

УДК 551.466.6

С.Ф.Доценко, А.Ю.Базыкина

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛИННЫХ ВОЛН В ПРОЛИВЕ БОСФОР

Каналовая модель поверхностных длинных волн применена для описания распространения одиночных линейных волн в каналах переменного сечения. Выполнен численный анализ конечно-разностным методом изменения амплитуды волны при распространении через пролив Босфор из Черного моря в Мраморное и наоборот. На отдельных участках пролива Босфор возможно увеличение высоты волны в полтора раза. Рост и уменьшение высоты волны взаимосвязаны с изменениями геометрии поперечного сечения пролива.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *одиночные длинные волны, распространение, каналы переменного поперечного сечения, каналовая модель, решения численные, пролив Босфор.*

Введение. Морские проливы представляют собой водное пространство между двумя участками суши, соединяющее смежные водные бассейны. Это районы активного судоходства, связанного с немалым риском. Часто проливы являются зонами интенсивных течений и волновых процессов, что говорит о важности всестороннего изучения динамики морской среды в таких динамически активных районах Мирового океана.

Ниже рассматривается распространение одиночной поверхностной длинной волны в канале переменного сечения, моделирующего пролив Босфор. Для описания распространения линейных длинных волн применена каналовая теория, которая оперирует с осредненными по поперечному сечению канала горизонтальной скоростью и смещениями уровня моря [1, 2].

Каналовая теория длинных волн и ее основные принципы нашли свое применение в теории приливов [3], при описании распространения волн типа цунами в каналах переменного сечения [4], приливных волн в устьях рек [5], поверхностных [6] и внутренних (двухслойная жидкость) [7] сейш и др. Достоинство каналовой теории – замена двумерной волновой задачи одномерной. Распространение периодических волн в каналах модельной и реальной геометрии рассмотрено в работе [8].

Математическая постановка задачи. В горизонтальной плоскости Oxy (x, y – декартовы координаты точки на плоскости) рассматривается криволинейный канал (пролив Босфор), показанный на рис.1. Канал характеризуется длиной L , изменяющейся вдоль оси канала локальной шириной зеркала $b(x)$, переменной максимальной глубиной в поперечном сечении канала $H(x)$, наконец, площадью поперечного сечения $S(x)$, где x – криволинейная координата вдоль оси канала.

В линейном приближении рассмотрим распространение в таком канале одиночной волны, входящей в пролив в точке $x = 0$ (Чёрное море) и выходящей из канала в точке $x = L$ (Мраморное море) и, наоборот, из Мраморного моря в Чёрное. При моделировании распространения волны воспользуем-

© С.Ф.Доценко, А.Ю.Базыкина, 2013

Р и с . 1 . Пролив Босфор, соединяющий Черное ($x = 0$) и Мраморное ($x = L$) моря.

ся каналовой теорией длинных волн [1, 2], оперирующей с осредненной по поперечному сечению канала горизонтальной скоростью $u = u(x, t)$ и осредненными поперек канала (по нормальной к оси канала координате y) смещениями свободной поверхности жидкости $\zeta = \zeta(x, t)$.

В рамках этого подхода линейное движение жидкости в канале описывается системой двух уравнений

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x}, \quad \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial(Su)}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Если исключить продольную скорость u из системы (1), то придем к волновому уравнению с зависящими от x коэффициентами:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) = 0. \quad (2)$$

Систему уравнений (1) необходимо дополнить начальными и граничными условиями. Начальные условия предполагают отсутствие возмущений поля скорости и смещений свободной поверхности в начальный момент времени $t = 0$, именно

$$u = 0, \quad \zeta = 0 \quad (t = 0). \quad (3)$$

При рассмотрении распространения одиночной волны через пролив Босфор из Чёрного моря в Мраморное на границах пролива задавались условия свободного входа в пролив волны заданной формы (полуволна синусоиды) и свободного выхода из него волн, достигших Мраморного моря:

$$\zeta = a_0 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right), \quad u = \sqrt{\frac{gb}{S}} \zeta \quad (x = 0, 0 \leq t \leq T), \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sqrt{\frac{gS}{b}} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (x = 0, T < t), \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \sqrt{\frac{gS}{b}} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (x = L, t \geq 0), \quad (6)$$

где T – длительность одиночной волны на входе в пролив.

