

УДК 621.311

Оптические изображения искровых каналов при растекании импульсных токов в грунте

В. В. Ивонин, А. Н. Данилин, Б. В. Ефимов, В. В. Колобов, В. Н. Селиванов,
Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон

В лабораторных условиях исследовано возникновение искровых каналов во влажном грунте у электрода при растекании импульсного тока с длительностью в диапазоне от нескольких микросекунд до сотен микросекунд при амплитуде напряжения 20—50 кВ. Разработана диагностика регистрации искровых каналов в объеме грунта. Впервые получены оптические изображения искровых каналов в грунте вблизи электродов различной формы. Подтверждено, что причиной образования искровых каналов при нелинейном растекании импульсного тока в грунте, когда происходит резкое уменьшение сопротивления заземления, является ионизационно-перегревная неустойчивость, возникающая при плотности тока на электроде больше критической. Развитие неустойчивости приводит к неоднородному распределению тока по сечению и возникновению искровых каналов.

PACS: 52.80, 51.50

Ключевые слова: заземление, молния, грунт, искрообразование, импульсный ток, сопротивление заземления, ионизационно-перегревная неустойчивость.

Введение

Заземляющее устройство является важной частью энергосистемы, задачей которого является защита ЛЭП и оборудования подстанций от перенапряжений, вызванных токами молнии. Основная характеристика заземляющего устройства — это его сопротивление, которое может сильно отличаться при протекании больших импульсных то-

ков молнии от значений стационарного сопротивления, измеренного на промышленной частоте или постоянном токе. Это явление вызвано процессами ионизации и искрообразования, возникающими в окружающем заземлителе в грунте в результате протекания импульсных токов большой амплитуды. Причиной ионизации является сильное электрическое поле проводимости, которое возникает в грунте при растекании импульсного электрического тока. Зона ионизации грунта с низким удельным сопротивлением грунта растет с увеличением амплитуды тока. Сопротивление искровых каналов меньше сопротивления грунта, в результате чего удельное сопротивление грунта уменьшается и, как следствие, — уменьшается полное сопротивление заземлителя.

Для выявления механизмов искрообразования и построения моделей снижения сопротивления грунта при искрообразовании необходима информация о характере растекания токов в грунте и образующихся искровых и дуговых плазменных каналах. Соответственно, для их исследования необходимы методики визуализации искровых каналов в грунте. Из-за непрозрачности почвы получение фотоизображений процессов искрообразования при помощи обычных фотокамер является невозможным. Поскольку искровые каналы производят различные типы воздействий, то были

Ивонин Виктор Владимирович, аспирант¹.

E-mail: ivoninviktor@mail.ru

Данилин Аркадий Николаевич, зав. лабораторией¹.**Ефимов Борис Васильевич**, директор¹.**Колобов Виталий Валентинович**, ведущий научный сотрудник¹.**Селиванов Василий Николаевич**, зам. директора¹.**Василяк Леонид Михайлович**, главный научный сотрудник².

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Ветчинин Сергей Петрович, старший научный сотрудник².**Печеркин Владимир Яковлевич**, старший научный сотрудник².**Сон Эдуард Евгеньевич**, заместитель директора².¹ Центр физико-технических проблем энергетики Севера
Кольского научного центра РАН.

Россия, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14.

² Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, д.13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2016 г.

© Ивонин В. В., Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В.,
Селиванов В. Н., Василяк Л. М., Ветчинин С. П.,
Печеркин В. Я., Сон Э. Е., 2016

разработаны альтернативные способы регистрации, например, с помощью фотобумаги или фотопленки, которые чувствительны не только к свету, но и к электрическому полю, заряженным частицам, тепловому или рентгеновскому излучению.

По данным ряда исследователей, искровая зона представляет собой несколько ветвящихся каналов различной длины с уменьшающимся сечением, заполняющих только часть объема вокруг электрода [1—4]. В силу этого плотность тока в этих каналах разряда выше, чем средняя плотность тока на поверхности искровой зоны [5]. Поэтому канал разряда, ветвясь, развивается дальше, пока у конца его ветвей напряженность электрического поля не будет меньше критической. Поскольку искровой канал с высокой проводимостью выносит потенциал электрода внутрь промежутка, а стримеры возникают на поверхности даже с однородным электрическим полем в различных местах, то поверхность, ограничивающая искровую зону, будет несимметрична относительно электрода из-за разной длины развивающихся каналов.

