

## ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМАЯ ПРОБОЙНАЯ МОЩНОСТЬ В АНТЕННЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА

А. А. Волков<sup>1</sup>, П. А. Трифонов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”*

<sup>2</sup> *Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 29.04.2016 г.

**Аннотация.** На основе импульсного критерия пробоя получено аналитическое выражение предельно допустимой пробойной мощности в антенне сверхвысокочастотного генератора с круглой апертурой, учитывающее длительность, время повторения и число импульсов в генерируемой последовательности, а также размер апертуры. Проведён расчёт зависимостей предельно допустимой мощности сверхвысокочастотного генератора от длительности импульсов для моноимпульсного и пачечного режимов генерации при разных распределениях поля по апертуре: равномерном и спадающем от центра к краям апертуры по квадратичному закону. Дана характеристика полученных зависимостей.

**Ключевые слова:** предельная мощность излучения, сверхвысокочастотный генератор, пробой воздуха.

## MAXIMUM PERMISSIBLE BREAKDOWN POWER IN THE AERIAL OF THE SUPERHIGH-FREQUENCY GENERATOR

A. A. Volkov, P. A. Trifonov

**Abstract.** On the basis of pulse criterion of breakdown analytical expression maximum allowable breakout powers in the aerial of the microwave generator with the round aperture, considering duration, time of repetition and number of impulses in generated sequence, and also the size of the aperture is received. Calculation of dependences of maximum allowable powers of the microwave generator on duration of impulses for the single and multiple modes of generation in case of different distributions of the field on an aperture is carried out: uniform and falling down from the center to edges of an aperture for the square law. The characteristic of the received dependences is given.

**Keywords:** limiting power of radiation, microwave generator, air breakdown.

### ВВЕДЕНИЕ

При задании требований к параметрам мощных сверхвысокочастотных (СВЧ) генераторов (виркаторов, черенковских генераторов, релятивистских магнетронов и др. [1]) возникает необходимость учёта явления пробоя атмосферного воздуха в излучающей антенне. Электрический пробой представляет собой естественный фактор, существенно снижающий эффективность излучения и тем самым ограничивающий предельные параметры генератора – мощность, число, длительность и время повторения импульсов. Учёт пробойных явлений особенно важен в задачах электромагнитного поражения радиоэлектронной аппаратуры, где

максимальная излучаемая мощность СВЧ генераторов определяет потенциальные возможности их применения [2].

Вывод электромагнитной энергии мощных СВЧ генераторов в атмосферу производится, как правило, через диэлектрическое окно в корпусе прибора, разделяющее вакуумные тракты генератора (рабочую камеру или волноводы) и воздушное пространство. На рисунке 1 в качестве примера приведена схема виркатора (триода с виртуальным катодом), где показано расположение окна для вывода электромагнитного поля (ЭМП) [1]. При излучении мощного ЭМП вблизи поверхности окна со стороны атмосферы может возникнуть безэлектродный СВЧ пробой воздуха [3], [4].

