

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ВОЗДУХА ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ОБЛУЧЕНИИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

А. П. АЛЕШКИН, К. В. БАКУРСКИЙ, В. М. МОСКАЛЕВ, Т. О. МЫСЛИВЦЕВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a_aleshkin@mail.ru*

С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований высокочастотных и импульсных газовых разрядов оценена электрическая прочность воздуха при облучении мощными электромагнитными импульсами. Основное внимание уделено воздействию импульсов наносекундной длительности. Представленные полуэмпирические формулы и графики справедливы при атмосферном давлении не ниже 10 торр, что соответствует высоте до 30 км.

Ключевые слова: *свободно локализованный газовый разряд, закон подобия, пробивная напряженность электрического поля, атмосферное давление, плазма разряда, критическая электронная концентрация, импульсный пробой воздуха, таунсендовская теория, наносекундный импульс*

Разработки, посвященные генерации больших электромагнитных мощностей, находят все более широкое применение в различных областях техники и технологии, в научных исследованиях [1], а также в военном деле. Мощное электромагнитное излучение используется для испытания электротехнических и радиоэлектронных изделий на стойкость и электромагнитную совместимость, в системах радиосвязи [2], в радиоэлектронной борьбе [3] и т.д.

При использовании средств генерации в наземных и околоземных условиях необходимо учитывать электрическую прочность атмосферы. Электрический пробой воздуха может вызвать сбой в работе собственно излучателя, а также испытываемых устройств. Пробой воздуха при высокочастотном электромагнитном облучении достаточно хорошо изучен [1–4], а для пробоя под действием сверхкоротких (наносекундных) радиоимпульсов не исследован ряд вопросов преимущественно прикладного характера.

В предлагаемой работе на основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований газового разряда оценена пробивная напряженность воздуха при электромагнитном облучении наносекундными импульсами большой мощности.

Электрическая прочность воздуха при постоянном напряжении описывается [5] законом Пашена (рис. 1). Если на рис. 1 искровой промежуток положить равным $d = 1$ см, то график даст представление о зависимости пробивной напряженности постоянного поля от давления газа*. Для воздуха в нормальных условиях $E = 30$ кВ/см, минимальное значение $E \approx 0,300$ кВ/см достигается при $p \approx 0,53$ торр.

* В цитируемой литературе давление воздуха измеряется обычно в торрах, 1 торр = 1 мм рт. ст. Другие единицы связаны соотношениями: 1 атм = 760 торр \approx 1013 гПа [6].

Пробой воздуха наступает в момент лавинообразной ионизации среды и фиксируется по резкому увеличению проводимости разрядной области. Подъем кривой Пашена при больших давлениях (правая ветвь) объясняется уменьшением длины свободного пробега электронов и, следовательно, снижением вероятности набора электронами энергии, достаточной для ионизации молекул газа. Подъем кривой на низких давлениях (слева от минимума) обусловлен уменьшением частоты актов ионизации. Типичное минимальное значение U_s , лежащее вблизи значения $pd \cong 1$ торр·см, составляет для различных газов сотни вольт.

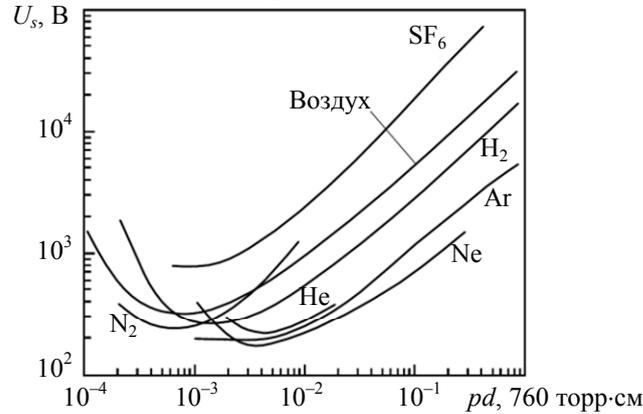


Рис. 1

Важно отметить, что закон Пашена следует принципу *подобия*: если в произведении pd обменять давление p на длину промежутка d (или наоборот), сохраняя их произведение неизменным, напряжение пробоя, соответствующее этому произведению, также остается неизменным.

