

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВБЛИЗИ УПРУГОГО СЛОЯ ЛЬДА

**Короченцев В.И.¹, Бондаренко Т.Ж.², Демьянов Т.Г.³,
Овчаренко В.В.⁴**

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²МГУ им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток

³Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

⁴Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва, г. Владивосток

Изгибные колебания в воде, способны значительно влиять на окружающую среду, в которой они возникают. Они представляют собой сочетание механических колебаний ледяной пластины и связанных с ними гравитационных волн в воде. Преобразование изгибных колебаний во льду в продольные колебания в морской воде может привести к повышению эффективности работы гидроакустической антенной решетки вблизи упругой ледяной пластины. Данный процесс способствует улучшению функционирования гидроакустической антенной решетки благодаря использованию упругих свойств льда.

Если по ледяной пластине распространяется изгибная волна, она вызывает локальные деформации поверхности пластины. Эти деформации передаются воде под льдом через граничное давление.

Ледяная пластина оказывает переменное давление на морскую среду внизу (в зависимости от частоты и амплитуды изгиба). Это давление возбуждает упругие волны в морской среде. Эффективность передачи зависит от частоты колебаний, толщины льда и плотности среды.

Гидроакустическая антенная решетка, состоящая из трех элементов, расположенных на расстоянии полдлины волны друг от друга, находится в области M_0 с координатами r_0 , расположена в декартовой системе координат, плоскость xu совпадает с плоскостью падения волны. Известны следующие характеристики сред: толщина слоя ледовой пластины, плотность ледовой пластины, морской воды, воздуха, фазовые скорости распространения продоль-

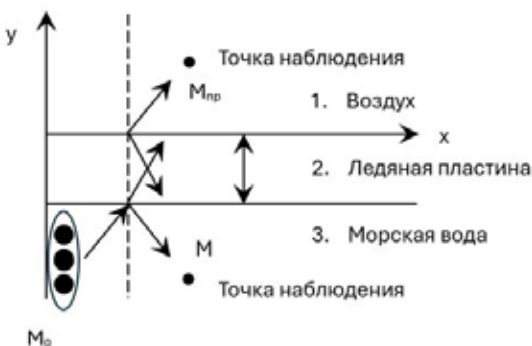


Рис. 1. Схематическое изображение расположения поверхности раздела трех сред и гидроакустической антенной решетки, формирующей звуковую (сферическую) волну, падающую на границу раздела, вода – лед

ных волн для первой и третьей сред, и так же фазовая скорость распространения изгибных волн для второй среды. Так же заданы конечные размеры антенной решетки. При заданных характеристиках необходимо определить акустическое давление и колебательную скорость, создаваемые гидроакустической

антенной решеткой, которая может располагаться как в слое льда, так и в морской воде [1].

В ледяной пластине поле гидроакустической антенной решетки возбуждает изгибные колебания, которые описываются следующим дифференциальным уравнением четвертого порядка (1):

$$\nabla^4 \eta + \frac{3\rho(1-\sigma^2)}{Eh} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где:

$$\nabla^4 = \Delta^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)^2 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2}$$

∇^4 – оператор производной четвертого порядка;

E – модуль упругости Юнга;

σ – коэффициент Пуассона;

η – смещение в средней плоскости слоя льда.

h – половина толщины слоя льда;

ρ – плотность льда.

Колебательная скорость (2, 3) и акустическое давление (4) в волне состоят из активной и реактивной составляющих [2]. При

излучении и приеме акустической энергии участвуют обе компоненты (излучение идет от суммы конечных сферических элементов).

Суммируя выражения (2, 3) и (4), выделяем активную и реактивную часть поля.

$$v_r = -\frac{\omega}{c} e^{j\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \frac{dh_m^{(2)}(z)}{dz} P_m(x) \quad (2)$$

$$v_\theta = \frac{\sin\theta}{r} e^{j\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} A_m h_m^{(2)}(z) \frac{dP_m(x)}{dx} \quad (3)$$

$$p = j\omega\rho e^{j\omega t} \sum_{m=0}^{\infty} A_m h_m^{(2)}(z) P_m(x) \quad (4)$$

где:

c – скорость звука в среде;

ω – частота;

$x = \cos \theta$;

θ – полярный угол;

P_m – полином Лежандра m -го порядка;

$z = kr$.

Для реактивной составляющей поля определим отражённую часть энергии от изгибной пластины льда. Соблюдая граничные условия: давление на поверхности ледяной пластины равно сумме давлений, создаваемых отдельными конечными элементами (6), и нормальная составляющая скорости всей ледяной пластинки равна нормальной составляющей суммы всех её конечных элементов (5).

$$v(\theta) = -\frac{\omega}{c} \sum_{m=0}^{\infty} A_m \frac{dh_m}{dz}(z) P_m(\cos\theta) \quad (5)$$

$$p(\theta, a) = j\omega\rho \sum_{m=0}^{\infty} A_m h_m^{(2)}\left(\frac{\omega}{c}a\right) P_m(\cos\theta) \quad (6)$$

Таким образом, вычислим смещение на поверхности пластинки льда, определим акустическое давление и колебательную скорость на поверхности. Проведем преобразование реактивной энергии гидроакустической антенной решетки в излучающую активную в дальнем поле. Полученные алгоритмы позволяют оценить долю активной и реактивной ча-

сти суммарного поля от гидроакустической антенной решетки и льда в данном поле на разных частотах.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности по проекту № FZNS-2023-0008.

Литература

1. Короченцев В.И., Лобова Т.Ж., Лобов И.Ж., Губко М.А. Повышение эффективности акустической связи в мелком море с ледовым покровом, Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3, часть 1. С. 324-329. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.057.
2. Лепендин, Л.Ф. Акустика. – М.: Высшая школа, 1978. - 448 с.