

УДК 614.841; 551.515

Б.Б. Поспелов, М.В. Кустов

Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

ИНИЦИИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Рассмотрены энергетические характеристики электромагнитного поля, создаваемого многопозиционной системой излучателей произвольной конфигурации. Показано, что для искусственной ионизации могут быть использованы многопозиционные системы излучателей с фиксированными и управляемыми параметрами. Определены требования к характеристикам излучателей для реализации искусственного образования осадков.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, многопозиционная система излучателей, напряжённость электрического поля, плотность потока мощности излучения.

Введение

Постановка проблемы. Чрезвычайные ситуации (ЧС) природного характера приводят к большим людским и материальным потерям. Все ЧС природного характера по происхождению можно разделить на два класса – атмосферные (наводнения, засухи, ураганы, пожары, сели) и геологические (землетрясения, вулканы, цунами, оползни). Даже незначительное влияние на атмосферные ЧС природного характера может существенно снизить их негативное действие. Одним из возможных способов влияния на атмосферные образования является воздействие СВЧ излучения. При этом возникает проблема создания специального источника достаточного мощного СВЧ излучения, способного инициировать искусственное образование осадков. Однако требуемую интенсивность СВЧ поля можно создавать с помощью нескольких менее мощных источников с взаимно согласованным пространственно-частотно-фазовым или пространственно-фазовым управлением излучения. В связи с этим актуальной является проблема обеспечения необходимой интенсивности подачи огнетушащего вещества для тушения ландшафтного пожара на основе процесса воздействия на атмосферные образования управляемым СВЧ излучением от нескольких источников.

Анализ последних достижений и публикаций. Искусственное воздействие на атмосферные осадки в основном осуществляется за счёт введения в зону воздействия активных центров конденсации [1]. Среди центров конденсации наибольшей активностью обладают электрически заряженные ядра, в качестве которых могут выступать, как твёрдые и жидкие частицы с концентрацией заряда на своей поверхности, так и ионы [2 – 4]. Вопросы создания и транспортировки в зону воздействия заряженных ядер рассмотрены в работах [5, 6]. Однако при воздействии на облачные образования на высотах

1-5 км целесообразней производить ионизацию под воздействием СВЧ излучения [7]. В [11] исследуются возможности использования многопозиционной системы излучателей для беспроводной передачи энергии. При этом задача воздействия на тропосферу с целью искусственной инициации осадков над зоной пожара там не рассматривается. Основное внимание уделяется проблеме фокусировки излучения в заданной точке пространства на значительных удалениях в зоне Френеля для многопозиционной системы излучателей.

Постановка задачи и её решение

Целью работы является определение характеристик результирующего поля СВЧ излучения в тропосфере, создаваемого многопозиционной системой излучателей (МСИ).

При образовании в области активной облачности достаточной ионной концентрации, как центров коагуляции, происходит интенсификация каплеобразования с последующим выпадением осадков. Обеспечение необходимой ионной концентрации в тропосфере возможно лишь при определённых параметрах поля СВЧ излучения. В работах [8, 9] экспериментально определено минимальное амплитудное значение напряжённости поля, при которой может происходить искусственное каплеобразование. Например, для источника излучения частоты $f = 2,45$ ГГц она составляет порядка $E_0 = 0,1$ кВ·м⁻¹. В работе [10] теоретически показана возможность создания такой напряжённости и на частоте $f = 10$ ГГц. Для обеспечения такой напряжённости поля на высотах 1 - 5 км необходимы достаточно мощные источники СВЧ излучения. Для снижения мощности источника рассмотрим случай использования МСИ для искусственной ионизации заданной области тропосферы.

