

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕЙ В ПРОТОЧНОМ БАССЕЙНЕ

Дымова О.А.

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь,

E-mail: olgadym@yahoo.com

Важным аспектом в понимании физических механизмов формирования и эволюции вихрей является изучение уравнения вихря. Хотя реальные океанические вихри имеют бароклинную структуру, в большинстве моделей в качестве первого приближения рассматривается баротропный случай. Так в [1] показано, что относительная завихренность, рассчитанная при помощи бездивергентной баротропной модели, хорошо согласуется с результатами лабораторных экспериментов для бассейна с наклонным дном. Важную роль в динамических процессах морских бассейнов играют потоки, поступающие через проливы. Множество работ посвящено проблематике обменных процессов в бассейнах соединенных узкими проливами, например [2]. В [3] рассматривается задача о возникновении приливно-индуцированных потоков в модельном бассейне с узким проливом и открытой боковой границей.

В представленной работе изучаются некоторые причины возникновения вихрей в бассейне с двумя проливами на основе исследования баланса слагаемых в уравнении абсолютного вихря скорости. Численные эксперименты проводятся для проточных бассейнов постоянной и переменной глубины при одинаковых начальных и граничных условиях.

Рассмотрим прямоугольный бассейн с размерами $a \times b$ с двумя симметричными проливами одинаковой ширины. Глубина бассейна либо постоянна, либо изменяется по закону:

$$h(x, y) = h_1 + h_0 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b}. \quad (1)$$

Здесь h_1 – глубина проливов, $(h_0 + h_1)$ – максимальная глубина бассейна.

Уравнения, описывающие движение жидкости с учетом горизонтальной турбулентной вязкости и силы Кориолиса, и уравнение неразрывности имеют вид [4]:

$$\frac{du}{dt} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dt} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где t – время, u и v – составляющие скорости по осям x и y соответственно, f – параметр Кориолиса, ζ – возвышение свободной поверхности, g – ускорение силы тяжести, A_L – горизонтальный коэффициент турбулентной вязкости. В уравнениях движения (2)–(3) используется полная производная по времени. На твердой части границы должно выполняться условие непротекания для нормальной составляющей и скольжения – для касательной скорости. В проливах распределение скорости $u(x, y, t)$ имеет вид:

$$u(0, y, t) = u(a, y, t) = u_0 \cos^2 \left(\frac{\pi(y-b)}{2l} \right) \sin \sigma t$$

где u_0 – максимальное значение скорости в проливе, b – y -координата центра пролива, $2l$ – ширина пролива, σ – частота. Считаем, что в начальный момент времени возмущения отсутствуют:

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = \zeta(x, y, 0) = 0.$$

Дифференциальная система уравнений (2)–(4) аппроксимируется полунейвной конечно-разностной схемой второго порядка точности по времени и пространству на сетке S , т.е. значение уровня рассчитывается в центре ячейки, а скорости на ее боковых границах. При аппроксимации по времени использовалась известная схема "чехарда". Область интегрирования разбивалась на ячейки с горизонтальными размерами $\Delta x = 2$ км, $\Delta y = 1$ км. При задании скорости в проливах рассматривались колебания с периодами 12 и 24 ч, величина A_L принималась равной $0,1 \text{ м}^2/\text{с}$, параметр Кориолиса соответствовал значению на 470 с.ш. Были выбраны следующие параметры бассейна: $a = 200$ км, $b = 100$ км, максимальная глубина бассейна ($h_1 + h_0$) = 200 м. Высота стенки (минимальная глубина в бассейне) принималась равной глубине пролива и равнялась 20 м, максимальная скорость в проливе $u_0 = 0,5 \text{ м/с}$, ширина каждого пролива $2l = 3$ км. В первом эксперименте рассматривался бассейн с плоским дном, во втором глубина бассейна изменялась по закону (1), но в обоих случаях максимальная глубина была одинаковой. Схема расчета полей скорости и уровня подробно описана в работе [5].

