

УДК 519.6:532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ТРАНСПОРТА ДОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ НАЛИЧИЯ ПРИБРЕЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРИБРЕЖНЫХ АКВАТОРИЯХ

¹Чистяков А.Е., ²Проценко Е.А., ³Тимофеева Е.Ф., ⁴Николич Н.А.

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, e-mail: cheese_05@mail.ru;

²Таганрогский институт имени А.П. Чехова Ростовского государственного экономического университета (РИНХ), Таганрог, e-mail: eapros@rambler.ru;

³Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь;

⁴Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, e-mail: fomenko.nata.alex@gmail.com

Необходимость численного моделирования механизмов формирования поля взвеси и потока наносов определяет актуальность исследуемой проблемы. В условиях современной действительности процесс освоения мелководных береговых зон с конструктивным преобразованием и изменением прибрежных рельефов приобретает все большее значение. Оценка гидродинамического воздействия на объекты прибрежной инфраструктуры, расположенные в прибрежных акваториях, является важнейшей задачей в настоящее время. Для определения динамики явлений, возникающих в прибрежных акваториях, и прогнозирования возможного вмешательства в экосистему актуализируется необходимость построения математических моделей процессов переноса вещества в прибрежных акваториях с учетом наличия прибрежных конструкций. В соответствии с поставленной целью необходимо провести анализ существующих моделей транспорта наносов в водных экосистемах и разработать комплекс взаимосвязанных моделей трехмерных волновых процессов и транспорта наносов, предназначенный для моделирования гидродинамических волновых процессов при наличии различных береговых сооружений.

Ключевые слова: транспорт наносов, волны, мелкая вода, затопление, надводные сооружения, силовое воздействие

MATHEMATICAL MODELING OF WAVE PROCESSES AND TRANSPORT OF BOTTOM MATERIALS TAKING INTO ACCOUNT COASTAL STRUCTURES IN COASTAL WATER AREAS

¹Chistyakov A.E., ²Protsenko E.A., ³Timofeeva E.F., ⁴Nikolich N.A.

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, e-mail: cheese_05@mail.ru;

²Taganrog Institute named after A.P. Chekhov, Rostov State Economic University, Taganrog, e-mail: eapros@rambler.ru;

³North-Caucasian Federal University, Stavropol;

⁴Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin, Moscow, e-mail: fomenko.nata.alex@gmail.com

The necessity of numerical modeling of the mechanisms of formation of the field of suspension and sediment flow determines the urgency of the problem under study. Under modern conditions, the process of developing shallow coastal zones, with constructive transformation and changes in coastal reliefs, is becoming increasingly important. Assessment of the hydrodynamic impact on coastal infrastructure facilities located in the coastal waters is an important task at present. To determine the dynamics of the phenomena occurring in the coastal water areas and to predict possible interference in the ecosystem, the need to build mathematical models of the transport processes of matter in the coastal waters taking into account the presence of coastal structures is actualized. In accordance with the goal, it is necessary to analyze existing models of sediment transport in aquatic ecosystems and develop a set of interrelated models of three-dimensional wave processes and sediment transport designed to simulate hydrodynamic wave processes in the presence of various shore structures.

Keywords: sediment transport, waves, shallow water, flooding, surface structures, and power action

Последние десятилетия характеризуются интенсивным использованием прибрежных районов морей и океанов в экономической и хозяйственной сферах деятельности страны. Изучение гидродинамических процессов прибрежных акваторий связано с исследованием влияния волновых процессов, генерируемых в открытом море или в самой прибрежной зоне водоема. Движение волн может привести к негативным резуль-

татам, оказывающим влияние на эксплуатацию как самой прибрежной зоны, так и непосредственно объектов прибрежной инфраструктуры: к трансформации донной поверхности, происходящей вследствие подъема донных отложений, к абразии, то есть процессу разрушения волнами и прибоем берегов различных водных систем.

