УДК
681.533.3:
519.8

Н.А. Попов, О.Э. Чоракаев, В.Е. Трушников

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ

Проведен анализ и обоснована модель распространения радиоволн с учетом влияния земной поверхности для контроля уровней электромагнитного поля. Исследования предложенного метода не выявили противоречий теоретическим положениям и результатам вычислительного эксперимента. Анализ подтвердил достаточную точность его применения, что может служить основанием для практического использования предложенного подхода при подтверждении требований по экологической безопасности.
Ключевые слова: моделирование, электромагнитное поле, экологическая безопасность, интерференционные максимумы и минимумы.

В настоящее время для контроля уровней электромагнитного поля (ЭМП), создаваемых источниками электромагнитного излучения (ЭМИ) радиочастотного диапазона (РЧ), наибольшее распространение получили расчетные методы. Они проводятся в соответствии с методическими указаниями, утвержденными в установленном порядке [1, 2, 5] на этапе экспертизы проектной документации и позволяют оценить ожидаемый уровень ЭМП на территории передающих радиотехнических объектов (ПРТО).

При использовании расчетных методов оценки экологически опасного уровня ЭМП используется формула [2], которая представляет собой поле E от антенны с направленным действием в свободном пространстве [2, 3, 4]

$$E = \frac{\sqrt{30 \cdot Pa \cdot G \cdot Kf}}{R} \cdot 1,3 \cdot Fw \cdot Fg \qquad (1)$$

где Pa – мощность на входе антенно-фидерного тракта, Вт; G – коэффициент усиления антенны; Kf – коэффициент потерь в антенно-фидерном тракте; Fw и Fg – нормированные диаграммы направленности антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 93–100.
© 2016. Н.А. Попов, О.Э. Чоракаев, В.Е. Трушников.

Измерение уровней ЭМП на ПРТО производится при выдаче санитарно-эпидемиологического заключения, при вводе ПРТО в эксплуатацию, в порядке плановых измерений, после проведения защитных мероприятий и в других случаях [1, 4].

Его предполагается производить в соответствии с разработанными методикам приборами или датчиками приема, прошедшими аттестацию.

Однако, при измерениях напряженности ЭМП возникают многочисленные трудности. Результаты, полученные в контрольных точках, не желают совпадать с результатами измерений. Даже небольшие перемещения точки измерения приводят к изменению результатов в несколько раз. Диаграмма направленности антенны кругового излучения получается «выражена звездообразной». Использование измерений при различной поляризации поля и обработка полученных данных также не дают положительных результатов. Т.е. имеет место проблема несоответствия результатов расчетных методов и их измерений.

Вызывают сомнение и утверждения авторов, у которых «Результаты измерения уровня ЭМП точно соответствуют результатам расчетов».

В работе сделана попытка обосновать несоответствие в оценке уровней ЭМП, полученных в результате расчетных и измерительных методов.

Решение поставленной задачи начали с рассмотрения модели проведения расчетов. В ее основу положена известная модель двухлучевого распространения радиоволн [3, 4, 5] в свободном пространстве, однако, в отличие от известного метода, расчеты проводили в трехмерной системе координат. Для пространственного распределения уровня сигнала подстилающую поверхность (землю с известными параметрами) представили в виде прямоугольника $X \cdot Y$ с размерами, соизмеримыми с размерами зон ограничений, либо санитарно-защитных зон (СЗЗ). Она показана на рис. 1. Источник ЭМИ А размещен на высоте h_1 в точке с координатами $i_о$, $j_о$. В качестве антенны была выбрана антенна типа «волновой канал» с характеристиками диаграмм направленности (ХДН) *Fw* и *Fg*. Оценивание результирующего поля прямой $E_{пр}$ и отраженной $E_{отр}$ волн производили для каждой точки ПРТО *i, j* на высоте h_2 при шаге дискретизации Δx. Результаты расчета были представлены в трехмерной графике.

Путь прямой волны в точку измерения *AB* обозначили r_1 при углах ХДН Θ_1 и γ в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а отраженной – как ломаную *ACB* r_2 при Θ_2 и γ.