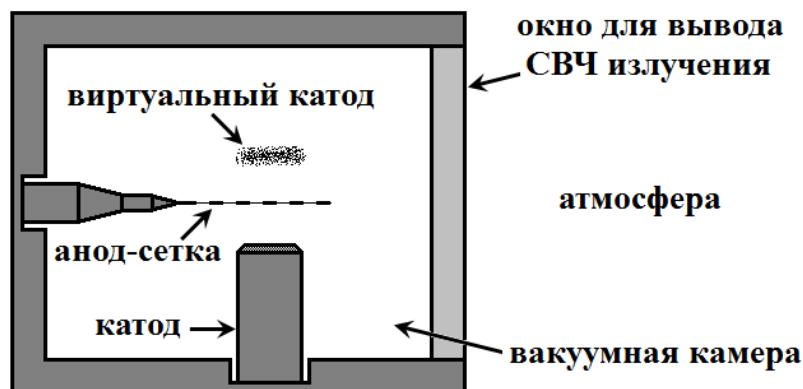


Рис. 1. Схема виркатора

Для недопущения пробоя воздуха при выводе СВЧ излучения в атмосферу, необходимо поддерживать уровень напряжённости электрического поля в излучающем окне ниже критического значения. Окна для вывода электромагнитной энергии мощных СВЧ генераторов представляют собой антенны типа открытого конца волновода или рупорные антенны [5]. Максимальный уровень напряжённости электрического поля в антеннах указанных типов зависит от вида распределения поля по излучающей поверхности и мощности генератора. Критическое значение напряжённости электрического поля (пробойный уровень по амплитуде) определяется параметрами воздушной среды, а также числом, длительностью и временем повторения импульсов СВЧ излучения [6], [7]. Следовательно, для заданных вида распределения поля по апертуре и её размеров обеспечить беспробойное излучение ЭМП можно путём подбора параметров генератора — мощности, длительности, времени повторения и числа СВЧ импульсов. Для решения этой задачи необходимо знать закономерности, связывающие пробойную мощность в антенне, которая является предельно допустимой мощностью генератора, с длительностью, временем повторения и числом импульсов в излучаемой последовательности.

В печати имеются работы, касающиеся вопросов пробоя воздуха при излучении импульсного СВЧ ЭМП [3], [4], [6]–[10]. В этих работах, в частности, приводятся результаты эксперимента, а также методики расчета пробойных уровней напряженности поля для случаев одиночного и повторного импульсных воздействий. Результаты оценок закономерностей, связывающих предельно допустимую мощность СВЧ генераторов, при которой происходит пробой воздуха в антенне, с длительностью, временем повторения и числом импульсов ЭМП, в известной литературе отсутствуют.

Цель работы — получение аналитического выражения предельно допустимой пробойной мощности СВЧ генератора, учитывающей длительность, время повторения и число импульсов в генерируемой последовательности, а также размеры антенны и параметры воздушной среды.

## ОЦЕНКА ПРОБОЙНОЙ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ В АНТЕННЕ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Под критерием безэлектродного СВЧ пробоя газа принято понимать условие, при котором плотность электронов достигает уровня образования непрозрачной электронной плазмы, называемого критическим. Этот критерий положен в основу метода определения пробойных значений импульсных СВЧ полей и выражается равенством [3], [4]:

$$n = n_{\text{кр}} \quad (1)$$

где  $n$  — плотность электронов в газе;  $n_{\text{кр}}$  — критическая плотность электронной плазмы.

Поведение электронной плотности однозначно определяется напряженностью электрического поля, наложенного на газ [3], [4]. Поэтому критерию (1) можно сопоставить условие пробоя, выраженное в напряженностях электрического поля:

$$E_{\text{а max}} = E_{\text{пр имп}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{а max}}$  — наибольшее значение напряженности электрического поля в излучающем окне (апертуре антенны);  $E_{\text{пр имп}}$  — импульсный пробойный уровень напряженности электрического поля.

Величина  $E_{\text{а max}}$  зависит от мощности генератора, вида распределения поля по излучающей апертуре и формы апертуры. Окна для вывода энергии мощных СВЧ генераторов чаще всего круглой формы, поэтому ниже будет рассматриваться круглая апертура. Также будет считаться, что возбуждающее поле в апертуре синфазно и обладает аксиальной симметрией. Схема апертуры показана на рисунке 2, где обозначено:  $R$  — радиус апертуры;  $\rho$  — расстояние от центра апертуры до излучающего элемента  $dS$ .

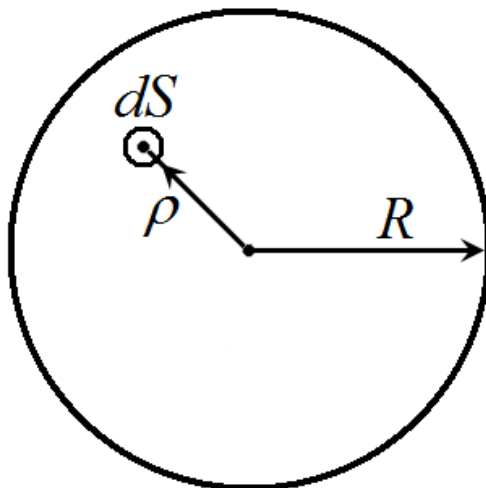


Рис. 2. Схема излучающей апертуры

Закон распределения поля на круглых апертурах в условиях принятых допущений удобно аппроксимировать зависимостью типа [11]:

$$E_S = E_{\text{а max}} (1 - \rho^2/R^2)^m, \quad (3)$$

где  $E_S$  — распределение возбуждающего поля по апертуре;  $m = 0,1,2,\dots$  — показатель степени аппроксимации.

