

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУКАХ MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL SCIENCES



Научная статья

DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73

УДК 519.62; 51.73

Дата: поступления статьи: 02.02.2023
после рецензирования: 16.03.2023
принятия статьи: 30.05.2023

И.В. Семенова

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: semenova.iv@ssau.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6400-4682>

А.А. Корнеева

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева, г. Самара, Российская Федерация
E-mail: korneevaaa2002@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4344-3357>

ПОЛЕ НАПРАВЛЕННОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

АННОТАЦИЯ

В связи с тем, что именно к низкочастотным относятся многие излучатели волн, которые способен воспринимать человек, актуальными являются исследования звуковых полей, создаваемых такими излучателями. Благодаря полученным результатам становится возможным понимать, в каких направлениях и с какой мощностью будет распространяться созданное ими звуковое поле, формировать практические рекомендации по выбору зоны, наиболее подходящей для наблюдения за ними, решать обратные задачи по определению их местоположения. В результате проведенного анализа существующих моделей, используемых для описания акустических излучателей, установлено, что наиболее адекватными являются модели, учитывающие направленность источников звука. Среди них отдельного внимания заслуживает параметрическая модель, предложенная Г.Н. Кузнецовым и А.Н. Степановым, которая и была использована в статье. В качестве модельного представления атмосферы была выбрана система однородных слоев, в одном из которых находится источник. Для выбранных моделей источника и среды поставлена краевая задача нахождения потенциала создаваемого источником поля, получены точные и приближенные соотношения, которые могут быть использованы для решения прямых и обратных задач, связанных с мультипольным излучателем. Проведено исследование влияния на амплитудную составляющую поля таких факторов, как высота и частота источника, а также горизонтальное расстояние между источником и приемником.

Ключевые слова: направленный низкочастотный излучатель; неоднородное пространство; система однородных слоев; поле акустического излучателя; потенциал поля; амплитуда; коэффициент отражения; импеданс.

Цитирование. Семенова И.В., Корнеева А.А. Поле направленного низкочастотного акустического излучателя в пограничном слое атмосферы // Вестник Самарского университета. Естественнонаучная серия. 2023. Т. 29, № 1. С. 64–73. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73>.

Информация о конфликте интересов: авторы и рецензенты заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© Семенова И.В., 2023

Семенова Ирина Владимировна — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной математики, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

© Корнеева А.А., 2023

Корнеева Анастасия Александровна — студент механико-математического факультета, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Российская Федерация, г. Самара, Московское шоссе, 34.

1. Модели направленных низкочастотных акустических излучателей

В [1–3], а также рядом других авторов показано не только то, что многие реальные акустические излучатели обладают свойством направленности, но и то, что для построения адекватных моделей таких излучателей необходимо учитывать это свойство, так как оно оказывает существенное влияние на создаваемое ими поле. Однако, например, в [4–6] и других современных работах при решении важных практических задач все еще используется модель монополя — ненаправленного акустического излучателя.

Для описания направленности источников звука предлагаются различные подходы. Условно их можно разделить на непараметрические [7–10] и параметрические [11–13]. Чаще всего авторами непараметрических моделей предлагается рассматривать реальный источник звука как совокупность монополей или диполей, которые непрерывно распределены по поверхности или объему источника. Однако функция, описывающая такой закон распределения, как правило, задается очень большим или даже бесконечным количеством уравнений, что приводит к вычислительным сложностям и затрудняет применение таких моделей на практике. Авторы параметрических моделей предполагают, что по поверхности или объему источника дискретным образом распределено конечное число монополей или диполей. В качестве параметров модели могут выступать геометрические характеристики источника, его местоположение в пространстве, амплитуда или фаза, а также мощности используемых монополей или диполей. Для получения выражения, описывающего потенциал поля, создаваемого таким источником, используют преобразование Фурье. По сути, полученное выражение представляет собой разложение потенциала в ряд Тейлора по совокупности плоских волн, которые хорошо изучены [14–17]. Однако использование ряда Тейлора приводит к тому, что разложение осуществляется по системе линейно зависимых функций. В связи с этим получить удобные для вычислений соотношения, позволяющие решить обратную задачу, возможно лишь для мультиполей нулевого или первого порядка. В силу отсутствия единственности решения использовать такие выражения для мультиполей более высоких порядков невозможно, что является существенным недостатком таких моделей.

Избежать описанных трудностей позволяет подход, предложенный в [18]. Авторами предлагается реальный источник звука заменить эквивалентным точечным направленным излучателем, а создаваемое им поле в неограниченном пространстве описывать при помощи разложения в ряд по сферическим мультиполям, образующим систему линейно независимых функций. Коэффициенты такого разложения являются мультипольными моментами и позволяют описать направленные свойства источника. Использование этой модели позволяет и в свободном пространстве, и в волноводах различных типов описывать поле звукового давления выражениями, линейно зависящими от параметров мультипольной модели.