Пусть некоторый излучатель заданной МСИ находится в точке, координаты которой определя-

ються вектором \bar{R}_n в прямокутній системі координат (рис. 1). Точку спостереження поля в зоні штучної іонізації тропосфери визначимо вектором \bar{r} . Тоді в разі N джерел в складі МСИ вектор напруженості результуючого електричного поля, спостережуваного в довільний момент часу t в точці \bar{r} , з урахування поляризації випромінювачів можна представити в такій формі:

$$\vec{E}_\Sigma(\bar{r}, t) = \sum_{n=1}^N \vec{e}_n \cdot \frac{\sqrt{60 \cdot P_n \cdot G_n}}{|\bar{r} - \bar{R}_n|} \times \exp\left[i\left(2\pi f_n(t - \tau_n) + \phi_n - k|\bar{r} - \bar{R}_n|\right)\right], \quad (1)$$

де \vec{e}_n, P_n, G_n - вектор поляризації випромінюваних хвиль, потужність випромінювання та коефіцієнт напрямленого впливу для n -го випромінювача МСИ; k - хвильове число; f_n - частота випромінювання n -го джерела; ϕ_n, τ_n - початкова фаза та час затримки випромінювання для n -го джерела.

В загальному випадку управляемими параметрами МСИ можуть бути наступні параметри: $\vec{e}_n, P_n, G_n, f_n, \phi_n$ та τ_n .

Розглянемо окремий випадок, коли область утворення опадів знаходиться в дальній зоні МСИ. В цьому випадку $|\bar{r}| \gg \bar{R}_n, n=1, \dots, N$. Будемо вважати також, що для випромінювачів виконуються умови: $\vec{e}_n = \vec{e}, f_n = f$ та $P_n G_n = P G$. З урахування цього, згідно (1), отримаємо вираз для результуючої напруженості електричного поля в довільній точці спостереження \bar{r} області утворення опадів:

$$\vec{E}_\Sigma(\bar{r}, t) = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G}}{|\bar{r}|} \cdot \exp[i \cdot 2\pi f t] \times \left(\sum_{n=1}^N \exp\left[-i\left(2\pi f \cdot \tau_n + \phi_n + k \cdot R_n \cos(\alpha_n)\right)\right] \right). \quad (2)$$

Для окремого випадку МСИ, що складається з двох випромінювачів (рис. 1) з фіксованими значеннями затримки та початкової фази випромінювань, за умови, що $2\pi f \tau_1 + \phi_1 = 2\pi f \tau_2 + \phi_2 = 0$ з (2) отримаємо:

$$\vec{E}_2(\bar{r}, t) = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G}}{|\bar{r}|} \cdot \exp[i \cdot 2\pi f t] \times \left(\exp[i \cdot k R_1 \cos(\alpha_1)] + \exp[i \cdot k R_2 \cos(\alpha_2)] \right). \quad (3)$$

Можливо показати, що для довільного напрямку $\alpha_1 = \alpha$ та довільного осевого розміщення випромінювачів (\bar{R}_1, \bar{R}_2) квадрат результуючої напруженості поля в довільній точці \bar{r} площини XOZ (сечення області Ω утворення опадів) буде визначатися

$$|E_2(\bar{r}, t)|^2 = S_X(r_x, r_z) = \frac{240 \cdot P \cdot G}{r_x^2 + r_z^2} \times \cos^2\left(k \cos\left(\frac{r_x}{\sqrt{r_x^2 + r_z^2}}\right) (R_1 + R_2) / 2\right), \quad (4)$$

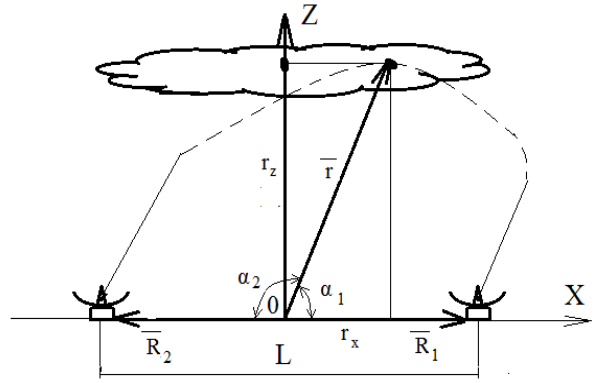


Рис. 1. Геометрія задачі штучної іонізації області тропосфери двоупозиційною системою випромінювачів

де k_x, k_z - відповідні координати вектора \bar{r} , визначають відповідну точку спостереження на площині.

