



Общероссийский математический портал

Л. Г. Чикина, А. Л. Чикин, Математическая модель процесса заиления подходов судоходных каналов в Таганрогском заливе,
Матем. моделирование, 2009, том 21, номер 2, 29–35

<https://www.mathnet.ru/mm2733>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<https://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.82

20 мая 2025 г., 20:17:21



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЗАИЛЕНИЯ ПОДХОДНЫХ СУДОХОДНЫХ КАНАЛОВ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ

© 2009 г. Л.Г. Чикина, А.Л. Чикин

Южно-Российский региональный центр информатизации

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: гранты 05-01-00096а, 06-01-00038а

Приведено описание математической модели процесса заиления подходных судоходных каналов в мелководных районах Таганрогского залива. Изложены результаты вычислительного эксперимента на представленной модели. Проведено сравнение полученных результатов с результатами исследований других авторов.

MATHEMATICAL MODEL OF SILTAGE PROCESS IN NAVIGATION CANALS OF TAGANROG BAY

L.G. Chikina, A.L. Chikin

South-Russian Regional Center of Informatization

The mathematical model of the siltage process in the navigation canals in a shallow-water regions of the Taganrog bay is described. The results of a computing experiment on the presented model are explained. Results and results of other authors are compared.

Введение

После распада СССР часть Черноморских портов Россией была утрачена и, вследствие этого, важность функционирования портов Азовского моря и Таганрогского залива значительно возросла. Однако мелководность Таганрогского залива сильно усложняет подход судов к портам городов Таганрога и Ейска, а также к устью реки Дон. Для осуществления подхода судов к портам в мелководных районах сооружаются подходные судоходные каналы.

В процессе эксплуатации данные каналы заиливаются и требуют регулярного очищения. Наиболее распространенным способом борьбы с заилением является периодические дноуглубительные работы, которые обеспечивают заданную проходную глубину. Извлеченный из каналов грунт транспортируют на одну из свалок, расположенных на акватории Таганрогского залива (рис.1). Данные мероприятия являются достаточно трудоемкими и требуют больших материальных затрат, поэтому изучение процессов размывания дна, переноса размывтого грунта и его оседания приобретает особую актуальность.

Известно [1], что скорость сгонно-нагонных течений в Таганрогском заливе может достигать значений 0.4–0.7 м/с. Это позволяет полагать, что перенос субстанций происходит, в основном, за счет конвективных, а не диффузионных процессов.

Постановка задачи

Одним из основных этапов решения задач, связанных с моделированием гидрофизических процессов в водоемах, является расчет гидродинамических параметров течения. К таким параметрам относятся компоненты скорости течения, перепад уровня поверхности воды, давление. При расчете течения в районе канала предполагается, что предварительно на более грубой конечно-разностной сетке был проведен расчет поля скоростей ветрового течения во всем водоеме [2]. Так как протяженность канала такова, что он занимает лишь несколько ячеек грубой сетки (рис.2), то можно считать, что скорости течения на поверхности канала в исследуемом

районе водоема изменяются незначительно. По этой причине скорость поверхностного течения задается постоянной, равной среднему значению скорости ветрового течения в слое водоема, граничащем с каналом.