Рентгенография — один из наиболее распространенных методов [6—11] с использованием фотопленок или фотобумаги [9]. Эти два типа регистрации чувствительны к свету, рентгеновским лучам [7], а также электрическим зарядам. Авторы [11] утверждают, что во время ионизации грунта может возникать рентгеновское излучение.

Менее распространенный метод регистрации искровых каналов в почве описан в [12, 13], где используется электропроводящая бумага. В работе показано, что, когда искровой разряд попадает на бумагу, он разрушает верхний слой бумаги. Это приводит к появлению следов на поверхности проводящей бумаги и даже отверстий в случае пробоя. По этим следам была получена информация о распространении каналов в лабораторных и полевых условиях. Данным методом было показано, что в сухом песке ток распространяется по одному каналу с большой плотностью тока, в то время как во влажном песке ток распространяется по нескольким каналам с меньшей плотностью тока в каждом канале.

В работе [14] представлены результаты оптических исследований электрического пробоя в модельной среде из пористого диэлектрического материала, состоящего из полых стеклянных микросфер диаметром 30 мкм. Это нерастворимый белый порошок, который производится из натриево-кальциево-боросиликатного стекла, пропускающего свет. Для регистрации развития искровых каналов использовалась высокоскоростная камера Photron FASTCAM SA5. Корреляция видеоизображения с осциллограммами тока осуществлялась путем синхронизации осциллографа и

видеокамеры. Данный метод позволяет проследить различные стадии развития разряда в пористых средах при различной влажности. Большое рассеяние света слоем микросфер ограничивает пространственное разрешение и регистрацию тонкой структуры искровых каналов. Поскольку свойства среды со стеклянными микросферами не совпадают с реальными грунтами, то этот метод позволяет только частично моделировать искрообразование в реальных грунтах.

Перечисленные работы позволяют определить возникновение плазменных и искровых каналов, плотность тока, при которой начинается ионизация, и соответствующую критическую напряженность электрического поля. Однако методы, основанные на использовании фотопленки и электропроводящей бумаги, не позволяют проследить динамику развития разряда в грунте, а модельные эксперименты с прозрачными средами в большинстве случаев не соответствуют характеристикам реальных грунтов.

Поэтому целью настоящей работы является разработка методики оптической регистрации искрообразования и развития плазменных каналов в грунте. Такая методика фоторегистрации разряда позволит также получать спектры разряда на различных стадиях его развития.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исследования искрообразования проводились в стеклянном сосуде диаметром 30 см и высотой 45 см, заполненной увлажненным кварцевым песком. Средний размер частиц песка составлял 0,8—2,5 мм. Изнутри емкость была покрыта медной фольгой для создания заземленного экрана. В медном экране было сделано стеклянное окно, к которому прислонялся исследуемый высоковольтный электрод: все это обеспечивало возможность регистрации искровых процессов в толще грунта.

Регистрация проводилась с помощью цифрового фотоаппарата с открытым затвором, который устанавливался напротив окна на расстоянии 20 см. Импульсы напряжения с амплитудой до 50 кВ и длительностью фронта не более 1 мкс формировались генератором импульсных напряжений (ГИН). Для определения начала искрообразования длительность импульса регулировалась изменением параметров RC-цепочки в диапазоне от нескольких микросекунд до сотен микросекунд.

Исследования искрообразования проводились на электродах различной формы (диск, шар и угол) при массовой влажности грунта 5—20 %.

Перед экспериментом песок увлажнялся водопроводной водой и тщательно перемешивался, после чего измерялась его электропроводность по стандартной методике. Значения электропроводности соответствовали значениям, которые использовались в исследованиях других авторов в лаборатор-

ных и полевых условиях. Высоковольтный подвод к электроду был изолирован для предотвращения растекания тока. Импульсы напряжения и тока регистрировались с помощью омического делителя и токового шунта, сигналы с которых подавались на цифровой осциллограф.

