

УДК 551.466.3

**Ю.С. Тучковенко**, д.г.н., **О.И Сахненко**, асп.  
Одесский государственный экологический университет

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕЛКОВОДНОЙ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ Г. ОДЕССЫ**

С помощью комплекса моделей ветро-волновой циркуляции и трансформации ветрового волнения на мелководье произведен расчет циркуляции вод в прибрежной зоне г.Одесса.

Среди экологических проблем Черного моря одной из наиболее актуальных является повышенное содержание загрязняющих веществ в прибрежных водах, в частности, у побережья г. Одессы. Причиной данной ситуации является ограниченный водообмен «ковшей» пляжей с прилегающей частью моря, что обусловлено наличием сплошной стенки волнолома. В предыдущей работе [1] были предложены различные варианты реконструкции существующих волноломов и произведена оценка трансформации ветрового волнения в прибрежной зоне моря при различных ветровых условиях и заданной батиметрии района. Модельные расчеты с использованием численной волновой модели третьего поколения SWAN [2] показали, что реконструкция волнолома путем создания в нем 10-метровых отверстий не приведет к существенным изменениям поля ветрового волнения и процессов диссипации волновой энергии в зоне прибрежного мелководья, а значит, практически не повлияет на транспорт донного материала. В то же время, водообмен акватории пляжа с прилегающей частью моря, очевидно, будет осуществляться более интенсивно.

Инженерное обоснование этого решения включает три подзадачи:

- расчет трансформации параметров ветровых волн в прибрежной зоне моря с учетом влияния на их динамику инженерных сооружений;
- расчет ветро-волновых течений в прибрежной зоне моря с учетом конфигурации инженерных сооружений для оценки водообновления в «ковшах»;
- расчет влияния течений и ветровых волн на литодинамические процессы в прибрежной зоне моря.

Цель предлагаемой работы заключается в изложении результатов решения второй из указанных выше подзадач – расчета ветро-волновой динамики вод в пределах прибрежного мелководья и береговой отмели одного из одесских пляжей.

Для полноты описания гидродинамических процессов, обуславливающих водообмен в прибрежной зоне моря, ограниченной волноломом, совместно использованы две численные модели: эволюции

параметров ветрового волнения [2] и ветро-волновой динамики вод на мелководье.

**Описание модели ветро-волновой циркуляции вод.** Ветро-волновая циркуляция вод в прибрежной зоне моря может быть описана с помощью осредненных по глубине и периоду ветровых волн уравнений Рейнольдса [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) - \\ - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wx} - \tau_{0x}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - f_0 V = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) - \\ - \frac{1}{\rho h} (\tau_{wy} - \tau_{0y}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + f_0 U = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(Uh)}{\partial x} + \frac{\partial(Vh)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где оси  $x$  и  $y$  направлены соответственно во вдольбереговом и поперечном направлениях;  $t$  - время;  $U$  и  $V$  – осредненные по глубине компоненты скорости течений по осям  $x$  и  $y$ , соответственно;  $\xi$  - возмущение уровня свободной водной поверхности;  $h = h_0 + \xi$  - локальная глубина;  $h_0$  - расстояние от дна до некоторой поверхности отсчета, характеризующей невозмущенный уровень водоема;  $\rho$  - средняя плотность воды;  $f_0$  - параметр Кориолиса;  $g$  - ускорение свободного падения;  $\tau_{wx}$  и  $\tau_{wy}$  - компоненты тангенциальных напряжений ветра на свободной поверхности.

Турбулентные напряжения потока  $\tau_{xy}$  представляются в виде:

$$\tau_{xy} = \rho \left( \varepsilon_x \frac{\partial V}{\partial x} - \varepsilon_y \frac{\partial U}{\partial y} \right), \quad (4)$$

где  $\varepsilon_x = const$  - коэффициент турбулентного обмена во вдольбереговом направлении;  $\varepsilon_y$  - коэффициент турбулентного обмена в поперечном направлении, значение которого принимается, как в [3]:

$$\varepsilon_y = \frac{h_b^2 g T}{4\pi^2 h} \sin^2 \alpha. \quad (5)$$

Здесь  $h_b$ ,  $T$ ,  $\alpha$  - высота, период и угол подхода ветровых волн соответственно.

$S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  - компоненты волновых радиационных напряжений, определяемые следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \cos^2 \alpha + n - 1/2), \\ S_{xy} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin \alpha \cos \alpha), \\ S_{yy} &= \frac{1}{8} \rho g h_b^2 (n \sin^2 \alpha + n - 1/2), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $n = \frac{1}{2} + \frac{K h_0}{sh 2K h_0}$ ,  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  - длина ветровых волн.

