Трехмерное негидростатическое моделирование воздействия струй судовых движителей на дно и берега

Бровченко И., Канарская Ю., Мадерич В., Терлецкая Е.

Представлена новая численная трехмерная негидростатическая гидродинамическая модель со свободной поверхностью, разработанная для моделирования устойчивости дна и берегов под действием струй судовых винтовых движителей. В отличие от известных моделей, она описывает трехмерные поля скорости, генерируемые судовыми движителями, интенсивность и интегральный масштаб турбулентности в заданной расчетной области с произвольным рельефом дна. Модель описывает как ближнюю, так и дальнюю область струи за винтом. Рассчитываются меняющиеся во времени и пространстве придонные напряжения трения и градиенты давления, вызывающие эрозию дна и повреждающие естественную среду обитания организмов на дне. Результаты расчетов сопоставлены с данными лабораторных экспериментов.

ВВЕДЕНИЕ

Струи от винтов судовых движителей при движении в узостях и на малых глубинах могут вызывать размыв донных отложений, влиять на устойчивость берегов и наносить ущерб естественной среде обитания донных организмов. Особенно существенное воздействие такие струи оказывают в морских и речных терминалах при маневрировании и подходе/отходе судов. В последние годы эта проблема исследовалась экспериментально и теоретически [см. напр. 2, 5, 6, 10, 11, 17], однако полученные в этих работах полуэмпирические зависимости не описывают влияние сложного рельефа дна.

В данной статье представлена численная трехмерная негидростатическая модель со свободной поверхностью, разработанная для оценки влияния винтовых струй на устойчивость дна и берегов. В отличие от известных моделей, она описывает трехмерные поля скорости, генерируемые судовыми движителями, интенсивность и интегральный масштаб турбулентности при произвольном рельефе дна и форме берегов. Разработанная модель основана на подходах, развитых в работах [1,8], использует трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса с трехмерным вариантом модели турбулентности [13]. Основными особенностями модели являются использование обобщенной вертикальной системы координат, криволинейной ортогональной горизонтальной системы координат, разложение и последовательный расчет скорости и давления на гидростатическую и динамическую составляющие. Результаты расчетов сопоставлены с данными лабораторного эксперимента [15].

II. МОДЕЛЬ

А. Уравнения модели

Исходные уравнения задачи, полученные из уравнений Навье-Стокса осреднением по Рейнольдсу имеют вид:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} - g_i, \quad (2)$$

где $x_i = (x, y, z)$ – декартовы координаты, ось z направлена вертикально вверх; $u_i = (u, v, w)$ – составляющие средних скоростей; p – давление; $g_i = (0, 0, g)$ – ускорение силы тяжести; ρ_0 – постоянная плотность воды в приближении Буссинеска. Напряжения Рейнольдса $\overline{u_i u_j}$ аппроксимируются в рамках приближения турбулентной вязкости:

$$\overline{u_i u_j} = -K_M\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{3}q^2\delta_{ij}, \quad (3)$$

где δ_{ij} - символ Кронекера. Коэффициент турбулентной вязкости K_M выражается через кинетическую энергию турбулентности $q^2/2$ и масштаб турбулентности l:

$$K_M = S_M q l, \quad (4)$$

где $q^2/2 = \overline{u_i u_i}$

$$S_M = \frac{A_1(B_1 - 6A_1 - B_1 C_1)}{A_2(B_1 - 6A_1)}, \quad (5)$$

A_1, A_2, B_1, C_1 - постоянные модели.