Согласно этому подходу переход к модельному излучателю осуществляется следующим образом. Пусть источник низкочастотных колебаний находится в однородном неограниченном пространстве и имеет конечный размер, а также произвольную форму. Из произвольной точки O внутри излучателя построим сферу S_0 так, чтобы источник находился внутри нее. Введем сферическую систему координат, совместив ее центр с точкой O . В произвольной точке на поверхности сферы рассматриваемый источник создает давление, величина которого может быть определена при помощи соотношения:

$$\tilde{P}(r, \theta, \varphi, t) = i\omega\rho_0\tilde{\psi}(r_0, \theta, \varphi)e^{-i\omega t},$$

где r_0, θ, φ — сферические координаты точки наблюдения; t — время; i — мнимая единица; ω — частота колебаний; ρ_0 — плотность среды; $\tilde{\psi}$ — потенциал скоростей поля давления.

Потенциал $\tilde{\psi}(r_0, \theta, \varphi)$ является непрерывно дифференцируемой функцией, модуль которой на поверхности сферы единичного радиуса представляет собой приведенную амплитудную, а аргумент — приведенную фазовую диаграмму направленности источника.

Колебания, которые создает источник в области Ω , находящейся за пределами сферы S_0 , описываются функцией, которая может быть найдена как решение внешней задачи Дирихле для сферы S_0 [18]. Это решение единственно и для $r \geq 0$ может быть представлено равномерно сходящимся рядом:

$$\psi(r, \theta, \varphi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n C_{nm} h_n^{(1)}(kr) P_n^{|m|}(\cos \theta) e^{im\varphi}, \quad (1.1)$$

где N — порядок мультипольности модели; C_{nm} — мультипольные моменты, описывающие направленность источника; $P_n^{(m)}$ — присоединенные полиномы Лежандра; $h_n^{(1)}$ — сферические функции Бесселя третьего рода порядка n ; $k = \frac{\omega}{c}$ — волновое число; c — фазовая скорость распространения волны в области; r, θ, ϕ — сферические координаты точки наблюдения.

2. Моделирование пограничного слоя атмосферы системой однородных слоев

При моделировании поля, создаваемого излучателем в пространстве, необходимо учитывать не только особенности самого источника, но и среды распространения сигнала. Большое внимание при исследовании полей низкочастотных источников звука уделяется случаю, когда они находятся в воде [19–22]. Однако в современном мире появились низкочастотные акустические излучатели, исследование полей которых важно именно в атмосфере. Практический интерес в этом случае представляет ее нижний слой, начинающийся от поверхности Земли и не превышающий 2–3 км. Согласно [23] такие высоты соответствуют пограничному слою атмосферы.

Известны различные модели атмосферы. Самым простым, но менее всего соответствующим действительности, является хорошо исследованный случай однородного пространства. Именно при использовании такой модели потенциал поля, создаваемого в нем рассматриваемым точечным мультипольным излучателем, описывается соотношением (1.1).

Для того чтобы учесть влияние на создаваемое поле поверхности Земли, можно применить модель однородного полупространства. Тогда потенциал поля, создаваемого в нем рассматриваемым точечным мультипольным излучателем, будет описываться следующим соотношением [18]:

$$\psi(M) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n C_{nm} [h_n^{(1)}(kr) P_n^{(m)}(\cos \theta) - \chi_{nm} h_n^{(1)}(kr') P_n^{(m)}(\cos \theta')] e^{im\phi}, \quad (2.1)$$

где $\chi_{nm} = (-1)^{n+|m|}$, $r'^2 = r^2 + 4rz_0 \cos \theta + 4z_0^2$, $\cos \theta' = \frac{r \cos \theta + 2z_0}{r'}$.

Однако большинство реальных сред, в том числе и атмосфера, являются неоднородными. Исследования в области атмосферной акустики показали, что особенно резко ее свойства изменяются в вертикальном направлении. В связи с этим по температуре, составу, электрическим характеристикам атмосфера может быть разделена на слои в вертикальном направлении. В качестве модели такого пространства может быть взята система однородных слоев с неидеальными границами, то есть границами, для которых коэффициент отражения волны зависит от угла ее падения.

В отличие от подходов, в которых атмосфера рассматривается как непрерывно-стратифицированная среда с определенным профилем показателя преломления [24], такая модель позволяет учесть наличие условных границ, отделяющих однородные слои друг от друга. Кроме того, ее использование целесообразно в случае, когда длина волны сравнима с толщиной слоя, в котором находится излучатель, или расстояние до него существенно превышает толщину слоя.

Для осуществления замены реального излучателя модельным будем считать, что выполняются условия $k(d_2 - z_0) > 1$ и $kz_0 > 1$.