З виразу (4) випливає, що квадрат результуючої напруженості не залежить від часу, а визначається координатами випромінювачів та точки спостереження або величиною кута $\alpha = r_x / \sqrt{r_x^2 + r_z^2}$. При цьому має місце періодичний характер зміни квадрата напруженості. Максимуми напруженості визначаються координатами точки спостереження (напрямленням α) та половиною осевого відстання між випромінювачами (базою системи). Координати r_z та r_x впливають на загальне ослаблення потужності та характер зміни напруженості.

Залежність квадрата напруженості $S_X(r_x, r_z)$ для системи з двох випромінювачів, розміщених вздовж осі OX на відстані 50 м від початку координат, потужністю $P = 30 \text{ кВт}$, $G = 10000$ та частотою $f = 2,5 \text{ ГГц}$ для висоти опорної точки спостереження $r_z = Hf = 2000 \text{ м}$ представлено на рис. 2. Там же наведено аналогічні залежності для висот, що відрізняються від опорної висоти.

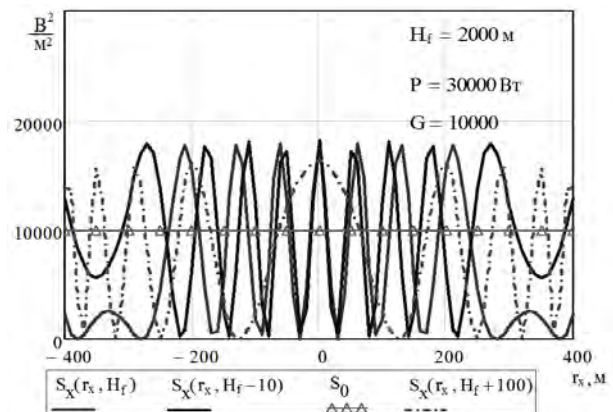


Рис. 2. Залежність квадрата результуючої напруженості від координати r_x

Аналогичные зависимости $S_X(r_x, r_z)$ от координаты r_z для тех же исходных данных при двух различных значениях координаты r_x , равных 0 м и 12 м, приведены на рис. 3.

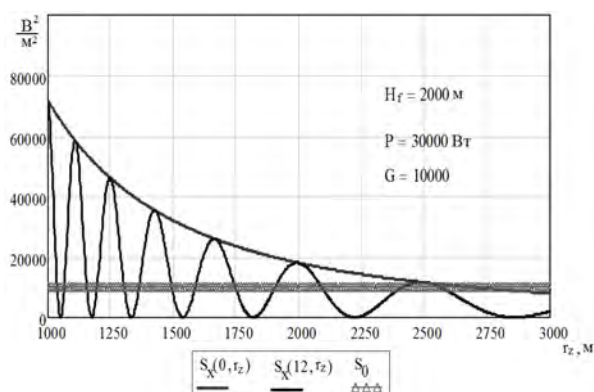


Рис. 3. Зависимость квадрата результирующей напряжённости от координаты r_z

При увеличении базы системы характер распределения энергии в области пространства становится неоднородным по всем осям. Так, например, для $R_1 = 150$ м и $R_2 = -50$ м характерные зависимости без учета направленности излучателей представлены на рис. 4.

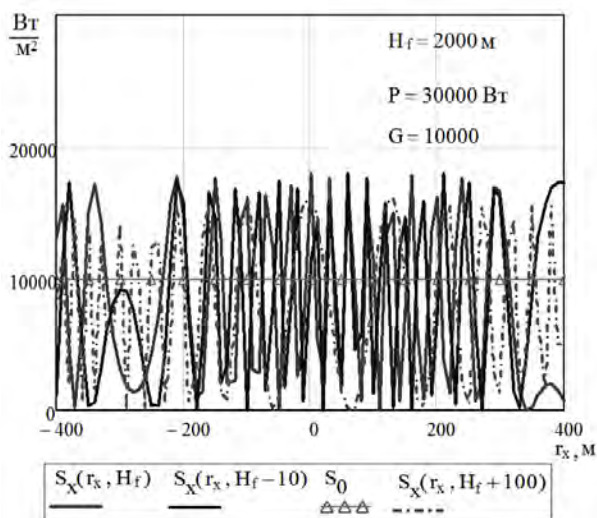


Рис. 4. Зависимость плотности потока мощности излучения от координат точки наблюдения r_x, r_y и r_z

Видно, что путем изменения базы двухпозиционной системы при постоянных характеристиках излучателей можно влиять на уровень и характер пространственной нерегулярности распределения потока мощности в планируемой области пространства для образования осадков.