Мощность генератора  $P_{\Gamma}$  связана с распределением (3) выражением [11]:

$$P_{\Gamma} = \frac{1}{2Z_0} \int E_S^2 dS, \quad (4)$$

где  $Z_0 = 120\pi$  Ом – волновое сопротивление свободного пространства.

Вычисление интеграла (4) по рассматриваемой поверхности с учётом (3) даёт:

$$P_{\Gamma} = \frac{\pi E_{a \max}^2 R^2}{2(2m+1)Z_0}. \quad (5)$$

Аналитическое выражение импульсного пробойного уровня напряженности электрического поля  $E_{\text{пр имп}}$  для воздуха в нормальных атмосферных условиях, учитывающее число длительность и время повторения импульсов получено в [7] и имеет вид:

$$E_{\text{пр имп}} = \begin{cases} \frac{E_{\text{пр ст}}}{1-b \ln\left(1+\frac{\ln \gamma}{N\nu_a \tau}\right)}, & T-\tau \leq T_{\beta N} \\ \frac{E_{\text{пр ст}}}{1-b \ln\left(1+\frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau} + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln\left(\frac{e^{\nu_{\beta}(T-\tau)}-1}{e^{\nu_{\beta}(T-\tau)}+1}\right)\right)}, & T-\tau > T_{\beta N} \end{cases} \quad (6)$$

где  $N$ ,  $\tau$ ,  $T$  – число, длительность и время повторения импульсов в последовательности соответственно;  $E_{\text{пр ст}}$  – статический пробойный уровень;  $\nu_a$  – частота прилипания электронов;  $\nu_{\beta} = 2\beta\nu_a n_0/\nu_d$  – интенсивность спада электронной плотности до уровня фона;  $n_0$  – концентрация электронов фона;  $\nu_d$  – частота отлипания электронов;  $\beta$  – коэффициент рекомбинации электронов и ионов;  $b = 0,108$  – безразмерный коэффициент;  $\gamma = n_{\text{кр}}/n_0$  – отношение критической плотности электронной плазмы  $n_{\text{кр}}$  к плотности фоновых электронов  $n_0$ ;  $T_{\beta N}$  – максимальный межимпульсный интервал, при котором пробойный уровень ещё зависит от числа импульсов:

$$T_{\beta N} = \frac{1}{\nu_{\beta}} \ln \left( \frac{\gamma^{(N-1)/N} + 1}{\gamma^{(N-1)/N} - 1} \right). \quad (7)$$

Подстановка (2) и (6) в (5) позволяет получить выражение предельно допустимой мощности СВЧ генератора, обусловленной пробоем воздуха в излучающей апертуре:

$$P_{\Gamma \text{ доп}} = \frac{\pi R^2 E_{\text{пр ст}}^2}{2(2m+1)Z_0} \begin{cases} \left(1 - b \ln\left(1 + \frac{\ln \gamma}{N\nu_a \tau}\right)\right)^{-2}, & T-\tau \leq T_{\beta N} \\ \left(1 - b \ln\left(1 + \frac{\ln \gamma}{\nu_a \tau} + \frac{1}{\nu_a \tau} \ln\left(\frac{e^{\nu_{\beta}(T-\tau)}-1}{e^{\nu_{\beta}(T-\tau)}+1}\right)\right)\right)^{-2}, & T-\tau > T_{\beta N} \end{cases} \quad (8)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ МОЩНОСТИ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ РАЗНЫХ ВИДОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ ПО АПЕРТУРЕ АНТЕННЫ

Расчёт проведён для частоты несущей 10 ГГц и исходных данных, соответствующих нормальным атмосферным условиям [6]:  $\nu_a = 7.6 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ;  $\nu_{\beta} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ;  $n_{\text{кр}} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_0 = 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Значение статического пробойного уровня для выбранной частоты несущей равно [10]:  $E_{\text{ст}} = 32 \text{ кВ/см}$ . Радиус апертуры принят равным  $R = 0,3 \text{ м}$ . Рассматривалось два закона распределения поля по апертуре: равномерный ( $m = 0$ ) и с квадратичным законом спада амплитуды к краям апертуры ( $m = 1$ ). На рисунке 3 показаны графики зависимостей предельно допустимой мощности от длительности импульса при моноимпульсном режиме генерации. На рисунках 4 и 5 показаны графики зависимостей предельно допустимой мощности от длительности импульса при пачечном режиме генерации  $N = 100$  импульсов с периодами повторения  $T_{\text{п}} = 100 \text{ мс}$  и  $T_{\text{п}} = 1 \text{ мс}$  соответственно.

