

УДК 532.465

МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУЙ СУДОВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ НА ДНО И БЕРЕГА

Ю. В. КАНАРСКАЯ, В. С. МАДЕРИЧ

Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев

Получено 15.03.2005

Представлена численная трехмерная негидростатическая гидродинамическая 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 описывает как ближнюю, так и дальнюю зоны струи за винтом. Рассчитываются меняющиеся во времени и пространстве придонные напряжения трения, вызывающие эрозию дна и повреждающие естественную среду обитания организмов на дне. Результаты расчетов сопоставлены с данными лабораторных экспериментов.

Представлена чисельна трьохвимірна негідростатична гідродинамічна модель з вільною поверхнею, яка розроблена для моделювання стійкості дна та берегів під дією струменів судових гвинтових рушіїв. На відміну від усіх відомих моделей, вона описує трьохвимірні поля швидкості, генеровані судовими рушійми, інтенсивність та інтегральний масштаб турбулентності у даній розрахунковій області з довільним рельєфом дна та формою берегів. Модель описує як ближню, так і дальню зони струменю за гвинтом. Обраховуються змінні у часі та просторі придонні напруження тертя, які викликають ерозію дна та пошкоджують природне середовище існування організмів на дні. Результати розрахунків співставлені з даними лабораторних експериментів.

The 3D numerical non-hydrostatic free-surface hydrodynamic model is presented that was designed for modelling of bottom and bank stability subjected by ship propeller jets. Unlike all known models it describes three-dimensional fields of velocities generated by ship propellers, turbulence intensity and length scale in the given domain of arbitrary bottom and coastal topography. The model describes as near field in propeller jet as far field. The time and space varying bottom shear stresses that caused bottom erosion and damage for bottom habitat are calculated. The results of simulations are compared with the laboratory experiment.

ВВЕДЕНИЕ

Струи судовых движителей при движении судов в узостях и малых глубинах могут вызывать размыв донных отложений и наносить значительный ущерб естественной среде обитания донных организмов, донным и береговым макрофитам, икре и личинкам рыб. Особенно существенно такие струи могут воздействовать на дно и берега при маневрировании судов и подходе/отходе судов-паромов к терминалам. В последние годы эта проблема исследовалась экспериментально и теоретически в ряде работ (см., например, [1-6]), однако полученные в них работах полуэмпирические зависимости, как правило, не описывают взаимодействие струи со сложным рельефом дна.

В настоящей работе представлена новая трехмерная негидростатическая гидродинамическая 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 поля скорости, генерируемые судовыми движителями, интенсивность и интегральный масштаб турбулентности в заданной расчет-

ной области с произвольным рельефом дна и формой берегов. Модель основана на подходе к решению задачи, развитом в работах [7-8] и дополнена трехмерным вариантом модели турбулентности [9]. Результаты расчетов сопоставлены с данными лабораторного эксперимента [10].

1. МОДЕЛЬ

1.1. Уравнения модели

Система трехмерных осредненных по Рейнольдсу уравнений гидродинамики имеет 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 $q^2/2 = \overline{u_i u_i}$,

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

а A_1, A_2, B_1, C_1 – постоянные модели. Для замыкания используется трехмерное обобщение $q - q^2 l$ модели [9] для однородной жидкости:

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} + u_j \frac{\partial q^2}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} S_q q l \frac{\partial q^2}{\partial x_j} - 2 \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - 2 \frac{q^3}{B_1 l}, \quad (6)$$

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

где $S_M, B_1, E_1, E_2, S_q, S_l$ – постоянные модели; κ – постоянная Кармана. Последний член в квадратных скобках представляет собой пристенную функцию, необходимую в $q - q^2 l$ модели, чтобы правильно описать течения у твердой границы. Согласно [9], расстояние от твердой границы L определено следующим образом:

$$L^{-1}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2\pi} \iint \frac{dA(\mathbf{r}_0)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|^3},$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор для данной точки; \mathbf{r}_0 – твердая граница; $dA(\mathbf{r}_0)$ – элементарная площадь поверхности твердой границы. Когда горизонтальный масштаб расчетной области много больше глубины, тогда

$$L^{-1} = z^{-1} + (H - z)^{-1}.$$

Постоянные модели $A_1, A_2, B_1, C_1, E_1, E_2, S_q, S_l, \kappa$, согласно [9], составляли соответственно 0.92, 0.74, 16.6, 0.08, 1.8, 1.32, 0.2, 0.2, 0.4.

