

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА КОРИОЛИСА НА ХАРАКТЕР ТЕЧЕНИЙ И ВОЛН В МОДЕЛЬНОМ БАССЕЙНЕ

С.С. Нечаев, Т.Я. Шульга

Морской гидрофизический институт
НАН Украины
E-mail: otw@alpha.mhi.iuf.net

В работе представлены результаты численного моделирования движений жидкости в модельном прямоугольном бассейне постоянной глубины. Выполнен анализ зависимостей амплитудных характеристик поля уровня и течений от изменения параметра Кориолиса и геометрических характеристик бассейна.

Введение. В данной работе исследуются сгонно-нагонные явления, возникающие под действием касательных напряжений ветра в модельном бассейне. Отдельно исследуется вопрос влияния изменения параметра Кориолиса с широтой на поля скорости и уровня свободной поверхности.

Описание уравнений использованных при построении модели. Модель построена на уравнениях движения взятых в рамках применимости гидростатического приближения и приближения Буссинеска. Соответствующая система уравнений движения, будучи записана для приближения β -плоскости принимает вид [1]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} - (f_0 + \beta y)v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_m \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} + (f_0 + \beta y)u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_m \frac{\partial v}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial P}{\partial z}. \quad (4)$$

Здесь K_m – коэффициент турбулентной вязкости в вертикальном направлении, для определения которого использовалась модель Меллора-Ямады [2] с модификациями Гальперина; A_m – в горизонтальном направлении для его вычисления использовалась формула Смагоринского, остальные обозначения общепринятые.

Дополним систему уравнений (1) – (4) граничными условиями. Условия на свободной поверхности: $z = \eta(x, y)$

$$w = u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\rho_0 K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{0x}, \tau_{0y}), \quad (6)$$

на дне:

$$w = u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad (7)$$

$$\rho_0 K_m \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}). \quad (8)$$

Для вычисления касательных напряжений на поверхности и дне, использовалась формула Манка

$$\bar{\tau}_{b,0} = \rho_0 C_{D,0} |\vec{U}_{b,0}| \vec{U}_{b,0}, \quad (9)$$

на свободной поверхности коэффициент трения вычислялся согласно формулы Линча

$$C_0 = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3} \frac{\rho_a}{\rho}, & |W| < 1 \text{ м/с}, \\ 1.0 \times 10^{-3} \frac{\rho_a}{\rho} (0.45 + 0.06 |W|), & |W| \geq 1 \text{ м/с}. \end{cases} \quad (10)$$

Для получения коэффициента донного трения использовалось выражение Мартина

$$C_D = \max[0.0025; k^2 \ln^{-2}(z_b/z_0)], \quad (11)$$

где $k = 0.04$; z_b – расстояние от нижнего узла сетки до дна; z_0 – относительная неровность дна (принята равной 1 см).

Описание условий и результатов моделирования. Выполнена серия численных экспериментов по исследованию течений и волн в модельных бассейнах, вызываемых ветровыми напряжениями. Моделирование проводилось в бассейнах постоянной глубины ($H = 30$ м) и ширины ($L_x = 540$ км), имеющих различную протяженность в меридиональном направлении ($L_y = 345$, $L_y = 690$ и $L_y = 1035$ км). Локальная система координат выбрана так, что ось ОХ направлена на восток, ось ОY – на север. Расположение бассейнов таково, что их стороны параллельны осям координат, причем начало координат смещается так, чтобы средин-

ная линия бассейнов находится на одной и той же широте, как показано на рисунке 1.

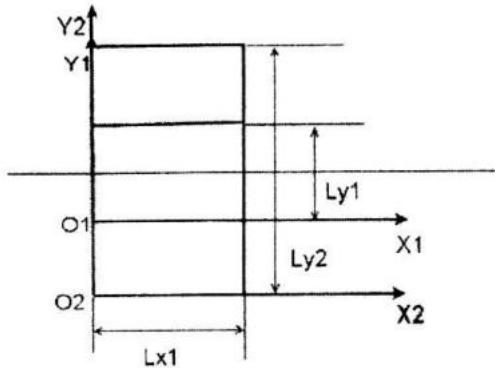


Рисунок 1 – Относительное расположение бассейнов и локальных систем координат для двух первых экспериментов

Движения в бассейне генерировались воздействием ветра, дующего в южном направлении, скорость которого в течении первых трех часов линейно возрастала, а затем оставалась постоянной и равной 10 м/с.

