

**ГЕНЕРАЦИЯ БАРОТРОПНЫХ ВОЛН
ДВИЖУЩИМСЯ БАРИЧЕСКИМ
ВОЗМУЩЕНИЕМ В ЗАМКНУТОМ
БАССЕЙНЕ**

А.В. Багаев

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
г. Севастополь ул. Капитанская, 2
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

С использованием двумерной линейной численной модели, базирующейся на уравнениях теории мелкой воды, исследуется генерация длинных волн перемещающейся осесимметричной областью пониженного давления. Предполагается, что ограниченный бассейн переменной глубины заполнен однородной несжимаемой жидкостью. Анализируется пространственно-временная эволюция полей отклонения уровня и волновых скоростей.

Введение. В данной работе с использованием численной модели в приближении гидростатики изучаются процессы генерации волн в прямоугольном бассейне переменной глубины. Анализируются сгонно-нагонные явления, направление и скорость волновых течений, вызванных барическим возмущением типа циклона, проходящим над исследуемой областью с различными скоростями.

Постановка задачи. Для расчета используем уравнения движения однородной несжимаемой жидкости в приближении теории мелкой воды с учетом нелинейного трения на дне. Координатные оси направлены следующим образом: ось x – на восток, ось y – на север. Начало координат расположено в нижнем левом углу бассейна. Бассейн прямоугольной формы с линейными размерами a и b и вертикальными стенками на границе. Глубина бассейна задается следующей функцией:

$$H(x, y) = (H_{max} - H_{st}) \frac{4x(a-x)}{a^2} \cdot \frac{4y(b-y)}{b^2} + H_{st},$$

где H_{max} – максимальная глубина бассейна ($H_{max} = H(a/2, b/2)$), H_{st} – высота стенок бассейна.

Уравнения движения [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - k \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{H}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - k \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{H}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= -\left(\frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

где $u = u(x, y, t)$, $v = v(x, y, t)$ – горизонтальные компоненты скорости, $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – отклонение свободной поверхности от начального уровня, $H = H(x, y)$ – глубина, $k = 0,0026$ – коэффициент донного трения. На боковых границах равны нулю нормальные компоненты скорости: $u(0, y, t) = u(a, y, t) = 0$; $v(x, 0, t) = v(x, b, t) = 0$. Начальные условия нулевые: $u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0$; $\zeta(x, y, 0) = 0$.

Описание численной модели. В проведенных экспериментах уравнения движения жидкости решались с помощью явной численной схемы на сетке “Arakawa C” с равномерным по x и y шагом h_c , шаг по времени определялся условием устойчивости схемы [2]:

$$\Delta t \leq \frac{h}{\sqrt{2gH_{max}}}$$

Стороны бассейна $a = 400$ км, $b = 300$ км. Максимальная глубина $H_{max} = 12$ м. Высота стенок $H_{st} = 0,5$ м (рисунок 1). Шаг сетки $h_c = 1$ км, шаг по времени $\Delta t = 60$ с.

Над бассейном проходит циклон, давление в котором задается следующим образом:

$$p_a = \begin{cases} -p_0 \cos^2\left(\frac{\pi r}{2R}\right) + \tilde{p}_a, & r \leq R, \\ \tilde{p}_a, & r > R, \end{cases}$$

где $R = 150$ км – радиус циклона, $p_0 = 1500$ Па – амплитуда отклонения давления от атмосферного, r – расстояние до центра циклона. Центр циклона при $t = 0$ находится в точке с координатами $x = -150$ км, $y = 150$ км. Проекция скорости циклона на ось x : $C_x = 5$ м/с. На ось y : $C_y = 0$ м/с.

При проведении численного эксперимента с дискретностью в один час фиксировались следующие данные: максимум моду-

ля возмущения свободной поверхности по всей площади бассейна ($\max|\zeta|$); максимум модуля вектора скорости по всей площади бассейна ($\max|(u,v)|$); изменение уровня свободной поверхности на береговых станциях – в точках W1, W2, W3, S1, S2, S3, E1, E2, E3, расположенных на границах бассейна.