Обозначим через r_{xm} координату r_x , соответствующую текущему максимуму квадрата результирующей напряжённости, а через Δr_m - расстояние

между соседними максимумами. Тогда с учетом (4) получим, что

$$r_{xm} = \frac{mcHf}{\sqrt{L^2 f^2 - m^2 c^2}}, \quad (5)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \Delta r_{xm} = |r_{xm} - r_{x(m-1)}|,$$

где $L = |\overline{R}_1| \pm |\overline{R}_2|$ - база двухпозиционной системы излучателей. Из выражений (5) видно, что положение максимумов плотности потока энергии зависит от частоты излучения величины базы системы, а также требуемой высоты концентрации энергии в области образования осадков. Расстояние между соседними максимумами тоже зависит от указанных параметров. При этом увеличение базы системы приводит к сближению максимумов.

В случае использования четырехпозиционной системы излучателей, размещенных по соответствующим осям плоскости XOY на одинаковом расстоянии R от начала координат квадрат напряжённости в произвольной точке наблюдения \vec{r} с учетом (2) будет определяться

$$S_{\Sigma 4}(r_x, r_y, r_z, R) = \frac{960 \cdot P \cdot G}{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \times \cos^2 \left(\frac{kR}{|\vec{r}|} \cdot \frac{r_x + r_y}{2} \right) \cos^2 \left(\frac{kR}{|\vec{r}|} \cdot \frac{r_x - r_y}{2} \right). \quad (6)$$

На рис. 5 представлены распределения квадрата напряжённости (6) в пространстве для случая четырехпозиционной и двухпозиционной систем излучателей, указанных выше конфигураций, при удалении излучателей от начала координат на расстояние 50 м.

Таким образом, в случае четырех излучателей в области взаимодействия полей результирующее распределение квадрата напряжённости носит многоэкстремальный характер по обеим осям. В случае двух излучателей экстремальный характер наблюдается только вдоль оси размещения излучателей. При этом в областях экстремумов плотность потока энергии превышает требуемый уровень для искусственной ионизации в 1,5 и 6 раз для двух и четырех излучателей соответственно. При этом один излучатель обеспечивает более чем вдвое меньший уровень, чем требуется для искусственного образования осадков.

Для искусственной ионизации также можно использовать продольные МСИ, но с управляемыми параметрами излучателей, которые позволяют фокусировать излучение в заданной точке. Такие системы излучателей позволяют создавать большую плотность потока энергии в максимумах излучения без сканирования при определенных параметрах излучателей. Так, например, в МСИ из N излучателей, частота и фаза для n-го излучателя должны удовлетворять соотношениям [11]:

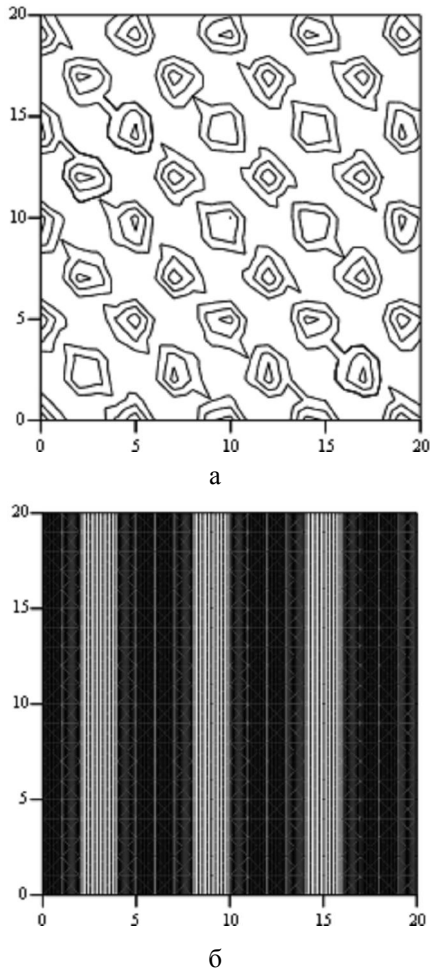


Рис. 5. Распределение квадрата напряжённости электрического поля в системе из четырёх а) и двух б) излучателей на плоскости XOY

$$f_{0n} = f_0 + |n| \Delta F_n, \varphi_{0n} = -2\pi f_{0n} \left(\frac{H}{c} - \frac{R_n}{c} \right),$$

$$n \in \left[-\frac{N-1}{2}, \dots, 0; 0, \dots, \frac{N-1}{2} \right], \quad (7)$$

где f_{0n} – частота излучения n-го излучателя; f_0 – частота центрального излучателя; $\Delta F_n = \Delta F_{\max} / n$ – величина дискретности частоты между соседними излучателями; ΔF_{\max} – максимальный разнос несущих частот по апертуре L;

$R_n = \left[(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + (z - z_n)^2 \right]^{0,5}$ – расстояние до точки фокусировки от n-го излучателя с координатами (x, y, z) и (x_n, y_n, z_n) соответственно; c – скорость света; H – высота точки фокусировки по оси OZ.

На рис. 6 приведены зависимости распределения плотности потока энергии $S_E(y, H_f)$ от координаты y точки наблюдения для рассматриваемой МСИ из пяти излучателей, расположенных вдоль оси OX на расстоянии 50 м симметрично относительно начала координат. Частота центрального из-

лучателя выбиралась равной $f = 2,5$ ГГц, $\Delta F_{\max} = 100$ МГц, высота фокусировки $H_f = 2000$ м. Энергетические параметры излучателей оставались прежними. На рис. 7 представлены аналогичные зависимости для оси OZ.

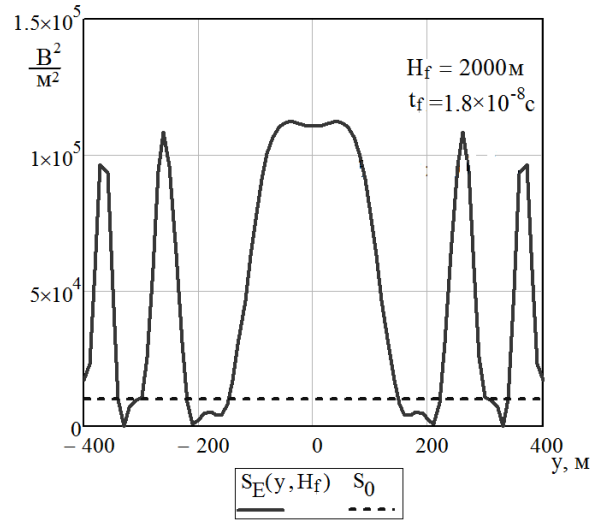


Рис. 6. Распределение квадрата напряжённости электрического поля в МСИ вдоль оси OY