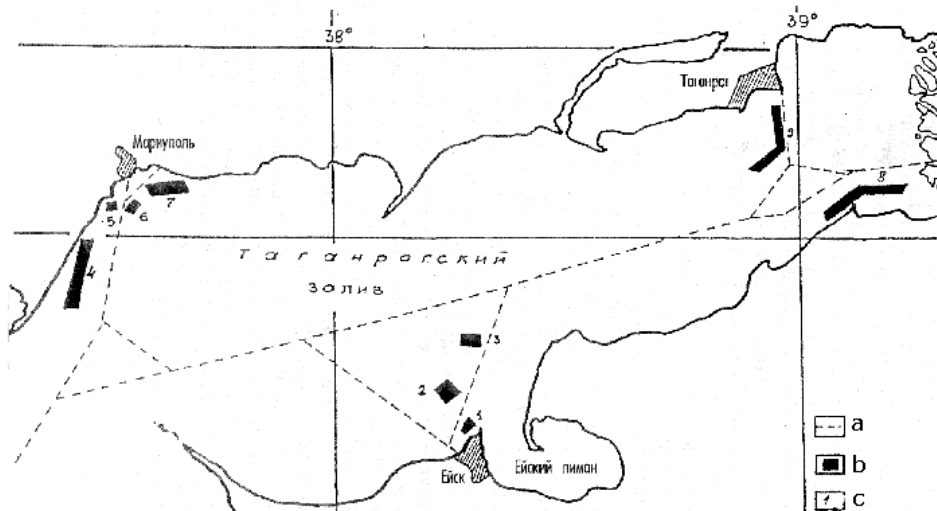


Рис.1. Схема расположения свалок выбранного из каналов грунта в Таганрогском заливе (обозначения: а – судоходные каналы; б – свалка грунта; с – номер свалки)

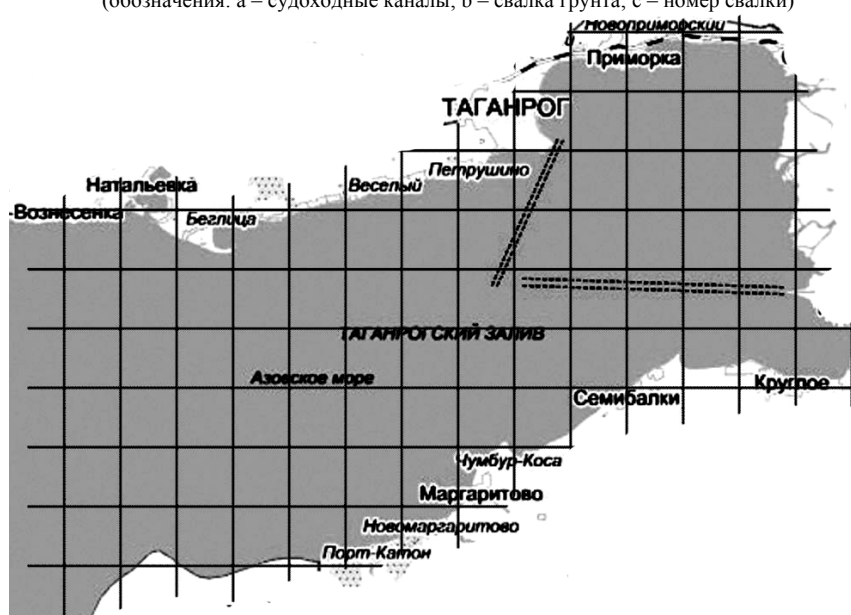


Рис.2. Наложение грубой сетки на восточную часть Таганрогского залива

В качестве изучаемого объекта рассматривается часть водоема в форме прямоугольного параллелепипеда. По дну этого водоема прорыт трапециевидный канал. Предполагается, что поверхность водоема является горизонтальной плоскостью, и поэтому уравнения рассматриваются в декартовой системе координат.

Система координат выбирается следующим образом. Плоскость XOY совмещается с невозмущенной поверхностью водоема, ось OZ направляется вверх. Движение воды в выделенном

объеме, содержащем исследуемый канал, описывается системой, состоящей из уравнений количества движения и уравнения неразрывности среды [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \Omega v = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{xy} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \Omega u = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{xy} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (3)$$

К системе уравнений (1)–(3) добавляется уравнение гидростатического давления

$$p = -g\rho_w z + p_a. \quad (4)$$

В (1) – (4) u, v, w – компоненты скорости; x, y, z, t – пространственные переменные и время соответственно; p_a – атмосферное давление; Ω – коэффициент Кориолиса; ν_{xy}, ν_z – коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости соответственно; ρ_w – плотность воды; $g=9.8 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

На боковых границах скорости предполагаются известными. На дне они равны нулю ($u=0, v=0, w=0$). На свободной поверхности вместо напряжения, создаваемого ветром, задается скорость ветрового течения, рассчитанная ранее на грубой сетке $u=u_s, v=v_s, w=w_s$. В качестве начальных данных можно задавать какое-либо известное распределение скоростей

$$u = u^0, \quad v = v^0, \quad w = w^0$$

или считать эти скорости нулевыми.