Для замыкания используется трехмерное обобщение $q^2 - q^2 l$ модели [13] для однородной жидкости:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + u_j \frac{\partial q^2}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[S_q q l \frac{\partial q^2}{\partial x_j}\right] + K_M P - 2\frac{q^3}{B_1 l} \quad (6)$$

$$\frac{\partial q^2 l}{\partial t} + u_j \frac{\partial q^2 l}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[S_l q l \frac{\partial q^2 l}{\partial x_j}\right] + 2E_1 l k_m P - \frac{q^3}{B_1}\left(1 + E_2\left[\frac{1}{\kappa L}\right]^2\right), \quad (7)$$

где $S_M, B_1, E_1, E_2, S_q, S_l$ - постоянные модели, κ – постоянная Кармана,

$$P=\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 \qquad (8)$$

порождение турбулентности за счет сдвига скорости. В отличие от одномерной модели [13], где учитывается только вертикальный сдвиг скорости, выражение для порождения (8) дополнено горизонтальным сдвигом скорости. Последний член в квадратных скобках уравнения (7) представляет собой пристеночную функцию, необходимую в q^2-q^2l модели, чтобы правильно описать течение у твердой границы. Согласно [13], расстояние от твердой границы L определено следующим образом:

$$L^{-1}=\frac{1}{2\pi}\iint\frac{dA(\vec{r}_0)}{\left|\vec{r}-\vec{r}_0\right|^3}, \qquad (9)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор для данной точки; $\vec{r}_0$ – положение твердой границы; $dA(\vec{r}_0)$ – элементарная площадка поверхности твердой границы. Когда горизонтальный масштаб расчетной области много больше глубины, можно использовать соотношение:

$$L^{-1}=z^{-1}+(H-z)^{-1} \qquad (10)$$

В модели турбулентности (6-8) в качестве расстояния L используется минимальное расстояние от точки до ближайшей границы расчетной области. Постоянные модели $A_1, A_2,\ B_1, C_1,\ E_1,\ E_2,\ S_q, S_l, \kappa$ согласно [13], составляют соответственно $0.92,\ 0.74, 16.6,\quad 0.08, 1.8, 1.32,\ 0.2,\ 0.2,\ 0.4$

Б. Граничные условия

Условия на поверхности воды $z=\eta(x,y,t)$ имеют вид

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}+u\frac{\partial\eta}{\partial x}+v\frac{\partial\eta}{\partial y}=w\ , \qquad (11)$$

$$K_M\frac{\partial\vec{V}_h}{\partial z}=\frac{\vec{\tau}_0}{\rho_0}\ , \qquad (12)$$

где $\vec{V}_h=(u,v),\ \vec{\tau}_0=\left(\tau_{0x},\tau_{0y}\right)$ – касательные напряжения ветра. У дна на ближайшем к нему расчетном уровне $z=H+z_b$

$$-u\frac{\partial H}{\partial x}-v\frac{\partial H}{\partial y}=w, \qquad (13)$$

$$K_M\frac{\partial\vec{V}_h}{\partial z}=\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0}, \qquad (14)$$

где $\vec{\tau}_b=\rho_0 C_D\left|\vec{V}_h\right|\vec{V}_h$,

$$C_D=\max\left(0.0005;\left(\frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z_b+z_0}{z_0}\right)\right)^{-2}\right),$$

z_b – высота первой расчетной точки в пограничном слое, z_0 - уровень шероховатости. Соответствующие граничные условия для уравнений у поверхности воды и у дна имеют вид:

$$\begin{aligned}&\left(q^2(\eta),q^2l(\eta)\right)=\left(B_1^{2/3}u_*^2(0),0\right),\\&\left(q^2(-H),q^2l(-H)\right)=\left(B_1^{2/3}u_*^2(-H),0\right),\end{aligned} \qquad (15)$$

где $u_*(0), u_*(-H)$ – динамические скорости,

$$u_*(0)=\frac{\left|\vec{\tau}_0\right|}{\rho_0}\ \text{ и }\ u_*^2(-H)=\frac{\left|\vec{\tau}_0^2\right|}{\rho_0}. \qquad (16)$$