3. Постановка и решение задачи о направленном излучателе в пространстве, моделируемом системой однородных слоев

Рассмотрим точечный излучатель, потенциал поля которого в неограниченном пространстве описывается функцией (1.1), находится в многослойной области, состоящей из однородных в горизонтальном направлении слоев $\Omega_1 \dots \Omega_m \dots \Omega_{m+n}$. Каждый слой имеет неидеальные границы Σ_i и Σ_{i+1} и характеризуется толщиной d_i , постоянной плотностью ρ_i , фазовой скоростью распространения волны c_i . Над слоем Ω_{m+n} находится полупространство Ω_{m+n+1} , а под слоем Ω_1 находится полупространство Ω_0 . Полупространства являются однородными в горизонтальном направлении и характеризуются постоянными плотностью ρ_{m+n+1}, ρ_0 и фазовой скоростью распространения колебаний c_{m+n+1}, c_0 .

Пусть точечный излучатель находится в точке $r = 0, z = z_1, z_1 > 0$ слоя Ω_m на расстоянии z_0 от его верхней границы.

Поле, создаваемое источником в слое Ω_p , описывается функцией, которая является решением следующей краевой задачи:

Найти функцию $\psi(r, \theta, \phi)$, которая удовлетворяет:

1) однородному дифференциальному уравнению в области Ω_m

$$\Delta\psi + k^2(z)\psi = 0, \quad (3.1)$$

где $k(z) = k_0 n(z)$;

2) условию сохранения непрерывности потенциала и его нормальной производной на границах Σ_m и Σ_{m+1} волновода

$$[\psi]|_s = 0, \left[\frac{d\psi}{dn}\right]|_s = 0, s = \Sigma_m \cup \Sigma_{m+1}; \quad (3.2)$$

3) краевому условию

$$\lim_{r \rightarrow 0} r|\psi(r, \theta, \phi) - \psi_0(r, \theta, \phi)| = 0, \quad (3.3)$$

где $\psi_0(r, \theta, \phi)$ — потенциал поля в однородном неограниченном пространстве, рассчитанный по формуле (1.1).

Приближенное решение поставленной задачи было найдено авторами при помощи вычисления имеющегося в точном решении интеграла методом перевала. Полученное решение имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \psi(r, \theta, \phi) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=-n}^n \frac{Cnm}{k_m r} e^{i(m\phi + k_m r)} (-i)^{n+1} & \left[\left(1 + \frac{a}{\sin \theta}\right) (F^*(\theta)) - \frac{iF^*(\theta)}{8k_m r (\sin \theta)^2} - \frac{i((F^*(\theta)))''}{2k_m r} \right) - \\ & - \left(1 - \frac{a}{\sin \theta}\right) \left(\frac{i(F^*(\theta))'}{2k_m r \tan \theta} - \frac{i(F^*(\theta))}{4k_m r (\sin \theta)^2}\right) \right], \end{aligned} \quad (3.4)$$

где

$$\begin{aligned} F^*(\theta) &= P_n^{|m|}(\cos \theta) f(\beta_j), b_m = ik_m \cos \beta_m, \\ f(\beta_j) &= \frac{1 + \chi_{nm} e^{2b_m(d_m - z_0)} V_m + \chi_{nm} e^{2b_m(z_j - z_{j-1})} V_{m+1} + e^{2b_m d_m} V_m V_{m+1}}{1 - V_m V_{m+1} e^{2b_m d_m}}, \end{aligned}$$

β_j — угол падения плоской волны на границы j -го слоя.

Полученные расчетные формулы позволяют вычислять поле направленного излучателя, находящегося в пространстве, которое моделируется системой однородных слоев с неидеальными границами. Соотношения для коэффициентов отражения $V_m(\beta)$ и $V_{m+1}(\beta)$ были получены авторами путем обобщения полученных ими [25] выражений для случая трехслойной области:

$$\begin{aligned} V_m(\beta_m) &= \frac{Z^{(i)} - Z_m}{Z^{(i)} + Z_m}, \\ V_{m+1}(\beta_m) &= \frac{Z^{(j)} - Z_m}{Z^{(j)} + Z_m}, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} Z^i &= \frac{(Z^{i-1} + Z_i) e^{-2ik_{iz} z_{i+1}} + (Z^{i-1} - Z_i) e^{-2ik_{iz} z_i}}{(Z^{i-1} + Z_i) e^{-2ik_{iz} z_{i+1}} - (Z^{i-1} - Z_i) e^{-2ik_{iz} z_i}} Z_i, \quad 1 \leq i \leq m-1, \\ Z^0 &= Z_0 = \frac{\rho_0 c_0}{\cos \beta_0}, \quad Z^{m+n+1} = Z_{m+n+1} = \frac{\rho_{m+n+1} c_{m+n+1}}{\cos \beta_{m+n+1}}, \quad Z_i = \frac{\rho_i c_i}{\cos \beta_i}, \\ k_{iz} &= k_i \cos \beta_i, \quad k_i = \frac{\omega_i}{c_i}, \quad k_i \sin \beta_i = k_{i-1} \sin \beta_{i-1}, \\ k_{jz} &= k_j \cos \beta_j, \quad k_j = \frac{\omega_j}{c_j}, \quad k_j \sin \beta_j = k_{j+1} \sin \beta_{j+1}, \\ Z^j &= \frac{(Z^{j+1} + Z_j) e^{-2ik_{jz} z_{j+1}} + (Z^{j+1} - Z_j) e^{-2ik_{jz} z_j}}{(Z^{j+1} + Z_j) e^{-2ik_{jz} z_{j+1}} - (Z^{j+1} - Z_j) e^{-2ik_{jz} z_j}} Z_j, \quad m \leq j \leq m+n, \\ Z_j &= \frac{\rho_j c_j}{\cos \beta_j}, \quad z_i = -\sum_{q=i}^{m+1} d_q + z_0, \quad z_j = \sum_{q=m+2}^{j-1} d_q + z_0. \end{aligned}$$

