов. Это связано с ограниченностью использования компьютерных ресурсов – даже для такой «маленькой» модели, для решения задачи требовалось приличное количество времени. Для физики рассматриваемых процессов данное упущение приемлемо.

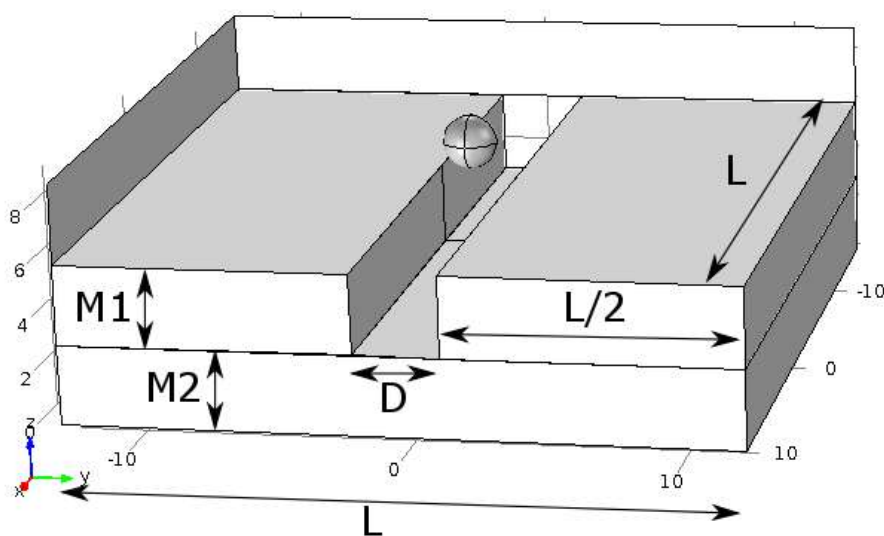


Рис. 46: Геометрия модели.

Для решения задачи используется закон сохранения заряда (7), закон Гаусса (8), уравнение теплопроводности (9) и взаимосвязь напряженности электрического поля с потенциалом (10).

$$\partial\rho/\partial t + \operatorname{div}(\sigma E) = 0 \quad (7)$$

$$\operatorname{div}(E) = \rho/\varepsilon_0 \quad (8)$$

$$\gamma c_p \partial T/\partial t + \operatorname{div}[-k\nabla T + \gamma c_p VT] = \sigma E^2 \quad (9)$$

$$E = -\nabla\varphi \quad (10)$$

где ρ – плотность заряда; t – время; σ – проводимость; E – напряженность электрического поля; ε_0 – электрическая постоянная; γ – плотность; c_p – удельная теплоемкость, φ – электростатический потенциал.

Поскольку характерные времена решения задачи малы (до 14 нс), в уравнении теплопроводности (9) отбрасывается член, отвечающий за поток тепла - учет кондуктивного теплообмена $-k\nabla T$ и диффузии $\gamma c_p VT$, т.е. считаем, что тепло из стримера распространиться не успевает. Тогда имеем из (9):

$$\gamma c_p \partial T/\partial t = \sigma E^2 \quad (11)$$

На заземленную плоскость задается условие $\varphi = 0$, на высоковольтный электрод - $\varphi = U$, где U – подаваемое напряжение.

Скорость распространения стримерной ветви по каналу в барьерной изоляции задается фиксированной, профиль проводящего канала задается функцией Гаусса (Рис. 47).