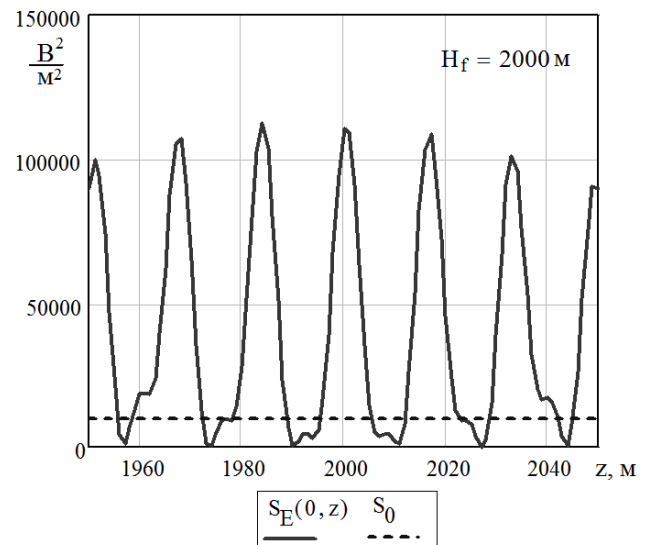
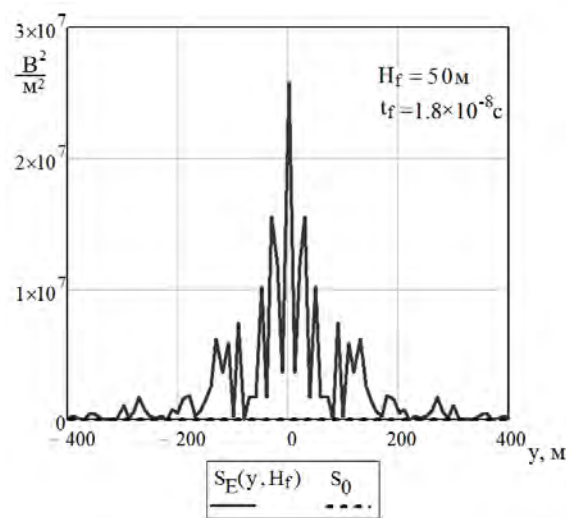


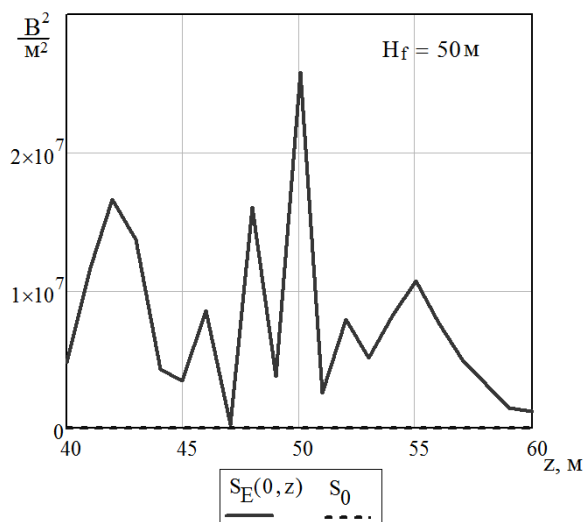
Рис. 7. Распределение квадрата напряжённости электрического поля в МСИ вдоль оси OZ

Из представленных на рис. 6 и 7 данных следует, что для МСИ рассматриваемой конфигурации с управляемыми параметрами излучения (7) имеет место неоднородное распределение плотности мощности поля в области наблюдения. Максимумы имеют место не только на заданной высоте фокусировки 2000 м, но и на других высотах, а также для различных значений оси OX. При этом возможно для продольного расположения излучателей получать аналогичные площадным излучателям распределения потока с большей плотностью энергии без сканирования.

Если высота фокусировки оказывается менее базы системы, то имеет место формирование одного главного максимума высокой плотности энергии в точке на заданной высоте ($H_f = 50$ м) фокусировки (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Распределение квадрата напряженности электрического поля в МСИ: а – вдоль оси OY, б – вдоль оси OZ

Следует заметить, что при создании искусственно ионизированной области в тропосфере для интенсификации процессов осадкообразования определяющим является обеспечение необходимой концентрации ионов в достаточно большой по объему области. Для этой цели можно использовать рассмотренные выше типы МСИ с фиксированными и управляемыми параметрами излучения. При этом каждый тип характеризуется различными реализационными возможностями и затратами на их создание. При этом использование МСИ любого типа позволят снизить требования к энергетическим показателям излучателей. Важным свойством МСИ с управляемыми параметрами является периодический характер более вы-

сокая плотность локальной концентрации энергии в пространстве и времени, что может быть дополнительно использовано при искусственном образовании осадков. При всех рассмотренных типах конфигурации МСИ облучаемая область тропосферы зависит от характеристик направленности излучателей по угловым координатам. Поэтому для образования осадков целесообразно использовать излучатели с широкими диаграммами направленности антенн. При этом концентрация энергии такими излучателями снижается, что может потребовать увеличения их числа в МСИ. В качестве подходящего излучателя для рассмотренных типов МСИ может быть предложена радиолокационная станция типа 1РЛ141 [12-13] с импульсным режимом излучения.