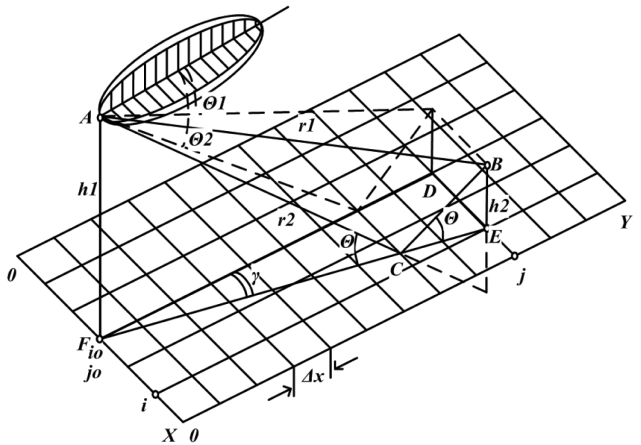

Рис. 1. Предлагаемая модель расчета ЭМП на ПРТО

На первом этапе предлагаемую модель расчетов использовали для определения пространственной конфигурации поля E по формуле (1) [1, 2, 4], которая представляет однолучевое распространение радиоволн. Антенна типа «волновой канал» размещена в точке $x = 30$, $y = 0$, поляризация волн – вертикальная. Расчеты выполнялись для всех точек поверхности $i = 0...I, j = 0...J$ на высоте СЗЗ $h_2 = 2$ м. ХДН типовой антенны в горизонтальной и вертикальной плоскости показаны на рис. 2.

График расчетов напряженности поля $E_{i,j}$ на территории ПРТО для однолучевого распространения, проведенный для

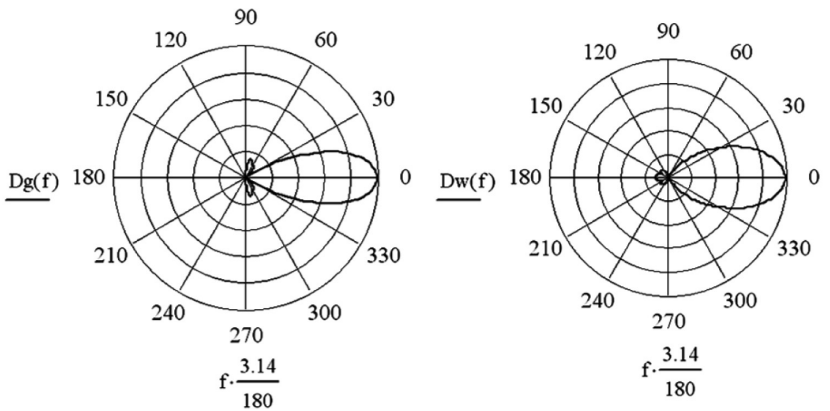

Рис. 2. Характеристики диаграмм направленности антенны

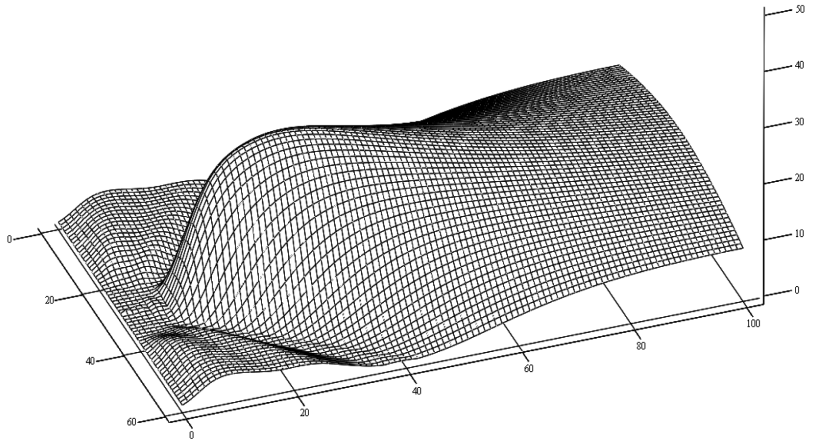

Рис. 3. Расчеты поля по формуле (1)

рассмотренной модели по формуле (1), показан на рис. 2. Он представляет форму «гладкой вытянутой возвышенности», имеющей плавные скаты. С его помощью можно оценить уровень ЭМП в любой точке рассматриваемой территории, в том числе и конфигурацию СЗЗ.