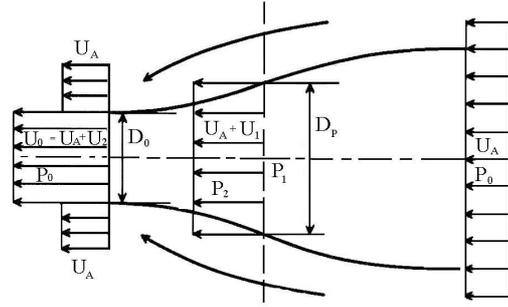


Рис. 1. Схема формирования струи винтовым двигателем [2]

1.2. Граничные условия

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} = w, \quad (8)$$

$$K_m \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} = \frac{\tau_0}{\rho_0}, \quad (9)$$

где $\mathbf{V}_h = (u, v)$; $\tau_0 = (\tau_{0x}, \tau_{0y})$ – касательные напряжения ветра. У дна на ближайшем к нему расчетном уровне $z = H + z_b$

$$-u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y} = w, \quad (10)$$

$$K_m \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial z} = \frac{\tau_b}{\rho_0}, \quad (11)$$

где

$$\tau_b = \rho_0 C_D |\mathbf{V}_h| \mathbf{V}_h,$$

$$C_D = \max \left(0.0025; \left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z_b + z_0}{z_0} \right) \right)^{-2} \right),$$

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:

$$(q^2(\eta), q^2 l(\eta)) = (B_1^{2/3} u_*^2(0), 0), \quad (12)$$

$$(q^2(-H), q^2 l(-H)) = (B_1^{2/3} u_*^2(-H), 0), \quad (13)$$

где $u_*(0), u_*(-H)$ – динамические скорости, $u_*(0) = |\tau_0| / \rho_0$ and $u_*(-H) = |\tau_b| / \rho_0$.

На твердых боковых границах заданы условия непротекания и соотношения для пристенного логарифмического слоя, аналогично (3)–(7). На жидкой границе, где задается струя от винтового двигателя, нормальная скорость и потоки турбулентных характеристик равны нулю, кроме области

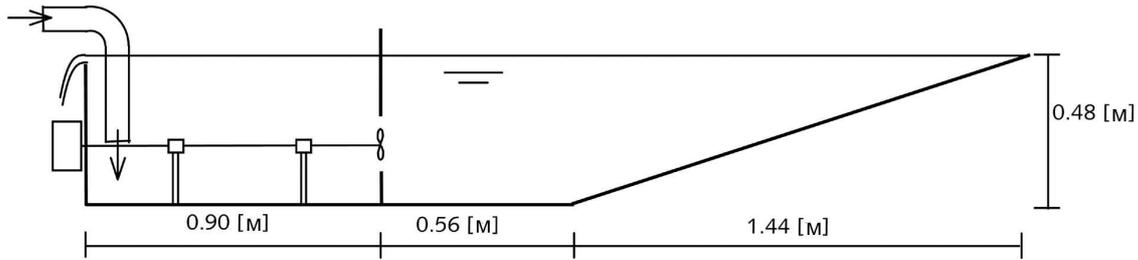


Рис. 2. Продольное сечение экспериментального лотка [10]

диаметром D_0 , из которой вытекает струя со скоростью U_0 . На открытых границах используются два вида условий. Одно из них представляет собой условие излучения (см., например, обзор [11]). Кроме того, используются новые граничные условия, в которых применяется ньютоновская схема усвоения данных. Идея метода заключается в выделении вдоль свободной границы относительно узкой релаксационной зоны, в которой уравнение для возвышения уровня, полученное интегрированием уравнения неразрывности по глубине, дополняется релаксационными слагаемыми:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}(H + \eta)}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}(H + \eta)}{\partial y} = -\frac{\eta - \eta_B}{T} \alpha. \quad (14)$$

Здесь α – релаксационный параметр, $\alpha = 1$ в релаксационной зоне, $\alpha = 0$ вне ее; T – время релаксации, которое выбираются для обеспечения полного поглощения уходящих из расчетной области возмущений. На внешней границе релаксационной зоны задаются условия для твердых границ. Преимущество разработанного метода по сравнению с использованием условий излучения и метода релаксации FRS 12] 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.