4. Результаты численного моделирования поля направленного низкочастотного акустического излучателя в пограничном слое атмосферы

С целью исследования влияния на амплитудную структуру звукового поля, создаваемого направленным низкочастотным излучателем в атмосфере, таких факторов, как его частота, высота и горизонтальное расстояние до приемников, при помощи разработанного авторами пакета прикладных программ была проведена серия вычислительных экспериментов.

Пространство, в котором находится источник, моделировалось системой из 10 однородных слоев. Из Международной стандартной модели атмосферы (International Standard Atmosphere, MCA, англ. ISA) были взяты среднесесячные значения плотности и скорости звука для летнего периода времени, приведенные в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характеристики системы слоев

Table 4.1

Characteristics of the layer system

Номер слоя	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Толщина, м	Высота над поверхностью земли, м
1	1,1725	345,77	100	100
2	1,161172	345,39	100	200
3	1,149928	345,01	100	300
4	1,138768	344,64	100	400
5	1,127691	344,26	100	500
6	1,116698	343,88	100	600
7	1,105786	343,05	100	700
8	1,094957	343,12	100	800
9	1,08421	342,74	100	900
10	1,073544	342,36	100	1000

При проведении расчетов в качестве модели источника был выбран мультиполь, состоящий из монополя, диполя, квадруполья с моментами: $C_{nm} = 1 + i$ для всех n и m . Предполагалось, что регистрация сигнала осуществляется датчиками колебаний, расположенными вдоль прямой на равных расстояниях друг от друга.

Во всех сериях расчетов в качестве базовых были выбраны следующие значения: частота источника 10 Герц, высота источника над поверхностью земли 390 м. Также считалось, что датчики колебаний находятся на высоте 220 м вдоль прямой, параллельной оси OY системы координат, связанной с поверхностью Земли, на горизонтальном расстоянии 50 м от излучателя.

В первой серии численных экспериментов изучалось влияние на амплитуду звуковых колебаний частоты излучателя. Частоты брались в диапазоне от 10 до 35 Гц.

На рис. 4.1 изображены обезразмеренные значения амплитуды звуковых колебаний, создаваемых источниками частотой 10, 20 и 35 Гц. Как видно, увеличение частоты источника приводит к существенному уменьшению его амплитуды. Также с увеличением частоты источника существенно вырождается определяемая направленностью излучателя структура поля.

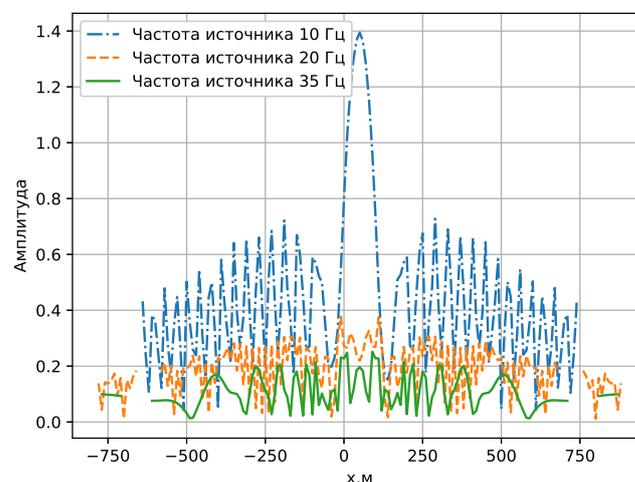


Рис. 4.1. Зависимость амплитудной структуры полей от частоты сигналов
 Fig. 4.1. Dependence of the amplitude structure of the field on the frequency of the source

Далее была изучена зависимость амплитуды от высоты излучателя.

На рис. 4.2 изображены обезразмеренные значения амплитуды звуковых колебаний, создаваемых источником, находящимся на высоте 390, 690 и 890 м. Анализ графиков показывает, что положения точек максимума и минимума амплитуды сигналов зависят от высоты излучателя и с увеличением его высоты положение максимума смещается. Максимальное значение амплитуды поля наблюдается в точке расположения излучателя, что согласуется с экспериментальными данными и может быть использовано для решения обратных задач по обнаружению источников звука.

