

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСКАЖЕНИЙ СТРУКТУРЫ СКОРОСТИ ЗВУКА, ВЫЗВАННЫХ ВЕТРОВЫМ ВОЛНЕНИЕМ

Е. В. АЗАРЕНКО, И. П. ШУМЕЙКО, Н. М. КОБЕЦ

Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности

Интенсивное ветровое волнение (шторм) вызывает изменение термохалинных характеристик деятельного слоя вод моря и как следствие изменяет его структуру скорости звука. Это изменение проявляется в виде хаотических мелкомасштабных флуктуаций, затухающих с глубиной. На основании анализа натуральных экспериментов по исследованию искажений скорости звука штормом, в деятельном слое вод предлагается математическая модель и созданный на ее основе программный продукт, позволяющий прогнозировать мелкомасштабные изменения скорости звука в результате интенсивного волнения.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что ветровое волнение является одним из источников морской турбулентности и приводит к перемешиванию верхних слоев водной среды. Следствием этого перемешивания является выравнивание термохалинных и других гидродинамических характеристик по глубине [1]. Однако при более детальном рассмотрении оказывается, что «выравнивание» проявляется в виде хаотических мелкомасштабных флуктуаций температуры, солености и других гидрологических характеристик [2, 3]. Как следствие этого процесса появляются мелкомасштабные флуктуации скорости звука, которые в свою очередь оказывают влияние на распространение акустических волн и решение прикладных задач гидроакустики [4, 5].

Зная закономерности появления флуктуаций скорости звука, их пространственно-временные характеристики, можно оценивать степень их влияния на распространение акустических волн и решение задач гидроакустического наблюдения.

ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ НАУЧНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является разработка имитационной модели, генерирующей флуктуационные искажения структуры скорости звука, вызванных ветровым волнением. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи. Во-первых, рассмотреть физические процессы, происходящие в верхнем водном слое под действием ветровых волн. Во-вторых, разработать математическую модель генерации флуктуаций скорости звука, вызванных ветровым волнением. В-третьих, создать программный продукт, реализующий разработанную математическую модель.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ВОДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕТРОВЫХ ВОЛН

В основе динамики ветровых волн, приводящих к перемешиванию верхних водных слоев, лежит трохоидальная теория, в соответствии с которой профиль движения волны осуществляется в виде трохоиды (рис. 1), а частицы воды осуществляют радиальные движения, затухающие с глубиной, как показано на рис. 2.

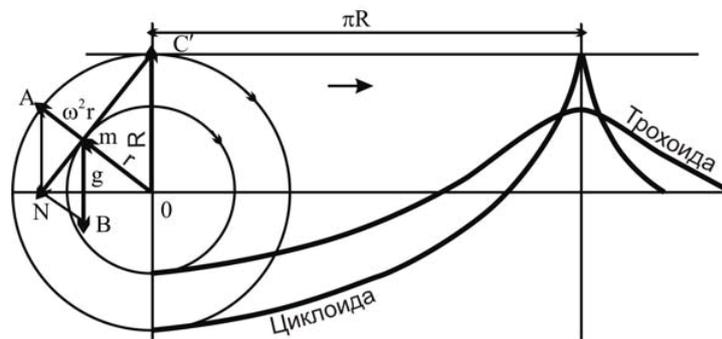


Рис. 1. Профіль руху хвилі у вигляді трохиоди.

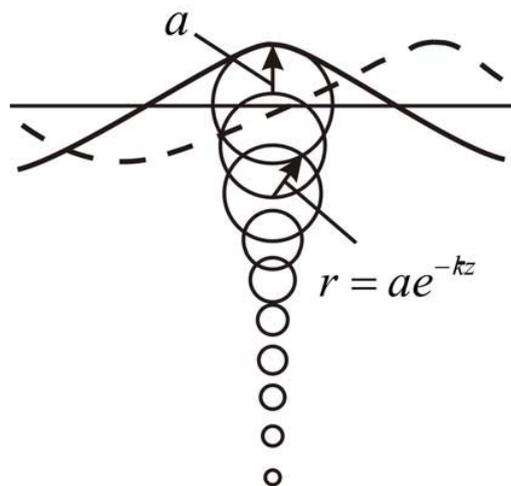


Рис. 2. Радіальні рухи частинок води, згасаючі з глибиною.

