УДК 621.371.33 + 621.396.6 Вестник УрФО № 1(43) / 2022, с. 11–21

Войтович Н.И., Юнгайтис Е.М., Ершов А.В.

DOI: 10.14529/secur220102

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ПОЛУПЛОСКОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СИСТЕМЕ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА АЭРОДРОМЫ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ СНЕЖНОГО ПОКРОВА И СЛОЖНЫМ РЕЛЬЕФОМ МЕСТНОСТИ В ЗОНЕ ЗАХОДА НА ПОСАДКУ[1]

Работа направлена на обеспечение пилота или автопилота воздушного судна безопасной информацией о траектории захода на посадку на аэродромы со сложным рельефом местности. Получены равномерные по угловым координатам источника и точки наблюдения коротковолновые асимптотические разложения поля дифракции сферической волны на полуплоскости, описывающее поле как вдали, так и в окрестности границ света-тени, при произвольной ориентации электрического диполя относительно ребра полуплоскости.

Рассмотрено влияние дифракции электромагнитных волн на площадке ограниченных размеров перед глиссадным радиомаяком на поведение траектории захода воздушных судов на посадку. Расчётные результаты сравниваются с экспериментальными результатами, полученными лётным путём на прибрежном аэродроме.

Ключевые слова: *безопасность, самолёт, дифракция сферической волны на полуплоскости, прибрежный аэродром, глиссада.*

Voytovich N.I., Iungaitis E.M., Ershov A.V.

DIFFRACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON A HALF-PLANE IN RELATION TO THE AIRCRAFT LANDING SYSTEM ON AIRFIELDS WITH A HIGH LEVEL OF SNOW COVER AND DIFFICULT TERRAIN IN THE APPROACH ZONE

The research is aimed at providing the pilot or autopilot of the aircraft with safe information on the trajectory of the landing approach to airfields with difficult terrain. Short-wave asymptotic expansions of the diffraction field of a spherical wave on a wedge, which describe the field both far away and in the vicinity of the light-shadow boundaries,

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Челябинской области в рамках научного проекта № 20-47-740009.

with an arbitrary orientation of the electric dipole relative to the edge of the half-plane, are obtained, uniform in the angular coordinates of the source and the observation point.

The influence of the diffraction of electromagnetic waves on the site of limited dimensions in front of the glide path on the behavior of the approach trajectory of aircraft for landing is considered. The calculated results are compared with the experimental results obtained by flight at the coastal airfield.

Keywords: *safety, airplane, half-plane spherical wave diffraction, coastal airfield, glide path.*

1. Введение

Статистика аварий, поломок самолётов и катастроф в авиации говорит о том, что около 60% авиационных происшествий происходит при заходе на посадку и посадке самолета. Причиной авиационных происшествий может быть человеческий фактор, не благоприятные погодные условия или технические проблемы с самолетом либо проблемы с информацией, формируемой радиомаячной системой посадки. Пилоту чрезвычайно сложно принять правильное решение в нештатной ситуации в связи с состоянием стресса, дефицитом времени и недостатком информации, ограниченной показаниями бортового оборудования.

На тридцать третьей Ассамблее ИКАО была названа главная причина всех авиационных происшествий при заходе на посадку и посадке — «неспособность распознать экипажем воздушного судна необходимости ухода на второй круг и невыполнение этого манёвра».

Естественно стремление разработчиков и персонала, эксплуатирующего радиомаячные системы посадки воздушных судов, обеспечить пилота или автопилот безопасной информацией о траектории захода на посадку.

Радиомаячная система посадки по приборам (ILS) используется во всем мире для обеспечения захода на посадку и посадки самолета как в условиях ограниченной видимости, так и при хорошей погоде. Однако система может быть чувствительна к многолучевому распространению радиоволн, обусловленному отражением радиоволн от складок рельефа местности и местных предметов.

Исследования влияния рельефа местности на распространение радиоволн вдоль трассы: радиомаяк системы посадки — заходящий на посадку самолёт — выполняются с самого начала развития авиации, а именно с того момента, когда радиомаячные системы посадки пришли на помощь пилотам, с 1930 годов по настоящее время [1, 2]. Развитие радиомаячных систем на протяжении почти столетней их истории рассмотрено в докладе Войтовича Н.И. и Жданова Б.В. [3] "Четыре ключевых технических решений в истории развития ILS (системы посадки самолётов)". В исторически первом техническом решении влияние Земли на распространение радиоволн учитывалось введением зеркального изображения передающей антенны радиомаяка. При этом предполагалось, что подстилающая поверхность представляет собой бесконечно протяжённую во всех направлениях плоскость. Однако, даже в таких идеальных условиях местности для системы посадки из-за несовершенной аппаратуры и несовершенного способа задания навигационной информации наблюдалась низкая точность по выводу самолёта в опорную точку над началом взлётно-посадочной полосы. С развитием авиации повышались требования к точности систем посадки. Новые технические решения (второе и третье ключевые решения в упомянутом докладе) позволили существенно повысить стабильность аппаратуры радиомаяков, избавиться от влияния дальних складок местности в зоне захода самолётов на посадку на поведение глиссады. Наконец, четвёртое техническое решение, предложенное в патенте РФ на изобретение № 2429499 "Глиссадный радиомаяк" авторов Войтовича Н.И., Жданова Б.В. и Соколова А.Н. [4], позволило избавиться от влияния уровня снежного покрова на положение в пространстве траектории для захода самолёта на посадку [5]. Однако, при этом по-прежнему требуется плоская площадка перед радиомаяком протяжённостью около 600-900 метров. Выполнение требования по размерам плоской площадки (определяемым размерами первой зоны Френеля на подстилающей поверхности) перед глиссадным радиомаяком в реальных условиях аэродромов представляет проблему. На аэродромах с неблагоприятной формой рельефа местности предпринимаются попытки ввода в эксплуатацию радиомаяков методом проб и ошибок. А именно, устанавливают радиомаяк на имеющейся площадке ограниченных размеров, выполняют лётные измерения, по результатам которых вводят корректировки высот подвеса излучающих элементов глиссадной антенной решётки и корректировки в амплитудно-фазовое распределение токов вдоль решётки. По вновь полученным лётным результатам вносят новые коррективы в положение излучающих элементов и амплитудно-фазовое распределение вдоль антенной решётки. И так продолжается либо до достижения нужных результатов, либо до принятия решения о вводе в эксплуатацию некатегорированной системы посадки. Это трудоёмкий и затратный путь.