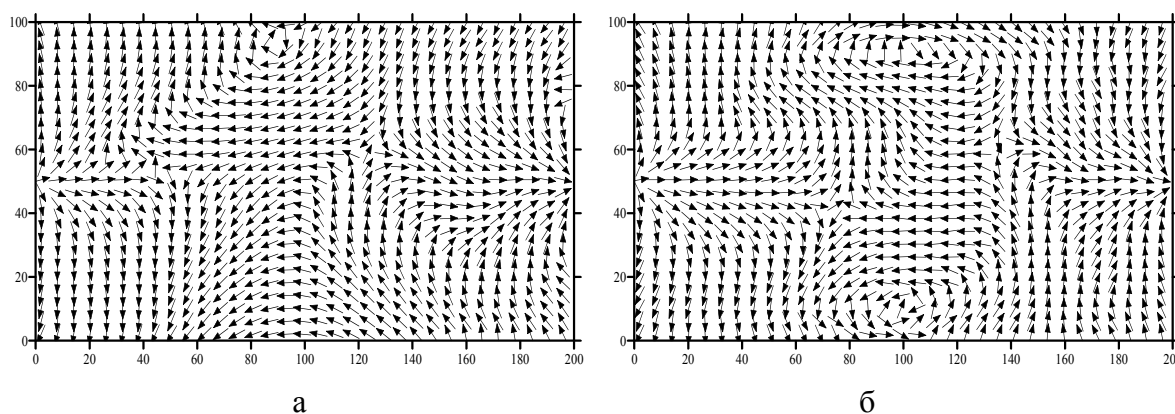


Рис. 1. Поле скорости для бассейнов постоянной (а) и переменной (б) глубины.

На рис. 1 показаны поля скоростей в бассейне постоянной (а) и переменной (б) глубины при $t=146$ ч. Момент времени был выбран так, чтобы вихревая структура носила наиболее интенсивных характер. В период смены знака скорости в проливе течение в бассейне меняет направление и при постоянной глубине формируются области завихренности, а если дно неровное, то у стенок образуются мезомасштабные вихри. Время их существования около 1 часа, орбитальные скорости порядка 10 см/с , средняя скорость равна 18 см/с .

При выполнении численного эксперимента также рассматривался баланс всех слагаемых в уравнении для абсолютного вихря скорости:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial(\xi u)}{\partial x} - \frac{\partial(\xi v)}{\partial y} + A_L \left(\frac{\partial(\Delta v)}{\partial x} - \frac{\partial(\Delta u)}{\partial y} \right) \quad (5)$$

где $\xi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} + f$. По результатам были получены интегральные (средние по поверхности) и пространственные распределения всех слагаемых в (5). Рассмотрим интегральные характеристики в бассейне постоянной глубины (рис. 2). Из рисунка видно, что при

постоянной глубине интегральное значение адвективного слагаемого гораздо меньше вязкостного и относительная завихренность определяется только вязкостью. Когда слагаемое в левой части принимает положительное значение, в бассейне формируются области завихренности (рис. 1а).

На рис. 3 показаны интегральные распределения слагаемых для бассейна переменной глубины. Здесь адвективное и вязкостное слагаемые имеют один порядок величины. Когда они возрастают и завихренность принимает положительное значение, в бассейне начинают образовываться вихри. Далее адвективное слагаемое уменьшается, завихренность принимает отрицательное значение, и вихри исчезают. Когда адвекция минимальна, в бассейне формируется струйное течение.

Сравнивая баланс слагаемых в уравнении вихря для бассейнов постоянной и переменной глубины, можно заключить, что основную роль при образовании вихрей играют адвективные слагаемые. Если глубина бассейна постоянна, то интегральное значение вязкостного слагаемого на несколько порядков превышает адвективное и вихри не образуются. Когда бассейн имеет переменную глубину, адвекция и вязкость соизмеримы и их комбинация определяет структуру течения. Также следует отметить, что при переменной глубине исследуемые величины возрастают, т.е. движение в бассейне носит более интенсивный характер.