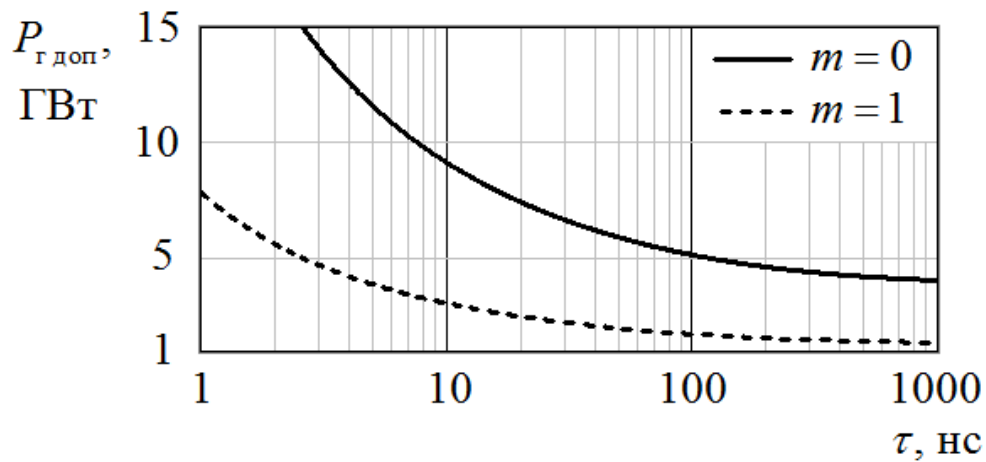


Рис. 3. Зависимости предельно допустимой мощности СВЧ генератора от длительности импульса при моноимпульсном режиме генерации

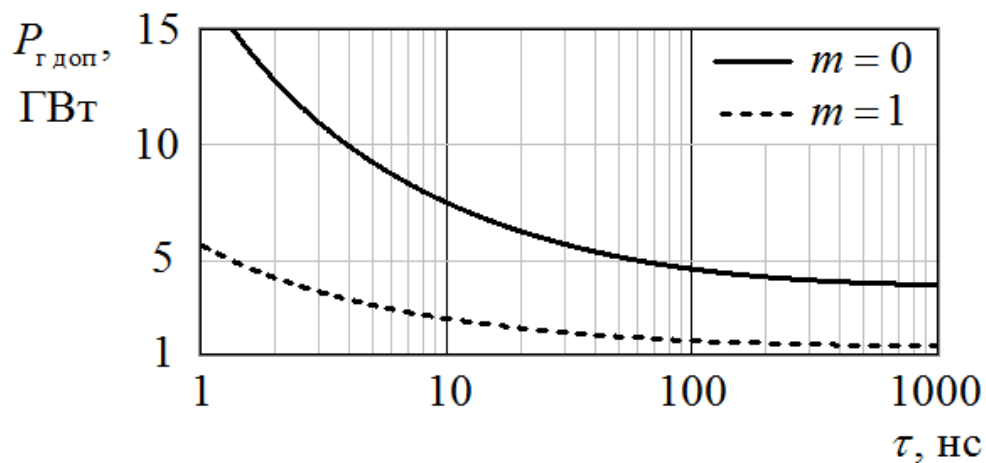


Рис. 4. Зависимости предельно допустимой мощности СВЧ генератора от длительности импульса при пачечном режиме генерации для  $N = 100$  и  $T_n = 100$  мс