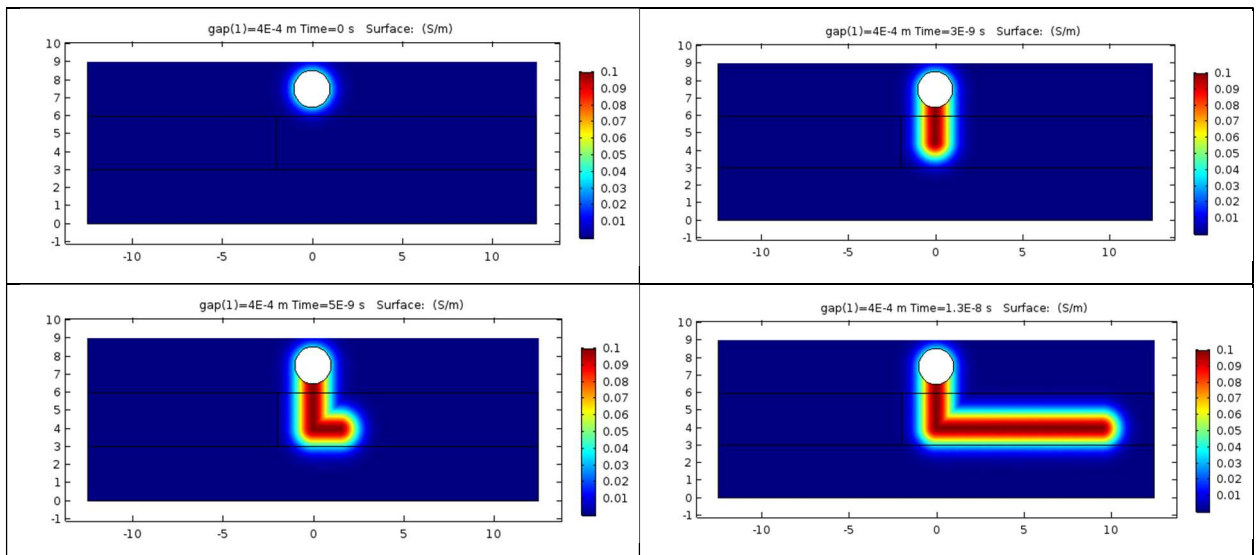


Рис. 47: Распространение стримерного канала в различные моменты времени в плоскости вдоль канала.

Для начала решим задачу при фиксированной толщине канала D , фиксированной высотой канала $M1$ и различных высотах барьера $M2$. Барьер можно представить в качестве

конденсатора. Проведенные ранее эксперименты по исследованию встречных лидеров [6] показали, что прогрев каналов осуществляется за счет емкостных токов, заряжающих барьер. Возникает конденсатор, обкладками которого служат пятна поверхностного заряда на барьере. Чем больше толщина барьера – тем меньше в нем запасенной энергии, следовательно, для возникновения пробоя необходимо подать более высокое напряжение. Это подтверждается на *Рис. 48а*. Также, из *Рис. 48б* видно, что, чем толще барьер – тем слабее нагревается стримерный канал, что тоже означает необходимость подачи большего напряжения для возникновения пробоя.

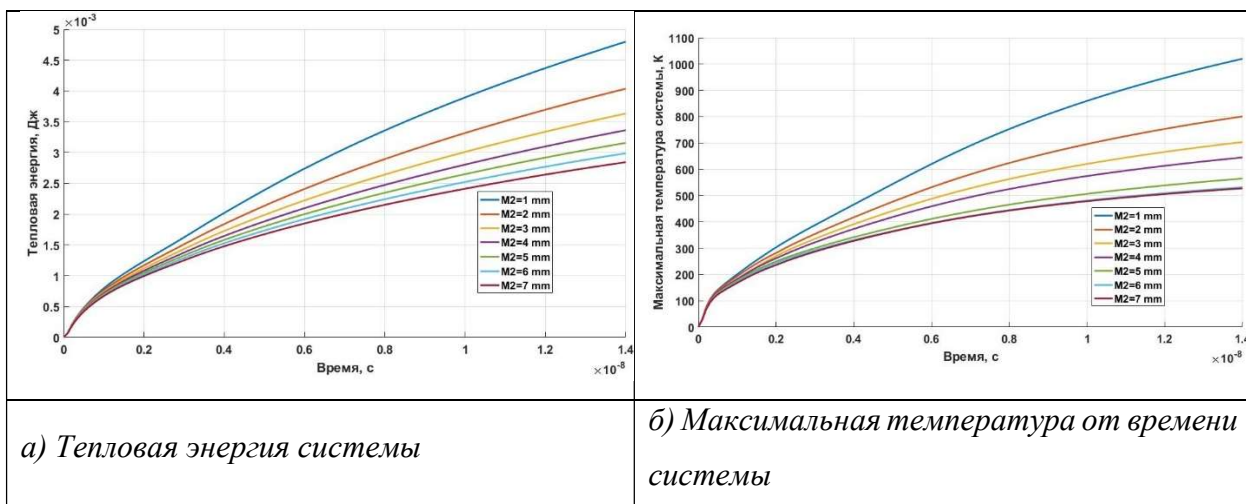


Рис. 48: Графики при фиксированной ширине канала D и различных значениях толщины барьерной изоляции $M2$.

Рассмотрим результаты решения задачи при фиксированной высоте барьерной изоляции $M2+M1$, варьируя величину ширины канала D .