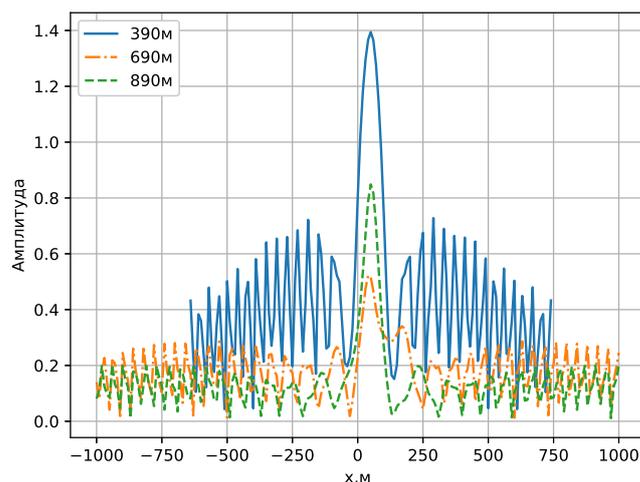


Рис. 4.2. Зависимость амплитудной структуры полей от высоты источника
Fig. 4.2. Dependence of the amplitude structure of the fields on the height of the source

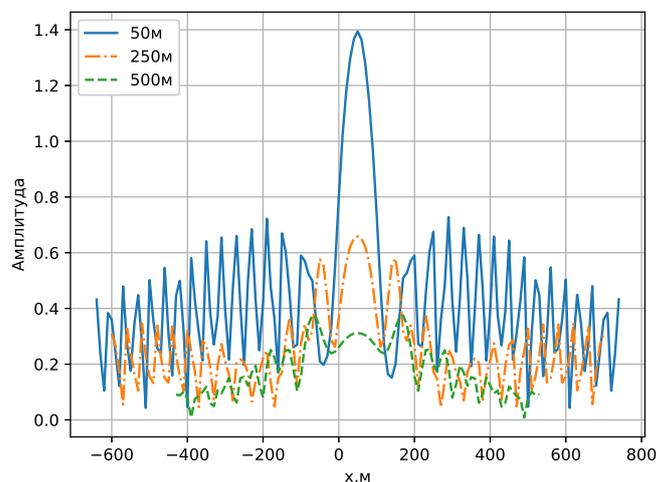


Рис. 4.3. Зависимость амплитудной структуры полей от высоты источника
Fig. 4.3. Dependence of the amplitude structure of the fields on the height of the source

При расположении источника на различных высотах наблюдаются качественно близкие интерференционные картины, которые определяются тремя факторами: влиянием изменения ориентации в пространстве характеристики направленности мультиполей относительно перемещающегося по горизонтали приемника; влиянием дипольного эффекта и влиянием увеличения расстояния между приемником и источником.

Кроме перемещения реальных источников в вертикальном направлении, типичным является их движение вблизи приемной антенны на некоторой фиксированной высоте с заданным горизонтальным расстоянием. Для анализа структурных особенностей сигналов в описанных условиях были рассчитаны

значения амплитуды тонального сигнала в точках приема при разных значениях горизонтального расстояния между источником и приемниками.

В результате анализа графиков, приведенных на рис. 4.3, можно заметить, что поля на различных расстояниях имеют схожую структуру, но наблюдается небольшое изменение характера интерференции при удалении источника от приемников. Сохраняются и характерные особенности, такие как, например, максимум в точке расположения излучателя. На больших расстояниях амплитуда сглаживается.

Выводы

1. В результате сравнительного анализа существующих моделей акустических излучателей установлено, что наиболее подходящей для описания направленного низкочастотного излучателя в пограничном слое атмосферы является параметрическая модель, предложенная в [18], основанная на замене реальных источников эквивалентным точечным направленным излучателем и описании создаваемого им поля при помощи разложения в ряд по сферическим мультиполям, образующим систему линейно независимых функций.

2. Использование в качестве модельного представления атмосферы неограниченного однородного пространства, однородного полупространства или однородного слоя является сильным упрощением. Более точным, учитывающим ее горизонтальную стратифицированность, является описание атмосферы системой однородных слоев.

3. Полученные соотношения (3.4) являются приближенным решением краевой задачи (3.1)–(3.3) и позволяют вычислять потенциал поля, создаваемого низкочастотным акустическим излучателем в пограничном слое атмосферы, а также могут быть использованы для решения прямых и обратных задач, связанных с мультипольным излучателем.

4. В неоднородном пространстве, которое моделируется системой однородных слоев, существенное влияние на амплитуду поля, создаваемого направленным низкочастотным излучателем, оказывают все рассмотренные факторы: высота и частота источника, а также горизонтальное расстояние между источником и приемниками.

В результате проведенных численных экспериментов установлено, что увеличение частоты источника приводит к существенному уменьшению его амплитуды, положение точек максимума и минимума амплитуды сигналов зависят от высоты излучателя, а при удалении источника от приемников наблюдается небольшое изменение характера интерференции.

Отмеченные закономерности позволяют формировать практические рекомендации по выбору зоны, в которой необходимо производить анализ характеристик источника в каждом конкретном случае.

