

УДК 532.542.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НАД ЗАТОПЛЕННЫМ ВОЛНОЛОМОМ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

И. Т. СЕЛЕЗОВ, В. В. ХОМИЦКИЙ, В. А. ТКАЧЕНКО, Л. Н. ТЕРЕЩЕНКО,
С. А. САВЧЕНКО, И. П. БРАТАСЮК

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
03680 Киев – 180, МСП, ул. Желябова, 8/4
office@hydromech.com.ua

Получено 12.03.2013

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по гашению набегающих на берег поверхностных гравитационных волн. Теоретический анализ проведен на основе модели взаимодействия волн с донными неоднородностями с применением метода сплайн-коллокаций. Физическое моделирование основано на экспериментах, проведенных на базе института в пос. Кийлово. Эксперименты проведены как для неразрушающихся, так и для разрушающихся волн. В первом случае сделано сопоставление теоретических и экспериментальных результатов. Во втором случае предложены эмпирические формулы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поверхностные гравитационные волны, донные неоднородности, метод сплайн-коллокаций

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень по гашінню поверхневих гравітаційних хвиль, що набігають на берег. Теоретичний аналіз проведений на основі моделі взаємодії хвиль з донними неоднорідностями із застосуванням методу сплайн-колокацій. Фізичне моделювання основано на експериментах, які проведено на базі інституту в с. Кийлово. Експерименти проведено як для неруйнівних, так і для руйнівних хвиль. В першому випадку здійснено співставлення теоретичних та експериментальних результатів. В другому випадку запропоновано емпіричні формули.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: поверхневі гравітаційні хвилі, донні неоднорідності, метод сплайн-колокацій

The results of theoretical and experimental investigations of suppression of surface gravity waves running on a coast are presented. The theoretical analysis is provided on the basis of model of wave interaction with bottom inhomogeneities by using the method of spline-collocations. Physical modelling is based on the experiments conducted on the base of Institute of hydromechanics in a settlement Kijlovo. Experiments are carried out both for nonbreaking and for breaking waves. In the first case comparison of theoretical and experimental results is carried out. In the second case empirical formulas are proposed.

KEY WORDS: surface gravity waves, bottom inhomogeneities, method of spline-collocations

ВВЕДЕНИЕ

Затопленный волнолом относится к числу активных наносерегулирующих сооружений, применение которых оказывает минимальное влияние на устойчивость берегового процесса и обеспечивает тем самым динамическое равновесие береговой линии в зоне влияния сооружения. Если ширина гребня волнолома соизмерима с длиной набегающей волны, то говорят о волноломах распластанного профиля. Если волнолом распластанного профиля примыкает к откосу берегозащитного сооружения другого типа, он именуется подводной бермой. Подводный волнолом прямоугольного профиля с широким гребнем называют искусственным рифом или подводным порогом. Часто такие сооружения предохраняют от размыва искусственные пляжи рекреационных территорий.

Обычно тело подводного волнолома выполняют проницаемым из каменной наброски, но по-

крытие волнолома может набираться также из фигурных массивов, бетонных блоков, геотуб (оболочек), проницаемых пустотелых полусфер и других видов покрытий. Преимущества подводных волноломов состоят в обеспечении эффективного гашения набегающих волн и водообмена между открытой и заволноломной акваториями.

Далее рассмотрим трансформацию регулярных поверхностных волн над затопленным волноломом распластанного профиля, выполненного в виде широкого порога, на гребне которого располагаются цилиндрические оболочки (мягкие или жесткие) различного диаметра, уложенные в один или несколько рядов. Указанная компоновка удешевляет стоимость сооружения, так как цоколь сооружения, предотвращая размыв основания, может быть выполнен из сравнительно дорогого буттового камня, а основная часть волнолома – из грунтонаполняемых синтетических оболочек, которые являются мобильными элементами. Последнее свойство позволяет учитывать фактор сезон-

ности при эксплуатации сооружения, улучшая тем самым экологический аспект проблемы природопользования.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В математической модели рассматривается подводная волногасящая берма, на поверхности которой располагаются локальные донные неоднородности (рис. 1). Определяются коэффициенты отражения волн в точке $x = b$, и прохождения в точке $x = a$, которые полностью характеризуют трансформацию волн. Задача рассматривается в рамках модели жидкости конечной глубины и решается на основе метода сплайн-коллокаций [1].

Рассмотрим задачу, когда профиль перехода описывается произвольной функцией $d_2(x)$, принадлежащей классу функций C^2 . Предполагается, что на подводную неоднородность под углом θ_3 набегают плоские регулярные волны с потенциалом скоростей φ_3 , а после прохождения неоднородности распространяются уходящие волны с потенциалом φ_1 [2].