При рассмотрении распространения одиночной волны через пролив Босфор из Мраморного моря в Чёрное на границах пролива условия свободного входа и выхода волны задаются аналогичным образом с учетом иного направления распространения волны на входе в канал.

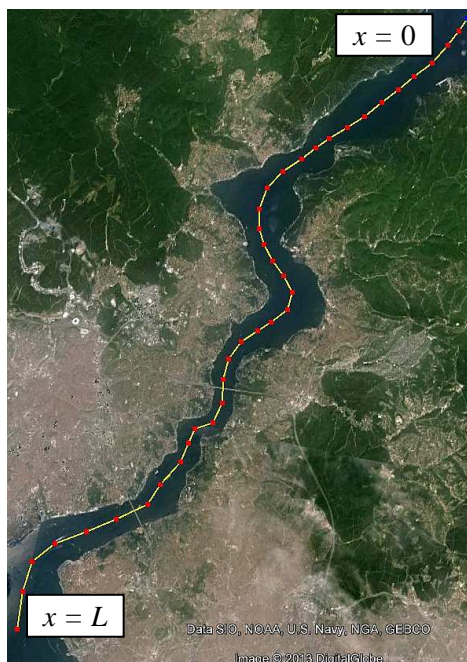




Рис. 2. Распределения вдоль оси пролива Босфор поперечной ширины зеркала $b(x)$ (а), максимальной глубины $H(x)$ (б), площади поперечного сечения $S(x)$ (в).

Задача (1), (3) – (6) решалась численно методом конечных разностей по явно-неявной схеме на разнесенных для полей u и ζ неравномерных сетках [9]. Распределения геометрических характеристик пролива Босфор показаны на рис.2.

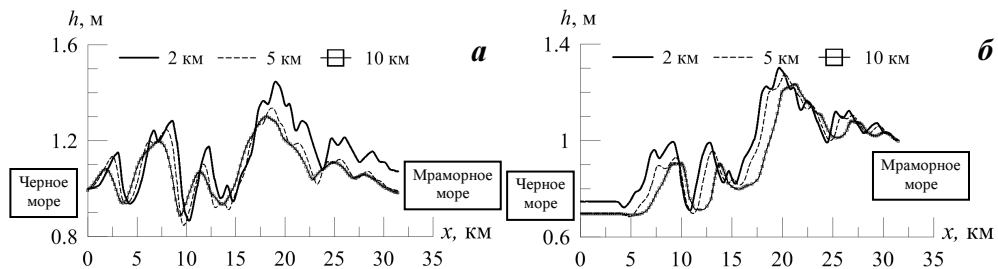
Они найдены с использованием кусочно-линейной интерполяции ширины пролива (рис.2, а), его максимальной глубины (рис.2, б) и площади поперечного сечения (рис.2, в) по значениям в 54 поперечных сечениях пролива. Вход в пролив из Черного моря соответствует точке $x = 0$, пролив заканчивается в Мраморном море (точка $x = L$). Изменения всех величин нерегулярны, характеризуются участками возрастания и убывания. Длина пролива 31,5 км, наименьшая ширина 750 м, наименьшая глубина судоходной части 33 м.

Численные оценки амплитудных характеристик волны вдоль пролива Босфор. Алгоритм решения задачи (1), (3) – (6) тестирован на каналах простой геометрии [8].

Рассмотрим распространение длинной волны из Черного моря в Мраморное через пролив Босфор. Такая волна, в частности, может быть вызвана сейсмическими (цунами) или метеорологическими (метеоцунами) источниками возмущений в акватории Черного моря.

Одиночная волна, возникшая на черноморском входе в пролив, распространяется с переменной скоростью вдоль пролива, изменяя высоту, длину и форму. Распределение максимально возможных высот поверхностной волны вдоль оси пролива показано на рис.3 для трех значений первоначальной длины волны.

Характер распределения высот волн вдоль пролива зависит от длины входящей в пролив волны, то есть фактически от соотношения между длиной волны и характерным масштабом нерегулярностей геометрических параметров канала. На отдельных участках пролива возможно полуторакратное увеличение высот волн. Как правило, локальное усиление волн связано с локальным уменьшением ширины пролива, увеличением глубины и уменьшением площади поперечного сечения пролива, а также от того, насколько резко изменяются эти геометрические характеристики. Такие же волновые эффекты проявлялись в каналах модельной геометрии [8]. Чем длиннее вол-



Р и с . 3 . Распределения вдоль оси пролива Босфор максимально возможных высот волн при распространении вдоль пролива из Черного в Мраморное море (а) и из Мраморного в Черное море (б) одиночных волн различной первоначальной длины.