Проблемы защиты объектов прибрежной инфраструктуры являются чрезвычай-

чайно важными в условиях современной действительности. Результатом взаимодействия волн с донной поверхностью, береговым склоном и объектами прибрежной инфраструктуры является рефракция, дифракция и изменения структуры волн. Возведение берегозащитных сооружений, волнорезов и волновых молов в настоящее время является дорогим и сложно реализуемым техническим процессом. Ключевым требованием к проектированию берегозащитных сооружений становится исследование и анализ природных условий и факторов, в которых они будут эксплуатироваться. При этом наиболее существенными факторами являются колебания уровня поверхности воды, ветровые явления, течения, транспорт донных материалов и непосредственно деформация берегового склона.

Изучение разнообразных этапов эволюции волн, в том числе их непосредственного выхода на берег, порождает необходимость разработки комплекса взаимосвязанных математических моделей, способных достаточно точно описать данные гидродинамические процессы. Активное развитие в области математического моделирования волновых процессов и их численной реализации направлено на точное предсказание приливов, определение адекватного тренда штормовых нагонов [1].

Характерной особенностью прибрежных акваторий является значительное влияние донной поверхности на волновые процессы, что затрудняет исследование приливных явлений в прибрежных районах морей и устьях рек. Влияние волновых процессов на прибрежную зону может иметь амбивалентный характер: волновые процессы могут оказывать существенное влияние на аккумуляцию и абразию береговой зоны водоема и непосредственно на прибрежные конструкции [2].

Для моделирования гидродинамических процессов актуализируется проблема практического применения вычислительно-эффективных методов, позволяющего получать довольно точное приближенное численное решение. Таким образом, в настоящее время актуализируется необходимость построения комплекса взаимосвязанных моделей трехмерных волновых процессов и транспорта наносов, предназначенного для моделирования волновых процессов при наличии объектов прибрежной инфраструктуры.

Целью нашего исследования является разработка комплекса взаимосвязанных моделей трехмерных волновых процессов и транспорта наносов, предназначенного

для моделирования волновых процессов с учетом объектов прибрежной инфраструктуры и оценка воздействия на объекты прибрежной инфраструктуры при наличии поверхностных гравитационных волн.

Поставленная цель требует реализации следующих задач: обосновать актуальность решаемой проблемы; выполнить обзор существующих подходов к проблеме; провести анализ существующих моделей транспорта наносов в водных экосистемах; проанализировать подходы к математическому моделированию данных процессов в водных экосистемах, провести классификацию описывающих их математических моделей; разработать модель транспорта донных материалов в прибрежных акваториях, предназначенную для определения динамики донной поверхности; разработать комплекс взаимосвязанных моделей трехмерных волновых процессов и транспорта веществ, предназначенного для моделирования гидродинамических волновых процессов при наличии объектов прибрежной инфраструктуры.

Математическая модель транспорта донного материала

Исходными уравнениями математической модели транспорта донных веществ являются уравнения, описывающие перестроение прибрежного рельефа [3]:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0,$$

$$\bar{Q} = \begin{cases} A\omega d |\bar{\psi}|^{\beta-1} \bar{\psi}, & |\tau| \geq \tau_{bc}, \\ 0, & |\tau| < \tau_{bc}; \end{cases}$$

$$\bar{\psi} = \frac{\bar{\tau}}{(\rho_1 - \rho_0)gd}, \quad (1)$$

где H – глубина дна, отсчитываемая от невозмущенной поверхности водоема; ε – пористость грунта; $\bar{Q} = \{Q_x, Q_y\}$ – расход наносов, $|\bar{Q}| = Q$; x, y – горизонтальные декартовы координаты; τ_b – касательное напряжение на дне; τ_{bc} – критическое значение касательного напряжения, при котором начинается перемещение наносов, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости, A и β – безразмерные постоянные (A равно 19,5, β равно 3), ω – частота волны, d – характеристика осадков.