Альтернативой служит моделирование характеристик радиомаяков по заданному рельефу местности и расположению местных предметов на аэродроме.

Чтобы правильно моделировать искривления траектории захода самолётов на посадку в последнее время французская компания Airbus, Французский университет гражданской авиации (ENAC) и Европейский аэрокосмический и оборонный концерн (сокра-

щенно EADS — European Aeronautic Defence and Space Company) объединились, чтобы разработать программные и технические средства для моделирования глиссады и линии курса по заданному рельефу местности и расположению местных предметов. Предварительная и последующая обработка основаны на программном обеспечении ENAC (ATOLL для курсового радиомаяка и LAGON для глиссадного радиомаяка) [6]. В этих программах используется метод физической оптики [7].

В последние годы предложено для вычислений использовать метод моментов [8] и быстрый, так называемый, многоуровневый мультипольный метод [9].

Применение представленного метода для учёта влияния уступообразной подстилающей поверхности на характеристики системы посадки сомнительно, так метод физической оптики не учитывает многократно отражённые волны.

В работах, поддержанных грантами Японского общества содействия науки в помощь молодым ученым [10], [11], подстилающая поверхность аппроксимируется либо прямоугольными пластинами (2D модели), либо треугольными пластинами (3D модели). Представленные работы, по-существу, являются первым шагом авторов к разработке полноценных методик. Работы не содержат сравнения результатов с результатами других авторов либо с экспериментальными результатами.

В нашей работе [12], представленной на 12-ой Европейской конференции по антеннам и распространению радиоволн (12th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2018) показано, что подстилающую поверхность на прибрежных аэродромах с заходом самолётов на посадку со стороны моря целесообразно представлять поверхностью в виде уступа. Для целей моделирования траектории захода самолёта на посадку непосредственно аэродромная поверхность представляется идеально проводящей полуплоскостью. Поверхность моря считается идеально проводящей. Модель для приближённого электродинамического анализа получена путём зеркального отражения полуплоскости и антенн относительно плоской водной поверхности. Искомое приближённое решение краевой задачи в области вдали от уступа представлено суммой двух полей. Первое поле — это поле дифракции волн, излучаемых реальными источниками на полуплоскости, отображающей непосредственно аэродромную поверхность. Второе поле есть поле дифракции волн, излучаемых мнимыми источниками, на мнимой полуплоскости. При этом поле дифракции сферической волны на полуплоскости представляется в дальней зоне суммой полей обобщённой падающей и обобщённой отражённой волн. Результаты численных исследований относительных величин полей двух источников на поверхности в виде уступа хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными лётным путём, на больших расстояниях от радиомаяка.

В настоящей статье мы ставим своей задачей устранить ограничение области для анализа дальней зоной. Во-первых, избавиться от ограничения, связанного с предположением, что излучающие диполи, образующие антенную решётку ГРМ параллельны ребру полуплоскости и, во-вторых, избавиться от предположения, что источник излучения и точка наблюдения находятся в одной и той же плоскости, перпендикулярной краю полуплоскости.

В настоящей работе подстилающую поверхность прибрежного аэродрома представим полуплоскостью, простирающейся от ГРМ до обрыва аэродромной поверхности к морю. Влияние водной поверхности исключим из рассмотрения.

Нашей целью является вычисление вклада в искривления траектории захода воздушного судна на посадку, обусловленного конечными размерами площадки перед ГРМ. Для достижения этой цели необходимо найти приближенное решение задачи дифракции волн диполя в присутствии полуплоскости, простое для вычислений, обладающее физической наглядностью.

2. Постановка задачи

Решения задач дифракции электромагнитных волн, излучаемых диполями, на идеально проводящей полуплоскости впервые были получены Т. Сеньором [13] и Ю. Вандакуровым [14]. Однако выражения для полей $\vec{E}$ (вектор напряжённости электрического поля) и $\vec{H}$ (вектор напряжённости магнитного поля) в общем случае произвольно ориентированных диполей не были выписаны. Вычисление полей в [13] и [14] сведено к вычислению некоторых интегралов.

В дальнейшем в близких по форме интегралах электромагнитные поля, порождённые диполями в присутствии идеально проводящей полуплоскости, представлены Тужилиным А.А. [15, 16]. По предложению Г.Д. Малюжинца этим интегралам дано название интегралов Макдональда.

Однако, использование представления электромагнитных полей, порождённых произвольно ориентированными диполями в присутствии идеально проводящей полуплоскости, через интегралы Макдональда для решения практических задач встречает затруднение. Представленные решения не обладают физической наглядностью. Интегралы Макдональда являются несобственными интегралами, что затрудняет создание программ счёта указанных полей. Кроме того, в решении присутствуют неопределённости вида $\frac{0}{0}$. Поэтому целесообразно на основе строгого решения задачи найти приближённые решения, которые обладали бы физической наглядностью и были бы удобны для численных расчётов.

3. Анализ строгого представления электромагнитных полей, порождённых диполями в присутствии идеально проводящей полуплоскости, через интегралы Макдональда

Для приближённого решения задачи найдём коротковолновое асимптотическое представление строгого решения задачи дифракции сферической волны на идеально проводящей полуплоскости.

В известном строгом решении [15] предполагается, что идеально проводящая полуплоскость расположена на плоскости y = 0 вдоль отрицательной полуоси x, т.е. её точки удовлетворяют соотношению y = 0, x<0. Все рассмотрения ведутся в цилиндрической системе координат $(\rho,\ \varphi,\ z)$ с полярной осью вдоль оси z — кромки полуплоскости.