1.3. Струя от винтового движителя

Для расчета поля скоростей, вызванных винтовым движителем, использовались соотношения, основанные на полумпирической модели [1], в которой реальный гребной винт заменялся эффективным движителем. Упор последнего равен упору гребного винта. Как следует из рис. 1, поток, обтекая судно, движущееся со скоростью U_A , ускоряется движителем диаметром D_p до скорости $U_A + U_1$ в плоскости эффективного движителя.

За свободным винтом диаметр струи уменьшается до значения D_0 , а скорость возрастает до значения $U_0 = U_A + U_2$. В настоящей статье рассматривается начало движения судна ($U_A = 0$), тогда согласно [1]:

$$U_0 = U_2 = \sqrt{\frac{8n^2 D^2}{\pi} K_T}, \quad (15)$$

где n – частота оборотов винта; K_T – эмпирический коэффициент упора гребного винта, рассчитываемый из соотношения

$$K_T = \frac{T_{prop}}{\rho n^2 D^4}, \quad (16)$$

где T_{prop} – упор винта в [Н]. Диаметр струи в зоне установления $D_0 = 0.71D$ для свободного гребного винта. Если коэффициент упора винта невозможно определить, то может быть использовано эмпирическое соотношение [1]:

$$V_2 = C_2 \left(\frac{P}{\rho_0 D_p^2} \right)^{1/3}, \quad (17)$$

где P – мощность на гребном валу [Вт]; C_2 – эмпирическая постоянная, равная 1.48 по данным экспериментов [1] и 1.32 по данным [6].

2. ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД

Система уравнений дискретизировалась с использованием криволинейной ортогональной горизонтальной системы координат и так называемой σ -системы координат [13], преобразующих расчетную область в параллелепипед. Решение задачи расщеплялось на две подзадачи: решение двумерной системы уравнений для возвышений уровня и осредненных по глубине скоростей и решение трехмерной задачи для скоростей и давления [13]. В свою очередь, поле скоростей и давления в трехмерной подзадаче расщеплялось на гидростатическую и негидростатическую