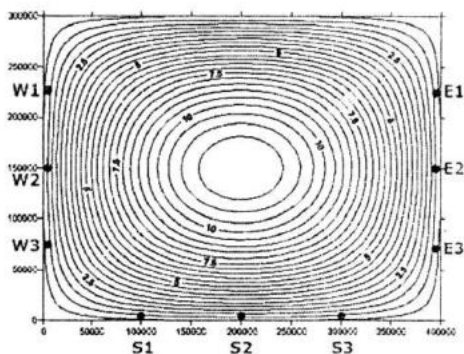


Рисунок 1. Глубины бассейна и расположение береговых станций

Первая серия экспериментов. Исследовалось влияние шага сетки h_c на получаемые данные. Значение h_c полагалось равным 500, 1000 и 2000 м.

Остальные параметры не изменялись. Проведенное сравнение показало, что все три значения h_c приводят к результатам, отличающимся менее чем на 1%.

Вторая серия экспериментов. Исследовано влияние скорости циклона на скорость движения жидкости и величину сгонно-нагонных явлений. Скорость циклона C_x полагалась равной 5, 10, 15 м/с.

Анализ результатов экспериментов показал, что при увеличении скорости циклона в 2 раза (с 5 до 10 м/с) происходит сдвиг (с 31 на 19 часов) времени достижения максимума отклонения свободной поверхности и увеличение этого максимума (на 11%). Значение максимума модуля скорости при этом изменяется более чем в два раза (время сдвигается с 26 на 16 часов). При дальнейшем увеличении скорости циклона (с 10 до 15 м/с) время достижения максимума отклонения свободной поверхности снова сдвигается с 19 на 14 часов, но величина его уменьшается на 32%. Время достижения максимума скорости и его величина сдвигается незначительно (с 16 на 12 часов при изменении на 10%). Анализ изменения уровня на береговых станциях свидетельствует, что на станциях западного берега (W)

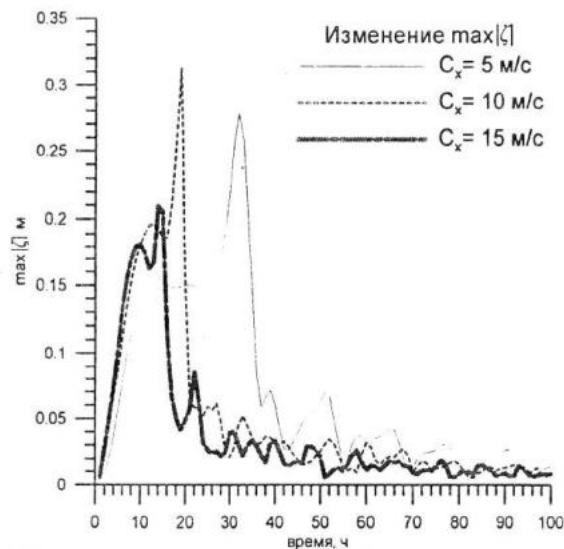


Рисунок 2 – Значение $\max|\zeta|$ (м) при различных скоростях перемещения циклона

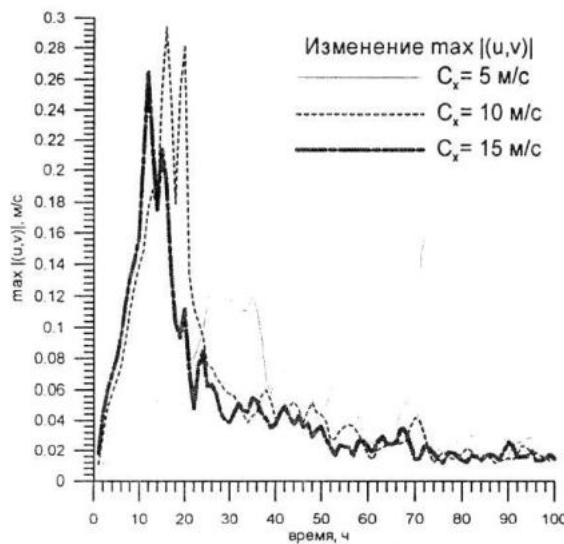


Рисунок 3 – Значение $\max|(u,v)|$ (м/с) при различных скоростях перемещения циклона