Предполагается, что диполь расположен в точке $r_0(\rho_0,\ \varphi_0, z_0)$; его момент $\vec{\mathrm{P}}$ представлен в виде двух составляющих — одной вдоль оси z, единичный орт которой обозначен через $\vec{e}_1$, и второй — ортогональной оси z, т.е.

$$\vec{\mathrm{P}} = P\left(\cos\theta_0\vec{e}_1 + \sin\theta_0\vec{e}_2\right),$$

где $P = \left|\vec{\mathrm{P}}\right|$ — длина вектора $\vec{\mathrm{P}}$; $\vec{e}_2$ является единичным вектором, лежащим в плоскости, перпендикулярной оси z, и направленным вдоль проекции вектора $\vec{\mathrm{P}}$ на эту плоскость. Орт $\vec{e}_2$ составляет с осью x угол ψ, т.е.

$$\vec{e}_2 = \cos\psi\vec{i} + \sin\psi\vec{j},$$

$\vec{i}$, $\vec{j}$ — единичные орты соответственно вдоль осей x и y (рис. 1).

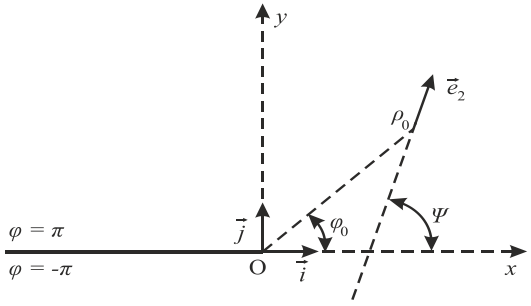

Рис. 1. Система координат.

Электромагнитные поля $\vec{E}(\rho,\varphi,z)$ и $\vec{H}(\rho,\varphi,z)$ удовлетворяют уравнениям Максвелла:

$$rot\,\vec{E} = \frac{i\omega\mu}{c}\vec{H} - \frac{4\pi}{c}\vec{j}^{*}$$

$$rot\,\vec{H} = \frac{\kappa^2 c}{i\omega\mu}\vec{E} + \frac{4\pi}{c}\vec{j}\ ,$$

где ω — частота колебаний, $\tilde{n}$ — скорость света, κ — волновое число, ε и μ — диэлектрическая и магнитная проницаемости среды. Если поле возбуждается электрическим диполем с электрическим диполем $\vec{\mathrm{P}}$, то $\vec{j}^{*} = 0$, $\vec{j} = -i\omega\mathrm{P}\delta(\vec{r} - \vec{r}_0)$, $\delta(\vec{r})$ — трёхмерная функция Дирака, $\vec{r}(\rho,\varphi,z)$. На гранях полуплоскости, т.е. при $\varphi = \pm\pi$ тангенциальная составляющая $\vec{E}$ должна обращаться в нуль; в окрестности кромки полуплоскости $\vec{E}$ и $\vec{H}$ удовлетворяют условиям Майкснера, т.е. компоненты $\vec{E}$ и $\vec{H}$, параллельные кромке, должны быть конечны на кромке, а остальные компоненты могут обращаться в бесконечность не быстрее $\rho^{-\frac{1}{2}}$. $\vec{E}$ и $\vec{H}$ должны удовлетворяют условиям излучения Зоммерфельда.

Векторы $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в полученном в [15, 16] решении представляются через интегралы Макдональда. Электрическое поле $\vec{E}(\rho,\varphi,z)$ в присутствии идеально проводящей полуплоскости, расположенной, как указано на рис. 1, определяется через вектор функцию $\vec{\Phi}_1(\beta,\delta)$:

где:

$$\vec{a}(\beta,\delta) = \frac{\left(\vec{r} - \vec{r}_0(\delta)\right)\left(\vec{e}_{\beta+\delta}, \vec{r} - \vec{r}_0(\delta)\right)}{R^2(\varphi - \delta)}. \quad (2)$$

$$\vec{E}(\rho,\varphi,z) = \frac{\omega^2\mu}{c^2k^2}\Big[\vec{\Phi}_1(-\varphi_0,-\varphi_0) - \vec{\Phi}_1(\varphi_0 - 2\psi, \varphi_0 - 2\pi)\Big]. \quad (3)$$

В (1) приняты обозначения:

$$\vec{e}_\alpha = \cos\theta_0\vec{e}_1 + \sin\theta_0\left(\cos\alpha\vec{e}_2 + \sin\alpha\vec{e}_3\right), \quad (4)$$

$H_0^{(1)}(n)$, $H_1^{(1)}(n)$ — функции Ханкеля,

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda};\ \ R(\alpha) = \sqrt{\rho^2 + \rho_0^2 + (z - z_0)^2 - 2\rho\rho_0\cos\alpha}, \quad (5)$$

$$R_0 = R(\pi) = \sqrt{(\rho + \rho_0)^2 + (z - z_0)^2}, \quad (6)$$

$M_n(x, y)$ — интеграл Макдональда:

$$M_n(x,\ y) = \int_{-\infty}^{Arsh} H_n^{(1)}(y\,ch\xi)\frac{d\xi}{(ch\xi)^{n-1}}d\xi. \quad (7)$$

Сравним между собой по величине слагаемые в векторной функции $\vec{\Phi}_1(-\varphi_0,-\varphi_0)$ (а также и в векторной функции $\vec{\Phi}_1(\varphi_0,\varphi_0 - 2\pi)$).

Как показывает анализ, векторные множители в фигурных скобках — это некоторые векторы, определяющие поляризацию той или иной волны. Векторные множители представляют собой величины по модулю равные единице.

Найдём соотношение τ_1 скалярных множителей в первых двух слагаемых, включающих в себя функции Ханкеля $H_1^{(1)}(kR_0)$ и $H_0^{(1)}(kR_0)$:

$$\tau_1 = \frac{\dfrac{Pik}{2\sqrt{\rho\rho_0}R_0}H_1^{(1)}(kR_0)}{\dfrac{Pik^2}{2\sqrt{\rho\rho_0}}H_0^{(1)}(kR_0)} = \frac{1}{\kappa R_0}\frac{H_1^{(1)}(kR_0)}{H_0^{(1)}(kR_0)}. \quad (8)$$

Асимптотика функций Ханкеля при больших значениях аргумента x имеет вид [17]:

$$H_\nu^{(1)}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}}e^{i\left(x - \nu\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} - 0\left(x^{-\frac{3}{2}}\right). \quad (9)$$

Следовательно, при $kR_0 >> 1$,

$$\left|\frac{H_1^{(1)}(kR_0)}{H_0^{(1)}(kR_0)}\right| \approx 1. \quad (10)$$

Тогда

$$\left|\tau_1\right| \approx \frac{1}{\kappa R_0}. \qquad (11)$$

Следовательно, при $kR_0 >> 1$ в приближённых расчётах слагаемым с функцией $H_1^{(1)}(kR_0)$ в качестве множителя можно пренебречь.