На твердой стенке заданы условия непротекания и соотношения для пристенного логарифмического слоя, аналогично (13-15). На жидких границах, где задается струя от винтового движителя, нормальная скорость и потоки турбулентных характеристик равны нулю, кроме области, из которой вытекает струя. На открытых границах используются два вида условий. Одно из них представляет собой условие излучения (см. напр. обзор [14]). Кроме того, используются новые граничные условия, в которых применяется ньютоновская схема усвоения данных. Идея метода заключается во введении вдоль свободной границы относительно узкой релаксационной зоны, в которой уравнение для возвышения уровня, полученное интегрированием уравнения неразрывности по глубине, дополняется релаксационными слагаемыми:

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}+\frac{\partial\bar{u}(H+\eta)}{\partial x}+\frac{\partial\bar{v}(H+\eta)}{\partial y}=-\frac{\eta-\eta_B}{T}\alpha \qquad (17)$$

Здесь α – релаксационный параметр, $\alpha=1$ в релаксационной зоне, $\alpha=0$ вне ее, T – время релаксации, которое выбирается так, чтобы обеспечить полное поглощение уходящих из расчетной области возмущений. Преимущество данного метода над условиями излучения и метода релаксации FRS [9] состоит в том, что скорости естественным образом вычисляются из полных уравнений гидродинамики, исходя из усваиваемого в зоне релаксации, в общем случае переменного во времени и пространстве, уровня свободной поверхности.

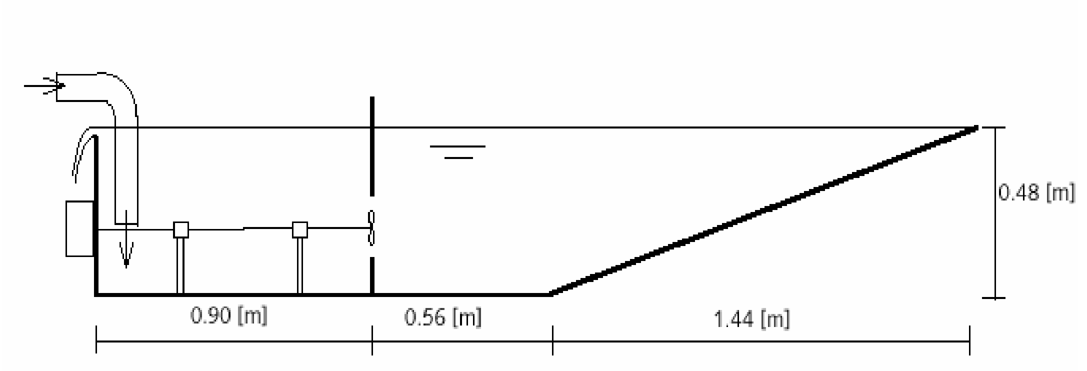

Рис. 1 Продольное сечение экспериментального лотка [15]