Электрический пробой газа имеет место и при СВЧ-облучении, однако наступает в более сильном переменном поле и, в отличие от стационарного режима, может происходить без участия электродов. В этом случае признаком СВЧ-пробоя принято считать достижение электронной концентрации в разряде некоторого критического значения [4]. Критической полагают электронную концентрацию, при которой плазма разряда становится непрозрачной для радиоизлучения:

$$N_{\text{кр}} = \frac{4\pi^2 m_e}{c^2 e^2 \mu_0} f^2 = 1,24 \cdot 10^{-2} f^2 = 1,12 \cdot 10^{15} \lambda^{-2},$$

где c — скорость света в вакууме, м/с; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м; e — заряд электрона, Кл, m_e — его масса, кг; f — частота, Гц; $\lambda = c/f$ — длина волны СВЧ-излучателя, м.

Зависимость пробивной напряженности электрического поля от давления воздуха как при непрерывном, так и при импульсном СВЧ-облучении, схожа с законом Пашена при условии, что длительность импульсов облучения τ_n должна быть достаточно большой, точнее — большим должно быть значение $f\tau_n \gg 1$. На рис. 2, а представлен импульсный пробой воздуха на частоте 994 МГц, эксперимент проводился в резонаторе с диффузионной длиной $\Lambda = 1,51$ см [4].

Анализ пробоя воздуха при воздействии сверхкоротких (наносекундных) видео и СВЧ электромагнитных импульсов ($f\tau_n \approx 1$) более сложен вследствие недостатка экспериментальных данных, получаемых при низком атмосферном давлении (на больших высотах). Применимость принципа подобия в случае импульсного пробоя специфична и требует специального обоснования [5].

В качестве критической плотности электронов в плазме импульсного разряда многие авторы используют величину [3]:

$$N_{кр} \cong 1,24 \cdot 10^{-2} \Delta f^2 = 1,12 \cdot 10^{15} (c\tau_{и})^{-2}, \quad (1)$$

где Δf — эффективная ширина спектра импульса, Гц.

Пример: $N_{кр} \approx 1,2 \cdot 10^{16}$ эл/м³ для $\tau_{и} = 1,0$ нс. В случае стандартной атмосферы [6] соответствующий ресурс для ионизации воздуха существует примерно до 200 км (под атмосферным ресурсом понимается плотность нейтральных частиц и аэроионов, причем наиболее вероятной полагается однократная ионизация). Следовательно, на высоте более 200 км атмосфера с большой вероятностью может уже считаться прозрачной для наносекундных импульсов любой мощности*.

Оценим электрическую прочность воздуха при воздействии наносекундных импульсов, следуя работе [5].

При импульсном СВЧ-облучении в объеме газа происходит своеобразный переходный процесс. Если за время импульса $\tau_{и}$ концентрация электронов не достигнет критического значения $N_{кр}$, пробой может и не произойти. Следовательно, в импульсном режиме пробойные поля должны быть больше, чем в непрерывном режиме. Величина пробойного поля должна зависеть, очевидно, от длительности импульса, фактора $f\tau_{и}$, частоты повторения импульсов и числа импульсов в пачке.

Действительно, как видно из рис. 2, б, с сокращением импульса пробивная напряженность поля растет (пробой на частоте 24,1 ГГц). А вот с увеличением частоты повторения импульсов (200 Гц) и $f\tau_{и}$ пробивная напряженность уменьшается и приближается к значениям для непрерывного режима [4]. Более того, можно считать доказанным [4, 5], что если $f\tau_{и} \gg 1$, то при импульсном и импульсно-периодическом облучении для СВЧ-пробоя воздуха соблюдается принцип подобия, при этом зависимость пробивной напряженности от давления имеет характерный минимум, как и в стационарном случае.