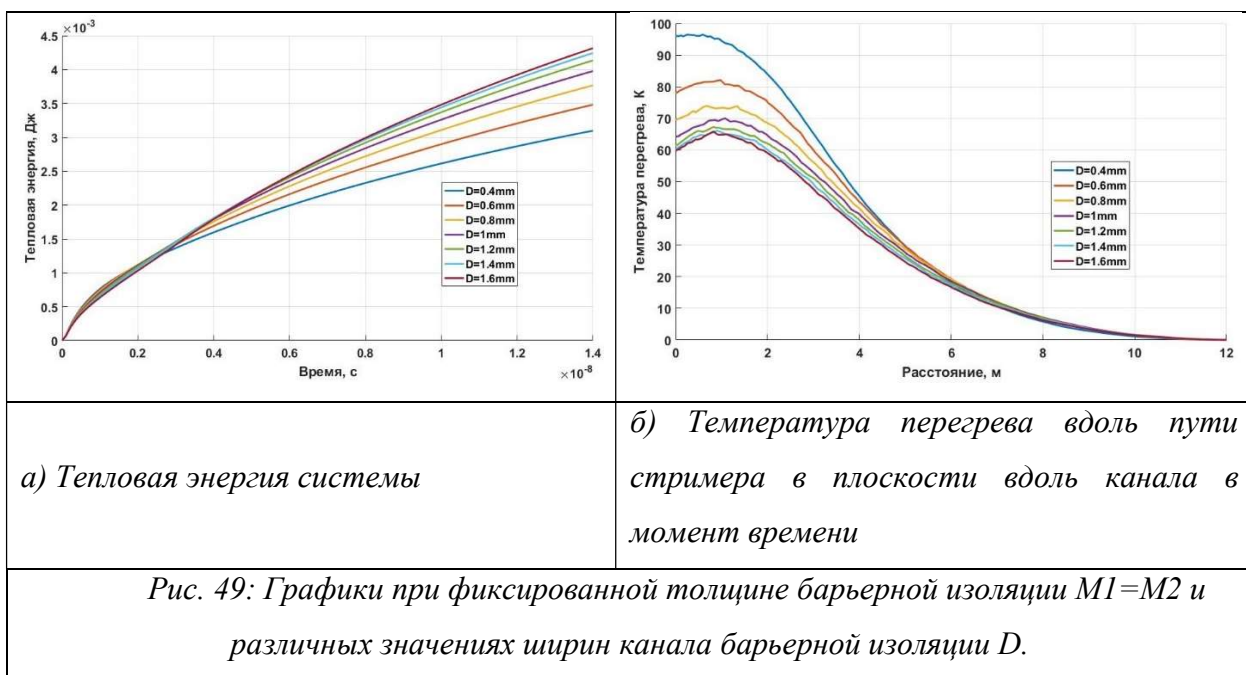


Рис. 49: Графики при фиксированной толщине барьерной изоляции $M1=M2$ и различных значениях ширины канала барьерной изоляции D .

Наблюдаем, что по мере увеличения ширины канала, энергия системы увеличивается (*Рис. 49а*), т.е. для стримерно-лидерного перехода потребуется меньшее

напряжение. Этот вывод согласуется с результатом, полученным в эксперименте (Рис. 44) и наглядно иллюстрирует его. В свою очередь, если рассмотреть температуру перегрева вдоль пути стримера для различных значений ширины канала в барьерной изоляции (Рис. 49б), наблюдается больший перегрев для узких значений ширины канала – данный эффект согласуется с выжженными следами от лидеров (Рис. 41а) при проведении экспериментов.

Таким образом, исходя из результатов испытаний и решении упрощенной модели в Comsol, можно сделать вывод о существовании двух эффектов, которые совершенно противоположно влияют на напряжение пробоя. Однако, как видно из эксперимента, перегрева стримера в узком канале барьерной изоляции не хватает для резкого понижения напряжения пробоя и результат уменьшения энергии системы при уменьшении ширины канала, ведущем к увеличению напряжения стримерно-лидерного перехода, является превосходящим.

5.3. Выводы

В случае «канала» напряжение пробоя плавно спадает по мере увеличения ширины канала до размеров сопоставимых с радиусом стримера, после чего совпадает со случаем отсутствия канала и образующих его половинок стекла. Когда полулисты стекла, образующие канал, сдвинуты полностью таким образом, что канала нет – напряжение пробоя совпадает со случаем сплошного барьера. Направление пробоя четко коррелирует с направлением канала. Оставшиеся после проведения испытаний выжженные следы и упрощенная модель в Comsol показывают, что в узком канале нагрев стримера увеличивается по сравнению с каналами большей ширины, что в свою очередь должно вести к ускоренному стримерно-лидерному переходу и меньшему напряжению пробоя. Однако, чем меньше ширина канала, тем меньше энергия системы и, следовательно, большее напряжение необходимо подать для возникновения пробоя – судя по результатам эксперимента, данный фактор является более значимым для возникновения стримерной активности, чем и объясняется постепенное падение напряжения пробоя при увеличении ширины канала.