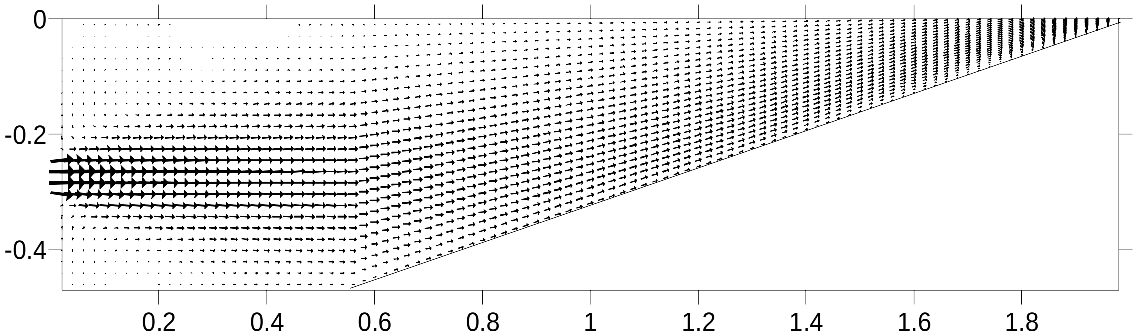

Рис. 2 Распределение скоростей в вертикальном сечении по оси струи

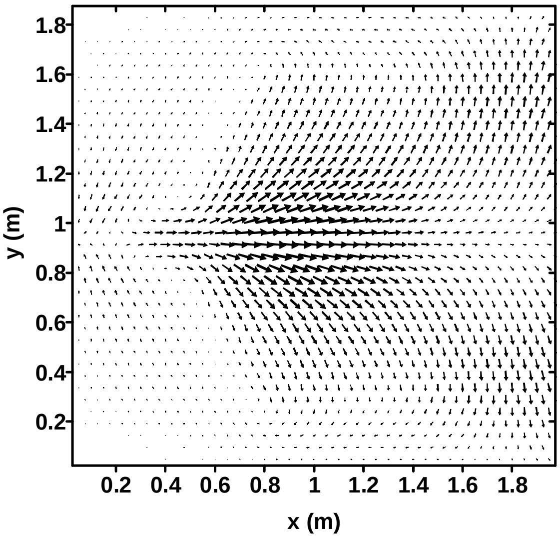

Рис. 3 Распределение скоростей у дна

B. Струя от винтового движителя

Для расчета поля скоростей, вызванных винтовым движителем, использовались соотношения, основанные на полуэмпирической модели [2], в которой реальный гребной винт заменялся эффективным движителем. В настоящей работе рассматривается начало движения судна, тогда согласно [2] скорость истечения струи U_0 рассчитывается по соотношению:

$$U_0 = \sqrt{\frac{8n^2 D^2}{\pi} K_T} \qquad (18)$$

где D – диаметр винта, n – частота оборотов винта, K_T – эмпирический коэффициент упора гребного винта. Если коэффициент упора винта невозможно определить, то может быть использовано эмпирическое соотношение [2]

$$U_0 = C_2 \left(\frac{P}{\rho_0 D_p^2} \right)^{1/3}, \qquad (19)$$

где P – мощность на гребном валу [Вт], C_2 - эмпирическая постоянная, равная 1.48 по данным экспериментов [2] и 1.32 по данным [11].

III. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Для решения системы уравнений использовалась горизонтальная криволинейная ортогональная система координат и, так называемая, σ-система координат [3], преобразующие расчетную область в параллелепипед. Решение задачи расщеплялось на две подзадачи: решение двумерной системы уравнений для уровня свободной поверхности и осредненных по глубине скоростей и решение трехмерной задачи для скоростей и давления [3]. В свою очередь, поле скоростей и давления в трехмерной задаче расщеплялось на гидростатические и негидростатические составляющие.

Численный алгоритм включает четыре этапа с расщеплением по времени на каждом из этапов. На первом этапе проводится расчет свободной поверхности из проинтегрированных по глубине уравнений движения при помощи явной численной схемы. Начальное двумерное поле скорости на каждом этапе определяется интегрированием по глубине найденного на предыдущем шаге трехмерного поля скорости. На втором этапе вычисляются гидростатические компоненты скорости и давления. На этом этапе решаются трехмерные уравнения гидродинамики. Используется явная схема по горизонтали и неявная по вертикали с относительно большим (внутренним) временным шагом. Таким образом, находится промежуточное поле скорости. На третьей стадии находится негидростатическая компонента скорости и давления. Промежуточное поле скорости, найденное на предыдущем этапе, дополняется негидростатической компонентой поля скорости за счет градиента негидростатического давления таким образом, чтобы удовлетворить уравнению неразрывности. В результате задача сводится к решению уравнения Пуассона для негидростатической компоненты давления. Дискретизированное уравнение представляет собой систему линейных уравнений, матрица которой является несимметричной пятнадцатидиагональной. Система решалась с помощью метода сопряженных градиентов. На четвертом этом этапе решаются уравнения для характеристик турбулентности. Для расчетов также использовалась численная схема явная по горизонтали и неявная по вертикали. Для вычисления адвективных слагаемых использовались разностные схемы второго порядка точности.

Предложенный алгоритм подробно описан в [1,8] и объединяет в себе наиболее эффективные компоненты гидростатических моделей, что позволяет рассматривать модель как обобщение существующих гидростатических моделей.

III. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Проведено сопоставление результатов моделирования с лабораторным экспериментом [15], в котором исследовалось воздействие струи от винтового движителя на наклонный берег. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Эксперимент проводился в лотке размером

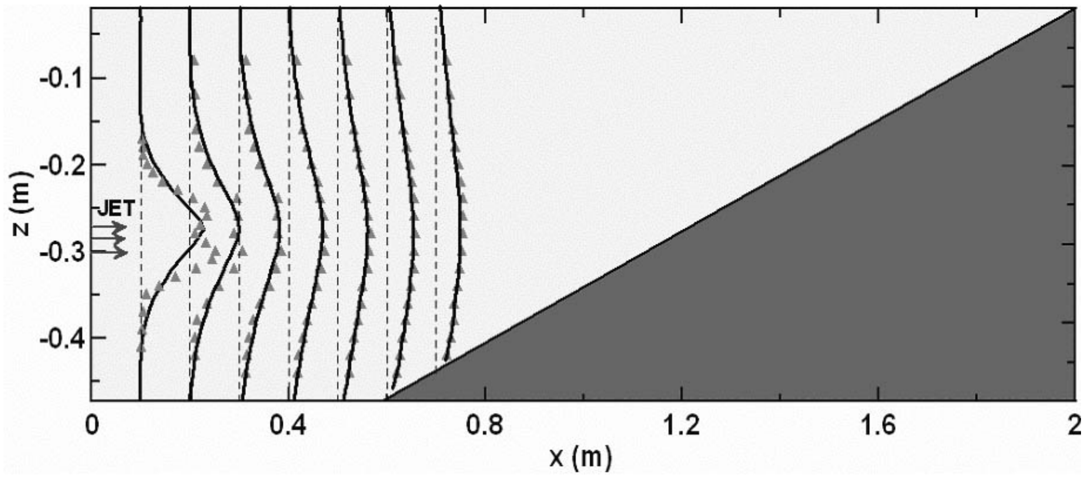

Рис. 4 Сравнение экспериментальных и рассчитанных профилей горизонтальной скорости

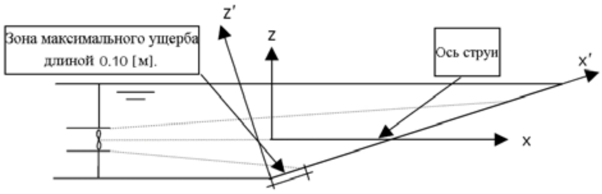

Рис. 5 Положение зоны максимального размыва дна

$2\times1.9\times0.48$ м. Винт диаметром $D_0 = 0.1$ м был установлен на глубине 0.28 м в перегородке, отделяющей рабочий объем от вспомогательного объекта, в который поступала вода из насоса, чтобы уравновесить уровень в обоих отсеках. Избыток воды при работе винта вытекал через боковые стенки. Начальная скорость струи составляла $U_0 = 1.36$ м/с. В расчетах струя вытекала из прямоугольного отверстия размером 10.8×6.6 см с начальной скоростью 1.38 м/с, что соответствовало импульсу струи в эксперименте.

При моделировании вода вытекала вовне через боковые границы, на которых использовалась ньютоновская схема усвоения данных. Расчетная сетка модели составляла $100\times80\times50$ узлов. Результаты расчетов установившегося движения представлены на рис. 2-4. На рис. 2 и 3 представлено распределение скоростей в вертикальном срезе и в придонном слое в момент времени, когда движение струи установилось. На рис. 4 приведено сравнение рассчитанных и экспериментальных [15] профилей горизонтальной скорости в ближней и дальней зонах развития струи. Как видно из рисунка, распределение скоростей неплохо согласуется с экспериментальным.