Для умов глибокого моря, коли глибина набагато більша за довжину хвилі, справедливі наступні рівняння (розглядають двохмерне переміщення частинок води, вздовж осі x (довжина) і z (глибина), вздовж осі y не розглядають).

$$\left. \begin{aligned} u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} &= v_0 \cdot \frac{ch(k(z+H))}{shkH} \cdot \sin(\sigma t - kx) \\ \omega = \frac{\partial \varphi}{\partial z} &= v_0 \cdot \frac{sh(k(z+H))}{sh(kH)} \cdot \cos(\sigma t - kx) \\ p &= -\rho g z + \rho g \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{ch(k(z+H))}{ch(kH)} \cdot \sin(\sigma t - kx) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де u – горизонтальна складова швидкості; ω – вертикальна складова швидкості; p – тиск; φ – потенціал швидкості; x, z – поточні значення координат по осі абсцис і ординат; v_0 – орбитальна швидкість; k – хвильове число; H – поточне значення глибини; ρ – густина води; h – висота хвилі; σ – складна функція ($\sigma^2 = g \cdot k \cdot th(kH)$); t – поточне значення часу.

Решение данной системы уравнений позволяет получить все компоненты скоростей и давлений частиц жидкости, совершающих движение по замкнутым круговым траекториям. Из него также следует, что с движением глубин радиусы орбит уменьшаются, а, следовательно, и интенсивность всех процессов, вызывающих флуктуации скорости звука, затихает.

Проблема состоит в другом – в систему уравнений (1) входит тринадцать параметров, а нам известно лишь о некоторых. Это характеристики ветровых волн, их высота, длина, период. Продолжительность шторма и фоновый профиль скорости звука (одна из его составляющих – изменение плотности воды с глубиной). Поэтому для решения этой задачи необходимо создавать самостоятельную математическую модель.

Таким образом, изменение гидрофизических характеристик, вызванных ветровым волнением, определяется системой уравнений, составленных в соответствии с трохоидальной теорией морских волн, в которую входит тринадцать переменных величин. Располагая только параметрами ветровых волн, продолжительностью шторма и плотностью воды, решение этой системы весьма затруднительно, но позволяет на базе этой системы разработать самостоятельную математическую модель генерации мелкомасштабных флуктуаций скорости звука.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ЗВУКА

Начальными условиями данной математической модели будут следующие постулаты.

1. Одномоментное начало и конец шторма. То есть, с началом волнения в этот же момент высота поверхностных волн достигает своего наибольшего значения h и сохраняется в период всего волнения. Вся энергия ветровых волн идет только на перемешивание верхнего слоя вод и генерацию процессов тепломассопереноса.
2. Наибольшее значение амплитуды флуктуаций скорости звука проявляются в приповерхностном слое сразу же после начала шторма. Наибольшее значение амплитуды флуктуаций скорости звука в $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$, появляющиеся а приповерхностном слое, по абсолютной величине, численно равно наибольшему значению высоты поверхностных волн в метрах, то есть $|\Delta c| = |h|$.
3. Начавшийся шторм с началом одномоментно охватывает определенный приповерхностный слой шириной B . Ниже этого слоя флуктуации скорости звука проникают только как результат перемешивания, генерируемого ветром. Соответственно, чем продолжительнее волнение, тем на большую глубину проникают колебания.
4. По окончанию шторма, инициировавшего волнение, все колебательные движения частиц сохраняются и постепенно синхронно затухают. Одновременно происходит и уменьшение флуктуаций скорости звука. Процесс их угасания происходит по всей глубине одновременно, что приводит к их исчезновению первоначально на базе низких горизонтах, а затем и у поверхности.

Геометрическая интерпретация этих постулатов представлено на рис. 3.