Принимая во внимание ограничения на касательные напряжения на дне расчетной области, система уравнений (1) может быть представлена в виде [4]:

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial H}{\partial t} + \operatorname{div}(k \bar{\tau}_b) = \operatorname{div}\left(k \left(\frac{\tau_{bc}}{\sin \varphi_0}\right) \operatorname{grad} H\right), \quad (2)$$

$$k = \frac{A \omega d}{((\rho_1 - \rho_0)gd)^\beta} \left| \bar{\tau}_b - \frac{\tau_{bc}}{\sin \varphi_0} \operatorname{grad} H \right|^{\beta-1} \cdot h \left(\left| \bar{\tau}_b - \frac{\tau_{bc}}{\sin \varphi_0} \operatorname{grad} H \right| - \tau_{bc} \right), \quad (3)$$

где $h(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ – функция Хэвисайда.

Уравнение (2) дополняется начальным и граничным условиями:

$$H(x, y, 0) = H_0(x, y). \quad (4)$$

$$H'_0(x, y) = 0. \quad (5)$$

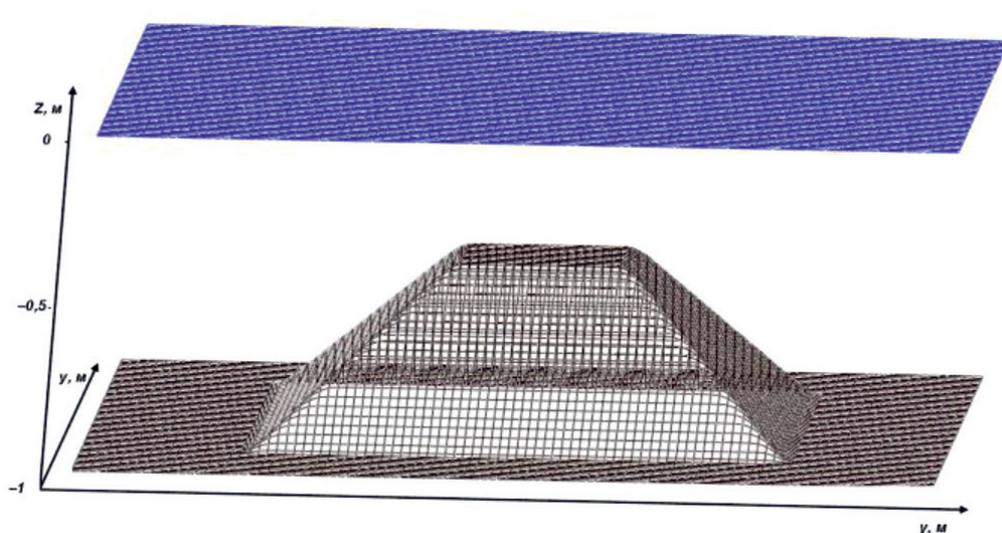


Рис. 1. Начальный рельеф дна

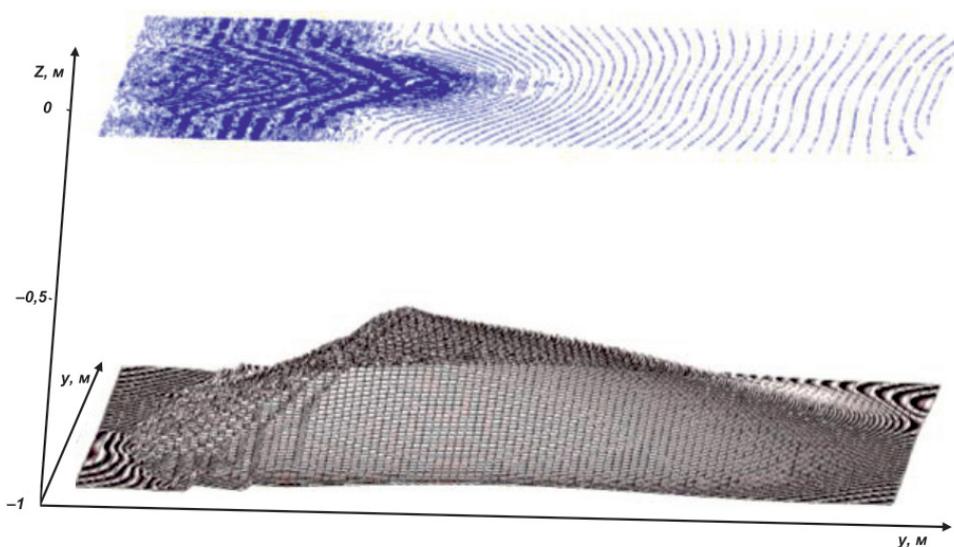


Рис. 2. Геометрия дна через 80 минут

Для расчета тангенциальных напряжений в модели транспорта наносов необходима информация о поле вектора скорости на дне водоема [5].