Компоненты тангенциальных напряжений потока у дна  $\tau_{0x}$  и  $\tau_{0y}$  представлены в соответствии с [5]:

$$\begin{aligned} \tau_{0x} &= \rho k_1 U \left[ (U + u_0 \sin \alpha)^2 + (V + u_0 \cos \alpha)^2 \right]^{1/2}, \\ \tau_{0y} &= \rho k_1 V \left[ (U + u_0 \sin \alpha)^2 + (V + u_0 \cos \alpha)^2 \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$k_1 = \frac{g}{c^2} \left[ 1 + \left( \frac{f C^2}{2g} \right)^{1/2} \right], \quad (8)$$

$$\frac{C}{\sqrt{g}} = 2.5 N \ln \left[ 1 + \frac{4h}{d_{cp}} \right], \quad (9)$$

где  $f = 2u_{*m}^2 / u_m^2$ ,  $u_m = \pi h_b / (T sh Kh)$ ,  $u_0 = (2/\pi) u_m$ ,  $d_{cp}$  - средний диаметр донных наносов;  $u_{*m}^2$  - амплитуда придонных тангенциальных напряжений в волновом потоке, значение которой определяется в соответствии с [6];  $N$  - параметр задачи, определяемый в процессе калибровки модели.

На жидких границах задавались скорости вдольбереговых течений, рассчитанные на крупномасштабной сетке и удовлетворяющие полю тангенциальных напряжений ветра. На твердой границе принималось условие  $U = V = 0$ .

Численные методы решения исходных уравнений приводятся в [7].

В связи со значительным вкладом ветрового волнения в динамику вод прибрежного мелководья, в качестве входной информации в гидродинамическую модель были использованы параметры волнения, рассчитанные по спектральной модели трансформации ветровых волн

SWAN [1]. Кроме учета наиболее важных процессов, связанных с генерацией, распространением и диссипацией ветровых волн в прибрежной зоне моря, в этой модели учтены такие дополнительные факторы и процессы, как спектральный состав, отражение ветровых волн, волновой нагон, а также влияние на распространение волн препятствия подсеточного масштаба в виде подводного волнолома. Пространственные поля высоты, длины, периода ветровых волн и направления их подхода к берегу, наряду с глубинами в узлах расчетной сетки, являлись главной входной информацией для расчета прибрежной циркуляции вод на акватории рассматриваемого пляжа.

Расчеты пространственных полей ветро-волновых течений осуществлялись на прямоугольной сетке с пространственными шагами  $\Delta x = \Delta y = 15 \text{ м}$ . Шаг по времени принимался 0.1 с. Расчеты проводились до установления поля течений при восточном ветре силой 14 м/с и подходе ветровых волн по нормали к берегу. Рассматривались случаи наличия и отсутствия волнолома. Время установления циркуляции вод определялось путем вычисления на каждом временном шаге кинетической энергии поля течений. Поле течений считались установившимися, если его кинетическая энергия перестает существенно изменяться с течением времени.

**Результаты расчетов.** На рис.1-3 приведены расчетные поля ветро-волновых течений, сформированных под действием ветра восточного направления силой 10-14 м/с и ветрового волнения со средней высотой 1.1 м, периодом 4.7 с на глубокой воде. Характерной особенностью динамики вод в исследуемом районе является наличие циркуляционных ячеек (рис.1,2). Совокупность этих круговоротов образует систему разрывных течений. При наличии волнолома интенсивное обрушение ветрового волнения приводит к повышению скоростей ветро-волновых течений на линии его расположения до 0.8 - 1.0 м/с (рис.2).

В то же время, на участке между волноломом и узкой прибойной полосой наблюдаются ветро-волновые течения меньшей скорости, чем в случае отсутствия волнолома. Другая зона с повышенными значениями скоростей течений приурочена к узкой мелководной прибрежной полосе, где формируется мощный вдольбереговой поток водных масс со скоростями 0,5 - 0,7 м/с (рис.1,2). Без учета ветрового волнения течения в прибрежной зоне имеют более однородный характер. В зоне, расположенной мористее существующего волнолома, в соответствии с граничными условиями, вдольбереговой поток направлен на юг со средней скоростью 0,15 м/с, на остальной части акватории интенсивность циркуляции вод мала, ветровые течения не превышают 0,1 м/с (рис.3).

По предварительным оценкам для указанных ветровых условий, при полном отсутствии подводной стенки волнолома скорость обновления вод «ковша» пляжа в 3-4 раза больше, чем при его наличии.