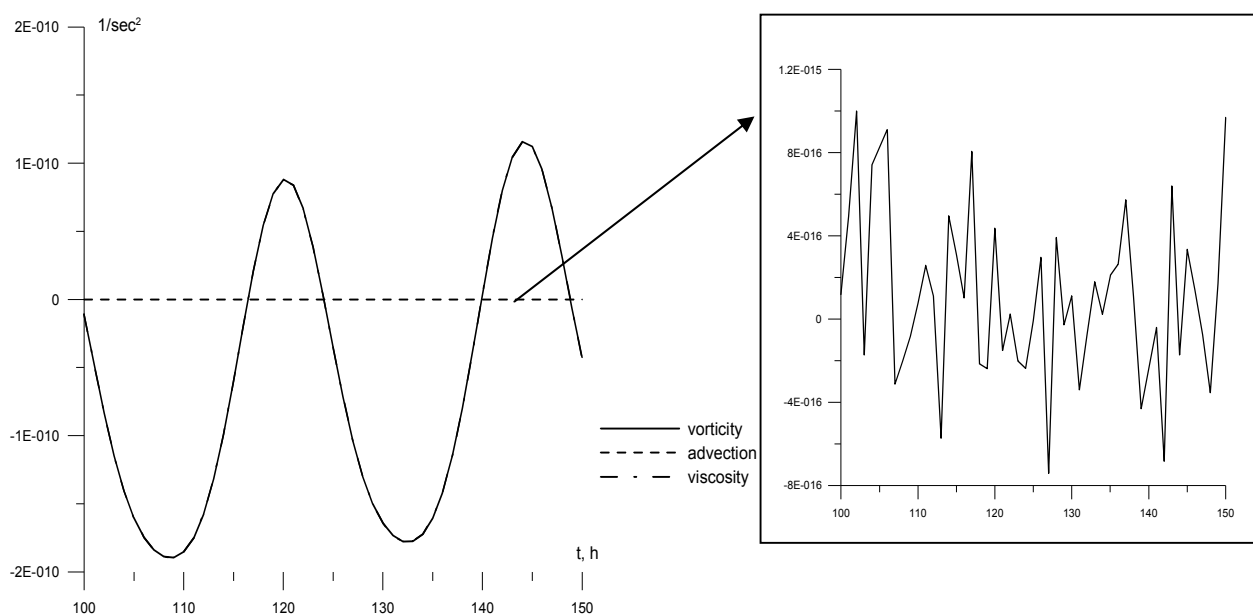


Рис. 2 Интегральные распределения слагаемых уравнения абсолютного вихря в бассейне постоянной глубины.

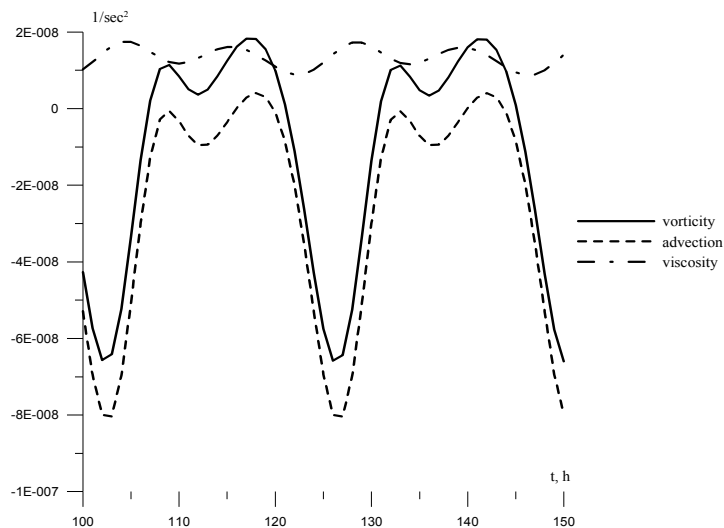


Рис. 3. Интегральные распределения слагаемых уравнения абсолютного вихря в бассейне переменной глубины.

Литература

1. L. Zavala Sanson, G.-J. F. van Heijst Interaction of Barotropic Vortices with Coastal Topography: Laboratory Experiments and Numerical Simulations // *Journal of Physical Oceanography*. – 2000. – vol. 30, p. 2141 – 2162.
2. C. Rocha, A. J. Clarke Interaction of ocean tides through a narrow single and narrow multiple strait // *Journal of Physical Oceanography*. – 1987. – vol. 17, p. 2203 – 2218.
3. T.A. Awaji, N. Imasato, H. Kunishi Tidal exchange through a strait: a numerical experiment using a simple model basin // *Journal of Physical Oceanography*. – 1980. – vol. 10, p. 1499 – 1508.
4. Черкесов Л.В., Иванов В.А., Хартиев С.М. Введение в гидродинамику и теорию волн. – С-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. – 264 с.
5. Демьшев С.Г., Дымова О.А., Черкесов Л.В. Численное моделирование течений в бассейне переменной глубины с двумя проливами // *Морской гидрофизический журнал*. – 2007. – №4. – С. 3 – 12.