

# Физика плазмы и плазменные методы

УДК 621.311

## Электрический пробой при растекании импульсного тока в песке

Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, В. А. Панов, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон

*Экспериментально исследованы процессы растекания импульсного тока с шаровых электродов и электрический пробой в кварцевом песке. При плотностях тока на электроде больше критической величины происходит нелинейное уменьшение сопротивления заземления в результате искрообразования в грунте. Определены значения критической напряженности электрического поля ионизации и пробоя. Показано, что на электроде развивается ионизационно-перегревающая неустойчивость, которая приводит к контракции тока и образованию плазменных каналов.*

PACS: 52.80.-г; 51.50.-b

*Ключевые слова:* заземлитель, сопротивление заземления, импульсный коэффициент заземлителя, критическое поле ионизации.

### Введение

Интерес к растеканию больших импульсных токов и возникновению электрического пробоя в грунте в настоящее время связан с необходимостью усовершенствования систем молниезащиты и защиты оборудования передающих сетей от перенапряжений [1], а также с исследованиями строения земной коры с помощью мощных импульсов тока, например, от взрывомангнитных генераторов [2]. При ударе молнии возникает быстрорастущий многокилоамперный ток, который воздействует на грунт и вызывает искрообразование, в результате чего и свойства грунта и характеристики заземления могут значительно отличаться от величин, полученных при протекании стационарного тока.

До сих пор нет понимания физики процессов пробоя и формирования плазменных каналов при растекании больших импульсных токов в

грунте. При оценке параметров перенапряжений при проектировании систем молниезащиты за базовые значения принимаются расчетные и опытные данные по сопротивлению заземления, полученные при растекании слабых низкочастотных токов. Кроме того, используется модель однородного распределения протекающих токов в земле, а искрообразование учитывается по простейшей модели увеличения эффективного размера заземлителя [3, 4]. При возникновении в грунте плазменных каналов величина тока на защищаемые элементы может многократно превышать значения, рассчитанные по модели однородного растекания тока.

Решение данной проблемы особенно актуально в настоящее время в связи с массовым внедрением в энергетику информационных и управляющих систем на основе микроэлектроники, имеющей повышенную чувствительность к возникающим перенапряжениям.

С помощью тока, в той или иной степени имитирующего ток молнии, давно проводятся лабораторные и полевые испытания заземлителей в различных грунтах [5—9]. При росте тока наблюдается заметное снижение удельного сопротивления грунта  $\rho_0$  и импульсного сопротивления заземления  $Z$  по сравнению с его стационарным значением  $R_0$  [3, 4, 10], полученным при слабом постоянном токе. При увеличении амплитуды импульсного тока начинается ионизация вблизи заземлителя, переходящая в искрообразование.

---

Василяк Леонид Михайлович, гл. научный сотрудник.  
Ветчинин Сергей Петрович, вед. научный сотрудник.  
Панов Владислав Александрович, ст. научный сотрудник.  
Печеркин Владимир Яковлевич, ст. научный сотрудник.  
Сон Эдуард Евгеньевич, зам. директора.  
Объединенный институт высоких температур РАН  
(ОИВТ РАН).  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13/2.  
Тел.: +7 (495) 484-18-10. E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Статья поступила в редакцию 14 августа 2014 г.

---

© Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Панов В. А.,  
Печеркин В. Я., Сон Э. Е., 2014

Упрощенная модель связывает уменьшение сопротивления заземлителя с увеличением его эффективного радиуса из-за процессов ионизации в грунте [3, 4, 10]. При анализе импульсных сопротивлений заземлителей при проведении натурных испытаний используют импульсный коэффициент заземлителя  $\alpha = Z/R_0$ , равный отношению сопротивлений заземления при импульсном и слабом постоянном токах. Импульсный коэффициент  $\alpha$  степенным образом зависит от параметра  $\rho_0 I_m / L$  [3, 4], где  $L$  — длина заземлителя,  $I_m$  — максимальное значение импульсного тока. Параметр  $\rho_0 I_m / L$  имеет условный смысл и не отражает физику процесса. Импульсное сопротивление заземления в слабопроводящих грунтах при килоамперных токах может уменьшаться больше, чем на порядок. Заметное отклонение  $\alpha$  от единицы, связанное с искрообразованием, наступает при увеличении напряженности электрического поля вблизи электрода до критического значения  $E_c$ . Импульсное сопротивление обычно вычисляют как отношение максимума напряжения на заземлителе к максимуму тока через него. В общем случае эти максимумы не совпадают во времени, причем реальный временной сдвиг может быть весьма существенным.