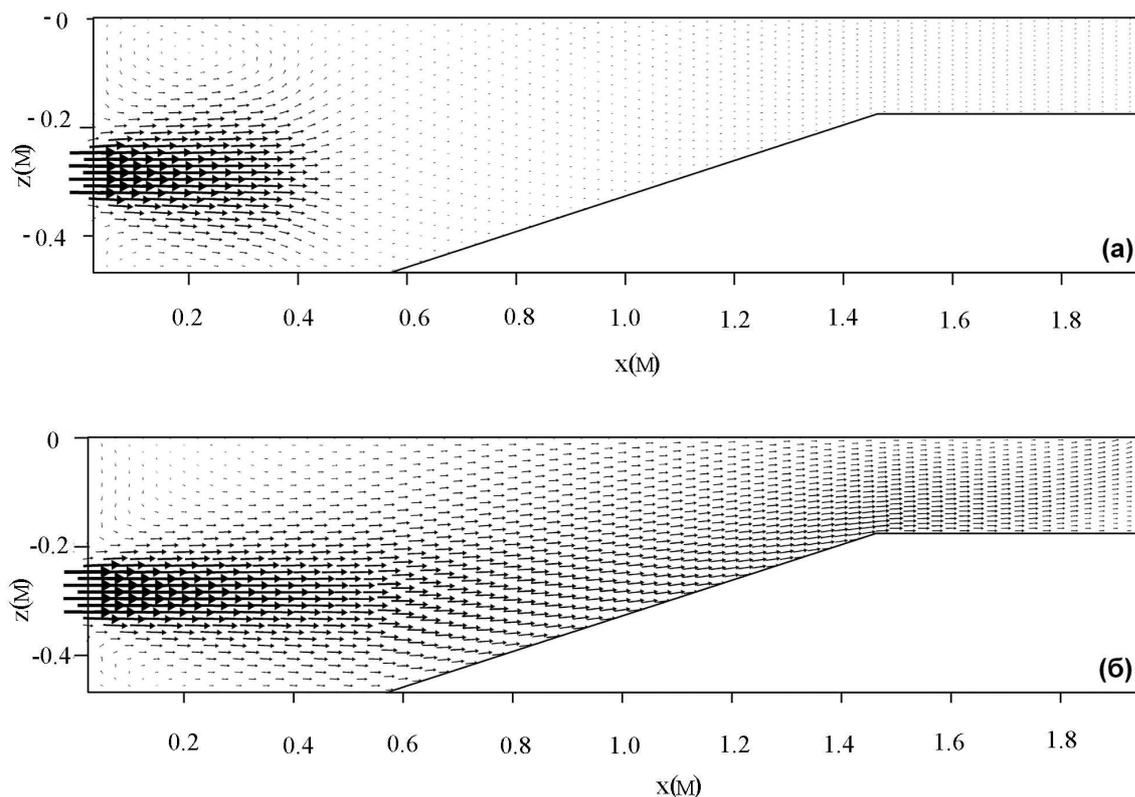


Рис. 3. Распределение скоростей в вертикальном сечении на оси симметрии лотка при $t = 0.95$ с (а) и 9.5 с (б)

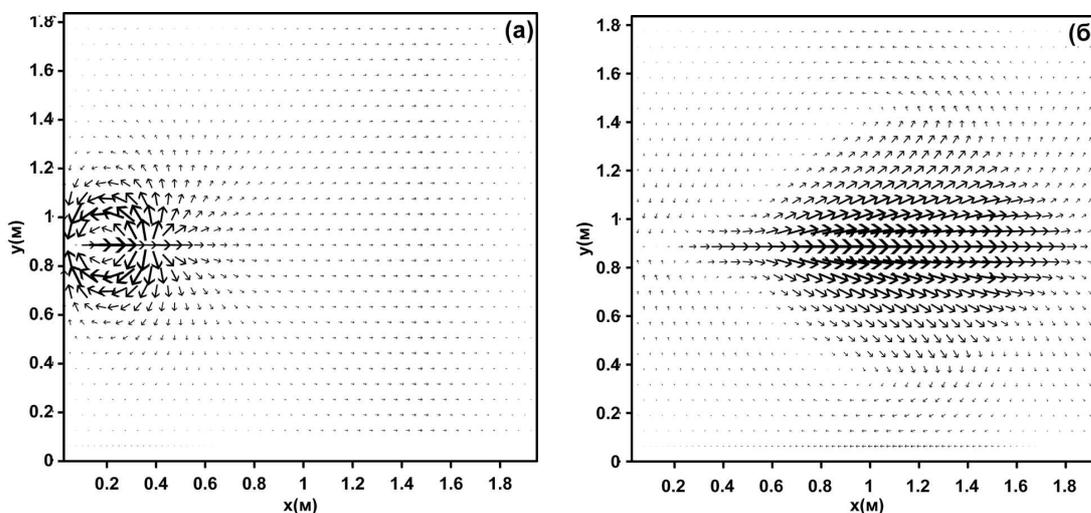


Рис. 4. Придонные скорости при $t = 0.95$ с (а) и 9.5 с (б)

составляющие. Алгоритм решения включал четыре стадии. На первой находилось решение для скаляров – интенсивности турбулентности и линейного масштаба. Использовалась явная схема по горизонтали и неявная по вертикали

с относительно большим (внутренним) шагом по времени. На второй стадии явным методом с малым (внешним) шагом решалась двумерная система уравнений для возвышений уровня и осредненных по глубине скоростей. На третьей