6. Заключение

Результаты проведенных экспериментов с привлечением компьютерного моделирования для визуализации и объяснения полученных результатов показали, что наличие воздушных зазоров в барьерной изоляции влияет на разрядные процессы в воздушном пространстве при воздействии на систему стандартным грозовым импульсом напряжения:

- при наличии одного или двух твердых диэлектрических барьеров, расположенных вдоль пути распространения разрядной активности и перпендикулярно заземленной плоскости по сравнению со случаем отсутствия барьеров, характерно: уменьшение до 11% (и увеличение в определенном интервале расстояний барьер-электрод для двух барьеров до 6%) напряжения пробоя; уменьшение длины стримеров, если они не достигают противоэлектрода; уменьшение наведенных токов стримеров. Данные эффекты вызваны, скорее всего, искажением электрического поля поверхностными зарядами, напыляемым стимерами на барьеры – уменьшению напряженности вблизи активного электрода и увеличению вблизи заземленной плоскости. Выявлено, что использование критериев, предсказывающих возникновение стримерно-лидерного перехода в воздушном пространстве для системы с наличием барьеров, может приводить к ошибке до 11%;

- при наличии воздушного зазора между барьерами, расположенными перпендикулярно пути распространения разрядной активности и параллельно горизонтальной заземленной плоскости характерно: уменьшение напряжения пробоя при уменьшении высоты зазора до 18%; лидерный канал направлен преимущественно в сторону зазора;

- при наличии «канала» в барьерной изоляции, расположенного перпендикулярно пути распространения разрядной активности и параллельно горизонтальной заземленной плоскости, характерно: падение напряжения пробоя до значения, определяющегося «минимальной» толщиной барьера, при увеличении ширины канала; траектория лидера, совпадающая с направлением канала.

Выявлена общая для всех рассмотренных систем закономерность – наличие воздушных зазоров порядка нескольких сантиметров и меньше между твердыми диэлектрическими элементами приводит к снижению напряжения стримерно-лидерного перехода. Таким образом, использование рассматриваемых конфигураций твердых диэлектрических элементов в барьерной изоляции сопровождается с риском возникновения нежелательной разрядной активности, которая может привести к повреждению высоковольтных устройств и используемой изоляции.

7. Список литературы

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 3-е издание. Москва: Интеллект 2009.
2. А.В. Самусенко, Ю.К. Стишков. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург. 2011.
3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. М.:Изд-во МФТИ, 1997.
4. К. А. Прилепа, А. В. Самусенко, Ю. К. Стишков. Методы расчета пробивного напряжения воздушных промежутков в слабо- и сильно неоднородном поле. Теплофизика высоких температур, том 54, № 4, с. 1–8. 2016.
5. F. Mauseth, J. S. Jørstad. Streamer Inception and Propagation for Air Insulated Rod-Plane Gaps with Barriers. Conference: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). 2012.
6. С. Ю. Красильников, А. В. Самусенко, Ю. К. Стишков. Встречные лидеры в системах с диэлектрическим барьером. Теплофизика высоких температур, том 53, № 1, с. 1–7. 2015.
7. Козлов В.Б. Экспериментальное исследование влияния барьерной изоляции на стримерные процессы в сильнонеоднородных полях. Магистерская диссертация. СПбГУ. 2010.
8. Волгин Д.Н. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование влияния диэлектрических барьеров на стримерные процессы в воздухе. Магистерская диссертация. СПбГУ. 2011.
9. П.Н. Бондаренко, О.А. Емельянов, М.В. Шемет. Исследование одиночного барьерного разряда в субмиллиметровых воздушных промежутках. Неоднородное поле. Журнал технической физики, том 84, вып. 8. 2014.
10. Стишков Ю.К., Ковалев А.Н., Самусенко А.В., Козлов В.Б. Влияние барьера на форму и структуру коронного разряда в воздухе. Электронная обработка материалов № 4, с. 31–40 .2010.
11. M. Akyuz, L. Gao, V. Cooray. Positive Streamer Discharges along Insulating Surfaces. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 8 No.6, December. 2001.
12. V. V. Timatkov, G. J. Pietsch, A. B. Saveliev, M. V. Sokolova1 and A. G. Temnikov. Influence of solid dielectric on the impulse discharge behaviour in a needle-to-plane air gap. J. Phys. D: Appl. Phys. 38. 2005.
13. L. Trémas, O. Lesaint, N. Bonifaci, B. Ohl, F. Gentils. Breakdown in Air along Insulating Solid Surfaces of Different Natures, Parallel or Perpendicular to the Field Direction. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2016 IEEE Conference on. 2016.