Рис. 6 показывает установившееся поле касательных напряжений у дна. Как видно из рисунка, зона максимальных касательных придонных напряжений находится вблизи точки пересечения оси струи с дном. Анализ экспериментальных данных, проведенный в [15] показал, что зона максимального размыва дна находится на первых 10 сантиметрах начала уклона дна (рис. 5). Согласно экспериментальным данным зона максимального ущерба находится значительно ниже зоны максимальных придонных скоростей и касательных напряжений. Причем движение частичек донных отложений в нижней части уклона происходило против направления движения течения.

В рамках представленной здесь модели задача размыва дна не рассматривается. Однако, обзор существующих моделей переноса наносов [см. напр. 4,7,12,16] показал, что большинство из них при расчете движения донных отложений учитывают только придонные касательные напряжения. Следовательно, большинство из известных моделей не подходят для задачи размыва дна в данном эксперименте. Распределение модуля градиента динамического давления, представленное на рис. 7 позволяет объяснить

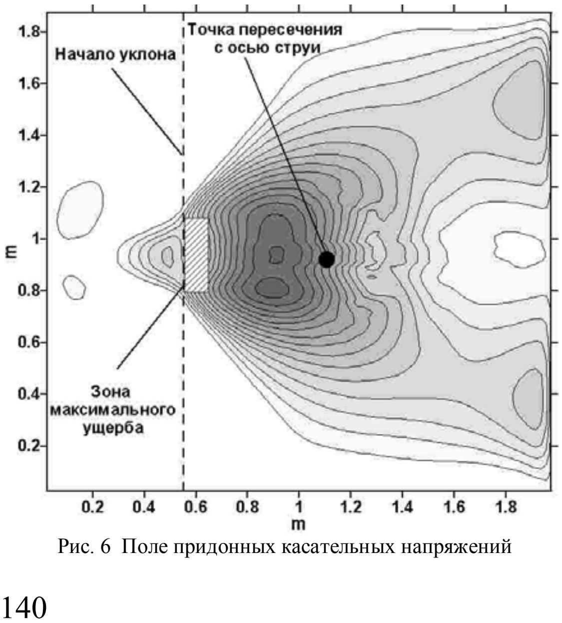

Рис. 6 Поле придонных касательных напряжений

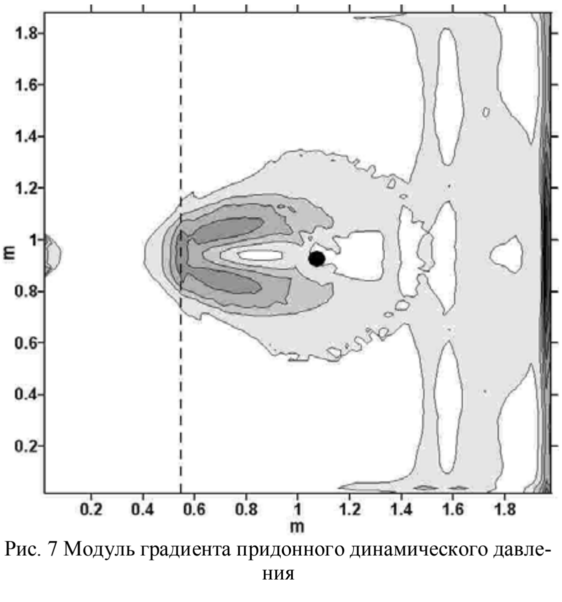

Рис. 7 Модуль градиента придонного динамического давления

экспериментальное расположения зоны максимально размыва дна. Сила, вызванная перепадом давления, также является движущей для частиц наносов, лежащих на дне. Из рис. 7 видно, что градиент давления максимален в начале уклона дна и направлен против течения, что позволяет объяснить направление и механизм движения частиц наблюдаемого экспериментально.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена новая трехмерная негидростатическая модель со свободной поверхностью, разработанная для моделирования устойчивости дна и берегов под действием струй судовых винтовых движителей. В отличие от всех известных моделей, она описывает трехмерные поля скорости, генерируемые судовыми движителями, интенсивность и интегральный масштаб турбулентности в заданной расчетной области с произвольным рельефом дна и формой берегов. Модель позволяет рассчитывать распределение придонных напряжений трения, градиента придонного давления и оценивать условия трогания донных наносов под действием струи гребного винта. Результаты расчетов неплохо согласуются с лабораторным экспериментом [15]. В дальнейшем гидродинамическую модель предполагается дополнить моделью наносов. Сделан вывод о том, что в рассмотренных задачах при моделировании размыва дна необходимо использование моделей переноса наносов, использующие параметризацию силы, действующей на донные отложения за счет перепада давления совместно с трехмерными негидростатическими гидродинамическими моделями.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке CRDF в рамках проекта UKG2-582-KV-05.

ССЫЛКИ

[1] Ю.В. Канарская, В.С. Мадерич Численная негидростатическая модель стратифицированных течений // Прикл. Гидромеханика. – 2002. – 76, N 3. – С. 12-21.