Однако попытки экспериментально проверить результаты расчетов в контрольных точках данной поверхности, приводят к явно выраженному несоответствию.

Для выяснения причин несоответствия была рассмотрена рекомендуемая для проведения измерений [3, 4] модель двулучевого распространения радиоволн. В данной модели результирующее поле $E_{i,j}$ в каждой точке над полупроводящей поверхностью с параметрами $\varepsilon_k = \varepsilon - i\sigma/\omega$ представляет суперпозицию падающей и отраженной волн

$$E_{i,j} = E_{np\,i,j} + E_{omp\,i,j} = \frac{\sqrt{30 \cdot Pa \cdot G}}{r_2} \cdot Fw\left(\Theta_1\right) \cdot Fg(\gamma) \cdot e^{-i \cdot k \cdot r_1} + \\ + R_0\left(\Theta_2\right) \cdot \frac{\sqrt{30 \cdot Pa \cdot G}}{r_2} \cdot Fg\left(\Theta_2\right) \cdot Fg(\gamma) \cdot e^{-i \cdot k \cdot r_2} \qquad (2)$$

где Θ_1 и Θ_2 – углы между антенной и направлениями на точку *B* и точку отражения *C* соответственно; r_1 и r_2 – путь прямой и отраженной волн *AB* и *ACB* соответственно; γ – угол от антенны в направлении на точку *B*.

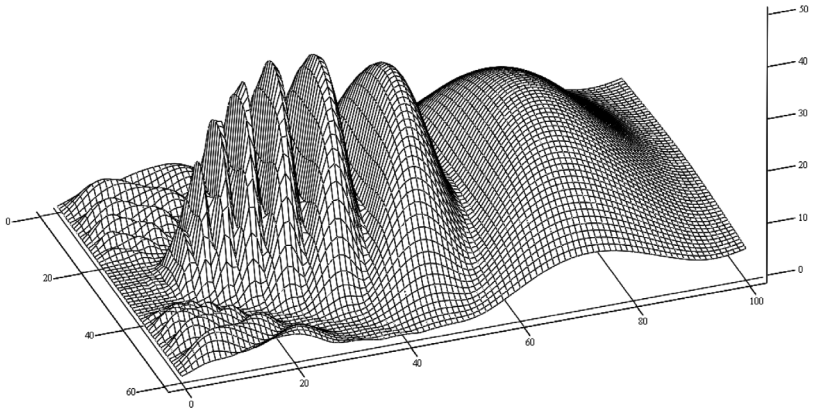

Рис. 4. График уровня поля, рассчитанный по интерференционной формуле (2)

График уровня ЭМП, рассчитанный по интерференционной формуле (2), представлен на рис. 4.

Интерференционные максимумы и минимумы напряженности поля образуются в результате сложение с переменными фазами прямой и отраженной волн, фазовые соотношения которых являются функциями частоты, координат контрольной точки, высоты подвеса антенны. Многочисленные экстремумы нельзя не учитывать, т.к. они характерны именно для области СЗЗ. Из графика видно, что даже при незначительном перемещении координат точки измерения уровни сигнала изменяются в несколько раз.

Графики поля, изображенные на рис. 3 и рис. 4, существенно различаются, но каждый из них достаточно точно описывает процессы распределения уровня ЭМП: один на расчетном этапе, второй на этапе экспериментальных измерений. Практические измерения осциллирующего поля, проводимые различными методами [4], подтверждают имеющиеся многократные отличия результатов.