Найдём теперь соотношение τ_2 третьего и четвёртого слагаемых, включающие в себя соответственно функции $M_0(x, y)$ и $M_1(x, y)$.

$$\tau_2 = \frac{\frac{Pik^2}{2R(\varphi+\delta)} M_0\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi+\delta)}\cos\frac{\varphi+\delta}{2}, kR(\varphi+\delta)\right)}{\frac{Pik^3}{2} M_1\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi+\delta)}\cos\frac{\varphi+\delta}{2}, kR(\varphi+\delta)\right)}. \qquad (12)$$

Воспользуемся равномерным по x при $|x| \geq \varepsilon > 0$ (ε — произвольно малое число) разложением функции $M_n(x, y)$ в асимптотический ряд по асимптотической последовательности

$$\left.\frac{H^{(1)}_{m+1-n}\left(y\sqrt{1+x^2}\right)}{\left(y\sqrt{1+x^2}\right)^{m+1}}\right|_{m \in N}: \qquad (13)$$

$$M_n(x,y) \square \begin{cases} \sqrt{\frac{2\pi}{y}} H^{(1)}_{n-\frac{1}{2}}(y) & при\ \ x>0 \\ 0 & при\ \ x<0 \end{cases} +$$

$$+\frac{(-1)^n x}{\sqrt{\pi}\left(1+x^2\right)^{\frac{n}{2}}} \sum_{m=0}^{\infty} 2^m \Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right)\left(1+\frac{1}{x^2}\right)^{m+1} \frac{H^{(1)}_{m+1-n}\left(y\sqrt{1+x^2}\right)}{\left(y\sqrt{1+x^2}\right)^{m+1}}. \qquad (14)$$

Пусть x>0, $y\sqrt{1+x^2} >> 1$.

Тогда

$$M_n(x,y) \approx \sqrt{\frac{2\pi}{y}} H^{(1)}_{n-\frac{1}{2}}(y). \qquad (15)$$

Функции Ханкеля с полуцелым индексом $H^{(1)}_{\frac{1}{2}}(y)$ и $H^{(1)}_{-\frac{1}{2}}(y)$ выражаются через тригонометрические функции [17]:

$$H^{(1)}_{\frac{1}{2}}(x) = -i\sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{ix}, H^{(1)}_{-\frac{1}{2}}(x) = i\sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{-ix}. \qquad (16)$$

Тогда

$$\tau_2 = \frac{\frac{1}{R(\varphi+\delta)} H^{(1)}_{-\frac{1}{2}}(x)}{kH^{(1)}_{\frac{1}{2}}(x)} = -\frac{e^{-2ix}}{kR(\varphi+\delta)}. \qquad (17)$$

$$\left|\tau_2\right| = \frac{1}{kR(\varphi+\delta)}. \qquad (18)$$

Следовательно, при $kR(\varphi+\delta) >> 1$ третьим слагаемым в сравнении с четвёртым можно пренебречь.

Заметим, что,

$$R(\varphi+\delta)\Big|_{\delta=-\varphi_0} = R(\varphi-\varphi_0), \qquad (19)$$

где $R(\varphi-\varphi_0)$ — расстояние между диполем и точкой наблюдения;

$$R(\varphi+\delta)\Big|_{\delta=\varphi_0} = R(\varphi+\varphi_0), \qquad (20)$$

где $R(\varphi+\varphi_0)$ — расстояние между мнимым источником и точкой наблюдения.

Таким образом, в дальнейших исследованиях бу-

$$\vec{\Phi}_1(\beta,\delta) = \left\{\left[\vec{e}_1\left[\vec{e}_{\frac{\varphi-\delta}{2}+\beta}, \vec{e}_1\right]\right] - \frac{\vec{a}(\beta,-\delta)-\vec{a}(\beta,\ \pi+\varphi)}{2\cos\frac{\varphi+\delta}{2}}\right\} \frac{Pik^2}{2\sqrt{\rho\rho_0}} H_0^{(1)}(kR_0) -$$

$$-\left\{\begin{array}{l} \frac{1}{2}\left[\vec{e}_1\left[\vec{e}_{\frac{\varphi-\delta}{2}+\beta}, \vec{e}_1\right]\right] - \frac{\vec{a}(\beta,-\delta)-\vec{a}(\beta,\ \pi+\varphi)}{2\cos\frac{\varphi+\delta}{2}} + \\ +\frac{2\rho\rho_0}{R^2(\varphi+\delta)}\cos\frac{\varphi+\delta}{2}\left(\vec{e}_{\beta-\delta} - 3\vec{a}(\beta,-\delta)\right) \end{array}\right\} \frac{Pik}{2\sqrt{\rho\rho_0}R_0} H_1^{(1)}(kR_0) + \qquad (1)$$

$$+\frac{Pik^2}{2R(\varphi+\delta)}\left(\vec{e}_{\beta-\delta} - 3\vec{a}(\beta,-\delta)\right) M_0\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi+\delta)}\cos\frac{\varphi+\delta}{2}, kR(\varphi+\delta)\right) +$$

$$+\frac{Pik^3}{2}\left(\vec{e}_{\beta-\delta} - \vec{a}(\beta,-\delta) - \frac{\vec{e}_{\beta-\delta} - 3\vec{a}(\beta,-\delta)}{k^2R^2(\varphi+\delta)}\right) \times$$

$$\times M_1\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi+\delta)}\cos\frac{\varphi+\delta}{2}, kR(\varphi+\delta)\right),$$