В таблице приведены значения  $\rho_0$ ,  $L$ ,  $I_m$  и  $\alpha$ , полученные при полевых испытаниях стержневых заземлителей, а также величина критического поля  $E_c$ , при котором начинается искрообразование в песчаном грунте.

грунте, характерных для токов молнии, возможны в случае сохранения плотности тока у поверхности заземлителя. Такой подход позволяет при существенно меньших токах изучить физические процессы, характерные при реальном растекании тока молнии в грунте.

В настоящее время выполнен ряд исследований изменения удельного сопротивления при искрообразовании в грунте вблизи заземлителя. Для некоторых типов электродов определены значения критической напряженности электрического поля  $E_c$  и ток, при которых начинается искрообразование. В существующей теории им в соответствие ставится радиус ионизации почвы. Однако, современные теоретические представления о режимах работы заземляющих устройств, как отмечалось в [16], не могут объяснить несоответствие между теоретическими значениями импульсных сопротивлений, вычисленных на основе радиуса ионизации, и опытными данными. Одной из причин таких расхождений является нелинейная зависимость напряженности электрического поля в грунте от плотности тока, даже в том случае, когда искрообразование не наблюдается. Этот эффект наиболее выражен в глинистых грунтах. В песчаных грунтах начальная вольтамперная характеристика почти линейна, что позволяет изучить непосредственно влияние ионизации на импульсное сопротивление заземления.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования растекания импульс-

Таблица

Параметры вертикальных стержневых заземлителей в песчаном грунте по результатам полевых испытаний

№ п/п	$\rho_0$ , Ом м	$L$ , м	$I_m$ , кА	$E_c$ , кВ/см	$\alpha$	Источник	Примечания
1	910	3	3,5—68,4	8,9	0,76—0,17	[11]	4 стержня, соединенные через 2 м
2	200	1	48—88	—	0,083—0,032	[12]	Искровые каналы на поверхности
3	500	2,5	40	—	0,3	[13]	
4	50	0,61	13	22,4	0,19	[14]	
5	240	2,46	8	14,4	0,25	[15]	
6	500	0,5—5	1—5	10,3	0,68—0,055	[8]	

Задача о растекании импульсного тока аналитически решена только для линейных сред и электродов простейшей конфигурации. В реальности изменение характеристик заземлителей при протекании импульсного тока происходит на нелинейной стадии, когда начинается ионизация. Как показано в [3, 16], искрообразование зависит от плотности тока и удельного сопротивления грунта.

Лабораторное моделирование и исследования процессов растекания импульсных токов в

ного тока и возникновения электрического пробоя в кварцевом песке.

### Эксперимент

Исследования растекания тока с шаровых электродов с диаметрами от 1 см до 6 см проводились в кварцевом песке в диэлектрическом баке диаметром 60 см. Металлические шары погружались в песок на половину диаметра для исследования растекания тока с полусферы и на глубину 4—6 см для исследования пробоя в песке. Влажность

песка изменялась от 3 до 20 %, чему соответствует изменение  $\rho_0$  в диапазоне 4000—200 Ом·м. Импульсы напряжения с коротким фронтом при скорости нарастания около 100 кВ/мкс и временем спада на полувысоте 5 мс подавались на электрод через балластное сопротивление  $R_b$  для ограничения тока. Динамика импульсных токов и напряжений регистрировались 4-канальным осциллографом Tektronix DPO 7054.

### Результаты и обсуждение

В предпробойной стадии, начиная с некоторого момента времени, на осциллограммах фиксируется появление максимума тока, который всегда сдвинут относительно максимума напряжения в сторону больших времен. С увеличением влажности песка временной сдвиг возрастает.