Моделирование проводилось на равномерной сетке, с шагами $\Delta x = 10.9$ км, $\Delta y = 6.8$ км, соответственно, величина шагов по времени составляла $\Delta t_1 = 60$ с., $\Delta t_2 = 6$ с. Расчеты проводились для параметра Кориолиса заданного в виде $f = f_0 + \beta R^{-1}(y - 0.5L_y)$, $f_0 = 9.91 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $\beta = 1.06 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, а также для $\beta = 0 \text{ с}^{-1}$. В вертикальном направлении бассейн был разделен на 32 горизонта, распределенных согласно соотношению, предложенному в [3].

Моделирование выполнялось до выполнения условия установления стационарного режима циркуляции, в качестве которого был выбран критерий уменьшения амплитуды колебаний полной энергии бассейна до 0.1 % её величины

$$\left| \frac{dE}{dt} E^{-1} \right| < 0.01.$$

На рисунке 2 представлено поле уровня свободной поверхности, полученное в результате моделирования для бассейна с $L_y = 345$ км, при $\beta \neq 0$. Из рисунка 2 видно, что под воздействием южного ветра, в установившемся движении наибольшие отклонения свободной поверхности имеют место в юго-западном и северо-восточном углах бассейна, достигая в них минимального и максимального значений. При увеличении размеров бассейна, конфигурация поля

уровня свободной поверхности изменяется, на рис. 3 изображено возвышение свободной поверхности при $L_y = 1035$ км.

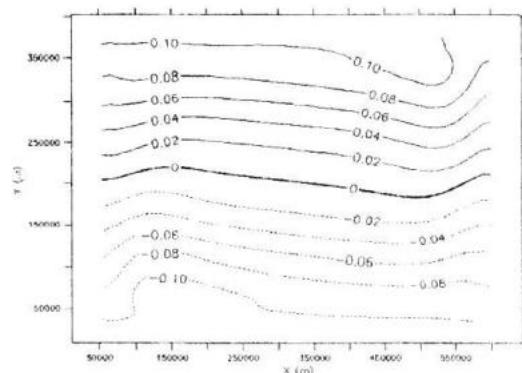


Рисунок 2 – Возвышение уровня свободной поверхности (м) в установившемся режиме для первого эксперимента

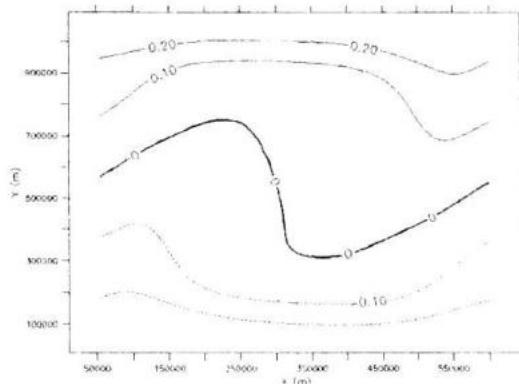


Рисунок 3 – Возвышение уровня свободной поверхности (м) в установившемся режиме для третьего эксперимента

Как видно из этого рисунка, кроме увеличения абсолютных величин наблюдается уплотнение поля уровня свободной поверхности вдоль зональных границ. Вид установившегося поля течений и поля относительной завихренности в приповерхностном слое бассейна отображен на рисунке 4. Приведенные для первого эксперимента поля получены в результате интерполяции на глубину 1.5 м. Течения в приповерхностном слое на большей части акватопии направлены под углом 80° к направлению ветра, у меридиональных границ данный угол составляет 45°. Такой характер течений у поверхности кажется парадоксальным, однако он вполне объясним, если обратить внимание на наличие системы противотечений, проиллюстрированной на рисунке 5. Здесь изображены течения на разрезе, проведенном в широтном направлении при $L_y = 150$ км, масштаб вертикальной скорости увеличен в 1000 раз.