на, тем менее ощутимо влияние на нее изменений формы пролива, хотя в целом для всех трех длин волн характер изменения высоты волны качественно одинаковый.

Можно рассмотреть и изменения высоты волны при распространении из Мраморного в Черное море. Для трех значений длины волны на входе в пролив такие зависимости представлены на рис.3, б.

Как и в предыдущем случае, характер распределения высот волн вдоль пролива зависит от длины входящей в пролив волны, то есть фактически от соотношения между длиной волны и протяженностью локальных нерегулярностей геометрии поперечного сечения пролива. На отдельных участках пролива возможно увеличение высоты волны в 1,3 раза, что несколько меньше по сравнению с предыдущим случаем. Чем длиннее волна, тем менее выражено влияние на нее изменений геометрии пролива, хотя в целом для всех трех длин волн характер изменения высоты волны качественно одинаковый, как и в предыдущем случае.

Заключение. Каналовая модель длинных поверхностных волн применена для анализа распространения одиночных волн в проливе Босфор для таблично заданных в 54 поперечных сечениях геометрических параметров пролива. Задача решалась численно с использованием метода конечных разностей.

Рассмотрено распространение длинной волны из Черного моря в Мраморное и наоборот. Показано, что при длинах волн 2 – 10 км распределения высот волн вдоль оси пролива качественно похожи, но несколько ослабевают с ростом длины волны. В случае распространения волны из Черного моря ее усиление достигает полутора раз, что связано с резким уменьшением площади поперечного сечения в середине пролива. Несколько меньшее увеличение амплитуды волны (в 1,3 раза) наблюдается при распространении волны из Мраморного моря в Черное. Как правило, локальное усиление волн связано с локальным уменьшением ширины канала, увеличением его глубины и уменьшением площади поперечного сечения пролива, как это следует из сопоставления рис.2 – 3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ламб Г. Гидродинамика.– М.-Л.: Гостехиздат, 1947.– 928 с.

2. *Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В.* Теоретическая гидромеханика. Ч.1.– М.: Физматгиз, 1963.– 584 с.
3. *Шулейкин В.В.* Физика моря.– М.: Наука, 1968.– 1083 с.
4. *Черкесов Л.В.* Поверхностные и внутренние волны.– Киев: Наукова думка, 1973.– 247 с.
5. *Стокер Дж.* Волны на воде.– М.: Иностранная лит-ра, 1959.– 618 с.
6. *Defant A.* Physical oceanography. Vol.1.– New York: Pergamon Press, 1961.– 745 p.
7. *Lemmin U., Mortimer C.H.* Tests of an extension to internal seiches of Defant's procedure for determination of surface seiche characteristics in real lakes // *Limnol. Oceanogr.*– 1986.– 31, № 6.– P.1207-1231.
8. *Доценко С.Ф., Ракова И.Н.* Распространение длинных поверхностных волн в каналах переменного поперечного сечения // *Морской гидрофизический журнал.*– 2012.– № 2.– С.3-17.
9. *Вольцингер Н.Е., Пясковский Р.В.* Основные океанологические задачи теории мелкой воды.– Л.: Гидрометеиздат, 1968.– 300 с.

Материал поступил в редакцию 10.07.2013 г.

АНОТАЦІЯ Модель каналових поверхневих довгих хвиль застосована для опису розповсюдження одиночних лінійних хвиль в каналах змінного перерізу. Виконано чисельний аналіз кінцево-різницеvim методом зміни амплітуди хвилі при поширенні через протоку Босфор з Чорного моря в Мармурове і навпаки. На окремих ділянках протоки Босфор можливе збільшення висоти хвилі в півтора рази. Ріст і зменшення висоти хвилі взаємопов'язане зі змінами геометрії поперечного перерізу протоки.

ABSTRACT Channel model of surface long waves is used to describe the propagation of linear waves in the channels of variable cross section. The numerical analysis by the finite-difference method of changing the amplitude of the wave propagating through the Bosphorus from the Black Sea to the Marmara, and vice versa was carried out. On some parts of the Bosphorus is possible to increase the height of the wave in the half. Growth and reducing the height of the waves is correlated with changes in cross-sectional geometry of the strait.