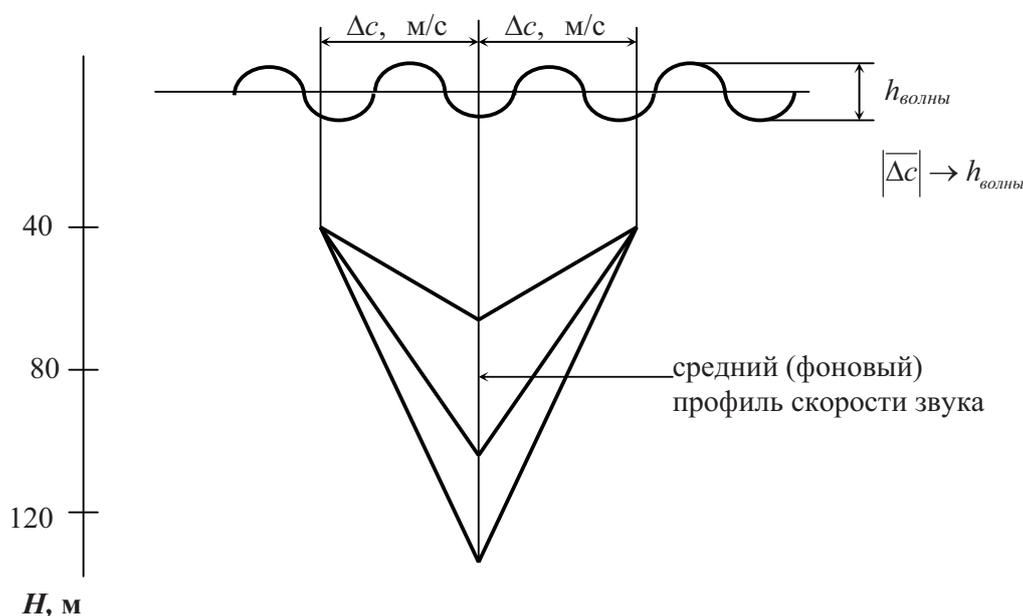


Рис. 3. Геометрическая интерпретация начальных условий.

Возвращаясь при этих постулатах к системе уравнений (1) может быть найдено решение – определен вид функциональной зависимости $H = f(h, t)$.

Один из вариантов этого решения, удовлетворяющих (1), может быть зависимость вида

$$H = a \cdot h \cdot t - b \cdot \frac{t}{h} + B \quad (2)$$

где H – глубина распространения флуктуаций; h – высота поверхностных волн; t – время продолжительности шторма; a , b , B – пропорциональные коэффициенты, приводящие в единую систему единицы измеряемых величин.

Принимая коэффициент B в выражении (2) численно равным ширине приповерхностного слоя, в котором одновременно с началом шторма появляются флуктуации скорости звука, а также учитывая, что соотношение высоты и длины штормовых волн в Черном море составляет от $2 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-1} значения коэффициентов приобретают конкретную величину и выражение (2) примет вид

$$H = 0,5 \cdot h \cdot t - b \cdot \frac{t}{h} + 40 \quad (3)$$

где значения H и h в метрах, t – в часах.

Изменение фонового профиля флуктуациями скорости звука представим в виде искажения фонового значения скорости звука случайной (хаотической) функцией $\delta c_H = f(\delta c, H)$, где δc – значение амплитуды флуктуации на глубине H .

Во-первых, условия задания функции $f(\delta c, H)$ определяются максимальным значением амплитуды флуктуации, это. Во-вторых, они затухают с глубиной и не превышают пределы заштрихованной зоны, как показано на рис. 3.

Суммируя вышесказанное, получим

$$\left. \begin{aligned} |h| &= |\delta c| \\ H &= a \cdot h \cdot t - b \cdot \frac{t}{h} + B \\ c_H &= c(H) \pm f(\delta c, H) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Данная система уравнений является моделью генерации флуктуаций скорости звука ветровым волнением.

Таким образом, математическая модель генерации флуктуаций скорости звука, представляет собой систему трех уравнений связывающих высоту поверхностных штормовых волн с амплитудой флуктуаций скорости звука, зависимостью глубин их проникновения от продолжительности шторма и высоты волн, изменения фонового профиля функцией хаотических флуктуаций. Эта модель содержит три изменяющихся параметра, пределы изменения которых известны, что позволяет на базе математической модели создать программный продукт.

ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ, РЕАЛИЗУЮЩИЙ МАТЕМАТИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ

Разработанная программа дает возможность отображения фоновых профилей скорости звука в заданном районе акватории по данным, осредненным по основным сезонам. Графический интерфейс программного модуля представлен на рис. 4.