Литература

- [1] Pachner J. On the dependence of directivity patterns on the distance from emitter // Journal of the Acoustical Society of America. 1956. Vol. 28. Issue 1. P. 86–90. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1908232>.
- [2] Horton C.W., Sabey A.E. Studies on the near field of monopole and dipole acoustic sources // Journal of the Acoustical Society of America. 1958. Vol. 30. Issue 12. P. 1088–1099. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1909467>.
- [3] Isakovich M.A. Nonlinear effect accompanying the dipole radiation. // 4th Int. Congr. Acoustics. Copenhagen. 1962. Vol. 1. P. 3–4 (NK 55).
- [4] Глебова Г.М., Кузнецов Г.Н. Методы оценивания приведенной шумности движущегося монопольного источника в мелком море // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 3. С. 275–285. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791921030035>. EDN: <https://www.elibrary.ru/bwdibj>.
- [5] Кузнецов Г.Н., Семенова И.В., Степанов А.Н. Локальные аномальные зоны звукового поля в мелком море. Эксперимент и моделирование // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 6. С. 626–638. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791921060046>. EDN: <https://www.elibrary.ru/salfzm>.
- [6] Сумбатян М.А., Мартынова Т.С., Мусатова Н.К. К дифракции точечного источника звука на бесконечном клине // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 4. С. 351–360. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922030145>. EDN: <https://www.elibrary.ru/krxviz>.
- [7] Oestreicher H.L. Representation of the field of an acoustic source as a series of multipole fields // Journal of the Acoustical Society of America. 1957. Vol. 29. Issue 11. P. 1219–1222. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1908749>.
- [8] Бобровицкий Ю.И. Физическая модель и характеристики ближнего поля мультиполя // Акустический журнал. 1998. Т. 44, № 1. С. 11–20. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1998_1_11-20.pdf.
- [9] Шарфарец Б.П. Поле протяженного излучателя в нерегулярном океаническом волноводе // Акустический журнал. 1992. Т. 38, № 2. С. 245–349. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1992_2_345-349.pdf.

- [10] Шарфарец Б.П. Представление поля давления протяженного источника в виде геометрооптического ряда в двумерном случае // Научное приборостроение. 2001. Т. 11, № 4. С. 41–45. URL: <http://iairas.ru/mag/2001/full4/Art6.pdf>.
- [11] Welkowitz W. Directional circular arrays of point sources // Journal of the Acoustical Society of America. 1956. Vol. 28. Issue 3. Pp. 362–366. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1908330>.
- [12] Виноградова Э.Л., Фурдуев В.В. Коэффициент направленности линейной группы излучателей // Акустический журнал. 1966. Т. 12, № 2. С. 181–185. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1966_2_181-184.pdf.
- [13] Бобровицкий Ю.И., Томилина Т.М. Общие свойства и принципиальные погрешности метода эквивалентных источников // Акустический журнал. 1995. Т. 41, № 5. С. 737–750. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1995_5_737-750.pdf.
- [14] Бреховских Л.М. Отражение и преломление сферических волн // Успехи физических наук. 1949. Т. 38. Вып. 1. С. 1–42. DOI: <http://doi.org/10.3367/UFNr.0038.194905a.0001>.
- [15] Van Moerhen W.K. Reflection of a spherical wave from a plane surface // Journal of Sound and Vibration. 1975. Vol. 42. Issue 2. P. 201–208. DOI: [http://doi.org/10.1016/0022-460X\(75\)90215-1](http://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90215-1).
- [16] Matthen Nobile A., Hayek Sabih I. Acoustic propagation over an impedance plane // Journal of the Acoustical Society of America. 1985. Vol. 78. Issue 4. P. 1325–1336. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.392902>.
- [17] Глебова Г.М., Жбанков Г.А., Кузнецов Г.Н. Экспериментальная оценка направленности излучения движущегося надводного судна в мелком море // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 1. С. 57–67. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922010038>. EDN: <https://elibrary.ru/mzbbqsg>.
- [18] Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. Векторно-скалярные поля мультипольных гидроакустических источников, эквивалентных шумоизлучению морских объектов. Москва: Буки Веди, 2022. 304 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48035148>. EDN: <https://elibrary.ru/qcrpkd>.
- [19] Аксенов С.П., Кузнецов Г.Н. Амплитудная и фазовая структура низкочастотного гидроакустического поля в глубоком океане // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 5. С. 493–504. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791921040018>. EDN: <https://www.elibrary.ru/uoyrxn>.
- [20] Тыщенко А.Г., Заикин О.С., Сорокин М.А., Петров П.С. Комплекс программ для расчета акустических полей в мелком море на основе метода широкоугольных модовых параболических уравнений // Акустический журнал. 2021. Т. 67, № 5. С. 533–541. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791921050117>.
- [21] Луньков А.А., Петников В.Г., Сидоров Д.Д. Использование линейных приемных антенн для наблюдения горизонтальной рефракции низкочастотного звука в мелком море с сильно неоднородным водоподобным дном // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 4. С. 400–408. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922040074>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ytwzau>.
- [22] Кузнецов Г.Н., Степанов А.Н. О возможности повышения помехоустойчивости обнаружения звуковых сигналов в мелком море с использованием энергетических и фазовых инвариантов // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 3. С. 300–311. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922030066>. EDN: <https://www.elibrary.ru/zitqiz>.
- [23] ГОСТ Р 54084-2010. Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры: Национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2012-01-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088881>.
- [24] Петухов Ю.В. О возможности безотражательного распространения плоских акустических волн в непрерывно-стратифицированных средах // Акустический журнал. 2022. Т. 68, № 2. С. 129–138. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922020071>. EDN: <https://www.elibrary.ru/dkvenj>.
- [25] Корнеева А.А., Семенова И.В. Поле направленного низкочастотного излучателя в многослойной области // XXIII Всероссийская конференция молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям. Новосибирск, 2022. С. 32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50142121>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ihxbui>.