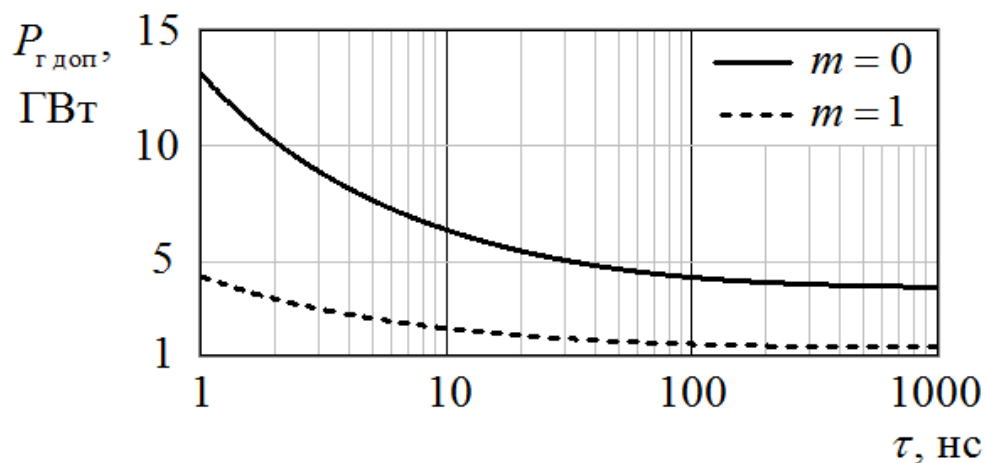


Рис. 5. Зависимости предельно допустимой мощности СВЧ генератора от длительности импульса при пачечном режиме генерации для  $N = 100$  и  $T_n = 1$  мс

Из графиков на рисунках 3 – 5 следует, что наибольшую предельно допустимую пробойную мощность имеет генератор в режиме одиночного импульса. Антенна с равномерным распределением поля по апертуре в 3 и более раза электрически прочнее по мощности, чем антенна с квадратичным законом спада амплитуды от центра к краям апертуры. Предельно допустимая мощность СВЧ генератора снижается при увеличении длительности и числа импульсов и при уменьшении времени их повторения, асимптотически стремясь к предельно допустимому уровню мощности в режиме непрерывного излучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, получено выражение предельно допустимой пробойной мощности в антенне СВЧ генератора с круглой апертурой, учитывающее число, длительность и время повторения импульсов в генерируемой последовательности. Полученная закономерность позволяет предсказывать поведение предельно допустимой мощности СВЧ генератора, связанной с электрической прочностью воздуха в антенне при излучении последовательностей импульсов. Проведён расчёт зависимостей предельно допустимой пробойной мощности СВЧ генератора от длительности импульсов для разных режимов генерации и видов распределения поля по апертуре антенны. Установлено, что наибольшую предельно допустимую мощность имеет генератор, в антенне которого поле по апертуре распределено равномерно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диденко, А. Н. СВЧ-энергетика: Теория и практика [Текст] / А. Н. Диденко. — М. : Наука, 2003. — 446 с.
2. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем [Текст] / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарёв, Л. Н. Шустов. — М. : Вузовская книга, 2007. — 468 с.
3. Мак-Доналд, А. Сверхвысокочастотный пробой в газах [Текст] / А. Мак-Доналд. — М. : Мир, 1969. — 212 с.
4. Райзер, Ю. П. Основы физики газоразрядных процессов [Текст] / Ю. П. Райзер. — М. : Наука, 1980. — 416 с.
5. Драбкин, А. Л. Антенно-фидерные устройства [Текст] / А. Л. Драбкин, В. Л. Зуенко, А. Г. Кислов. — М. : Советское радио, 1974. — 320 с.
6. Зарин, А. С. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе [Текст] / А. С. Зарин, А. А. Кузовников, В. М. Шибков. — М. : Нефть и газ, 1996. — 204 с.
7. Волков, А. А. Учёт времени повторения и числа импульсов при оценке пробойных уровней поля в антенных системах сверхвысокочастотных генераторов [Текст] / А. А. Волков, П. А. Трифонов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. Физика, математика. — 2014. — № 1. — С. 15–21.
8. Гуревич, А. В. Ионизированный слой в газе (атмосфере) [Текст] / А. В. Гуревич // Успехи физических наук. — 1980. — Т. 132, вып. 4. — С. 685–690.
9. Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле [Текст] / А. Ф. Александров, В. Л. Бычков, Л. П. Грачев [и др.] // Журнал технической физики. — 2006. — Т. 76, вып. 3. — С. 38–43.
10. Пробой воздуха в нарастающем СВЧ поле [Текст] / В. С. Барашенков, Л. П. Грачев, И. И. Есаков [и др.] // Журнал технической физики. — 2000. — Т. 70, вып. 10. — С. 34–39.
11. Шифрин, Я. С. Антенны / Я. С. Шифрин. — Харьков : ВИРТА, 1976. — 408 с.