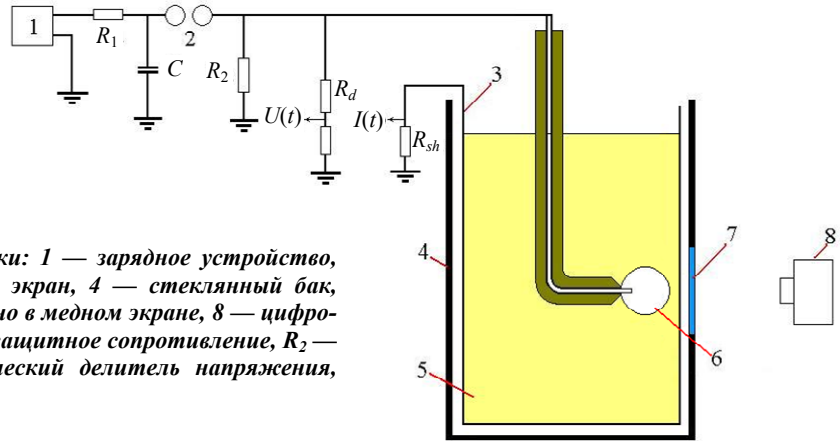


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — зарядное устройство, 2 — разрядник, 3 — заземленный медный экран, 4 — стеклянный бак, 5 — кварцевый песок, 6 — электрод, 7 — окно в медном экране, 8 — цифровой фотоаппарат, C — конденсатор, R_1 — защитное сопротивление, R_2 — формирующее сопротивление, R_d — омический делитель напряжения, R_{sh} — шунт.

Результаты

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения $U(t)$, тока $I(t)$ и кривая расчетного динамического сопротивления $Z(t) = U(t)/I(t)$ для импульса напряжения амплитудой 30 кВ, длительностью фронта 1 мкс, длительностью импульса до спада на половину амплитуды 33 мкс и электрода в виде диска диаметром 21,5 мм и толщиной 1 мм. Хорошо регистрируется начало резкого падения сопротивления заземлителя практически сразу при достижении амплитудного значения напряжения 30 кВ. Уменьшение значения сопротивления связано с возникновением искровых каналов в грунте. Минимальное значение сопротивления всегда отстает от максимального значения тока. Эта задержка возрастает с увеличением влажности грунта от 5 до 20 %. Процесс искрообразования начинается на нелинейной стадии растекания импульсного тока вблизи его максимума, когда $dU/dI < 0$, а сопротивление электрода в песке спадает почти до минимума.

Искрообразования наблюдались на диске и уголке при амплитуде напряжения 30 кВ. Опыты с различными типами электродов показали, что в случае диска и уголка процессы искрообразования начинаются при меньших значениях напряжения по отношению к сферическому электроду. Это обусловлено тем, что даже при небольших значениях напряжения на краях диска и уголка напряженность электрического поля будет много больше, чем напряженность на поверхности сферы, и будет превышать критическое значение E_c [15]. При этом динамическое сопротивление электродов падает практически в 2 раза.

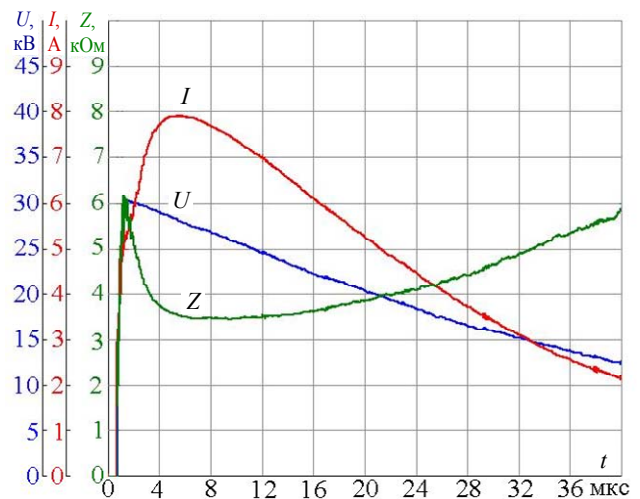


Рис. 2. Кривые напряжения, тока и расчетного динамического сопротивления. Влажность грунта 10 %.