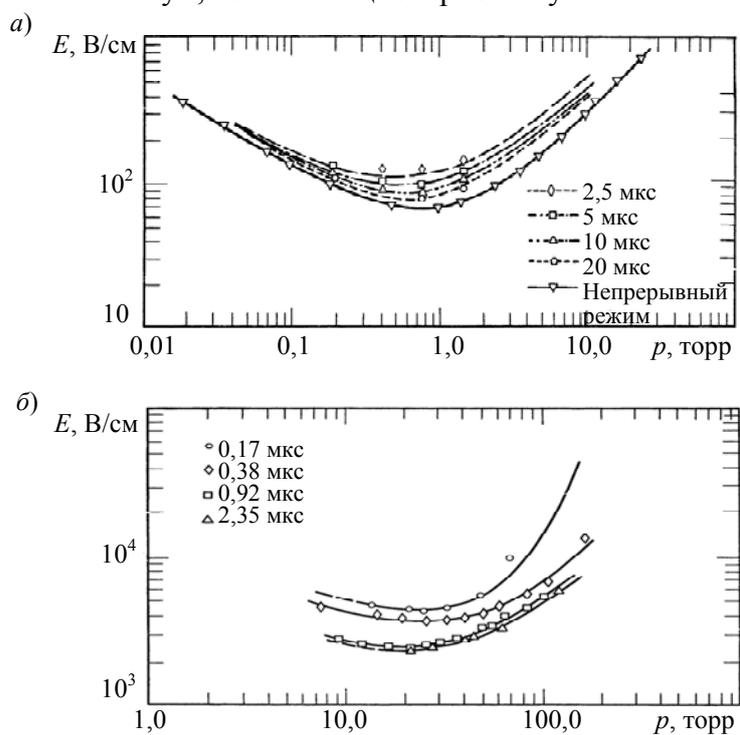


Рис. 2

Рассмотрим более подробно эффект воздействия сверхкороткими (наносекундными) электромагнитными импульсами. В соответствии с этим определенный интерес представляет

* Речь идет о свободно локализованных импульсных и СВЧ-разрядах в воздухе, а не о разрядах, например, в линиях передачи [1].

вопрос о справедливости принципа подобия за время формирования разряда τ ($\leq \tau_{и}$), в частности, при СВЧ-пробое на одиночных импульсах. Из рис. 3 видно, что отношение пробивной напряженности СВЧ-поля к давлению есть функция комплекса $p\tau$ [5].

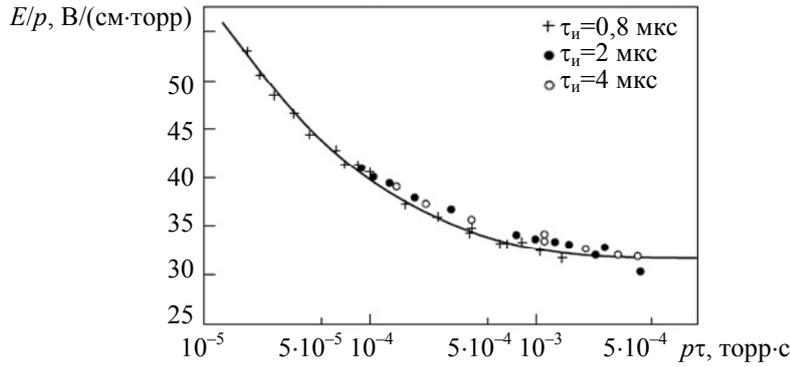


Рис. 3

Объяснение этому факту можно дать исходя из так называемой таунсендовской теории импульсного пробоя [2—5], согласно которой лавинообразное нарастание концентрации электронов в разряде, приводящее к пробое, происходит в результате, с одной стороны, увеличения числа электронов вследствие ударной ионизации нейтральных частиц, с другой — сокращения электронов за счет прилипания и диффузии:

$$N = N_0 \exp \left[t \left(\nu - \nu_a - D/\Lambda^2 \right) \right] \text{ или } \ln(N/N_0) = t \left(\nu - \nu_a - D/\Lambda^2 \right). \quad (2)$$

Здесь N_0 — начальная (затравочная) концентрация электронов (10^6 — 10^9 м⁻³ на высотах до 100 км); t — время; ν , ν_a — частота (скорость) ионизации и частота прилипания соответственно; D — коэффициент диффузии; Λ — диффузионная длина, сопоставимая с шириной радиолуча [1, 3].