Совпадения результатов теоретических и экспериментальных измерений удастся достичь лишь при условии, что для каждой контрольной точки, определенным образом, будет выбрано несколько близкорасположенных значений, для которых будет применен метод скользящего усреднения.

Суть скользящего усреднения для любого значения аргумента k состоит в расчете среднего значения по соседним w – данным. Чем больше w, тем больше данных участвуют в расчете среднего, тем более сглаженная кривая получается (5).

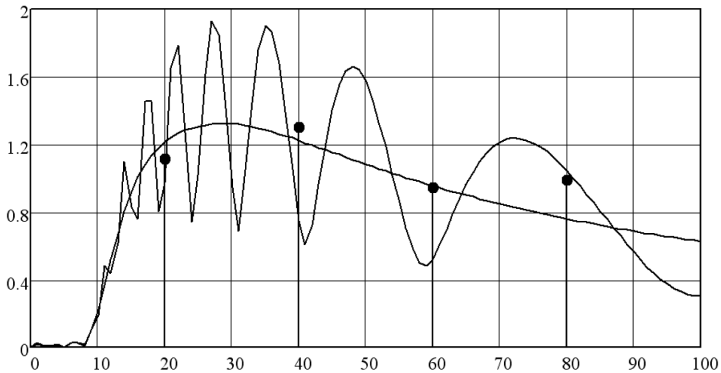

Рис. 5. График сечений расчетного и экспериментального полей E, взятых от основания антенны в направлении максимума ХДН

$$Ec_k = \frac{\sum_{j=k-\frac{w}{2}}^{k+\frac{w}{2}} E_j}{w-1} \qquad (5)$$

На графике (рис. 5) сплошной жирной линией показана зависимость напряженности поля *E*, полученная расчетным методом по формуле (1). Тонкой линией показана та же зависимость, но для двухлучевого интерференционного метода по формуле (2). Точками показан результат скользящего усреднения в точках 20, 40, 60 и 80 м, при $w = 10$. Из рисунка видно, что результаты, полученные расчетными методами, с достаточной степенью точности удается подтвердить при использовании метода скользящего усреднения.

Предлагаемый метод может быть несколько упрощен. Для этого в окрестностях контрольной точки надо найти две ближайшие точки с максимальным и минимальным значениями уровня поля. Для получения результата в контрольной точке данные уровней ближайших точек предлагается усреднить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *СанПиН* 2.1.8/2.2.4.1190-03 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи. 01.06.2003.

2. *СанПиН* 2.1.8/2.2.4.2302-07 Изменение № 1 к санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03» (приложение). 20.02.2008.

3. *Попов Н.А.*, *Данилов Г.И.*, *Чоракаев О.Э.* Территориальное распределение уровней сигнала на радиотрассах декаметрового диапазона волн от передатчика с антенной ромб // Известия Самарского научного центра российской академии наук. – Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. – С. 564–573.

4. *Нарышкин У.М.*, *Серков В.П.* Волновая служба и антенные устройства. Часть 1. Теория электромагнитного поля и распространения радиоволн. – М.: Воениздат, 1982. – 288 с.

5. *Методические* указания МУК 4.3.1677-03. Определение уровней электромагнитного поля, создаваемого излучающими техническими средствами телевидения, ЧМ радиовещания и базовых станций сухопутной подвижной связи. – М.: Минздрав России, 2003. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Попов Н.А.[1] – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: iatu-kafedracc@yandex.ru,
Чоракаев О.Э.[1] – кандидат технических наук, доцент,
e-mail: olegchorakaev@yandex.ru,
Трушников В.Е. – доктор технических наук, профессор,
e-mail: tvye@yandex.ru,
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
[1] Ульяновский государственный технический университет.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 93–100.

UDC 681.533.3: 519.8

N.A. Popov, O.E. Chorakaev, V.E. Trushnikov

DEVELOPMENT MODEL OF DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE ENVIRONMENTAL CONTROL

The paper analyzes and substantiated propagation models taking into account the effect of the Earth's surface to monitor the levels of electromagnetic fields. Studies of the proposed method showed no contradictions theoretical position and results of computational experiment. The analysis confirmed sufficient accuracy of its use, which can serve as a basis for the practical application of the proposed approach in confirming the requirements for environmental safety.