При пробое по осциллограммам определялись пробойный ток, пороговое напряжения пробоя  $U_b$  и время задержки пробоя  $\tau_b$ . Использование длинных миллисекундных импульсов позволяет проследить медленные стадии развития разряда в грунте, которые ранее не наблюдались при микросекундных высоковольтных импульсах. Минимум динамического сопротивления заземлителя  $Z(t)$  появляется позднее максимума импульса тока и указывает на процесс ионизации в грунте.

Импульсный коэффициент заземлителя  $\alpha$  определялся по сопротивлению заземлителя  $Z(t)$ , соответствующего максимуму импульсного тока:  $Z = U(I_m)/I_m$ , когда  $dI/dt = 0$ , в отличие от ранее принятого способа, когда  $Z = U_m/I_m$ , и максимумы напряжения и тока не совпадают по времени. Сопротивление заземлителя является чисто омическим и  $\alpha = \rho/\rho_0$  и зависит от плотности тока на электроде  $j_0$  степенным образом (рис. 1). Значения  $\alpha$  заметно падают и становятся меньше единицы при плотности тока  $j_0 > j_c$ . Вычисленная критическая плотность тока, при которой начинается ионизация на электроде, равна  $j_c \approx 0,1$  А/см<sup>2</sup>, а по данным работы [17]  $j_c \approx 0,5$  А/см<sup>2</sup>. Разница между этими величинами объясняется различным удельным сопротивлением грунта  $\rho_0$ . Полученные отсюда значения критического поля ионизации  $E_c = \rho_0 j_c$ . Равны, соответственно, 10—12 кВ/см и 15—17 кВ/см. Предложенный метод позволяет определить критическое поле  $E_c$  простым способом.

До настоящего времени нет единой методики определения величины  $E_c$ , которое является одной из основных характеристик, определяющих процесс искрообразования. Наиболее последовательным с физической точки зрения является метод, который позволяет проанализировать и наглядно показать нелинейности ВАХ грунта, связанные с ионизацией и искрообразованием по

петлеобразным кривым ВАХ. [9, 17]. Из наших экспериментальных данных следует, что при  $j_0 > j_c$  качественно изменяется вид ВАХ.

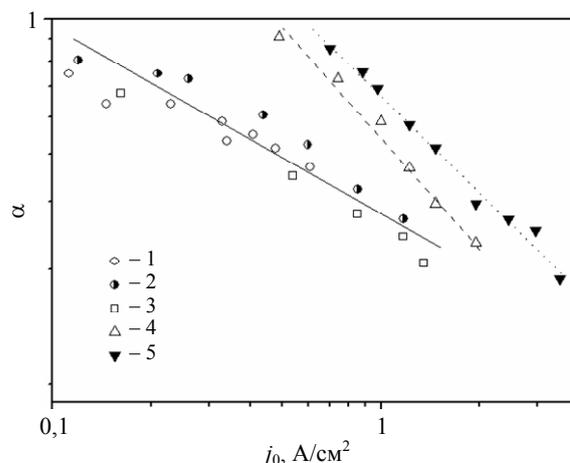


Рис. 1. Зависимость импульсного коэффициента заземлителя  $\alpha$  от плотности тока на электроде: 1—3 результаты данной работы, 4, 5 построены по данным работы [17] при влажности 2 % и 4 %, соответственно

На рис. 2 точками показаны экспериментальные ВАХ (линии 1, 2, 4) и сплошной линией вольтамперная кривая 3 [17]. Обратный ход петель связан с деионизацией грунта и падением напряжения на электроде. Начальный участок ВАХ отвечает росту напряжения на переднем фронте высоковольтного импульса. На начальном участке выполняется закон Ома вплоть до точки перегиба, и сопротивление заземлителя, практически, не отличается от стационарного. Начальные участки кривых 1 и 2 при малых токах имеют заметные погрешности из-за наводок, поэтому они не приведены.