Разность скоростей встречных процессов можно представить [2—4] в виде $\nu - \nu_a = \alpha v$, где α — эффективный коэффициент ударной ионизации, а v — скорость дрейфа электронов. Если τ — время, за которое концентрация электронов достигает своей критической величины, то критерий импульсного СВЧ-пробоя получается из (2):

$$\tau = \frac{\ln(N_{кр}/N_0)}{\alpha v - D/\Lambda^2} \text{ или } p\tau = \frac{\ln(N_{кр}/N_0)}{\frac{\alpha v}{p} - Dp/(p\Lambda)^2}. \quad (3)$$

Согласно [2—4], справедливы утверждения: $\alpha v/p = f_1(E/p)$ и $Dp = f_2(E/p)$. Следовательно, при фиксированной величине $p\Lambda$ существует однозначная зависимость $p\tau$ от E/p , что подтверждается также экспериментом (рис. 3). Заметим, что на практике, используя (3), обычно принимают $N_{кр}/N_0 = 10^8$ [3, 5].

Таким образом, можно считать установленным, что в импульсном СВЧ-пробое воздуха соблюдается соотношение

$$p\tau = f(E/p). \quad (4)$$

Для решения задачи, сформулированной вначале, представляется целесообразным решить (4) относительно E/p , обозначив E как $E_{пр}$ и τ как $\tau_{и}$:

$$E_{пр}/p = f^{-1}(p\tau_{и}) \text{ или } E_{пр} = pf^{-1}(p\tau_{и}). \quad (5)$$

Представление (5) не будет однозначным из-за наличия у кривых разряда, как и в законе Пашена, двух — ниспадающей и восходящей — ветвей. Двухзначность можно обойти, рассматривая эти ветви отдельно. Проще всего это сделать для правой ветви кривой Пашена.

Известно, что при достаточно больших значениях давления ($p \geq 10$ торр) $E_{пр} \sim p$ (см. рис. 1, 2). Это позволяет переписать соотношение (5):

$$E_{пр} = k(\tau_{и})p. \tag{6}$$

Введенный фактор $k(\tau_{и})$ подлежит определению. Уместно заметить, что так как к СВЧ-пробую, происходящему в непрерывном или импульсном режиме, применим закон подобия, то для этих режимов, очевидно, должны существовать соотношения, подобные (6), например: $E_{пр} = k(f)p$, $E_{пр} = k(f\tau_{и})p$, явный вид этих выражений можно найти, например, в [1] и в обзоре [3].

Для нахождения фактора $k(\tau_{и})$ целесообразно воспользоваться объективными экспериментальными данными. На рис. 4 приведена зависимость напряженности пробоя от длительности импульса при $p = 760$ торр [5]. Представленные результаты получены как для одиночных видеоимпульсов (3, 4), так и радиоимпульсов (1, 2, 5) частотой 37 ГГц, у которых $f\tau_{и} \approx 1$.

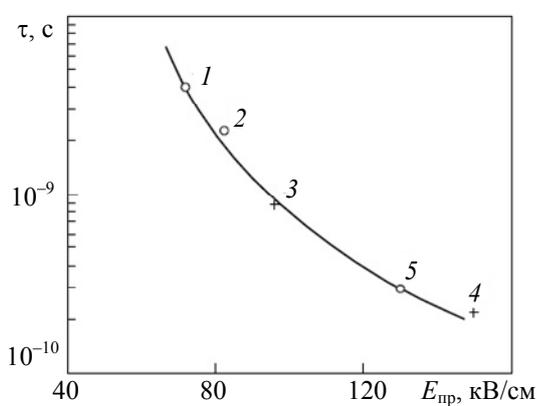


Рис. 4

Для $\tau_{и} = 1$ нс из рис. 4 находим $E_{пр} = 95$ кВ/см, тогда

$$k = 95/760 = 0,125 \text{ кВ}/(\text{см}\cdot\text{торр}).$$

Следовательно, для $\tau_{и} = 1$ нс при атмосферном давлении $p \geq 10$ торр в соответствии с (6) получаем

$$E_{пр} = 0,125p, \tag{7}$$

Очевидно, что зависимость (7) для воздуха повторяет барометрическую кривую атмосферы (но только примерно до 30 км). Результаты расчета $E_{пр}$ в функции высоты над поверхностью Земли, полученные в настоящей работе, представлены в таблице и на рис. 5.