14. Xiaobo Meng, Hongwei Mei, Liming Wang, Zhicheng Guan. Characteristics of Streamer Propagation along the Insulation Surface: Influence of Air Pressure and Humidity. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 24, No. 1; February. 2017.

15. C. Gomes, V. Cooray, M. Rahman. Breakdown Characteristics and Optically Visible Discharge Paths of Surface Flashover. 2012 IEEE Conference on Sustainable Utilization and Development in Engineering and Technology. 2012.

16. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. Переиздание. 2003 год.

Приложение: Удельная поверхностная и объемная сопротивления стёкол

При постановке экспериментов на ГИН важен выбор материала, из которого сделана барьерная изоляция. Используемый диэлектрик должен успеть нейтрализовать накопленный электрический заряд между подачей стандартных грозовых импульсов, чтобы обеспечить независимость испытаний - отсутствие влияния предыдущих испытаний на результаты последующих. Для проверки, подходит ли диэлектрик выдвигаемым требованиям, используется понятие максвелловского времени релаксации – времени, за которое нейтрализуется заряд, размещенный на поверхности или в объеме материала за счет его электропроводности.

Устанавливаются два требования:

1. Время релаксации должно быть меньше интервала между испытаниями (обеспечение независимости результатов испытаний).
2. Время релаксации должно быть больше длительности грозового импульса (для того чтобы на масштабе грозового импульса материал являлся диэлектриком).

Для определения времени максвелловской релаксации измеряются удельные поверхностные и объемные сопротивления диэлектриков-барьеров, зная токи, которые проходили вдоль поверхности и через объем материала.

Подходящим материалом оказалось стекло, в силу малого времени максвелловской релаксации, дешевизны и удобства использования.

<p>Поверхностное удельное сопротивление:</p> $\rho_s = R * l/d$ <p>где R —сопротивление [Ом]; l – расстояние между образцами [м]; d – толщина электродов [м]</p> <p>Соответствующее время максвелловской релаксации:</p> $\tau_s = b^2 * \varepsilon * \varepsilon_0 * \rho_s/h$	<p>Объемное удельное сопротивление:</p> $\rho_v = R * S/h$ <p>где R —сопротивление [Ом]; S—площадь электрода [м²]; h—толщина стекла [м].</p> <p>Соответствующее время максвелловской релаксации:</p> $\tau_v = \varepsilon * \varepsilon_0 * \rho_v$
<p>где b-половина меньшей стороны пластины; R=U/I; l=0.01[м]; d=0.1[м]; S=0.1*0.08=0.008[м²]; U=30[V]; h=1[см]; $\varepsilon = 4.7$; $\varepsilon_0 = 8.85 * 10^{-12}$[Ф/м].</p>	

	Поверхностная	Объемная
Стекло№1	$I = (3.6 \pm 0.2) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.2[c]$	$I = (16.7 \pm 1.7) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.06[c]$
Стекло№2	$I = (90.6 \pm 6.8) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.009[c]$	$I = (9.2 \pm 0.5) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.1[c]$
Стекло№3	$I = (12.2 \pm 0.9) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.06[c]$	$I = (10.5 \pm 1.0) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.09[c]$
Стекло№4	$I = (27.3 \pm 2.0) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.03[c]$	$I = (9.6 \pm 0.8) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.1[c]$
Пол-листа стекла №а	$I = (56.1 \pm 3.6) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.01[c]$	$I = (23.3 \pm 1.4) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.04[c]$
Пол-листа стекла №б	$I = (142.9 \pm 7.5) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.006[c]$	$I = (14.1 \pm 0.8) * 10^{-9}[A]$ $\tau \sim 0.07[c]$

Заряд на стеклянном барьере релаксирует за время большее длительности стандартного грозового импульса и меньше интервалов времени между подачей импульсов: $5 * 10^{-5}c < \tau < 5c$. Это обеспечивает независимость испытаний.