Процесс переноса взвеси разделяется на перенос взвешенных частиц и донный нанос. Соответственно, область исследования можно разделить на область донных наносов толщиной δ (рис. 3) и область взвешенных наносов, расположенную выше и имеющую толщину $H-\delta$. Обмен взвесями между этими двумя областями происходит через оседание вниз с расходом D_b и размывание (поднятие вверх из нижнего слоя) с расходом E_b .

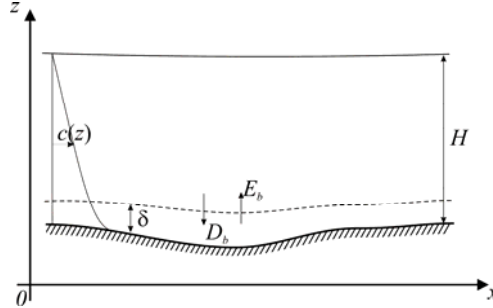


Рис.3. Схема процесса поднятия и оседания донных наносов

Распределение концентрации взвешенных частиц описывается уравнением конвекции-диффузии, конвективная часть которого записана в симметричной форме [4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} + \frac{\partial(uc)}{\partial x} + \frac{\partial(vc)}{\partial y} + \frac{\partial[(w - w_s)c]}{\partial z} \right) = \\ = \mu^{x,y} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu^z \frac{\partial c}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где c – концентрация, $\mu^{x,y}(x,y)$, $\mu^z(z)$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно, w_s – гидравлическая крупность частиц.

Принято, что вертикальный поток примеси на свободной верхней границе водоема с атмосферой отсутствует

$$\mu^z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} - (w - w_c)c = 0. \quad (6)$$

На твердой границе Γ_1 (дно и боковые стенки канала) ставится условие

$$\mu^z \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_{\Gamma_1} = 0.$$

На открытых боковых границах Γ_0 исследуемой области

$$\mu^z \frac{\partial c}{\partial n} \Big|_{\Gamma_0} + V_n \cdot c = 0,$$

где V_n – нормальная составляющая скорости.

Вертикальный поток примеси на дне (области взвешенных наносов) принимается равным разности отрывающихся от дна частиц примеси E_b и оседающих частиц D_b

$$\mu^z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=-H} + w_s \cdot c = E_b - D_b.$$

Уравнение (5) дополняется начальным условием

$$c|_{t=0} = c^0.$$

Вычисление расхода оседания D_b и расхода размывания E_b проводится по формулам из [5,6].

Толщина активного слоя донных отложений определяется с помощью уравнения [7]

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{D_b - E_b}{\rho}.$$

Уравнения (1)–(5) с соответствующими граничными условиями решаются конечно-разностными методами. В исследуемой области строится равномерная прямоугольная сетка с шагами по горизонтали 1 м и по вертикали 0.25 м. Разнесение переменных в ячейках показано на рис.4. Конвективная часть в уравнениях движения (1)–(2) аппроксимировалась разностями против потока, а в уравнении переноса (5) – центральными разностями. Полученные системы линейных алгебраических уравнений решаются треугольными итерационными методами [8].

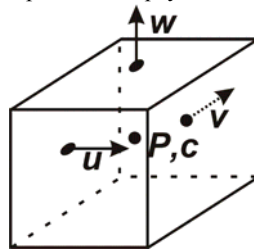


Рис.4. Разнесение переменных по сторонам разностной ячейки

Вычислительный эксперимент

Моделировался условный подходной подводный канал трапецевидной формы шириной 100 м, глубиной 5.5 м, при этом полная глубина водоема принималась равной 7.5 м. Длина и ширина всей расчетной области была равна 200 м. После дискретизации указанной области и индексации расчетных ячеек получалось порядка 700000 неизвестных по каждому рассчитываемому параметру.

Известно [9], что в Таганрогском заливе преобладающими являются ветры восточных направлений силой 5–6 м/с и западных направлений силой 4–4.5 м/с. Для подходных каналов в зависимости от их расположения данные ветры инициируют три типа течения воды: продольное течение, которое направлено вдоль канала; поперечное течение, которое перпендикулярно направлению канала; и косое течение под углом 45° относительно направления канала.