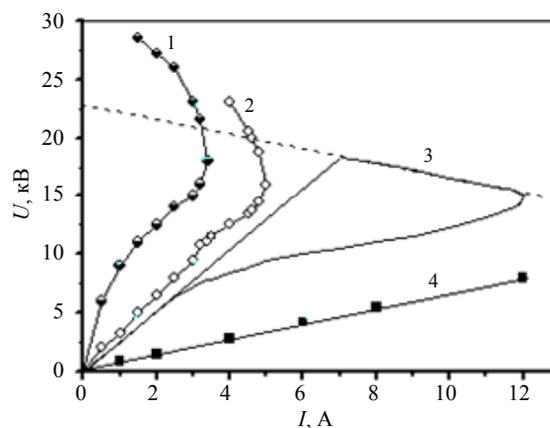


Рис. 2. Вольтамперные характеристики растекания тока с полусферических электродов диаметрами: 1 — 4 см, 2 — 2 см, 3 — 2,54 см [17], 4 — 6 см. Влажность песка: 1, 2 — 10 %, 3 — 4 %, 4 — 20 %

Появление области с падающей ВАХ ( $dU/dI < 0$ ) на каждой из петель указывает на развитие

неустойчивости по отношению к малым флуктуациям тока. При выполнении условия  $-dU/dl > R_\phi$  вблизи поверхности электрода развивается ионизационно-перегревная неустойчивость, которая приводит к контракции тока в песке. Развитие аналогичной неустойчивости также происходит в объемных разрядах в газах атмосферного давления, которые сопровождаются прорастанием яркосветящихся токовых каналов [18—21]. Контракция приводит к резкому увеличению плотности тока в образующемся токовом канале.

В предыдущих исследованиях не обращали внимание на то, что вблизи поверхности электрода в грунте может возникнуть ионизационно-перегревная неустойчивость. Именно неустойчивость является основной причиной образования плазмы, контракции тока с последующим искрообразованием, что и приводит к резкому уменьшению импульсного сопротивления заземлителя. Предложенное выше условие позволяет однозначно определить критическую напряженность поля ионизации  $E_c$  по точке касания нагрузочной кривой  $U = U_0 - IR_\phi$  и ВАХ (рис. 2), где  $U_0$  — зарядное напряжение. Значение критической напряженности поля ионизации  $E_c$ , согласно рис. 2, хорошо согласуются со значениями  $E_c = \rho_0 j_c$ .

При исследовании пробоя в песке в качестве токоприемника использовались медные кольца различного диаметра. Обнаружено, что пробой коротких (менее 3 см) и длинных (более 10 см) промежутков в мокром песке происходит по разным механизмам. Измеренные времена задержки в коротких промежутках примерно такие же, как при пробое в атмосферном воздухе, что позволяет предположить, что пробой происходит по стримерному механизму. При пробое длинных промежутков наблюдается длительная предпробойная стадия (~ 0,3—1 мс), в течение которой в разрядном промежутке медленно нарастает ток до нескольких ампер, что связано с термическим разогревом воды и увеличением проводимости грунта. Предпробойная стадия сильно зависит от величины приложенного напряжения и меняется на два порядка при изменении напряжения на промежутке от 22 до 36 кВ. При  $R_\phi > 1$  кОм пробой в мокром песке не происходит, и наблюдается лишь растекание импульсного тока. В отличие от лидера молнии, канал в грунте разогревается и прорастает за счет токов проводимости, протекающих через его боковую поверхность. При большом балластном сопротивлении величины тока разряда не хватает для термического разогрева и формирования канала разряда в всем промежутке.

На рис. 3 показана зависимость средней величины напряженности электрического поля  $E_b$

при возникновении пробоя в песке с разной влажностью от длины промежутка. Если среднее электрическое поле в промежутке меньше  $E_b$ , то пробой грунта не происходит, и наблюдается обычное растекание тока от электрода. В коротком промежутке величина среднего поля при пробое  $E_b$  практически совпадает с величиной критического поля ионизации  $E_c$ . В сухом песке  $E_b \approx 12$  кВ/см, с увеличением длины промежутка и влажности значение  $E_b$  падает. С увеличением длины промежутка величина среднего поля при пробое уменьшается, и в промежутках с  $d > 10$  см  $E_b$  выходит на значение  $\approx 2$  кВ/см, которое слабо зависит от влажности песка. Как известно, при пробое длинных разрядных промежутков в воздухе по мере прорастания лидера среднее поле в его канале также падает. В канале положительного лидера длиной 10 м в воздухе средняя напряженность электрического поля равна  $\approx 2$  кВ/см [1]. В длинных промежутках в грунте, так же как и в длинном лидере в воздухе, величина  $E_b$ , по-видимому, постоянна (1—2 кВ/см), и условия пробоя грунта определяются в основном проводимостью почвы и площадью заземленного электрода.