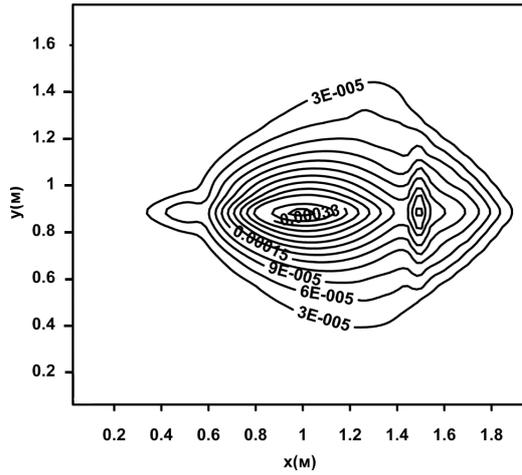


Рис. 5. Рассчитанные значения $|\tau_b/\rho_0|$ при $t = 9.5$ с

стадии находилось решение для гидростатических составляющих скорости с внутренним шагом по времени. Наконец, на четвертом этапе находились негидростатические поправки для поля скорости и давления. Детально этот алгоритм описан в [7, 8].

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Результаты расчетов с помощью модели были сопоставлены с лабораторным экспериментом [10], в котором исследовалось воздействие струи винтового движителя на наклонный берег (рис. 2). Эксперимент проводился в лотке размером $2 \times 1.9 \times 0.48$ м. Винт диаметром $D_0 = 0.1$ м был установлен в перегородке, отделяющей рабочий объем от вспомогательного отсека, в который поступала вода из насоса, чтобы уравновесить уровень в обеих отсеках при работе винта. Избыток воды в обеих отсеках перетекал вовне через боковые стенки. Начальная скорость струи составляла $U_0 = 1.36$ м/с. В расчетах струя истекала из прямоугольного отверстия 10.8×6.6 с постоянной скоростью 1.38 м/с, что соответствовало импульсу винта в эксперименте. Из рабочего объема вода вытекала через противоположную границу, на которой использовалась ньютоновская схема усвоения данных. Расчетная сетка численной модели была $80 \times 30 \times 40$. Внешний шаг составлял 0.00475 с, а отношение внутреннего шага к внешнему – 3-5. Средняя кинетическая энергия устанавливалась за время около 10 с. Результаты расчетов, приведенные на рис. 3–6, показывают развитие струи в начальный момент времени $t = 0.95$ и тогда, когда течение уже устано-

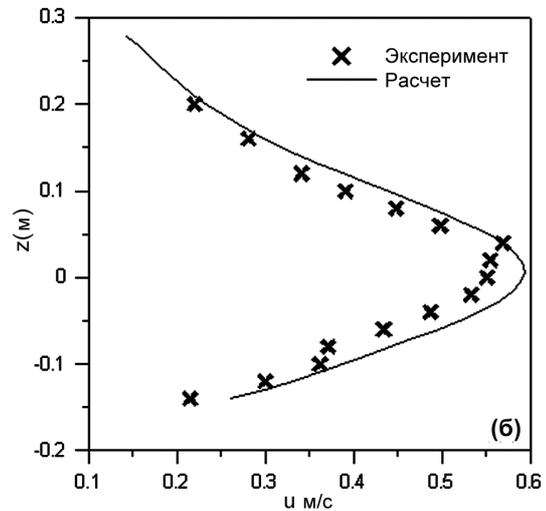
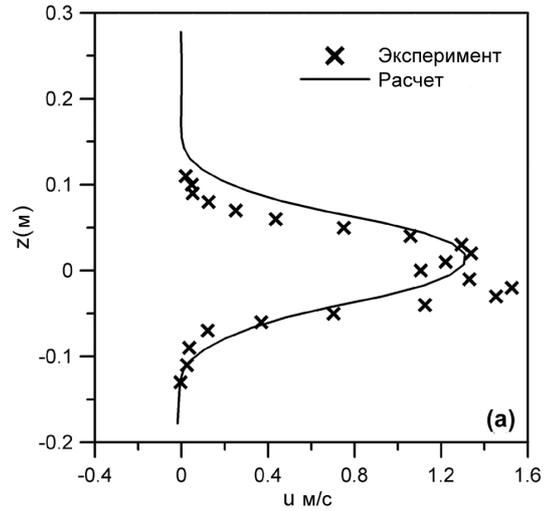