Задержка процесса начала образования контрагированного токового канала, который нам удастся зафиксировать оптическими методами, от начала подачи импульса напряжения определяется временем развития ионизационно-перегревной неустойчивости во влажном песке [16, 17], которая больше времени развития ионизационно-перегревной неустойчивости в атмосферном воздухе. Поскольку характерные размеры областей между частицами песка примерно равны радиусу частиц и составляют порядка 1 мм, то за минимальные времена развития ионизационно-перегревной неустойчивости 5—10 мкс давление успевает выравняться. Поэтому использовалась модель ионизационно-перегревной неустойчивости в предположении постоянного давления $P = \text{const}$. Во влажном песке при испарении воды и развитии

разряда будут протекать такие же процессы, связанные с прилипанием электронов и образованием комплексных ионов, как и во влажном атмосферном воздухе [18], которые приводят к увеличению времени развития ионизационно-перегревной неустойчивости. Время развития перегревной неустойчивости определяется мощностью выделения джоулева тепла jE в грунте. Более длительные времена задержки, видимо, связаны с тем, что в грунтах ток растекается по проводящим влажным участкам, поэтому необходимы значительные энергозатраты для прогрева воды, которая обладает большей теплоемкостью, чем воздух, а также для ее испарения и последующего нагрева.

С ростом как амплитуды импульса напряжения, так и длительности импульса тока длина искровых каналов увеличивается (см. рис. 3 и 4), в результате чего уменьшается значение динамического сопротивления. Одновременно увеличивается яркость свечения искр, которая носит факельный характер, что связано с повышением энерговыклада в образующийся плазменный канал. При увеличении длительности импульсов напряжения более 70 мкс динамическое сопротивление

заземления выходит на минимальное значение, которое остается постоянным при дальнейшем увеличении длительности импульса. На дисковом электроде толщиной 3 мм образование плазменных каналов также носит факельный характер, однако плазменные каналы фиксируются при большей амплитуде напряжения и большей длительности импульсов. Ионизация на краях дисковых электродов носит многоискровой характер и наблюдается при плотностях тока $j > j_c$, где $j_c \sim 0,5 \text{ А/см}^2$ — критическая плотность тока развития ионизационно-перегревной неустойчивости, полученная из данных по динамическим ВАХ во влажном песке [15, 16]. Такая же ситуация наблюдается в газах атмосферного давления с предварительной ионизацией [16]. Время развития ионизационно-перегревной неустойчивости в газах составляет несколько микросекунд, после чего температура искрового канала повышается до 4000—5000 К и образуется термически ионизованная плазма. Во влажном песке вода и твердые частицы имеют высокую плотность по сравнению с воздухом, поэтому на развитие неустойчивости требуется больше времени для прогрева.

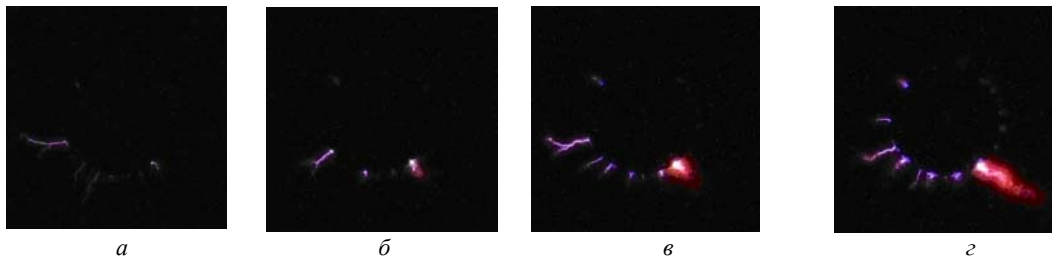


Рис. 3. Фотографии искровых и плазменных каналов вокруг диска при амплитуде напряжения $U = 42 \text{ кВ}$ и разных длительностях приложенного импульса тока: а — 2,5 мкс, б — 10 мкс, в — 50 мкс, г — 260 мкс. Влажность грунта 10 %.