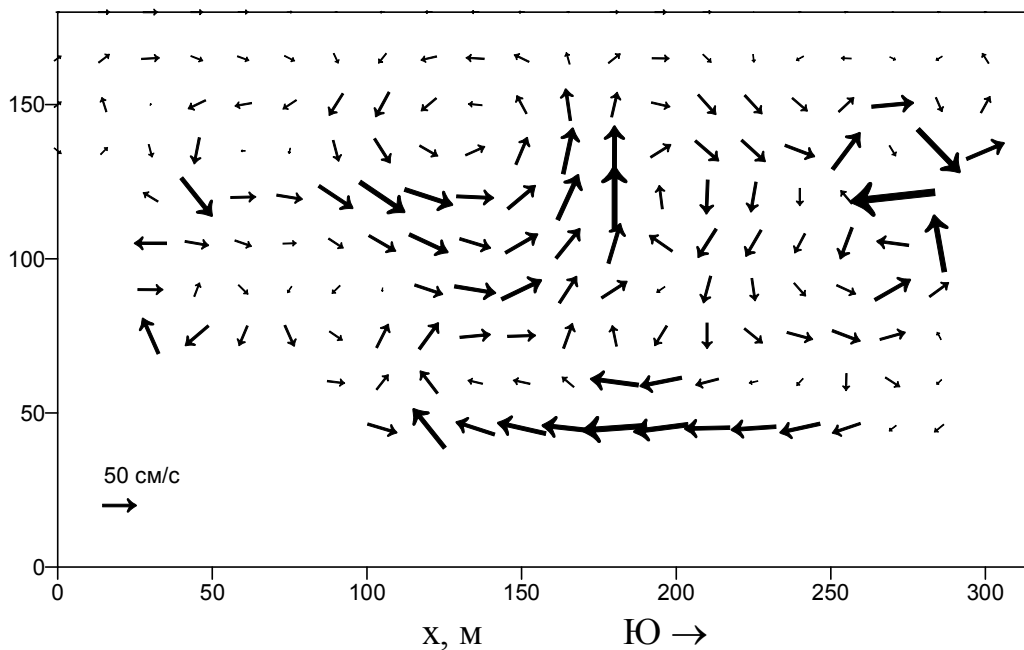


Рис.1 - Расчетное поле течений, сформированное под действием восточного ветра силой 14 м/с и ветрового волнения при отсутствии волнолома.

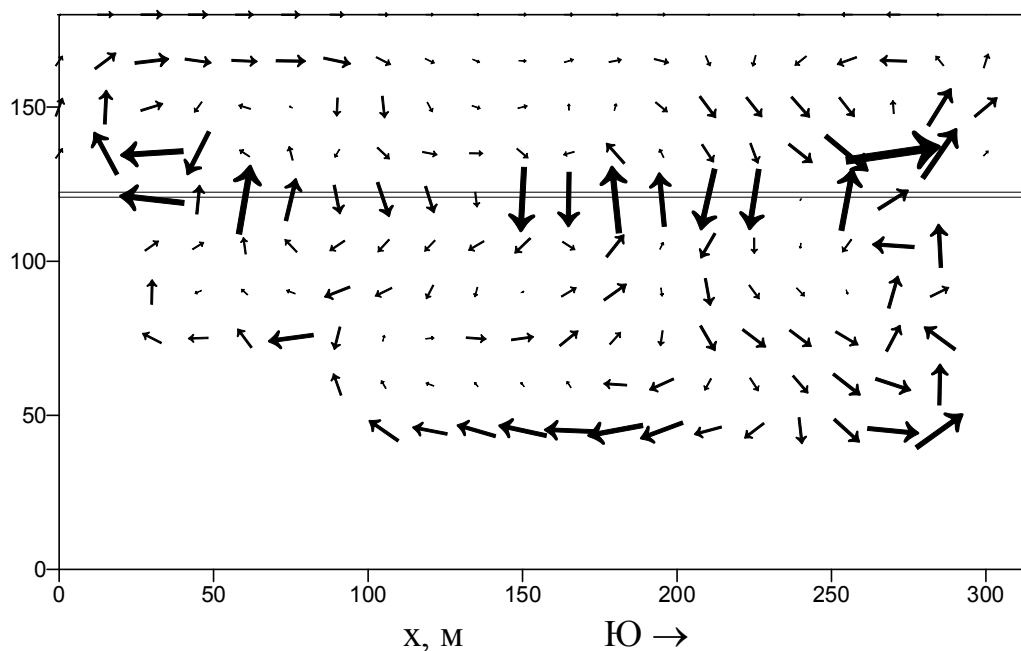


Рис.2 - Расчетное поле течений, сформированное под действием восточного ветра силой 14 м/с и ветрового волнения при наличии волнолома.