Для определения минимальной мощности излучателей необходимо учитывать потери энергии в твердых и жидких аэрозольных частицах тропосферы. Основными компонентами, рассеивающими излучение при образовании осадков, являются микроскопические капли воды в облаках и твердые частицы дыма от ландшафтных пожаров. Ослабление излучения определяется законом Бугера:

$$E(r) = E_0 \cdot \exp(\gamma \cdot r), \quad (12)$$

где γ – коэффициент ослабления среды, m^{-1} .

Решение задачи рассеивания электромагнитной волны на частицах основано на решении уравнения Максвелла. Наиболее распространенный метод решения данного уравнения рассматривается теорией Ми [2, 14-17]. Из уравнения (2), при условии одинаковых характеристик излучателей, без учета (12) получаем выражение для определения необходимой мощности излучателя:

$$P(\vec{r}) \geq \frac{E^2(\vec{r}) \cdot |\vec{r}|^2}{60 \cdot G \cdot N^2}. \quad (13)$$

Из (13) следует, что для создания требуемой напряженности $E_{\min} = 0,1 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ с помощью МСИ из двух излучателей на высоте 5 км, при базе 1 км минимальная мощность излучателя составляет величину 105,2 кВт. Использование большего числа излучателей позволит дополнительно снизить их мощность. Так для $N=4$ при размещении излучателей на вершинах квадрата со сторонами 1 км минимальная мощность излучателя составляет величину 26,3 кВт. Излучатели подобной мощности выпускаются промышленностью Украины и России, например, станции типа 1РЛ134Ш [12], 1РЛ141 [12-13], 19Ж6 [13, 18], 36Д6 [13, 18] и другие.

Выводы

В работе рассмотрены энергетические распределения электромагнитного поля, создаваемого многопозиционной системой излучателей произвольной конфигурации. Показано, что для искусственной ионизации области тропосферы могут быть использованы

различные типы МСИ с фиксированными и управляемыми параметрами излучения. Полученные выражения и теоретические зависимости позволяют анализировать распределение и характеристики электромагнитного поля в произвольной зоне облучения тропосферы. Теоретически определены характерные распределения электромагнитной энергии в пространстве и необходимая мощность излучателей для наиболее типичных систем с малым числом позиций, предназначенных для искусственной интенсификации осадкообразования за счет СВЧ излучения. Отмечается, что в качестве излучателей МСИ для создания искусственной ионизированной области тропосферы с целью инициирования осадков над зоной ЧС могут использоваться существующие радиолокационные станции.