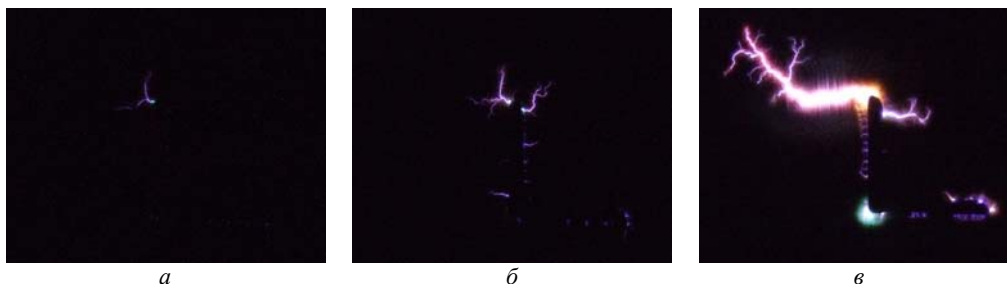


Рис. 4. Фотографии плазменных каналов вокруг уголка при амплитуде напряжения $U = 42 \text{ кВ}$ и разных длительностях приложенного импульса тока: а — 2 мкс, б — 30 мкс, в — 70 мкс. Влажность грунта 10 %.

Процессы искрообразования оптически более выражены на заземлителях в виде уголков размером $35 \times 35 \text{ мм}$ и толщиной 5 мм с резко неоднородным электрическим полем на краях (рис. 4). Процесс искрообразования начинается на электродах в местах с наибольшей плотностью тока,

где максимальны напряженность и неоднородность электрического поля. При влажности песка 10 % образование плазменных каналов носит факельный характер, как и на дисковых электродах. Однако при влажности песка 20 % образуются контрагированные искровые каналы. При ампли-

туде импульсов напряжения $U = 30$ кВ светящиеся искровые каналы были зафиксированы при минимальной длительности импульсов напряжения 1,5 мкс. В этом случае максимум импульсов тока наблюдался на осциллограммах на первой микросекунде, что намного раньше, чем достигается минимум сопротивления для уголкового электрода. Связано это с тем, что искрообразование начинается сначала на остриях, и ток начинает стекать по искровым каналам, а затем начинается искрообразование и с других областей уголка (см. рис. 4), которое и определяет суммарное сопротивление всего заземлителя. Плотности тока и напряженности электрического поля на остриях велики даже при сравнительно низких амплитудах прикладываемого импульса напряжения, и в этом случае начало искрообразования, практически, не имеет задержки по сравнению со сферическим электродом. Интенсивность искрообразования, зафиксированная оптическими методами, повышается с увеличением напряжения, поскольку увеличивается плотность тока. При увеличении длительности импульса напряжения образуются более яркие и более протяженные контрагированные искровые каналы. После образования на электроде горячей плазменной области и началом роста канала потенциал электрода выносится хорошо проводящим каналом, на границе которого происходит усиление электрического поля и образование новых искровых каналов, которые ослабляют электрическое поле у поверхности электрода, в результате чего через этот канал и протекает большая часть общего тока.

В резко неоднородном электрическом поле области ионизации вблизи поверхности электрода сильно локализованы, что при большой плотности тока $j \gg j_c$ приводит к существенному увеличению энергосклада в канал разряда. Повышение влажности грунта, а также увеличение плотности тока способствуют образованию шнуровых токовых каналов.

Все процессы при начале искрообразования в грунте, и особенно в неоднородном поле, как уже указывалось, — нелинейны. Это хорошо демонстрируют вольт-амперные зависимости, которые строятся по осциллограммам токов и напряжений, полученных в ходе экспериментов. На рис. 5 приведены ВАХ для электрода в виде диска при разных амплитудах импульсов напряжения в интервале от 25 до 50 кВ с фронтом 0,1 мкс и длительностью до полуспада 120—270 мкс.

При малых напряжениях импульсное сопротивление линейно и эквивалентно стационарному сопротивлению. При больших напряжениях вольт-амперная характеристика имеет форму гистерезиса, связанную с нелинейной характеристикой

грунта. Из рисунка видно, что, когда плотность тока превышает критическое значение на поверхности электрода, сопротивление начинает уменьшаться из-за ионизации грунта и кривые ВАХ принимают петлеобразную форму.