Scientific article

DOI: 10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73

Submitted: 02.02.2023

Revised: 16.03.2023

Accepted: 30.05.2023

I. V. Semenova

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: semenova.iv@ssau.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6400-4682>

A. A. Korneeva

Samara National Research University, Samara, Russian Federation

E-mail: korneevaaa2002@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4344-3357>

FIELD OF A DIRECTIONAL LOW-FREQUENCY ACOUSTIC EMITTER IN THE BOUNDARY LAYER OF THE ATMOSPHERE

ABSTRACT

Due to the fact that many wave emitters that a person is able to perceive belong to low-frequency ones, studies of sound fields created by such emitters are relevant. Thanks to the results obtained, it becomes possible to understand in which directions and with what power the sound field created by them will propagate, form practical recommendations for choosing the zone most suitable for observing them, solve inverse problems to determine their location. As a result of the analysis of existing models used to describe acoustic emitters, it was found that the most adequate models are those that take into account the directionality of sound sources. Among them, the parametric model proposed by G.N. Kuznetsov and A.N. Stepanov deserves special attention, which was used in the work. As a model representation of the atmosphere, a system of homogeneous layers was chosen, in one of which the source is located. For the selected models of the source and medium, the boundary value problem of finding the potential of the field created by the source is set, exact and approximate relations are obtained that can be used to solve direct and inverse problems associated with a multipole emitter. The influence of such factors as the height and frequency of the source, as well as the horizontal distance between the source and receiver on the amplitude component of the field has been studied.

Key words: directional low-frequency emitter; inhomogeneous space; system of homogeneous layers; acoustic emitter field; field potential; amplitude; reflection coefficient; impedance.

Citation. Semenova I.V., Korneeva A.A. Field of a directional low-frequency acoustic emitter in the boundary layer of the atmosphere. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaia serii* = *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2023, vol. 29, no. 1, pp. 64–73. DOI: <http://doi.org/10.18287/2541-7525-2023-29-1-64-73>. (In Russ.)

Information about the conflict of interests: authors and reviewers declare no conflict of interests.

© Semenova I.V., 2023

Irina V. Semenova — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, assistant professor of the Department of Information Security, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, 443086, Russian Federation.

© Korneeva A.A., 2023

Anastasia A. Korneeva — student of the Department of Mechanics and Mathematics, Samara National Research University, 34, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation.

References

- [1] Pachner J. On the dependence of directivity patterns on the distance from emitter. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, vol. 28, issue 1, pp. 86–90. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1908232>.
- [2] Horton C.W., Sabey A.E. Studies on the near field of monopole and dipole acoustic sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1958, vol. 30, issue 12, pp. 1088–1099. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1909467>.
- [3] Isakov M.A. Nonlinear effect accompanying the dipole radiation. *4th International Congress of Acoustics*. Copenhagen, 1962, vol. 1, pp. 3–4 (NK 55).
- [4] Glebova G.M., Kuznetsov G.N. Methods for estimating the reduced noise of a moving monopole source in shallow water. *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no. 3, pp. 273–282. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1063771021030039>. EDN: <https://www.elibrary.ru/oawwmmr>. (In English; original in Russian)
- [5] Kuznetsov G.N., Stepanov A.N., Semenova I.V. Local anomalous sound field zones in shallow water. Experiment and simulation. *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no. 6, pp. 619–630. DOI: <http://doi.org/10.1134/S106377102106004X>. EDN: <https://www.elibrary.ru/qrajmi>. (In English; original in Russian)
- [6] Sumbatyan M.A., Martynova T.S., Musatova N.K. To diffraction of a point sound source on an infinite wedge. *Acoustical Physics*, 2022, vol. 68, no. 4, pp. 351–360. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922030145>. EDN: <https://www.elibrary.ru/krxviz>. (In Russ.)
- [7] Oestreicher H.L. Representation of the field of an acoustic source as a series of multipole fields. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1957, vol. 29, issue 11, pp. 1219–1222. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1908749>.