Список литературы

1. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы / Л.Г. Качурин. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 463 с.
2. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. – СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. – 194 с.
3. Куни Ф.М. К теории зародышеобразования на заряженных ядрах. 2. Термодинамические параметры равновесного зародыша / Ф.М. Куни, А.К. Щекин, А.И. Русанов // Коллоидный журнал. – 1982. – Т. 44. № 6. – С. 1062–1068.
4. Палей А.А. Исследование процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах [Электронный ресурс] / А.А. Палей, В.Б. Лапшин, Н.В. Жохова, В.В. Москаленко // Электронный научный журнал «Исследовано в России» – Режим доступа к статье: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.
5. Пат. № 2 112 357, Россия, А01G15/00, E01H13/00 Способ воздействия на атмосферные образования / Лапшин В.Б.(RU); Палей А.А.(RU); Попова И.С.(RU); Танака Масаюя (JP); Ямомото Кацужуи (JP); патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью "Простор Плюс" (RU); Фирма тяжелой промышленности "Ишикавадзима Харима" (JP). – № 95109596/13; заявл. 07.06.1995; опубл. 10.06.1998.
6. Пат. № 2 098 942, Россия, А01G15/00, E01H13/00 Способ воздействия на атмосферные образования / Пестов Дмитрий Александрович; патентообладатель Пестов Дмитрий Александрович. – № 97108438/13; заявл. 04.06.1997; опубл. 20.12.1997.
7. Борисов Н.Д. Искусственная ионизированная область в атмосфере / Н.Д. Борисов, А.В. Гуревич, Г.М. Милих. – М.: ИЗМИРАН, 1986. – 348 с.
8. Кустов М.В. Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением / М.В. Кустов, Б.Б. Поспелов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2013. – Вып. 17. – С. 72–81.
9. Поспелов Б.Б. Исследование процесса нуклеации водяного пара под воздействием электромагнитного излучения / Б.Б. Поспелов, М.В. Кустов // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – Гомель: ГИИ МЧС РБ, 2013. – Т. 8, № 2. – С. 45–50.
10. Кустов М.В. Параметры импульсного сверхвысокочастотного излучения для интенсификации осадкообразования в зоне чрезвычайных ситуаций / М.В. Кустов, Б.Б. Поспелов // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2013. – Вып. 18. – С. 95–105.
11. Гомозов А.В. Фокусировка электромагнитного излучения и ее применение в радиоэлектронных средствах СВЧ / А.В. Гомозов, В.И. Гомозов, Г.В. Ермаков, С.В. Титов; под ред. В.И. Гомозова. – Х.: КП «Городская типография», 2011. – 330 с.
12. Василюк Н.Я. Зенитные ракетные комплексы / Н.Я. Василюк, А.Л. Гуринович. – Минск: «Белорусский дом печати», 2001. – 463 с.
13. Казённое предприятие «Научно-производственное предприятие «Искра» [Электронный ресурс]. – Режим доступа к сайту: <https://iskra.zp.ua>.
14. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде / К.С. Шифрин. – Донецк: Гостехиздат, 1957. – 288 с.
15. Asano S. Light scattering by spheroidal particles / S. Asano, G. Yamamoto // App. Opt. – 1975. – Vol. 14, № 1. – P. 29–34.
16. Волковицкий О.А. Оптические свойства кристаллических облаков / О.А. Волковицкий, Л.Н. Павлова, А.Г. Петрушин. – Л., Гидрометеоиздат. – 1984. – 198 с.
17. Фараонов В.Г. Рассеяние света несферическими частицами / В.Г. Фараонов // Проблемы физики атмосферы. Физика и химия атмосферных аэрозолей. – 1997. – Вып. 20. – С. 216–233.
18. Государственное предприятие «Укроборонсервис» [Электронный ресурс]. – Режим доступа к сайту: <http://uos.ua/produksiya/tehnika-pvo/rls>.

Поступила в редколлегию 22.07.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.И. Адаменко, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков.

ІНІЦІУВАННЯ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ БАГАТОПОЗИЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ ВИПРОМІНЮВАЧІВ

Б.Б. Поспелов, М.В. Кустов

Розглянуті енергетичні характеристики електромагнітного поля, яке утворюється багатопозиційною системою випромінювачів довільної конфігурації. Показано, що для штучної іонізації можуть бути використані багатопозиційні системи випромінювачів з фіксованими та керованими параметрами. Визначені вимоги до характеристик випромінювачів для реалізації штучного утворення опадів.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання, багатопозиційна система випромінювачів, напруженість електричного поля, густина потоку потужності випромінювання.

THE INITIATION OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION MULTIPOSITION SYSTEMS EMITTERS

B.B. Pospelov, M.V. Kustov

The energy characteristics of the electromagnetic field created multiposition system emitters of arbitrary configuration are considered. It is shown that for artificial ionization can be used multiposition system emitters fixed and controlled parameters. Defined the requirements to the characteristics of radiators for the implementation of the artificial formation of sediment.

Keywords: electromagnetic radiation, multiposition system of radiators, electric field strength, the power flux-density of radiation