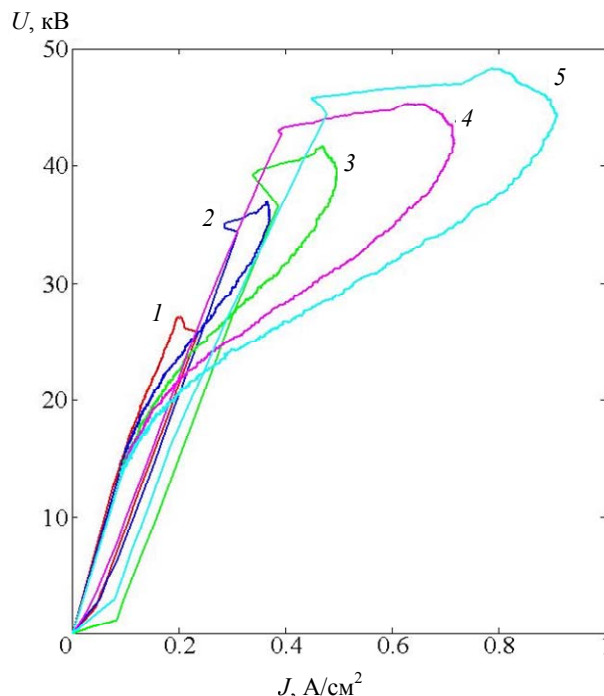


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики увлажненного кварцевого песка при разных амплитудах импульса напряжения. 1 — 28 кВ, 2 — 37, 3 — 42, 4 — 45, 5 — 48 кВ.

Определение E_c по петлеобразным вольт-амперным характеристикам, полученным из осциллограмм тока и напряжения, является наиболее точным и простым способом [15, 16]. В наших экспериментах кривые ВАХ приобретают форму петли, если приложенное напряжение превышает 30 кВ. Обратное направление кривой описывает процесс деионизации грунта, когда напряжение падает. Участок линейного роста вначале соответствует увеличению напряжения на фронте. Импульсное сопротивление заземления до точки перегиба имеет примерно такое же значение, что и стационарное сопротивление. В случае со сферическим электродом ток растекался без ионизации грунта и сопротивление оставалось неизменным.

Заключение

В работе разработана методика оптической регистрации искровых каналов в объеме грунта. Впервые получены оптические изображения искровых каналов в объеме грунта вблизи электродов различной формы при растекании импульсного тока. Возникновение искровых каналов связано с ионизацией грунта вблизи поверхности электро-

да при плотности тока больше критического значения, что приводит к резкому снижению сопротивления заземления. Причиной образования искровых каналов при нелинейном растекании импульсного тока в грунте является ионизационно-перегревная неустойчивость, которая приводит к неоднородному распределению тока по сечению и возникновению искровых каналов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 14-08-00573.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sunde E. D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems. — New York: Van Nostrand Co., 1949.
2. Корсунцев А. В. // Электричество. 1958. № 5. С. 31.
3. Tatsuro O., Muneaki H. // Mem. Fac. Engng Kyoto Univ. 1963. Vol. 25. No. 4. P. 384.
4. Анненков В. З. // Электричество. 1993. № 12. С. 15.
5. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения. — М.: Энергия, 1978.
6. Hayashi M. // The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan. 1967. Vol. 87. P. 133.
7. Hayashi M., Higuchi T. / Proceedings of Fifth International Symposium on High Voltage Engineering (Germany, 1987). P. 1—4.

8. Víctor M., Cabrera M. // Journal of Electrostatics. 1993. Vol. 30. P. 47.
9. Han X.-m., Peng M.-f., Pu B.-j., Xia C.-z., Yu J.-h., Wang Y.-f., et al. / Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2011 IEEE, 2011, P. 36—40.
10. He J., Yuan J., Zhang B. // IEEJ Transactions on Power and Energy. 2013. Vol. 133. P. 947.
11. He J., Bo Z. / Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility: APEMC (Australia, 2013) P. 94—98.
12. Zeqing S., Raghuvveer M. R., Jingliang H. / Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000 Annual Report Conference on, 2000. Vol. 2. P. 739—742.
13. Zeqing S. Doctor of Philosophy Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 2003.
14. Elzowawi A., Haddad A., Griffiths H. / 2015 Asia-Pacific international conference on lightning (APL). (Nagoya, Japan, 2015). P. 1—5.
15. Bazelyan E. M. and Raizer Yu. P. *Lightning Physics and Lightning Protection* (Bristol, IOP Publishing, 2000).
16. Ивонин В. В., Данилин А. Н., Ефимов Б. В., Колобов В. В., Селиванов В. Н., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Сон Э. Е. // Прикладная физика. 2015. № 4. С. 50.
17. Vasilyak L. M., Pecherkin V. Ya., Vetchinin S. P., Panov V. A., Son E. E., Efimov B. V., Danilin A. N., Kolobov V. V., Selivanov V. N., Ivonin V. V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vol. 48. P. 285201.
18. Ardelyan N. V., Bychkov V. L., Kosmachevskii K. V. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. Vol. 44. No. 4. DOI: 10.1109/TPS.2016.2544804.