Рис. 6. Рассчитанные и измеренные вертикальные профили скорости при $t = 9.5$ с на расстоянии 0.1 м (а) и 0.7 м (б)

вилось при $t = 9.5$. На рис. 4 видно перемещение по потоку зоны больших придонных скоростей с развитием струи. Установившееся поле касательных напряжений у дна на рис. 5 показывает зону наибольшего воздействия струи на дно вдоль его склона. В рамках представленной здесь модели задача размыва дна не рассматривается. Для ее решения модель должна быть дополнена моделью переноса наносов, однако оценка условий трогания наносов может быть дана с использованием критериев Избаша или Шилдса с поправками на уклон дна [10].

На рис. 5 приведено сравнение рассчитанных и экспериментальных [10] вертикальных профилей скорости в ближней и дальней зоне развития

струи. Как следует из рисунка, распределения скоростей неплохо согласуются, несмотря на некоторые различия в конфигурации лотка в расчетах и эксперименте.

ВЫВОДЫ

В работе представлена новая трехмерная негидростатическая гидродинамическая 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 и оценивать условия трогания донных наносов под действием струи гребного винта. Результаты расчетов неплохо согласуются с лабораторным экспериментом [10]. В дальнейшем гидродинамическую модель предполагается дополнить моделью переноса наносов.

Настоящая работа выполнена при частичной поддержке CRDF в рамках проекта UM2-5013-KV-03.

1. *Blaauw H.G., van de Kaa E.J.* Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw-race of manoeuvring ships. // International Harbour Congress.– 1978, Antwerp, Belgium.– P. 1–16.
2. *Verhey H.J.* The stability of bottom and banks subjected to the velocities in the propeller jet

behind ships. // Proceedings of the 8th International Harbour Congress. Publication No 303.– 1983, Antwerp, Belgium.– P. 1–11.

3. *Fuehrer M., Pohl H., Roemisch K.* Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protections of various constructions // Bulletin of the IANC.– 1987.– No. 58.– P. 45–56.
4. *Hamill G.A.* The scouring action of the propeller jet produced by a slowly manoeuvring ship // Bulletin of the IANC.– 1988.– No. 62.– P. 85–110.
5. *Maynard S.T.* Bottom shear stress from propeller jets // Ports '98.– 1998, Sponsored by ASCE and U.S. Section of the IANC, Long Beach, Ca.– P. 1074–1083.
6. *Maynard S.T.* Inflow zone and discharge through propeller jets.– Interim 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.
7. *Канарская Ю.В., Мадерич В.С.* Численная негидростатическая модель стратифицированных течений // Прикл. гидромеханика.– 2002.– **76**, N 3.– С. 12–21.
8. *Kanarska Y., Maderich V.* A non-hydrostatic numerical model for calculating free-surface stratified flows // Ocean Dynamics.– 2003.– **53**.– P. 176–185.
9. *Mellor G., Yamada T.* Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Reviews of Geophysics and Space Physics.– 1982.– **20**.– P. 851–875.
10. *Schokking L.* Bowthrustrer-induced Damage.– MS thesis: Technical University Delft, 2002.– 143 p.
11. *Palma E.D., Matano R.P.* On the implementation of open boundary conditions to a general circulation model: The barotropic model // J. Geophys Res.– 1996.– **103**.– P. 1319–1341.
12. *Martinsen E.A., Engedahl H.* Implementation and testing of a lateral boundary scheme as an open boundary condition in a barotropic ocean model // Coastal Eng.– 1987.– **11**.– P. 603–627.
13. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean circulation // Three-Dimensional Coastal Ocean Models.– 1987, N. Heaps (ed), Washington, D.C., Am. Geoph. Union.– P. 1–16.