- [8] Bobrovnikskii Yu.I. A Physical Model and the Near Field Characteristics of a Multipole. *Acoustical Physics*, 1998, vol. 44, no. 1, pp. 11–20. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/1998_1_11-20.pdf. (In Russ.)
- [9] Sharfarets B.P. Extended source field in a non-regular ocean waveguide. *Acoustical Physics*, 1992, vol. 38, no. 2, pp. 245–349. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/1992_2_345-349.pdf. (In Russ.)
- [10] Sharfarets B.P. Representation of the pressure field of an extended source as a geometric-optical series in the two-dimensional case. *Nauchnoe Priborostroenie = Scientific Instrumentation*, 2001, vol. 11, no. 4, pp. 41–45. Available at: <http://iairas.ru/mag/2001/full4/Art6.pdf>. (In Russ.)
- [11] Welkowitz W. Directional circular arrays of point sources. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, vol. 28, issue 3, pp. 362–366. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.1908330>.
- [12] Vinogradova E.L., Furduev V.V. Directivity coefficient of a linear group of emitters. *Acoustical Physics*, 1966, vol. 12, no. 2, pp. 181–184. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/1966_2_181-184.pdf. (In Russ.)
- [13] Bobrovnikskii Yu.I., Tomilina T.M. General Properties and Fundamental Errors of the Method of Equivalent Sources. *Acoustical Physics*, 1995, vol. 41, no. 5, pp. 737–750. Available at: http://www.akzh.ru/pdf/1995_5_737-750.pdf. (In Russ.)
- [14] Brekhovskikh L.M. Reflection and refraction of spherical waves. *Physics-Uspekhi = Advances in Physical Sciences*, 1949, vol. 38, no. 1, pp. 1–42. DOI: <http://doi.org/10.3367/UFNr.0038.194905a.0001>. (In Russ.)
- [15] Van Moerhen W.K. Reflection of a spherical wave from a plane surface. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, vol. 42, issue 2, pp. 201–208. DOI: [http://doi.org/10.1016/0022-460X\(75\)90215-1](http://doi.org/10.1016/0022-460X(75)90215-1).
- [16] Matthen Nobile A., Hayek Sabih I. Acoustic propagation over an impedance plane. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, vol. 78, issue 4, pp. 1325–1336. DOI: <http://doi.org/10.1121/1.392902>.
- [17] Glebova G.M., Zhibankov G.A., Kuznetsov G.N. Experimental evaluation of radiation directivity of a moving surface vessel in a shallow sea. *Acoustical Physics*, 2022, vol. 68, no. 1, pp. 57–67. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922010038>. EDN: <https://elibrary.ru/mzbqsg>. (In Russ.)
- [18] Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. Vector-scalar fields of multipole hydroacoustic sources equivalent to the noise emission of marine objects. Moscow: «Buki Vedi», 2022, 304 p. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48035148>. EDN: <https://elibrary.ru/qcrpkd>. (In Russ.)
- [19] Aksenov S.P., Kuznetsov G.N. Amplitude and phase structure of a low-frequency hydroacoustic field in the deep ocean. *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 474–485. DOI: <http://doi.org/10.1134/S1063771021040011>. EDN: <https://www.elibrary.ru/irrlvw>. (In English; original in Russian)
- [20] Tyshchenko A.G., Zaikin O.S., Sorokin M.A., Petrov P.S. Software package for calculating acoustic fields in shallow seas based on the method of wide-angle mode parabolic equations. *Acoustical Physics*, 2021, vol. 67, no. 5, pp. 533–541. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791921050117>. (In Russ.)
- [21] Lunkov A.A., Petnikov V.G., Sidorov D.D. The use of linear receiving antennas to observe the horizontal refraction of low-frequency sound in a shallow sea with a highly heterogeneous water-like bottom. *Acoustical Physics*, 2022, vol. 68, no. 4, pp. 400–408. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922040074>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ytzwau>. (In Russ.)
- [22] Kuznetsov G.N., Stepanov A.N. On the possibility of increasing the noise immunity in detecting sound signals in a shallow water using energy and phase invariants. *Acoustical Physics*, 2022, vol. 68, no. 3, pp. 262–271. DOI: <http://doi.org/10.1134/S106377102203006X>. EDN: <https://www.elibrary.ru/yqsrog>. (in English; original in Russian)
- [23] GOST R 54084-2010. Models of the atmosphere in the boundary layer at altitudes from 0 to 3000 m for aerospace practice. Parameters: national standard of the Russian Federation: date of introduction 2012-01-01. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200088881>. (In Russ.)
- [24] Petukhov Yu.V. On the possibility of non-reflective propagation of plane acoustic waves in continuously stratified media. *Acoustical Physics*, 2022, vol. 68, no. 2, pp. 129–138. DOI: <http://doi.org/10.31857/S0320791922020071>. EDN: <https://www.elibrary.ru/dkvenj>. (In Russ.)
- [25] Korneeva A.A., Semenova I. Field of a directional low-frequency emitter in a multi-layer region. In: *XXIII all-russian conference of young scientists on mathematical modeling and information technologies*. Novosibirsk, 2021, pp. 362–365. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50142121>. EDN: <https://www.elibrary.ru/ihxbui>. (In Russ.)