z, км	p, торр [4]	E пр, кВ/см	
		τ = 5 нс	τ = 1 нс
0	760	69,1	95,0
1	674	61,3	84,3
2	596	54,2	74,5
3	526	47,8	65,8
4	462	42,0	57,8
5	405	36,8	50,6
6	354	32,2	44,3
8	267	24,3	33,4
10	198,7	18,1	24,8
15	90,8	8,3	11,4
20	41,5	3,8	5,2
30	8,88	0,81	1,11

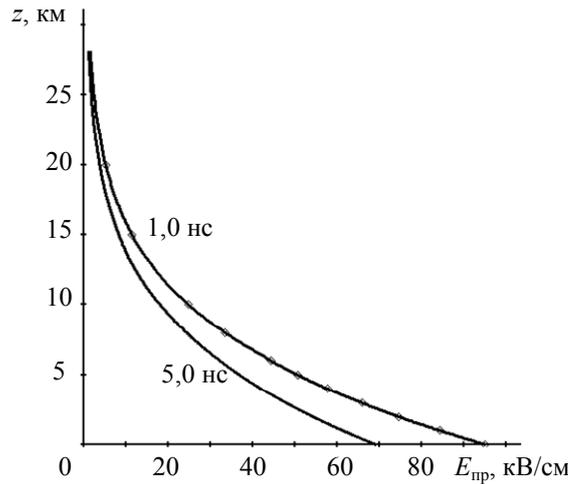


Рис. 5

Для определения значения $k(\tau_{и})$ аппроксимируем кривую, представленную на рис. 4.

Дополнительные требования к аппроксимируемой функции $\tau_{и}(E_{пр})$:

1) функция должна иметь вертикальную асимптоту при $E_{пр} = 30$ кВ/см (это соответствует электрической прочности воздуха в постоянном, $\tau_{и} \rightarrow \infty$, поле в нормальных условиях);

2) при $\tau_{и} \rightarrow 0$, очевидно, должно быть $E_{пр} \rightarrow \infty$, — горизонтальная асимптота.

Всем этим требованиям удовлетворяет функция (рис. 6):

$$\tau_{и} = \frac{1}{14,2 \cdot 10^{5,2} \left[x^{0,4} \exp(19,3x^{0,5}) - 12,7 \right]}. \quad (8)$$

Здесь $x = E_{пр}/p$, по сути, переменная x есть не что иное, как искомый фактор $k(\tau_{и})$, т.е. $x = k(\tau_{и})$.

Решение уравнения (8) представлено на рис. 7, кривая описывается выражением:

$$k(\tau_{и}) = 1,718 \cdot 10^{-3} W_0^2 \left\{ 155,6 \left[(100 + 2,68\tau_{и})/\tau_{и} \right]^{5/4} \right\},$$

где $W_0(z)$ — функция Ламберта.