дем использовать следующую приближённую формулу $\vec{\Phi}_1(\beta,\delta)$:

$$\vec{\Phi}_1(\beta,\delta)\approx\left\{\left[\vec{e}_1\left[\vec{e}_{\frac{\varphi-\delta}{2}+\beta},\vec{e}_1\right]\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{\vec{a}(\beta,-\delta)-\vec{a}(\beta,\ \pi+\varphi)}{2\cos\frac{\varphi+\delta}{2}}\right\}\frac{Pik^2}{2\sqrt{\rho\rho_0}}H_0^{(1)}(kR_0)+$$

$$+\frac{Pik^3}{2}\left(\vec{e}_{\beta-\delta}-\vec{a}(\beta,-\delta)-\frac{\vec{e}_{\beta-\delta}-3\vec{a}(\beta,-\delta)}{k^2R^2(\varphi+\delta)}\right)\times$$

$$\times M_1\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi+\delta)}\cos\frac{\varphi+\delta}{2},\ kR(\varphi+\delta)\right) \quad (21)$$

4. Приближённая формула напряжённости электрического поля, порождённого диполем в присутствии идеально проводящей полуплоскости

Приближённую формулу напряжённости электрического поля $\vec{E}(\rho,\varphi,z)$ в присутствии идеально проводящей полуплоскости получим, если в формулу (3) подставить приближённые значения векторной функции $\vec{\Phi}_1(\beta,\delta)$ (21).

$$\vec{E}(\rho,\varphi,z)\approx\left\{\left[\vec{e}_1\left[\vec{e}_{\frac{\varphi-\varphi_0}{2}},\vec{e}_1\right]\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{\vec{a}(-\varphi_0,\ \varphi_0)-\vec{a}(-\varphi_0,\ \pi+\varphi)}{2\cos\frac{\varphi-\varphi_0}{2}}\right\}\times$$

$$\times\frac{Pik^2}{2\sqrt{\rho\rho_0}}H_0^{(1)}(kR_0)+\frac{Pik^3}{2}\left(\vec{e}_0-\vec{a}(-\varphi_0,\ \varphi_0)-\right.$$

$$\left.-\frac{\vec{e}_0-3\vec{a}(-\varphi_0,\ \varphi_0)}{k^2R^2(\varphi-\varphi_0)}\right)\times M_1\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi-\varphi_0)}\cos\frac{\varphi-\varphi_0}{2},\right.$$

$$\left.kR(\varphi-\varphi_0)\right)-\left\{\left[\vec{e}_1\left[\vec{e}_{\frac{\varphi-(\varphi_0-2\pi)}{2}+\varphi_0},\vec{e}_1\right]\right]-\right.$$

$$\left.-\frac{\vec{a}(\varphi_0,-\varphi_0+2\pi)-\vec{a}(\varphi_0,\ \pi+\varphi)}{2\cos\frac{\varphi+\varphi_0-2\pi}{2}}\right\}\times$$

$$\times\frac{Pik^2}{2\sqrt{\rho\rho_0}}H_0^{(1)}(kR_0)+\frac{Pik^3}{2}\left(\vec{e}_{2\pi}-\vec{a}(\varphi_0,-\varphi_0+\right.$$

$$\left.+2\pi)-\frac{\vec{e}_{2\pi}-3\vec{a}(\varphi_0,-\varphi_0+2\pi)}{k^2R^2(\varphi+\varphi_0-2\pi)}\right)\times$$

$$\times M_1\left(\frac{2\sqrt{\rho\rho_0}}{R(\varphi+\varphi_0-2\pi)}\cos\frac{\varphi+\varphi_0-2\pi}{2},\right.$$

$$\left.kR(\varphi+\varphi_0-2\pi)\right). \quad (22)$$

Воспользовавшись равномерным по x при $|x|\geq\varepsilon>0$ (ε — произвольно малое число) разложением функции M_n (x, y) в асимптотический ряд по асимптотической последовательности получим расчётные формулы для приближённого вычисления напряжённости электрического поля.

$$\left.\frac{H_{m+1-n}^{(1)}\left(y\sqrt{1+x^2}\right)}{\left(y\sqrt{1+x^2}\right)^{m+1}}\right|_{m\in N},$$

5. Теоретические и экспериментальные результаты поведения глиссады ГРМ на площадке ограниченных размеров

На рис. 2 приведён вид со спутника прибрежной части аэродрома.

Извилистая белая полоса в нижней части рисунка обусловлена набегающими на берег морскими волнами. Ниже этой полосы — море, выше земная аэродромная поверхность. Серая полоса с белыми разметками — взлётно-посадочная полоса. Перпендикулярная к ней полоска — рулёжная дорожка. Высота обрыва на границе земная поверхность-поверхность моря равна 1,5м. В точке O установлен ГРМ. Таким образом, ГРМ установлен на земной площадке ограниченных размеров.

Аппроксимируем подстилающую поверхность для ГРМ идеально проводящей полуплоскостью П, расположенной на плоскости y = 0 вдоль отрицательной полуоси x, П(y = 0, x < 0) (рис.3).

На рис. 3 точка B (точка пересечения оси ВПП с ребром полуплоскости) — начало декартовой системы координат (B, x, y, z) и начало оси z цилиндрической системы координат.

Ось z декартовой системы координат направлена вдоль ребра клина.

ГРМ установлен в точке O на расстоянии 150 м от оси O_1O_1 ВПП и 200 м от торца ВПП. Точка A – проекция источника Q на ось ВПП. Расстояние AB от проекции A источника на ось ВПП до точки B пересечения оси ВПП с ребром полуплоскости равно 270 м.

Ось ВПП образует с ребром полуплоскости угол, равный $\Theta=69^0$. Высота подвеса h верхней антенны ГРМ, расположенной в точке Q, равна 2,55 м. Расстояние Oz_0 равно 198 м. Полуплоскость наклонена относительно горизонтальной плоскости на 25′. Угол глиссады относительно горизонтальной плоскости равен 3^0 и, следовательно, относительно полуплоскости равен 3^0 25′.