Движение жидкости в области $\Omega = \{(x, y, z) | -\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty, z \in [-z_{inh}, 0]\}$ описывается уравнением Лапласа

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad \text{в} \quad \Omega. \quad (1)$$

Выражение для потенциала φ_3 имеет вид

$$\varphi_3 = \frac{igh \operatorname{ch} [k_3 (z + d_3)]}{2\omega \operatorname{ch} (k_3 d_3)} \times \exp(-i(\alpha_3 x + \sigma_3 y - \omega t)), \quad (2)$$

где h , λ – высота и длина набегающей волны; ω – круговая частота; t – время; $\alpha_3 = k_3 \cos \theta_3$, $\sigma_3 = \sin \theta_3$; $k_3 = 2\pi/\lambda$ – волновое число. Множитель $\exp(i\omega t)$ в дальнейшем опускается. Потенциал φ_1 определяется аналогично.

Трансформированные на подводной неоднородности $\{a < x < b, |y| < \infty, -d_2(x) \leq z \leq 0\}$ волны генерируют отраженные волны φ_s , распространяющиеся в области $\{b < x < \infty, |y| < \infty, -d_3(x) \leq z \leq 0\}$, и проходящие волны φ_1 , распространяющиеся в области $\{-\infty < x \leq a, |y| < \infty, -d_1(x) \leq z \leq 0\}$. Потенциалы скоростей $\varphi_3 = \varphi_i + \varphi_s$ и φ_1 в этих областях удовлетворяет уравнению Лапласа. В области подводной неоднородности $\{a < x < b, |y| < \infty, -d_2(x) \leq z \leq 0\}$ потенциал скоростей определяется следующим образом:

$$\varphi_2 = \frac{\operatorname{ch} [k_2(x)(z + d_2(x))]}{\operatorname{ch} (k_2(x) d_2(x))} \psi(x, y), \quad (3)$$

где функция $\psi(x, y)$ удовлетворяет уравнению

$$D(x) \nabla^2 \psi + \left[2 \frac{dD(x)}{dx} - E(x) \frac{dd_2(x)}{dx} \right] \frac{d\psi}{dx} + \left[\frac{d^2 D(x)}{dx^2} + \frac{d}{dx} \left(E(x) \frac{dd_2(x)}{dx} \right) + \alpha_2^2 D(x) \right] \cdot \psi = 0. \quad (4)$$

Искомые функции φ_j ($j = 1, 3$) на границе перехода от постоянной глубины к переменной должны удовлетворять условиям сопряжения. Решение уравнения (4) будем искать в виде $\psi(x, y) = R(x) \exp(-i\sigma_2 y)$, где $\sigma_2 = k_2 \sin \theta_2$ ($\sigma_2 = \sigma_3$), а $R(x)$ – определяется из уравнения

$$D \frac{d^2 R}{dx^2} + \left(2 \frac{dD}{dx} - E(x) \frac{dd_2}{dx} \right) \frac{dR}{dx} + \left[\frac{d^2 D}{dx^2} - \frac{d}{dx} \left(E \frac{dd_2}{dx} \right) + (\alpha_2^2 - \sigma_3^2) D \right] \cdot R = 0. \quad (5)$$

Для решения уравнения (5) применяется метод сплайн-коллокаций в виде разложения по базису из нормализованных кубических B -сплайнов:

$$R(x) = \sum_{n=j-3}^j b_n B_n(x), \quad x_1 \in [x_j, x_{j+1}], \quad j = \overline{0, N}, \\ -a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b. \quad (6)$$

Численные расчеты были проведены для случая, когда на подводной волногасящей буне располагаются локальные донные неоднородности в виде круговых цилиндров (рис. 2).

Энергия падающего поля равна сумме энергий отраженных и проходящих волн, если не имеет место захват волн. Это характеризуется коэффициентами отражения $k_r = |\varphi_3|/|\varphi_i|$ и прохождения $k_t = |\varphi_1|/|\varphi_i|$. Здесь φ_i – потенциал падающей волны, φ_3 – отраженной, φ_1 – проходящей. Из закона сохранения энергии следует, что $k_r^2 + k_t^2 = 1$ и поэтому для анализа численных расчетов достаточно определить только одну из этих величин.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Экспериментальные исследования проводились на физических моделях в волновом лотке $27 \times 0.35 \times 0.5$ м. Изменение амплитуды действующих волн осуществлялось датчиками емкостного типа, которые были установлены перед сооружением, за сооружением и на берме (рис. 2). Волновой режим в опытах был следующим: $h_{неч} = 0.02 \dots 0.10$ м; $\bar{\tau} = 0.67 \dots 3.8$ с; $\lambda_0 = \lambda/h = 10 \dots 60$. Цилиндрические оболочки имели три типоразмера: $D_1 = 0.12$ м; $D_2 = 0.16$ м;