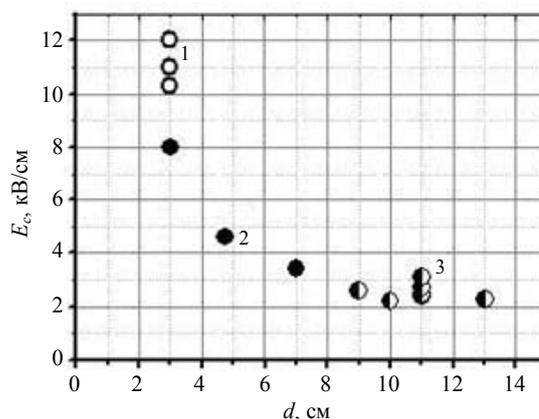


Рис. 3. Зависимость среднего поля пробоя в песке от длины разрядного промежутка: 1 — сухой песок, 2 — влажность 20 %, 3 — 10—15 %

### Закключение

При плотностях импульсных токов больше критических происходит резкое нелинейное уменьшение сопротивления заземления в результате ионизации и искрообразования в грунте вблизи электрода. На электроде развивается ионизационно-перегревная неустойчивость, которая приводит к контракции тока и образованию плазменных каналов. Предложен метод определения критической напряженности электрического поля, при которой начинается ионизация в грунте, исходя из зависимости тока от напряжения на заземляющем электроде. Величина средней напряженности элек-

трического поля пробоя  $E_b$  уменьшается с увеличением длины промежутка и влажности. Пробой в мокром песке развивается по разным механизмам в коротких (около 3 см) и длинных (более 10 см) промежутках, в которых среднее поле пробоя в промежутке  $E_b$  падает до уровня 2 кВ/см. В коротких промежутках пробой аналогичен пробую в воздухе, а в длинных промежутках пробой развивается с большим временем задержки (~1 мс), аналогично тепловому пробую, при этом скорость прорастания контрагированного плазменного канала в песке на два порядка меньше, чем скорость лидера в атмосфере.

### Литература

1. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты. — М.: Физматлит, 2001.
2. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока. Под редакцией Фортнова В. Е. — М.: Наука, 2002.
3. Анненков В. З. // Электричество. 1993. № 12. С. 15.
4. Рябкова Е. Я. Заземления в установках высокого напряжения. — М.: Энергия, 1978.
5. Berger K. // Bulletin SEV. 1946. No. 8. P. 107.
6. Takeuchi M., Yasuda Y., Fukuzono H. // Proc. 24th Int. Conf. Lightning Prot., Birmingham, U.K., 1998. P. 513.
7. Yasuda Y., Kondo S., Hara T., Ikeda J., Sono Y., Furukawa Y. // IEEE Transactions on Power and Energy. 2003. V. 123B. No. 6. P. 718.
8. Vainer A. L., Floru V. N. // Elect. Technol. USSR (GB). 1971.V. 2. No. 5. P. 18.
9. Asimakopoulou F. E., Gonos I. F., Stathopoulos I. A. // XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22—26, 2011. P. 101.
10. Nor Mohamad N., Haddad A., Griffiths H. // IEEE Trans. Power Delivery. 2006. V. 21. P. 353.
11. Борисов Р. К., Коломиец Е. В., Колюшко Г. М. // Сб. докл. 3-й Российской конф. по заземляющим устройствам. Новосибирск, 27—31 ноября, 2008 г. С. 61.
12. Вилков Ю. В., Кравченко А. С., Саиткулов М. М. и др. // ПТЭ. 2009. № 2. С. 75.
13. Техника высоких напряжений. Под редакцией Костенко М. В. — М.: Высшая школа. 1973.
14. Liew A. C., Darveniza M. // Proc. IEE. 1974. V. 121. No. 2. P. 123.
15. Phillips A., Anderson J. G. // Technical Report 1006866. 2002. EPRI. Palo Alto. California. P. 123.
16. Базелян Э. М., Скобарихин Ю. В., Манасыпов Р. Ф. // Известия Академии наук. Серия Энергетика. 2010. № 5. С. 33.
17. Bok-Hee Lee, Geon-Hun Park, Hye-Gu Kim, et al. // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2009. V. 4. No. 1. P. 98.
18. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Наука, 1991.
19. Аксинин В. И., Казанцев С. Ю., Кононов И. Г. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 5.
20. Ашурбеков Н. А., Иминов К. О., Рамазанов А. Р. и др. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 29.
21. Курбанисмаилов В. С., Омаров О. А., Рагимханов Г. Б. и др. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 3. С. 234.