Были рассмотрены следующие случаи расположения свалки грунта относительно судоходного канала:

- а) наличие свалки грунта канала на подветренном к поперечному течению берегу;
- б) расположение свалки грунта на наветренном к поперечному течению берегу;
- с) отсутствие свалки.

Для случая а) поле скоростей в поперечном сечении канала показано на рис.5.

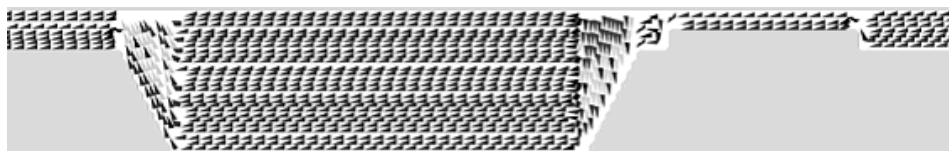


Рис.5. Течение воды в поперечном сечении канала при наличии свалки грунта канала на подветренном берегу

При проведении вычислительных экспериментов было сделано условное разделение донного грунта на несколько категорий в соответствии с [1] в зависимости от критических значений напряжения отрыва τ_{ce} и оседания τ_{cd} .

Значения скоростей течения, а также критические сдвиговые напряжения, при которых наблюдалось наибольшее накопление донного осадка, приведены в табл.1.

Таблица 1

Скорости течения, критические сдвиговые напряжения и величина донного осадка (куб.м на 1 пог. метр)

Наличие свалки			Отсутствие свалки		
Скорость течения (см/с)	м ³ /п.м.	τ_{cd} / τ_{ce}	Скорость течения (см/с)	м ³ /п.м.	τ_{cd} / τ_{ce}
$u=0 \ v=75$	0.549	0.050/0.100	$u=0 \ v=75$	0.228	0.050/0.100
$u=0 \ v=40$	0.200	0.050/0.050	$u=0 \ v=40$	0.053	0.050/0.050
$u=0 \ v=40$	0.186	0.002/0.050	$u=0 \ v=40$	0.050	0.002/0.050
$u=0 \ v=40$	0.180	0.050/0.100	$u=0 \ v=40$	0.040	0.050/0.100
$u=0 \ v=40$	0.167	0.002/0.100	$u=0 \ v=40$	0.038	0.002/0.100

Из табл.1 видно, что заиление канала происходит при средних и сильных поперечных течениях для взвесей, состоящих из крупных частиц основной части грунта. Наличие свалки ускоряет процесс заиления в 2–4 раза по отношению к случаю отсутствия свалки. При поперечном течении происходит интенсивный размыв свалки, причем в первую очередь размываются

ее края, а затем и центральная часть. Взвесь оседает на дне канала (рис.6). Это не противоречит результатам исследований особенностей каналов Мариупольского порта, когда было установлено, что интенсивный гидродинамический режим в районе свалки грунта приводит к значительному смыву и разному складываемым донным отложениям.

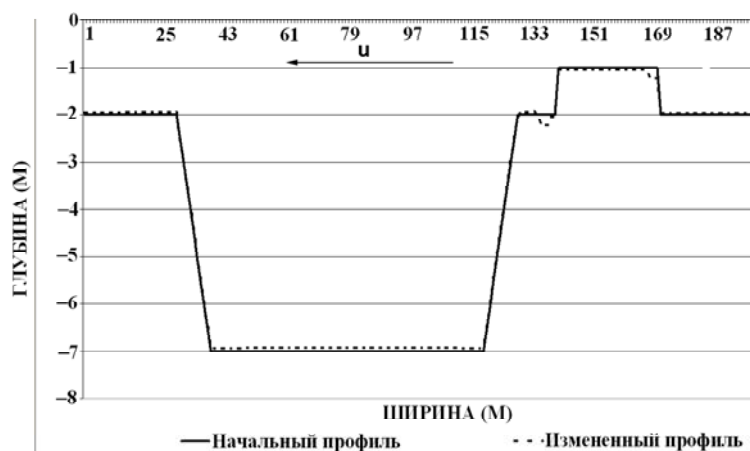


Рис.6. Изменение профиля дна в случае взвеси из крупных частиц при поперечном течении

Для мелких частиц и слежавшегося грунта при продольном и косом течениях не только не происходит накопления осадка, но и наблюдается некоторое размывание дна канала и вынос взвеси из области расчета (табл.2). Это согласуется с наблюдаемым фактом, что преобладающие ветровые течения и волнения, перемещающие наносы вдоль трассы канала, способствуют его меньшему заилению [1].