Рис. 1–2 иллюстрируют результаты численных экспериментов моделирования динамики донной поверхности. При этом размер расчетной сетки равен 200×200 , шаг по пространственным переменным 0,1 м, шаг по времени 0,01 с, скорость движения ветра 5 м/с и направлена слева направо.

Математическая модель волновой гидродинамики

Для математического описания задачи волновой динамики жидкости использована модель [6], представленная на рис. 3.

$$u'_t + uu'_x + vv'_y = -\frac{P'_x}{\rho} + (\mu u'_x)'_x + (\eta u'_y)'_y, \quad (6)$$

$$v'_t + uv'_x + vv'_y = -\frac{P'_y}{\rho} + (\mu v'_x)'_x + (\eta v'_y)'_y + g, \quad (7)$$

$$u'_x + v'_y = 0. \quad (8)$$

$$P'_n(x, y, t) = 0, \quad V_n(x, y, t) = 0,$$

$$\rho \eta u'_y(x, y, t) = -\tau_x(t), \quad \rho \mu v'_x(x, y, t) = -\tau_y(t), \quad (9)$$

$$w_n = \{t^n = n\tau, x_i = ih_x, y_j = jh_y; n = \overline{0 \dots N_t}, i = \overline{0 \dots N_x}, j = \overline{0 \dots N_y}; N_t \tau = T, N_x h_x = l_x, N_y h_y = l_y\},$$

где τ – шаг по времени, h_x, h_y – шаги по пространству, N_t – верхняя граница по времени, N_x, N_y – границы по пространству.

Рис. 4 иллюстрирует трансформацию профиля волны, набегающей на берег, с течением времени, программа отображает векторы поля скорости, градацией цвета показано поле давления.

$$u'_n(x, y, t) = 0, \quad v(x, y, t) = P'_t / g\rho,$$

$$P'_n(x, y, t) = 0, \quad (10)$$

$$u'_n(x, y, t) = 0, \quad v'_n(x, y, t) = 0,$$

$$P'_n(x, y, t) = \frac{\rho \Pi}{\tau L}, \quad (11)$$

где $V = (u, v)$ – вектор скорости движения водной среды; P – давление; μ, η – коэффициенты турбулентного обмена по горизонтальному и вертикальному направлениям соответственно; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; τ_x, τ_y – составляющие тангенциального напряжения на дне жидкости; Π – поток вектора скорости через боковую поверхность; L – расстояние от поверхности жидкости до дна (глубина жидкости с учетом возвышения уровня) на боковой границе. Система координат выбрана таким образом, что ось Ox совмещена с поверхностью невозмущенной жидкости и направлена в сторону берега, ось Oy – вертикально вниз.

Для численной реализации дискретной модели задачи волновой гидродинамики введена сетка:

Математическая модель волновых процессов, учитывающая наличие надводных береговых сооружений

Для разработки математической модели движения водной среды использована трехмерная гидростатическая модель, представленная на рис. 5.