Пользователю предоставляется возможность моделировать мелкомасштабные флуктуации профиля скорости звука, искажающие его фоновый профиль. Реализована возможность сохранения и импорта в Microsoft Excel результатов моделирования.

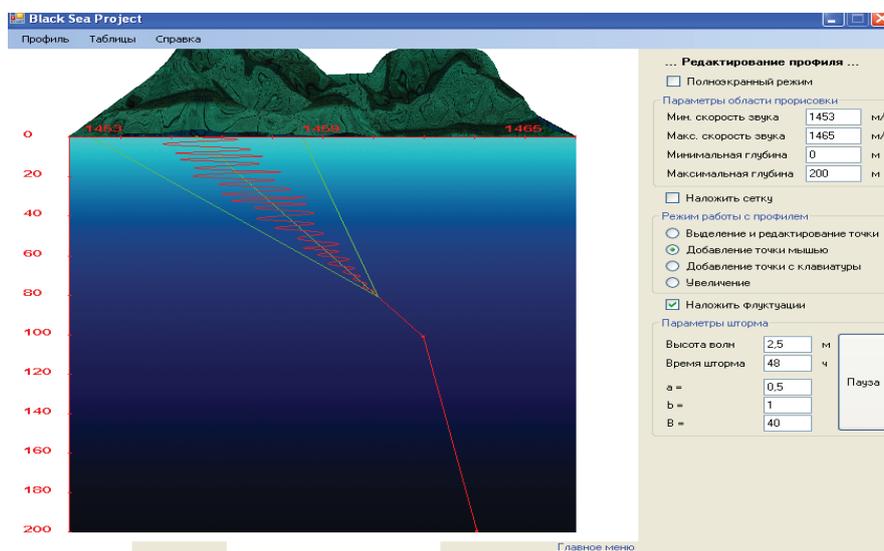


Рис.4. Графический интерфейс пользователя

В качестве среды программирования выбрана интегрированная среда разработки программ на языке C# - **Visual C Sharp Express Edition**. Для визуализации с помощью двумерной и трёхмерной компьютерной графики использовалась библиотека OpenGL,

для доступа к возможностям библиотеки которой при разработке на языке С# использовалась библиотека Tao Framework 2.1.0

При моделировании мелкомасштабных флуктуаций, искажающих фоновый профиль звука, входными данными являются: максимальная высота волн, продолжительность шторма, сезон и квадрат акватории Черного моря, для которых будет осуществляться моделирование.

Выходными данными являются визуальные и численные отображения профилей скорости звука с учетом флуктуаций (при допущении, что распределение флуктуаций подчиняется нормальному закону) и глубина распространения флуктуации.

Таким образом, на основе приведенной математической модели создан программный продукт, осуществляющий визуальные и численные отображения профилей скорости звука с учетом флуктуаций и глубины распространения флуктуации.

ВЫВОДЫ

1. Изменение гидрофизических характеристик, вызванных ветровым волнением, определяется системой уравнений, составленных в соответствии с трохoidalной теорией морских волн, в которую входит тринадцать переменных величин. Располагая только параметрами ветровых волн, продолжительностью шторма и плотностью воды, решение этой системы весьма затруднительно, но позволяет на базе этой системы разработать самостоятельную математическую модель генерации мелкомасштабных флуктуаций скорости звука.

2. Математическая модель генерации флуктуаций скорости звука, представляет собой систему трех уравнений связывающих высоту поверхностных штормовых волн с амплитудой флуктуаций скорости звука, зависимостью глубин их проникновения от продолжительности шторма и высоты волн, изменения фонового профиля функцией хаотических флуктуаций. Эта модель содержит три изменяющихся параметра, пределы изменения которых известны, что позволяет на базе математической модели создать программный продукт.

3. На основе приведенной математической модели создан программный продукт, осуществляющий визуальные и численные отображения профилей скорости звука с учетом флуктуаций и глубины распространения флуктуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шулейкин В.В. Физика моря. – М.: Наука, 1967 – 1083 с.
2. Физика океана / Под. ред. Доронина Ю.П. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.
3. Коменкович Изменчивость мирового океана
4. Бабий В.И. Мелкомасштабная структура поля скорости в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.
5. Азаренко Е.В. Обнаружение подводных объектов. – Севастополь: Гос. Океанариум. – 2003. – 80 с.