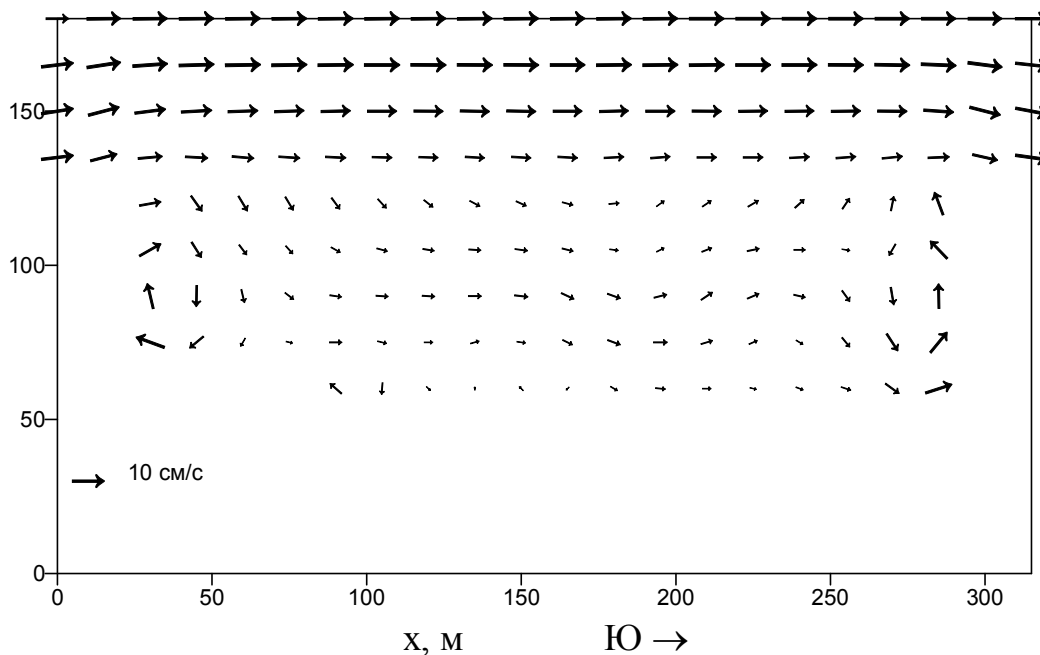


Рис. 3 - Расчетное поле течений, сформированное под действием восточного ветра силой 14 м/с без учета ветрового волнения.

**Выводы.** Анализ приведенных расчетных полей течений показал, что в наиболее динамически активной части прибрежной зоны доминирующий вклад в динамику вод оказывает ветровое волнение.

Использование вышеописанного комплекса математических моделей дает возможность воспроизводить общую картину ветро-волновой динамики вод в зоне прибрежного мелководья с учетом процессов интенсивного обрушения волн на таких гидротехнических конструкциях как подводный волнолом. Согласно модельным расчетам, максимальные скорости на акватории прибрежной зоны типового одесского пляжа имеют разрывные течения, сосредоточенные на линии волнолома. Интенсивное обрушение ветровых волн приводит также к формированию мощного вдольберегового переноса вод в узкой прибойной зоне. При отсутствии волнолома возможно формирование ярко выраженных циркуляционных ячеек с интенсификацией динамических и водообменных процессов на акватории пляжа.

### Список литературы

1. Тучковенко Ю. С., Сахненко О. И. Моделирование трансформации ветровых волн в прибрежной зоне моря при различных вариантах реконструкции волнолома // *Український гідрометеорологічний журнал. – Одеса: ТЕС, ОДЕКУ. – 2007. - №2. – С. 175 - 185.*
2. *SWAN. User manual / Delft University of Technology. Department of Civil Engineering. – Cycle IV, Version 40.31, 2004. – 110 p.*

3. *Блатов А.С., Иванов В.А.* Гидрология и гидродинамика шельфовой зоны Черного моря.- Киев: Наукова Думка, Морской гидрофизический ин-т НАН Украины, 1992.- 242 с.
4. *Krishna Kumar, C S Murty* Wave-induced nearshore circulation along the Calangute-Candolim beach, Goa, west coast of India.- Proc. Indian Acad. Sci., Vol.98, No. 3, 1989, pp. 265-278.
5. *Михинов А.Е.* Транспортирующая и эрозионно-аккумулятивная способность волновых потоков в береговой зоне открытых водоемов//Управление вод. ресурсами суши: теория и практика.– М.: Наука, 1989. – С. 136– 145.
6. *Михинов А.Е.* Транспорт донных наносов в волновых потоках// Моделир. гидрофиз. процессов и полей в замкн. водоемах и морях. – М:Наука, 1989. – С. 139-149.
7. *Лонин С.А., Тучковенко Ю.С.* Имитация сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 1999.–С. 58-66.

#### SUMMARY

**Y.S. Tuchkovenko, O.I. Sakhnenko**

#### **MODELING OF THE HYDRODYNAMICAL PROCESSES ON THE BEACH ZONE OF ODESSA CITY**

Using the complex of the wave-wind circulation model and the wave transformation numerical model the nearshore circulation on the beach zone of Odessa city was calculated.