Рассмотрим самый простой из семейства ГРМ, так называемый ГРМ с «опорным нулём»

Рис. 2. Вид со спутника прибрежной части аэродрома

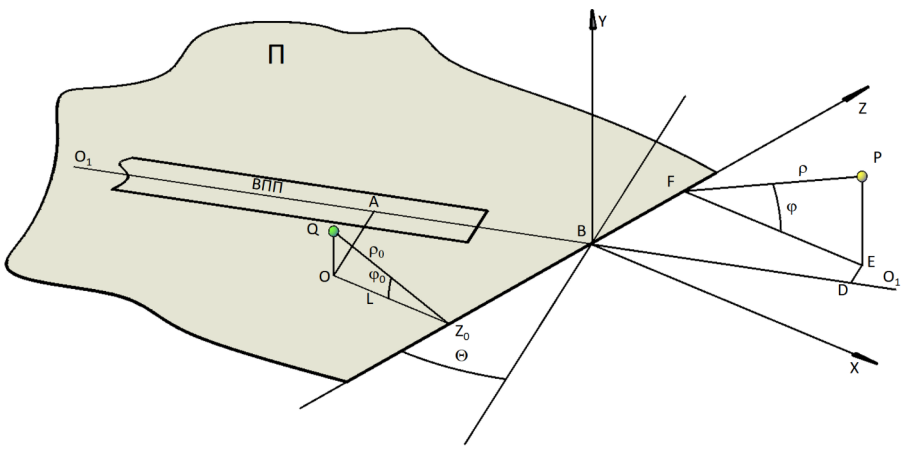

Рис. 3. Модель подстилающей поверхности в виде полуплоскости

[18]. Он включает в себя две антенны, установленные друг над другом на вертикальной мачте; высоты подвеса относительно поверхности Земли верхней h_1 и нижней h_2 антенн равны:

$$h_1 = \frac{\lambda}{2\sin\left(\theta_{gl} + \eta\right)},\ h_2 = \frac{\lambda}{4\sin\left(\theta_{gl} + \eta\right)}, \quad (24)$$

где: λ — длина волны, θ_{gl} — угол глиссады, η — угол уклона местности.

Будем для определённости рассматривать ГРМ дециметрового диапазона волн (ДЦВ) [18]. ГРМ ДЦВ формирует в окружающем пространстве навигационный параметр, называемый коэффициентом разнослышимости сигналов (*КРС*)[18].

$$KPC = \frac{\left|E_2(R,\theta) + aE_1(R,\theta)\right| - \left|E_2(R,\theta) - aE_1(R,\theta)\right|}{\left|E_2(R,\theta) + aE_1(R,\theta)\right| + \left|E_2(R,\theta) - aE_1(R,\theta)\right|} \quad (23)$$

где: (R,θ) — координаты точки наблюдения в полярной системе координат с началом в основании мачты; угол θ отсчитывается от плоскости против хода часовой стрелки;

$E_2(R,\theta)\left[E_1(R,\theta)\right]$ — комплексная амплитуда напряжённости электрического поля, формируемого нижней (верхней) антенной;

а — коэффициент, равный отношению амплитуды тока в верхней антенне к амплитуде тока в нижней антенне.

На рис. 4 представлена зависимость КРС на прямой, проходящей через точку А и составляющей угол