## Electric breakdown under the spread of pulsed current in a sand

*L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin and E. E. Son*

Join Institute for High Temperatures of Russian Academy of Science  
13/2 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

*Received August 14, 2014*

***The results of laboratory experiments on the spreading of pulsed current with spherical electrodes and electrical breakdown in quartz sand are presented. If the current density at the electrode exceeds the critical value, then the earthing resistance nonlinearly reduced as a result of ionization in the sand. Values of critical intensity of electric field for sparking and breakdown are defined. It is shown that ionization-overheating instability develops near electrode. Instability leads to a contraction of current and formation of plasma channels.***

PACS: 52.80.-r; 51.50.-b

**Keywords:** earthing, grounding resistance, pulse rate earthing, critical field ionization.

## References

1. E. M. Bazelyan and Yu. P. Raizer, *Physics of Lightning and Lightning Protection* (Fizmatlit, Moscow, 2001) [in Russian].
2. *Explosive Generators of High-Power Pulses of Electric Current*. Ed. by V. E. Fortov (Nauka, Moscow, 2002) [in Russian].
3. V. Z. Annenkov, *Elektrichestvo, Электричество*, No. 12, 15 (1993).
4. E. Ya. Ryabkova, *Grounding in High-Voltage Devices* (Energiya, Moscow, 1978) [in Russian].
5. K. Berger, *Bulletin SEV*. No. 8,107 (1946).
6. M. Takeuchi, Y. Yasuda, and H. Fukuzono, in *Proc. 24th Int. Conf. Lightning Prot.*, (Birmingham, U.K., 1998). P. 513.
7. Y. Yasuda, S. Kondo, T. Hara, et al., *IEEJ Transactions on Power and Energy* **123B**, 718 (2003).
8. A. L. Vainer and V. N. Floru, *Elect. Technol. USSR (GB)*. **2** (5), 18 (1971).
9. F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos, and I. A. Stathopoulos, in *Proc. XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, (Hannover, Germany, August 22—26, 2011). P. 101.
10. N. Nor Mohamad, A. Haddad, and H. Griffiths, *IEEE Trans. Power Delivery* **21**, 353 (2006).
11. R. K. Borisov, E. V. Kolomiets, et al., in *Proc. III Russian Conf. on Grounding* (Novosibirsk, Russia, 2008). P. 61.
12. Yu. V. Vilkov, A. S. Kravchenko, M. M. Sotkulov, et al., *Instrum. Exp. Tech.*, No. 2, 75 (2009).
13. *Engineering of High Voltage* Ed. by M. V. Kostenko (Vyssh. Shkola, Moscow, 1973) [in Russian].
14. A. C. Liew and M. Darveniza, *Proc. IEE*. **121**, 123 (1974).
15. A. Phillips and J. G. Anderson, Technical Report 1006866. 2002. EPRI. Palo Alto. California. P. 123.
16. E. M. Bazelyan, Yu. V. Skobarikhin, and R. F. Manasypov, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Electr.*, No. 5, 33 (2010).
17. Bok-Hee Lee, Geon-Hun Park, Hoe-Gu Kim, et al., *Journal of Electrical Engineering & Technology* **4**,98 (2009).
18. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of Gas Pulse Breakdown* (Nauka, Moscow, 1991) [in Russian].
19. V. I. Alsinin, S. Yu. Kazantsev, I. G. Kononov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 5 (2014).
20. N. A. Ashurbekov, K. O. Iminov, A. R. Ramazanov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 29 (2014).
21. V. S. Kurbanismailov, O. A. Omarov, G. B. Ragimkhanov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, C. 234 (2014).