наблюдается небольшое (3 см) уменьшение максимума нагонов с одновременным значительным сдвигом времени его наступления (с 47 на 10 часов). Сдвиг времени наступления максимума, объясняется увеличением скорости прохождения циклона над этими станциями, равно как и тем, что максимальные сгоны и нагоны на этих станциях (из-за их расположения) имеют место при прохождении над ними циклона, а не вследствие остаточных колебаний жидкости. Из данных о сгонах на восточных и южных станциях видно увеличение сгонов более чем на 40% при скорости циклона $C_x = 10$ м/с, а затем такое же уменьшение, при скорости $C_x = 15$ м/с.

Таблица 1 – Значение максимума уровня (нагоны) при изменении скорости движения циклона

Станция	$C_x = 5 \text{ м/с}$		$C_x = 10 \text{ м/с}$		$C_x = 15 \text{ м/с}$	
	$t, \text{ ч}$	$ \zeta , \text{ см}$	$t, \text{ ч}$	$ \zeta , \text{ см}$	$t, \text{ ч}$	$ \zeta , \text{ см}$
W1	47	5	34	4	10	2
W2	10	13	6	9	6	6
W3	47	5	34	4	10	2
E1	33	18	20	13	16	11
E2	32	28	19	31	14	21
E3	33	18	20	13	16	11
S1	45	3	14	7	12	7
S2	22	3	15	11	12	11
S3	37	4	18	10	15	11

Таблица 2 – Значение минимума уровня (сгоны) при изменении скорости движения циклона

Станция	$C_x = 5 \text{ м/с}$		$C_x = 10 \text{ м/с}$		$C_x = 15 \text{ м/с}$	
	$t, \text{ ч}$	$ \zeta , \text{ см}$	$t, \text{ ч}$	$ \zeta , \text{ см}$	$t, \text{ ч}$	$ \zeta , \text{ см}$
W1	34	6	27	4	15	4
W2	34	6	27	6	15	5
W3	34	6	28	4	15	4
E1	24	13	15	17	12	10
E2	23	14	14	21	11	13
E3	24	13	16	17	12	10
S1	12	7	9	11	8	10
S2	15	7	11	17	9	17
S3	20	8	14	19	11	17

Это явление можно объяснить совпадением скорости движения циклона с фазовой скоростью длинной волны для данного бассейна ($\sqrt{gH_{\max}} = 10,8 \text{ м/с}$). Как было отмечено в работе [3] при прохождении барического возмущения над бассейном, при условии, что размеры циклона сопоставимы с размерами бассейна и его скорость близка к фазовой скорости длинных волн, наблюдаются максимальные сгонно-нагонные явления. Это же явление четко прослеживается и на рисунках 2 и 3.

Заключение. С использованием двумерной численной модели исследована генерация волн под действием осесимметричной перемещающейся области пониженного давления. Проанализирована пространственно-временная эволюция полей отклонения уровня и волновых скоростей. Первая серия экспериментов позволила выбрать оптимальный шаг пространственного

интегрирования. Анализ второй серии экспериментов показал, что если диаметр циклона равен ширине бассейна и его скорость совпадает с фазовой скоростью длинных волн, то отмечается максимум отклонения уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Е. Вольцингер, Р.В. Пясковский. Основные океанологические задачи теории мелкой воды. – Л.: Гидрометеиздат, 1968. – 300 с.
2. А.Г. Марчук, Л.В. Чубаров, Ю.И. Шокин. Численное моделирование волн цунами. – Новосибирск: Наука, 1993. – 176 с.
3. А.В. Коновалов, Л.В. Черкесов. Генерация длинных нелинейных волн в замкнутом бассейне движущимися возмущениями атмосферного давления. – Известия РАН «ФАО», 1995, т. 31, №5. – С. 713–718.