[2] H.G Blaauw., E.J van de Kaa, Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw-race of maneuvering ships. // International Harbour Congress. – 1978, Antwerp, Belgium. P. 1-16.

[3] A.F. Blumberg , G. L Mellor A description of a three-dimensional coastal oceanic circulation // Three-Dimensional Coastal Ocean Models. – 1987, N. Heaps.(ed), Washington, D.C. Am. Geoph. Union. – P. 1-16.

[4] B.P. Donnell Users Guide to SED2D WES Version 4.5. Engineer Research And Development Center Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulics Laboratory. 2001 – P. 164.

[5] M. Fuehrer, H. Pohl, K. Roemisch Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protectins of various constructions //Bulletin of the PIANC. – 1987. – No.58. – P. 45-56.

[6] G.A. Hamill The scouring action of the propeller jet produced by a slowly manoeuvring ship. // Bulletin of the PIANC. . – 1988. – No.62. – P. 85-110.

[7] Y Jia., S. Wang CCHE2D: a two-dimensional hydrodynamic and sediment transport model for unsteady open channel flows over loose bed // Technical Report: No. CCHE-TR-97-2. School of Engineering. The University of Mississippi 1997 - P. 38.

[8] Y Kanarska, V. Maderich A non-hydrostatic numerical model for calculating free-surface stratified flows // Ocean Dynamics. – 2003. - 53.P. 176-185

[9] E.A.. Martinsen H. Engedahl Implementation and testing of a lateral boundary scheme as open boundary condition in a barotropic ocean model // Coastsl Eng. 1987. – **11**. – P. 603-627.

[10] S.T. Maynord Bottom shear stress from propeller jets // Port' 98. – 1988, Sponsored by ASCE and U.S. Section of the PIANC, Long Beach , Ca. – P. 1074-1083.

[11] S.T. Maynord Inflow zone and discharge through propeller jets. // Report for the Upper Mississippi River – Illinois Waterway System Navigation Study. ENV Report 3: U.S. Army Engineer Research and development Center Coastal and Hydraulics Laboratory , Vicksburg, MS, 2000. – 28 p.

[12] Mike-21 -- Modeling System for Estuaries, Coastal Waters and Seas DHI Water & Environment 2000 http://www.dhisoftware.com/mike21/Description/index.htm

[13] G. Mellor, T .Yamada Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1982. – 20. – P. 851-875.

[14] E.D. Palma,R. P. Matano On the implementation of open boundary conditions to a general circulation model: The barotropic model // J. Geophys Res. – 1996. – **103** –P. 1319-1341

[15] L. Schokking Bowthruster – induced Demage. –MS thesis: Technical University Delft, 2002. – 143 p.

[16] M Spasojevic., F.M. Holly 2-D bed evolution in natural watercources-new simulation approach J. Hyd. Engr 1990. – **116**. – P. 425 - 444.

[17] H.J. Verhey The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propeller jet behind ships. // Proceedings of the 8 th international Harbour Congress. Publication No 303. – 1983, Antwerp, Belgium. – P. 1-11.