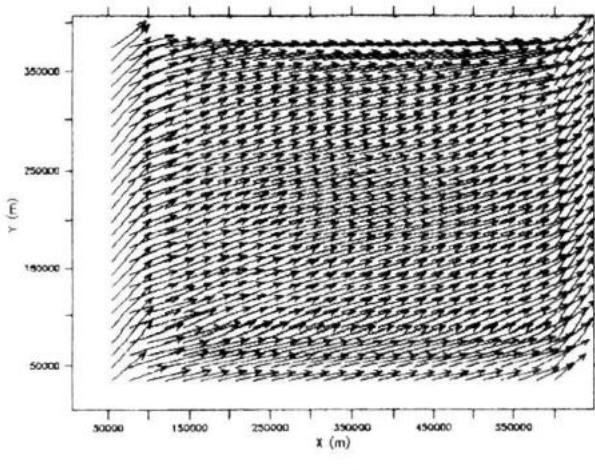


Рисунок 4 – Поле скорости (м/с) и вертикальная проекция ротора скорости (c^{-1}), полученные для глубины 1.5 м в первом эксперименте

В приповерхностном слое, течения направлены в восточном направлении, вертикальная проекция скорости течения пренебрежимо мала по сравнению с трансверсальной. С ростом глубины вектор скорости поворачивается против часовой стрелки и в придонном слое направлен против направления течений на поверхности.

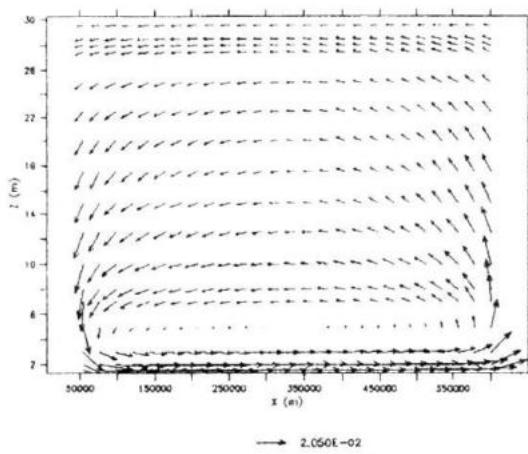
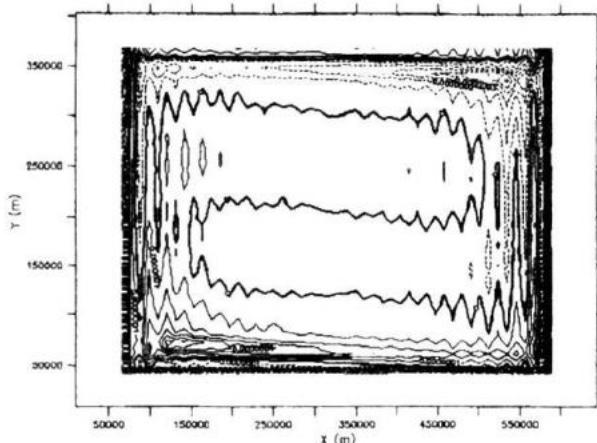


Рисунок 5 – Поле скорости (м/с) на профиле $L_y = 150$ км в установившемся режиме для первого эксперимента

В таблице 1 представлены результаты анализа шести численных экспериментов для различных значений параметра β в трех бассейнах различной протяженности в меридиональном направлении. Приведены максимумы скоростей течения и амплитуды возвышения свободной поверхности ($\Delta\eta = \max_{(x,y)} \eta - \min_{(x,y)} \eta$) поверхности.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что отклонения по амплитуде возвышения свободной поверхности, вычисленные



при $\beta = 1.06 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ и при $\beta = 0$ отличаются не более чем на 0.1 см, при этом отклонения значений скоростей течений на всех рассматриваемых горизонтах не превосходят 3 мм/с.

Таблица 1 – Время установления стационарного режима, максимальные скорости и максимальные вариации поля уровня свободной поверхности для различных значений L_y и β

L_y , км	Время	V_{max} , см/с		$\Delta\eta_{max}$, см	
		$\beta \neq 0$	$\beta = 0$	$\beta \neq 0$	$\beta = 0$
345	301	4.381	4.383	21.72	21.72
690	338	5.06	5.218	42.31	42.38
1035	424	5.255	5.247	58.31	58.36

Отметим, что с увеличением линейных размеров в меридиональном направлении, происходит рост возвышения свободной поверхности в 2.7 раза, а максимальные значения скоростей течения растут в 1.2 раза.

Л и т е р а т у р а

1. Ле Блон П., Майнсек Л. Волны в океане, т. 1. Москва. «Мир». 1986.
2. Mellor G.L. and Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 20:851–875, 1982.
3. Daniel R. Lynch, et all. Convergence Studies of Tidally-Rectified Circulation on Georges Bank. Quantitative skill assessment for coastal ocean models, coastal and estuarine studies, vol. 47, 1995. P. 153 – 174.