Key words: modeling, electromagnetic field, environmental safety, interference maximum and minimum.

AUTHORS

Popov N.A.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: iatu-kafedracc@yandex.ru,
Chorakaev O.E.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
e-mail: olegchorakaev@yandex.ru,
Trushnikov V.E., Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: tvye@yandex.ru,
National Mineral Resource University «University of Mines»,
199106, Saint-Petersburg, Russia,
[1] Ulyanovsk State Technical University, 432027, Ulyanovsk, Russia.

REFERENCES

1. *SanPiN 2.1.8/2.2.4.1190-03 Gigienicheskie trebovaniya k razmeshcheniyu i ekspluatatsii sredstv sukhoputnoy podvizhnoy radiosvyazi*. 01.06.2003 (Sanitary rules and regulations 2.1.8/2.2.4.1190-03 Sanitary requirements for arrangement and operation of land mobile radiocommunication facilities. 01.06.2003).

2. *SanPiN 2.1.8/2.2.4.2302-07 Izmenenie № 1 k sanitarno-epidemiologicheskim pravilam i normativam «Gigienicheskie trebovaniya k razmeshcheniyu i ekspluatatsii peredayushchikh radiotekhnicheskikh ob"ektov. SanPiN 2.1.8/2.2.4.1383-03» (prilozhenie)*. 20.02.2008 (Sanitary rules and regulations 2.1.8/2.2.4.2302-07 Sanitary and Epidemiological Code Amendment No. 1: Sanitary requirements for arrangement and operation of transmitting radio-technical facilities. Sanitary rules and regulations 2.1.8/2.2.4.1383-03» (application). 20.02.2008).

3. Popov N. A., Danilov G. I., Chorakaev O. E. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra rossiyskoy akademii nauk* (Proceedings of the Samara scientific center, Russian Academy of Sciences), Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2011, pp. 564–573.

4. Naryshkin U. M., Serkov V. P. Volnovaya sluzhba i antennye ustroystva. Chast' 1. *Teoriya elektromagnitnogo polya i rasprostraneniya radiovoln* (Wave service and antenna assemblies. Part 1. Theory of electromagnetic field and radio wave propagation), Moscow, Voenizdat, 1982, 288 p.

5. *Metodicheskie ukazaniya MUK 4.3.1677-03. Opredelenie urovney elektromagnitnogo polya, sozdavaemogo izluchayushchimi tekhnicheskimi sredstvami televideniya, ChM radioveshchaniya i bazovykh stantsiy sukhoputnoy podvizhnoy svyazi* (Instructional guidance MUK 4.3.167703: Determination of levels of electromagnetic field generated by radiating technical facilities of picture transmission, FM radio and land mobile communication base stations), Moscow, Minzdrav Rossii, 2003.

РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН, ОДНОВРЕМЕННО УЧАСТВУЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ КАМНЯ

(№ 1075/7-16 от 13 мая 2016 г., 5 с.)
Дубинин Петр Иванович – кандидат технических наук, доцент,
НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

Определено оптимальное количество алмазных зерен одновременно участвующих в процессе круглого наружного шлифования природного камня инструментом «МонАлит», с учетом размеров обрабатываемого изделия, параметров шлифовального круга и схемы шлифования

Ключевые слова: шлифовальный круг, алмазное зерно, диаметр, камень, разрушение.

DETERMINING THE NUMBER OF DIAMOND GRAINS, AT THE SAME TIME I NVOLVED IN THE PROCESS OF CYLINDRICAL GRINDING STONE

Dubinin P.I., Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

The optimal number of diamond grains at the same time involved in the process round external grinding of natural stone the tool "Monalit", given the size of the workpiece, parameters of the grinding wheel and the grinding circuit

Key words: grinding wheel, diamond grain diameter, the stone destruction.