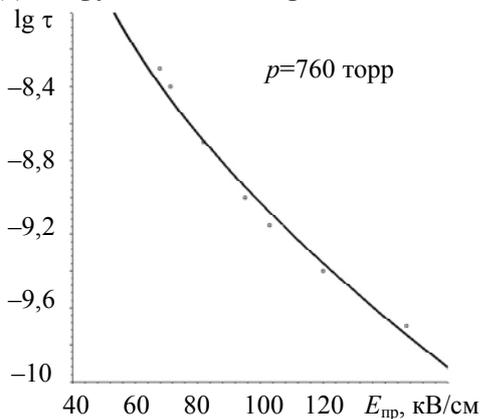


Рис. 6

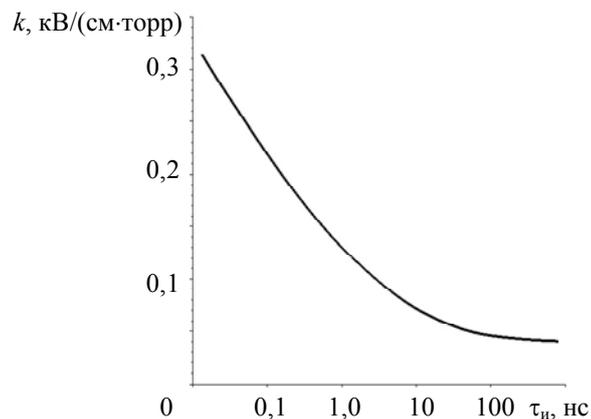


Рис. 7

Функция Ламберта описывает функциональное уравнение: $z = We^W$, $W(0) = 0$. Вещественная (основная) ветвь функции характеризуется требованием $W_0(e) = 1$.

Полученная оценка пробивной напряженности импульсного пробоя воздуха (6) может быть использована для решения различных прикладных задач, таких как создание в атмосфере искусственных ионизированных областей, организация и проведение испытаний электротехнических и радиоэлектронных систем и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарин А. С., Кузовников А. А., Шибков В. М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М.: Нефть и газ, 1996. 206 с.
2. Райцын Д. Г. Электрическая прочность СВЧ устройств. М.: Сов радио, 1977. 168 с.
3. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. РЭБ: Силовое поражение радиоэлектронных систем. М.: Вузовская книга, 2007. 468 с.
4. Мак-Доналд А. Сверхвысокочастотный пробой в газах / Пер. с англ. под ред. М. С. Рабиновича. М.: Мир, 1969. 212 с.
5. Месяц Г. А. Законы подобия в импульсных газовых разрядах // УФН. 2006. Т. 176, № 10. С. 1069—1091.
6. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. акад. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

Сведения об авторах

- Андрей Петрович Алешкин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ; E-mail: a_aleshkin@mail.ru
- Клим Валерьевич Бакурский** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ; старший преподаватель; E-mail: klim_bak@mail.ru
- Виктор Михайлович Москалев** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ; доцент; E-mail: 1vital1@omnisp.ru
- Тимофей Олегович Мысливцев** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ; начальник кафедры; E-mail: tim33@list.ru

Рекомендована кафедрой антенно-фидерных, передающих устройств и средств СЕВ

Поступила в редакцию 21.07.16 г.

Ссылка для цитирования: Алешкин А. П., Бакурский К. В., Москалев В. М., Мысливцев Т. О. Электрический пробой воздуха при электромагнитном облучении наносекундными импульсами // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 359—366.

ELECTRIC BREAKDOWN OF AIR BY NANOSECOND PULSES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION

A. P. Aleshkin, K. V. Bakursky, V. M. Moskalyev, T. O. Myslivtsev

*A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: a_aleshkin@mail.ru*

Dielectric toughness of air under the exposure to powerful electromagnetic pulses is evaluated with the use of results of theoretical and experimental studies of high-frequency and pulsed gas discharge. The main attention is paid to the impact of pulses of nanosecond duration. The results presented in the form of semi-empirical formulas and graphs are valid at atmospheric pressure below 10 Torr corresponding to altitudes of up to 30 km.

Keywords: freely localized gas discharge, similarity law, breakdown electric field strength, atmospheric pressure, plasma of discharge, critical electron concentration, pulse breakdown of air, Townsend theory, nanosecond pulse

Data on authors

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices and Means for SEV; E-mail: a_aleshkin@mail.ru
- Klim V. Bakursky** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices and Means for SEV; Senior Lecturer; E-mail: klim_bak@mail.ru

- Viktor M. Moskalyev** — PhD, Associate Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices and Means for SEV; E-mail: 1vitalia1@omnisp.ru
- Timofey O. Myslivtsev** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Department of Transmission, Antenna-Feeder Devices and Means for SEV; Head of the Department; E-mail: tim33@list.ru

For citation: *Aleshkin A. P., Bakursky K. V., Moskalyev V. M., Myslivtsev T. O.* Electric breakdown of air by nanosecond pulses of electromagnetic radiation // *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 4. P. 359—366 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-359-366