Optical images of spark channels under a spreading pulse current in soil

V. V. Ivonin¹, A. N. Danilin¹, B. V. Efimov¹, V. V. Kolobov¹, V. N. Selivanov¹, L. M. Vasilyak², S. P. Vetchinin², V. Ya. Pecherkin², and E. E. Son²

¹Center for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of the Kola Science Center of the RAS
14 Fersman str., Apatity, Murmansk Region, 184209, Russia
E-mail: ivoninviktor@mail.ru

²Join Institute for High Temperatures of the RAS
Bld. 2, 13 Izhorskaya str. Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Received May 20, 2016

Consideration is given to the laboratory experimental investigations of spark channels occurrence in wet soil at an electrode under spreading of pulse current with pulse duration in the range from several microseconds to hundreds of microseconds at an amplitude voltage of 20—50 kV. A diagnostics of registration of spark channels in soil was developed. For the first time, optical images of spark channels in soil have been obtained. It is confirmed that the reason for the formation of spark channels on the nonlinear stage of the spreading of the pulse current in soil is an ionization-overheating instability that occurs when the current density on the electrode is more critical.

PACS: 52.80, 51.50

Keywords: grounding, lightning, soil, sparking, pulse current, grounding resistance, ionization-overheating instability.

REFERENCES

1. E. D. Sunde. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems* (Van Nostrand Co., New York, NY, 1949).
2. A. V. Korsuntsev, *Elektrichestvo*, No. 5, 31 (1958).
3. O. Tatsuuro and H. Muneaki, *Mem. Fac. Engng Kyoto Univ.* **25**, 384 (1963).
4. V. Z. Annenkov, *Elektrichestvo*, No. 12, 15 (1993).
5. E. Y. Ryabkova, *Ground Connections in the High-Voltage Installations* (Energia, Moscow, 1978) [in Russian].
6. M. Hayashi, *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan* **87**, 133 (1967).
7. M. Hayashi and T. Higuchi, in *Proceedings of Fifth International Symposium on High Voltage Engineering* (Germany, 1987). P. 1—4.
8. M. Victor and M. Cabrera, *Journal of Electrostatics* **30**, 47 (1993).
9. X.-m. Han, M.-f. Peng, B.-j. Pu, C.-z. Xia, J.-h. Yu, Y.-f. Wang, et al., in *Power Engineering and Automation Conference* (PEAM, IEEE, 2011) P. 36—40.
10. J. He, J. Yuan, and B. Zhang, *IEEJ Transactions on Power and Energy* **133**, 947 (2013).
11. J. He and Z. Bo, in *Asia-Pacific International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility: APEMC* (Australia, 2013) P. 94—98.
12. S. Zeqing, M. R. Raghuveer, and H. Jingliang, in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2000 Annual Report Conference* (2000). Vol. 2. P. 739—742.
13. S. Zeqing, Doctor of Philosophy Thesis (Department of electrical and computer engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, 2003).
14. A. Elzowawi, A. Haddad, and H. Griffiths, in *2015 Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL)*. (Nagoya, Japan, 2015). P. 1—5.
15. E. M. Bazelyan and Yu. P. Raizer, *Lightning Physics and Lightning Protection* (Bristol, IOP Publishing, 2000).
16. V. V. Ivonin, A. N. Danilin, B. V. Efimov, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, and E. E. Son, *Prykladnaya Fizika*, No. 4. 50 (2015).
17. L. M. Vasilyak, V. Ya. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, E. E. Son, B. V. Efimov, A. N. Danilin, V. V. Kolobov, V. N. Selivanov, and V. V. Ivonin, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48**, 285201 (2015).
18. N. V. Ardelyan, V. L. Bychkov, and K. V. Kosmachevskii, *IEEE Transactions on Plasma Science* **44** (4), (2016); DOI: 10.1109/TPS.2016.2544804.