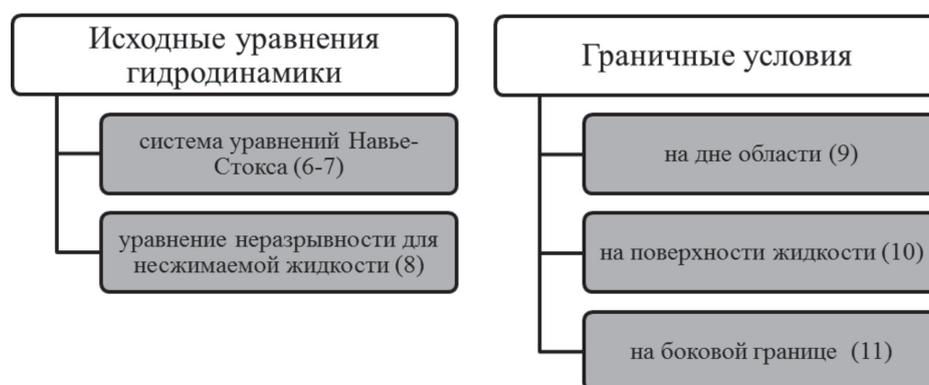


Рис. 3. Исходные уравнения математической модели волновой гидродинамики

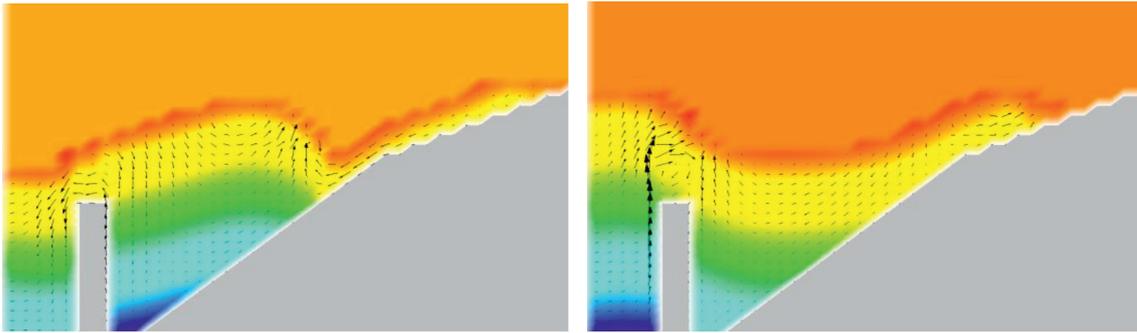


Рис. 4. Динамика профиля уровня возвышения жидкости при наличии прибрежной конструкции



Рис. 5. Исходные уравнения математической модели волновых процессов, учитывающей наличие надводных береговых сооружений

$$u'_t + uu'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_x + (\mu u'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (\eta u'_z)'_z,$$

$$v'_t + uv'_x + vv'_y + ww'_z = -\frac{1}{\rho} P'_y + (\mu v'_x)'_x + (\mu v'_y)'_y + (\eta v'_z)'_z, \tag{12}$$

$$u'_x + v'_y + w'_z = 0, \tag{13}$$

$$P = \rho g(z + \xi). \tag{14}$$

$$\rho_v \eta v'_n = \tau_{y,b}(t), V_n = 0, \rho \eta u'_n = -\tau_{x,p}(t), \tag{15}$$

$$\rho \eta u'_n = -\tau_{x,p}(t), \rho \eta v'_n = -\tau_{y,p}(t), w = -\xi'_t, \tag{16}$$

$$u'_n = 0, v'_n = 0, \xi'_t = 0, \tag{17}$$

где ξ – функция подъема уровня (функция возвышения), $V = \{u, v, w\}$ – вектор скорости движения водной среды, P – давление, μ, η – коэффициенты турбулентного обмена по горизонтальному и вертикальному на-

правлениям соответственно, g – ускорение свободного падения, ρ – плотность жидкости, τ_x, τ_y – тангенциальное напряжение на дне жидкости, оси Ox, Oy имеют горизонтальное направление.