Таблица 2

Величина размываемого грунта в канале в зависимости от скорости течения и наличия свалки (куб.м на 1 пог. метр)

Наличие свалки			Отсутствие свалки		
Скорость течения (см/с)	м ³ /п.м.	τ_{cd} / τ_{ce}	Скорость течения (см/с)	м ³ /п.м.	τ_{cd} / τ_{ce}
$u=0.075 \ v=0$	0.001	0.050/0.100	$u=0.050 \ v=0.050$	0.000	0.002/0.100
$u=0.075 \ v=0$	0.009	0.002/0.050	$u=0.075 \ v=0$	0.009	0.002/0.050
$u=0.050 \ v=0.050$	0.001	0.002/0.100	$u=0.075 \ v=0$	0.001	0.002/0.100

Таблица 3

Среднегодовая высота осажденного материала в судоходных каналах (м)

	Мариупольский канал	Таганрогский канал	Ейский канал	Азово-Донской канал
Расчетные данные	0.79	1.11	0.24	0.32
Данные наблюдений [1]	0.8	0.4-0.5; 1.0	0.45-0.75	0.4-0.5

В табл.3 отражена среднегодовая высота осажденного в каналах материала. По данным наблюдений установлено [1], что на участке от входа в Таганрогский порт до 2-го километра

канала ежегодно собирается слой наносов мощностью 1 м, между 2-м и 4-м километрами – 0.4-0.5 м. Основной причиной высокого заиления каналов является оплывание бровок, а также преобладание сгонных и нагонных течений, перемещающих наносы в направлении, перпендикулярном трассе канала.

Заиление подходного канала к г. Ейску варьируется в пределах от 45 до 75 см. На данный процесс оказывают преимущественное влияние штормовые ветры юго-западной и северо-восточной группы [10].

Таким образом, проведенные вычислительные эксперименты на построенной математической модели процесса заиления достаточно полно отражают приведенные выше закономерности перемещения донного материала в акваториях судоходных каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хрусталеv Ю.П., Ивлиева О.В. Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). – Ростов-на-Дону: Изд. «Гефест», 1999, 196 с.
2. Чикин А.Л. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин // Водные ресурсы, 2005, т.32, № 1, с.55-60.
3. Марчук Г.И., Каган Б.А. Океанские приливы (математические модели и численные эксперименты). – Л.: Гидрометеоздат, 1977, 296 с.
4. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. – Москва: Изд. УРСС, 1998, 248 с.
5. Lumborg U. and Windelin A. Hydrography and cohesive sediment modelling: application to the Rømø Dyb tidal area // Journal of Marine Systems, January 2003, v.38, Issues 3-4, p.287-303.
6. Pandoe Wahyu W. and. Edge Billy L. Cohesive sediment transport in the 3D-hydrodynamic-baroclinic circulation model, study case for idealized tidal inlet // Ocean Engineering, December 2004, v.31, Issues 17-18, p.2227-2252.
7. Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Вычислительный алгоритм для определения динамики взвешенных и донных наносов в речном русле // Вычислительные технологии, 2004, т.9, № 2, с.9-25.
8. Krukier L.A., Chikina L.G., Belokon T.V. Triangular skew-symmetric iterative solvers for strongly nonsymmetric positive real linear system of equations // Applied Numerical Mathematics, 2002, №41, p.89-105.
9. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том V. Азовское море. С.-Пб.: Гидрометеоздат, 1991.
10. Шаповалов П.Б. Заносимость Ейского канала // Тр. АзЧерморпути, 1957, 129 с.

Поступила в редакцию 30.05.07