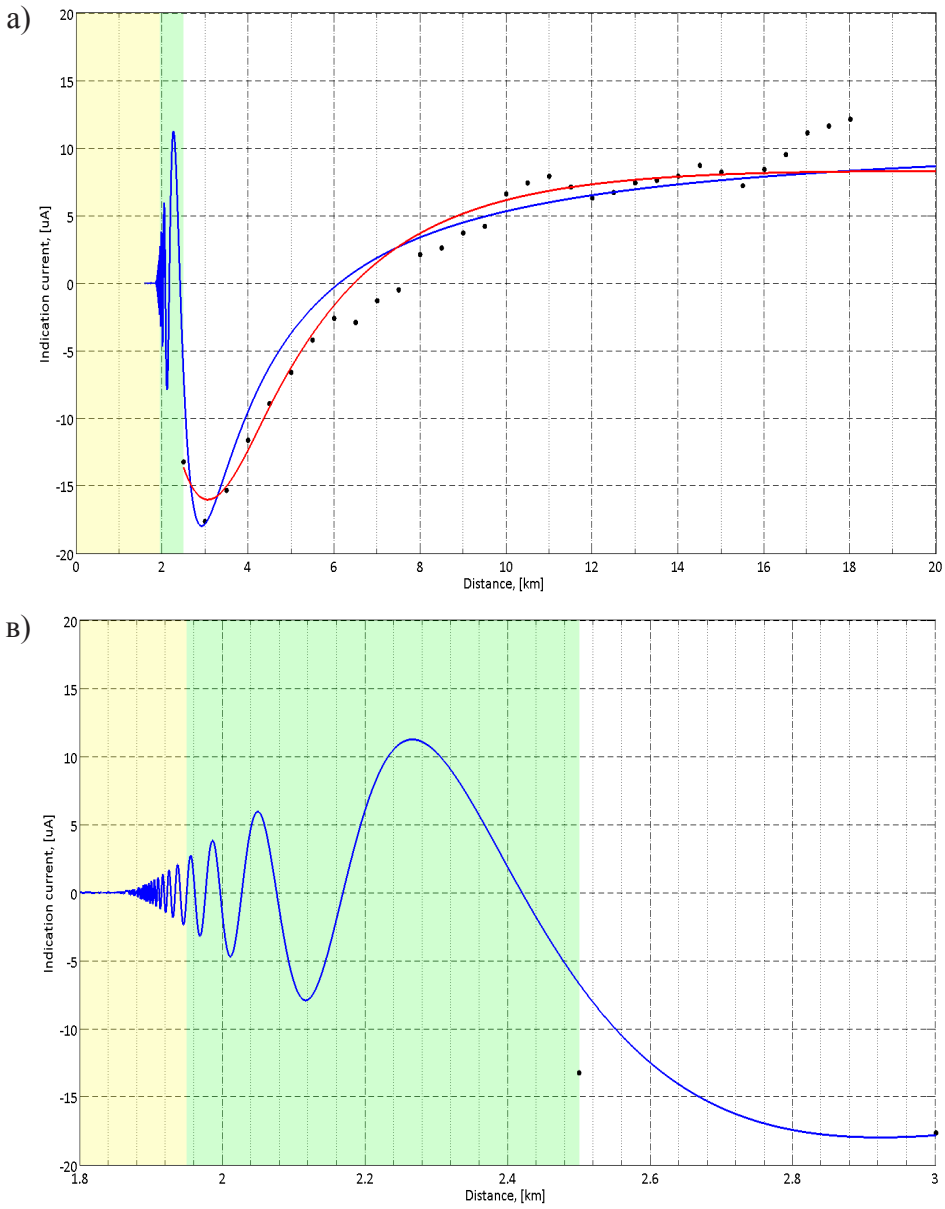

Рис.4. Зависимость Коэффициента Разнослышимости Сигналов (КРС) от дальности

3^0 25′ с осью ВПП. По горизонтальной оси отложена дальность вдоль оси ВПП относительно её центра. С приближением к ВПП, на участке от 20 км до 3 км КРС монотонно убывает, достигая минимума на удалении 3 км. Ближе 3 км зависимость КРС от расстояния имеет вид осциллирующей кривой, убывающей по амплитуде. На рис на бесцветном, зелёном и жёлтом участках приняты разные масштабы вдоль горизонтальной оси с целью демонстрации убывания периода осцилляций. Красным цветом представлен график функции КРС, вычисленной для модели подстилающей поверхности в предположении ортогональности оси ВПП с ребром полуплоскости. При этом ГРМ расположен на оси ВПП. Синим цветом представлена зависимость КРС от дальности в предположении, что ГРМ, как лётное препятствие, вынесен относительно оси ВПП. Ось ВПП составляет с ребром полуплоскости угол, равный 69^0. Точками отмечены результаты летных измерений для ГРМ, установленном на аэродроме, как показано на рис. 4.

Как следует из рассмотрения графиков на рис. 4, поведение КРС на луче, определяющее искривления глиссады, имеет одинаковый характер для представленных двух моделей подстилающей поверхности. Экспериментальные данные, представленные для больших удалений от ГРМ близки к расчетным по одной и другой модели. Колебательный характер зависимости на небольших расстояниях от ГРМ объясняется изменением фазовых соотношений между краевой волны и падающей и отражённой волнами.

6. Выводы

С целью выявления закономерностей в поведении глиссады, обусловленного конечными размерами земной площадки перед ГРМ, предложено подстилающую поверхность, на которой расположен ГРМ, аппроксимировать идеально проводящей полуплоскостью. На основе строгого решения задачи дифракции электромагнитного поля, созданного дипольным источником на идеально проводящей полуплоскости, получено приближённое решение задачи дифракции.

В области пространства, в которой расположена глиссада, приближённое решение представлено суммой полей двух сферических волн: волны, падающей непосредственно от диполя (реального источника), волны, зеркально отражённой от полуплоскости (мнимого источника) и краевой волны, формируемой в окрестности ребра полуплоскости. Поведение глиссады обусловлено интерференцией поля краевой волны с полем волн реального и мнимого источников. Расчётная зависимость информационного параметра от дальности в области далее ребра полуплоскости близка к экспериментальной зависимости, полученной лётным путём на прибрежном аэродроме, на котором ось ВПП составила с кромкой обрыва аэродромной поверхности к морю угол 690, а расстояние от проекции ГРМ на ось ВПП до точки пересечения оси ВПП с обрывом равно 435 м.

Целесообразно продолжить численные исследования влияния ограниченных размеров площадки на поведение глиссады.

Литература

1. Watts, C.B., Jr. Instrument Landing Scrapbook / C.B., Jr. Watts. – Trafford Publishing, 2005. – 392 p.

2. НИИ-33 / ВНИИРА. История становления и развития Всесоюзного НИИ радиоаппаратуры. – СПб., 2007. – 291 с.

3. Войтович Н.И., Жданов Б.В. "Четыре ключевых технических решений в истории развития ILS (системы посадки самолётов)" //Сборник 28-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Материалы конференции. – 9-15 Сентября 2018 г. Том 8 – С.1882-1890. Севастополь, Крым, Россия.

4. Патент РФ на изобретение № 2429499 "Глиссадный радиомаяк" авторов Войтовича Н.И. и Жданова Б.В. и Соколова А.Н.

5. Iungaitis E.M., Voytovich N.I., Ershov A.V., Zhdanov B.V., Zotov A.V. ILS Glide Slope Antenna Array for Airfields with a High Level of Snow Cover. 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), https://ieeexplore.ieee.org/document/8740267.

6. A.Thain and others. Stealh Buidings at Airbus Group Innovations. IEEE Antennas & Propagation Magazine. – February 2016.

7. S. Odunaiya, "A physical theory of diffraction model for predicting the effects of multipath on ILS and VOR performance," in Proc. 1999 Nat. Technical Meeting Institute Navigation, San Diego, CA, Jan. 1999, P. 435–446.

8. R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods. Piscataway, NJ: IEEE Press, ISBN 0780310144, 1993.

9. M. Song and W. C. Chew, "Multilevel fast multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering," Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 10, no. 1, P. 14–19, 1995.

10. Unichi Honda, Hirohisa Tajima and Hisashi Yokoyama "Influences of ILS Localizer Signalover Complicated Terrain". Proceedings of the 11th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2017). - Springer.

11. Unichi Honda, Hirohisa Tajima and Hisashi Yokoyama "Numerical Simulation of Glide Slope Signal Interferences by Irregular Ground" WEB, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND APPLICATIONS. Proceedings of the Workshops of the 33rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (WAINA-2019). - Springer.

12. Yungaitis E.M., Voytovich N. I.,Golovnin A. A., Zhdanov B. V. "Radio Wave Diffraction on Ledge-like Underlying Surface", IET Conference Publications, 12th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2018, DOI: 10.1049/cp.2018.1080.