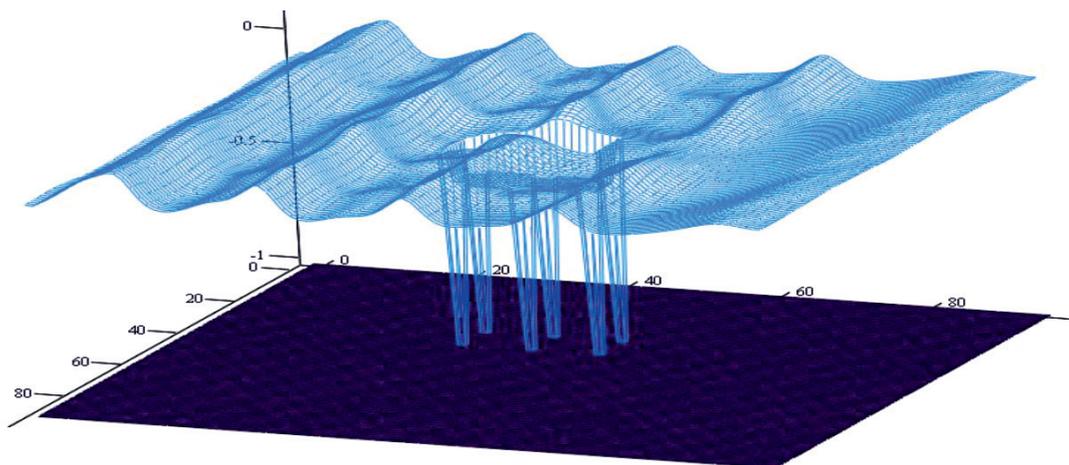


Рис. 6. Функция возвышения уровня при обтекании водной средой прибрежного объекта

Для расчета давления в гидростатическом приближении при наличии надводного объекта, установленного на дне водоема, используем уравнение

$$P = \rho g (z + \chi) + P_g = \rho g (z + \chi + P_g / \rho g).$$

Функция возвышения в этом случае примет вид

$$\xi = \chi + P_g / \rho g,$$

где χ – функция, описывающая геометрию дна.

Взаимосвязанный комплекс программ был использован для расчета гидродинамического воздействия волновых процессов на прибрежный объект. Размеры подводной части конструкции: 5 м×10 м×20 см. Объект установлен на шести опорах. Зона моделирования имеет размеры 50 м×50 м×1 м (рис. 6).

Результаты численных экспериментов, полученные с помощью применения взаимосвязанного комплекса программ по моделированию гидродинамических волновых процессов, позволяют провести оценку воздействия волновых процессов на прибрежные объекты.

Заключение

Оценка гидродинамического воздействия на берегозащитные сооружения и прибрежные конструкции, установленные на дне мелководного водоема, является важнейшей задачей в настоящее время, применение результатов исследований, представленных в статье, связано с планированием рационального природопользования.

Новизна научной идеи состоит в применении комплекса взаимосвязанных моделей волновых процессов и транспорта донных материалов в прибрежных акваториях с учетом наличия объектов прибрежной инфраструктуры, а также воздействия на объекты прибрежной инфраструктуры при наличии поверхностных волн. Разработанный комплекс взаимосвязанных моделей волновых процессов и транспорта донных материалов может быть использован при планировании целесообразного природопользования и прогнозировании динамики донной поверхности.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 17-11-01286).

Список литературы

1. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. – М.: ГЕОС, 2001. – 272 с.
2. Sukhinov A.I., Sukhinov A.A. Reconstruction of 2001 ecological disaster in the Azov Sea on the basis of precise hydrophysics models // *Parallel Computational Fluid Dynamics 2004: Multidisciplinary Applications*. – 2005. – С. 231–238.
3. Сухинов А.И. Прецизионные модели гидродинамики и опыт их применения в предсказании и реконструкции чрезвычайных ситуаций в Азовском море // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2006. – № 3 (58). – С. 228–235.
4. Sidoryakina V.V., Sukhinov A.I. Well-posedness analysis and numerical implementation of a linearized two-dimensional bottom sediment transport problem // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 2017. – Vol. 57, № 6. – P. 978–994.
5. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Protsenko E.A. Mathematical modeling of sediment transport in the coastal zone of shallow reservoirs // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 351–363.
6. Sukhinov A.I., Chistyakov A.E., Shishenya A.V., Timofeeva E.F. Mathematical model for calculating coastal wave processes // *Mathematical Models and Computer Simulations*. – 2013. – Т. 5, № 2. – С. 122–129.