## REFERENCES

1. Didenco A.N. Microwave power engineering: Theory and practice. [Didenco A.N. SVCh-e'nergetika: Teoriya i praktika]. Moscow: Nauka, 2003, 446 p.

2. Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G. Shustov L.N. Radio- electronic fight. Power defeat of radio-electronic systems. [Dobykin V.D., Kupriyanov A.I., Ponomarev V.G. Shustov L.N. Radioe'lektronnaya bor'ba. Silovoe porazhenie radioe'lektronnykh sistem]. Moscow: Vuzovskaya kniga, 2007, 468 p.
3. Mac-Donald A. Superhigh-frequency breakdown in gases. [Mac-Donald A. Sverkhvysokochastotnyi proboi v gazakh]. Moscow: Mir, 1969, 212 p.
4. Raizer U.P. Bases of physics of gas-discharge processes. [Raizer U.P. Osnovy fiziki gazorazryadnykh processov]. Moscow: Nauka, 1980, 416 p.
5. Drabkin A.L., Zuenko V.L., Kislov A.G. Antenna-feeding devices. [Drabkin A.L., Zuenko V.L., Kislov A.G. Antenna-fidernye ustroistva]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 320 p.
6. Zarin A.S., Kuzovnikov A.A., Shibkov V.M. Freely localised microwave category in air. [Zarin A.S., Kuzovnikov A.A., Shibkov V.M. Svobodno localizovannyi SVCh-razryad v vozdukhel]. Moscow: Neft' i Gaz, 1996, 204 p.
7. Volkov A.A., Trifonov P.A. The accounting of time of repetition and number of impulses at an assessment the breakdown of levels of a field in antenna systems the microwave of generator. [Volkov A.A., Trifonov P.A. Uchet vremehi povtoreniya i chisla impul'sov pri ocnke proboynykh urovney polya v antennykh sistemakh mosh'nykh sverkhvysokochastonykh generatorov]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. Matematika – Proceedings of Voronezh State University. Series: Physics. Mathematics*, 2014, no. 1, pp. 15–21.
8. Gurevich A.V. The ionised layer in gas (atmosphere). [Gurevich A.V. Ionizirovannyi sloi v gaze (atmosfera)]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physics-Uspekhi*, 1980, vol. 132, no. 4, pp. 685–690.
9. Aleksandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Lomteva A.U. Air ionisation in nearby critical electric field. [Aleksandrov A.F., Bychkov V.L., Grachev L.P., Esakov I.I., Lomteva A.U. Ionizaciya vozdukhha v okolokriticheskom e'lektricheskom pole]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics*, 2006, vol. 76, no. 3, pp. 38–43.
10. Barashenkov V.S., Grachev L.P., Esakov I.I., Kostenko B.F., Hodataev V.K., Ur'ev M.Z. Air breakdown in an accruing microwave field. [Barashenkov V.S., Grachev L.P., Esakov I.I., Kostenko B.F., Hodataev V.K., Ur'ev M.Z. Probay vozdukhha v narastaush'em SVCh pole]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Technical Physics*, 2000, vol. 70, no. 10, pp. 34–39.
11. Shifrin Ya.S. Aerials. [Shifrin Ya.S. Antenny]. Khar'kov: VIRTA, 1976, 408 p.

Волков Алексей Анатольевич, начальник лаборатории Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил “Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина”, Воронеж, Россия

E-mail: volkov\_aa@autorambler.ru

Тел.: 8-906-673-67-92

Трифонов Павел Андреевич, профессор Воронежского госуниверситета, доктор технических наук, доцент, Воронеж, Россия

E-mail: bk\_123@bk.ru

Тел.: 8-951-545-61-69

Volkov Aleksey Anatolevich, chief of the laboratory from the Military Educational-Research Centre of Air Force “Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin”, Voronezh, Russia

E-mail: volkov\_aa@autorambler.ru

Тел.: 8-906-673-67-92

Trifonov Pavel Andreevich, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Voronezh State University, Voronezh, Russia

E-mail: bk\_123@bk.ru

Тел.: 8-951-545-61-69