13. J.J. Bowman and T.B.A. Senior. Diffraction of a Dipole Field by a Perfectly Conducting Half Plane. Radio Science. Vol.2 (New Series). No.11. November 1967.

14. Vandakurov Y.V. Diffraction of electromagnetic waves by an arbitrarily oriented electric or magnetic dipole on a perfectly conducting half plane. Journal of Experimental and Theoretical Physics. - 1954. Vol. 26, pp. 3-18 (in Russian).

15. Тужилин, А.А Представление электромагнитных полей, порожденных диполями в присутствии идеально проводящей полуплоскости, через интегралы Макдональда, Дифференц. уравнения, 1967, том 3, номер 11, 1971–1989

16. Тужилин, А.А. Асимптотические разложения решений задач дифракции волн в угловых и клиновидных областях / А.А. Тужилин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1970. – Том 10, № 1. – С. 99-113.

17. Андреева Т.Г. Математика: Специальные функции и некоторые приложения. СПб.: РГГМУ, 2013. — 102 с.

18. G.A.Paholkov, V.V.Kashinov, M.E.Solomonik, U.G.Shatrakov. [Gauge radioengineering landing systems: (Forecasting of precision characteristics)]. G.A.– M.: Transport, 1982. –p.159. (In Russian).

References

1. Watts, C.B., Jr. Instrument Landing Scrapbook / C.B., Jr. Watts. – Trafford Publishing, 2005. – 392 p.

2. NII-33 / VNIIRA. Istorija stanovlenija i razvitija Vsesojuznogo NII radioapparatury. – SPb., 2007. – 291 s.

3. Vojtovich N.I., Zhdanov B.V. "Chetyre kljuchevyh tehnicheskih reshe-nij v istorii razvitija ILS (sistemy posadki samoljotov)" //Sbornik 28-oj Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii «SVCh-tehnika i telekommunikaci-onnye tehnologii» (KryMiKo'2018). Materialy konferencii. – 9-15 Sen-tjabrja 2018 g. Tom 8 – S.1882-1890. Sevastopol', Krym, Rossija.

4. Patent RF na izobretenie № 2429499 "Glissadnyj radiomajak" av-torov Vojtovicha N.I. i Zhdanova B.V. i Sokolova A.N.

5. Iungaitis E.M., Voytovich N.I., Ershov A.V., Zhdanov B.V., Zotov A.V. ILS Glide Slope Antenna Array for Airfields with a High Level of Snow Cover. 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), https://ieeexplore.ieee.org/document/8740267.

6. A.Thain and others. Stealh Buidings at Airbus Group Innovations. IEEE Antennas & Propagation Magazine. – February 2016.

7. S. Odunaiya, "A physical theory of diffraction model for predicting the effects of multipath on ILS and VOR performance," in Proc. 1999 Nat. Technical Meeting Institute Navigation, San Diego, CA, Jan. 1999, P. 435–446.

8. R. F. Harrington, Field Computation by Moment Methods. Piscataway, NJ: IEEE Press, ISBN 0780310144, 1993.

9. M. Song and W. C. Chew, "Multilevel fast multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering," Microwave Opt. Technol. Lett., vol. 10, no. 1, P. 14–19, 1995.].

10. Unichi Honda, Hirohisa Tajima and Hisashi Yokoyama "Influences of ILS Localizer Signalover Complicated Terrain". Proceedings of the 11th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2017). - Springer.

11. Unichi Honda, Hirohisa Tajima and Hisashi Yokoyama "Numerical Simulation of Glide Slope Signal Interferences by Irregular Ground" WEB, ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND APPLICATIONS. Proceedings of the Workshops of the 33rd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (WAINA-2019). - Springer.

12. Yungaitis E.M., Voytovich N. I.,Golovnin A. A., Zhdanov B. V. "Radio Wave Diffraction on Ledge-like Underlying Surface", IET Conference Publications, 12th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2018, DOI: 10.1049/cp.2018.1080.

13. J.J. Bowman and T.B.A. Senior. Diffraction of a Dipole Field by a Perfectly Conducting Half Plane. Radio Science. Vol.2 (New Series). No.11. November 1967.

14. Vandakurov Y.V. Diffraction of electromagnetic waves by an arbitrarily oriented electric or magnetic dipole on a perfectly conducting half plane. Journal of Experimental and Theoretical Physics. - 1954. Vol. 26, pp. 3-18 (in Russian).

15. Tuzhilin, A.A Predstavlenie jelektromagnitnyh polej, porozhden-nyh dipoljami v prisutstvii ideal'no provodjashhej poluploskosti, cherez integraly Makdonal'da, Differenc. uravnenija, 1967, tom 3, nomer 11, 1971–1989.

16. Tuzhilin, A.A. Asimptoticheskie razlozhenija reshenij zadach di-frakcii voln v uglovyh i klinovidnyh oblastjah / A.A. Tuzhilin // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoj fiziki. – 1970. – Tom 10, № 1. – S. 99-113.

17. Andreeva T.G. Matematika: Special'nye funkcii i nekotorye prilozhenija. SPb.: RGGMU, 2013. — 102 s.

18. G.A.Paholkov, V.V.Kashinov, M.E.Solomonik, U.G.Shatrakov. [Gauge radioengineering landing systems: (Forecasting of precision characteristics)]. G.A.– M.: Transport, 1982. –p.159. (In Russian).

ВОЙТОВИЧ Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский госу-

дарственный университет (национальный исследовательский университет)». Россия, 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: voytovichni@mail.ru

VOYTOVICH Nikolay Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (National Research University)". 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: voytovichni@mail.ru

ЮНГАЙТИС Екатерина Михайловна, младший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: jungaitis92@gmail.ru

IUNGAITIS Ekaterina Mikhailovna, junior researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (National Research University)". 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: jungaitis92@gmail.ru

ЕРШОВ Алексей Валентинович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)». 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76. E-mail: eav@list.ru

ERSHOV Aleksey Valentinovich, PhD in Engineering sciences, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University (National Research University)". 76, Lenin prospect, Chelyabinsk, 454080, Russia. E-mail: eav@list.ru