

УДК 519.6:532.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2012 г. Г.Г. Матишов^{1,2}, А.Л. Чикин³

Описан подход к моделированию ветровых течений в Керченском проливе с помощью двухслойной математической модели. Для анализа течений и калибровки математической модели использовалась база данных Южного научного центра по Керченскому проливу. С помощью модели были получены картины течений при различных ветровых ситуациях, а также исследовано влияние наличия или отсутствия дамбы вдоль Тузлинской косы на течения в центральной части Керченского пролива.

Ключевые слова: математическая модель, ветровое течение.

ВВЕДЕНИЕ

Керченский пролив играет важную роль в формировании океанографического режима Черного и Азовского морей, которые он соединяет. В условиях современных изменений климата и антропогенных воздействий на морские экосистемы пролив служит естественным передаточным звеном для этих воздействий. Кроме того, характеристики экосистемы самого Керченского пролива подвержены существенным изменениям, что не может не сказаться на характере его хозяйственного использования. Систематическое изучение течений в Керченском проливе, соединяющем Азовское и Черное моря, имеет принципиальное значение для продвижения в понимании физической природы изменчивости циркуляции вод и ее влияния на изменчивость климата региона.

Режим уровня вод в Керченском проливе складывается под воздействием двух основных факторов: колебаний уровня Черного и Азовского морей и ветровой ситуации, необходимо учитывать и особенности конфигурации берегов и рельефа дна. Действие ветра проявляется двояко: ветер, с одной стороны, вызывает колебания уровня как на концах пролива, так и в нем самом, что приводит к возникновению градиентных течений, а с другой стороны, непосредственно воздействует на водную поверхность и способствует за счет тангенциального трения изменению скорости, а иногда и направления течения. Основная роль в формировании поля

течений в Керченском проливе принадлежит ветру, господствующему над акваторией всего бассейна и над проливом, разности уровней на концах пролива, обусловленной сгонами и нагонами, и различием в пресном балансе Черного и Азовского морей.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Керченский пролив имеет очень сложную береговую линию, изрезанную заливами, косами, а наличие острова Тузла делает область расчета неодносвязной. Также существенно то, что пролив характеризуется неоднородными глубинами. В судоходной части Керченского пролива глубины составляют 8–10 м, а в южной его части – до 19 м. В то же время в прибрежных районах, Таманском и Динском заливах глубина составляет 0,5–4 м. В связи с этим для численного исследования течений в данном водоеме использовалась двухслойная модель гидродинамики [1]. Данная методика была успешно применена к расчету течений в Азовском море, поскольку, как следует из батиметрической карты Азовского моря, составленной академиком Г.Г. Матишовым [2], Азовское море в полной мере обладает указанной особенностью неоднородности глубин. Суть предлагаемого подхода заключается в следующем.

Исходная трехмерная область моделирования – водная толща водоема – ограничена сверху поверхностью моря, а снизу донной поверхностью. Проведем горизонтальную секущую плоскость P , отстоящую от невозмущенной поверхности водоема P_0 на глубине, равной максимальной глубине мелководья, и разобьем всю область моделирования на два слоя – верхний I и нижний II (рис. 1).

Слой I – это все побережье и верхний слой открытого моря, слой II – это нижний слой водной толщи.

¹ Южный научный центр Российской академии наук, 344006 Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41.

² Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, 183010 Мурманск, ул. Владимирская, 17.

³ Институт аридных зон Южного научного центра РАН, 344006 Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41; e-mail: chikin@sfn.ru

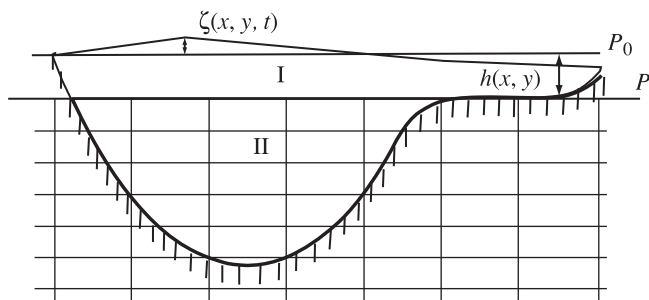


Рис. 1. Вертикальный разрез исследуемого водоема

Движение воды в верхнем слое описывается уравнениями мелкой воды с добавлением членов, описывающих взаимодействие слоев:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial u_s}{\partial y} - \Omega v_s = \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 u_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_s}{\partial y^2} \right) + \\ + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H} + F_x(x, y), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial v_s}{\partial x} + v_s \frac{\partial v_s}{\partial y} - \Omega u_s = \\ = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 v_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_s}{\partial y^2} \right) + \\ + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H} + F_y(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial H u_s}{\partial x} + \frac{\partial H v_s}{\partial y} = 0. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3)

$$u_s = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u dz, \quad v_s = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} v dz, \quad H = h + \zeta;$$

$h = h(x, y)$ – глубина мелководного слоя; $u_s = u_s(x, y, t)$, $v_s = v_s(x, y, t)$ – скорости в слое I; функции $F_x(x, y)$ и $F_y(x, y)$ описывают взаимодействие верхнего и нижнего слоев между собой; τ_{sx} , τ_{sy} – проекции на оси OX и OY силы трения ветра о поверхность водоема; τ_{bx} , τ_{by} – проекции на оси OX и OY силы трения жидкости о дно (или о глубоководный слой воды). Эти величины зависят от скорости ветра $\bar{W}_B = \{W_x; W_y\}$ и течения $\bar{W}_T = \{u_s; v_s\}$ и определяются так [3]:

$$\bar{\tau}_s = \gamma |\bar{W}_B| |\bar{W}_B|, \quad \bar{\tau}_b = \beta |\bar{W}_T| |\bar{W}_T|,$$

где $|\bar{W}_B| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$, $|\bar{W}_T| = \sqrt{u_s^2 + v_s^2}$, $\beta(x, y)$ – коэффициент трения верхнего слоя жидкости о дно

(или о глубоководный слой), γ – коэффициент трения ветра о слой I.

Движение воды в нижнем слое описывается системой, состоящей из уравнений количества движения и уравнения неразрывности среды:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - \Omega v = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial u}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \Omega u = \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v_{xy} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_z \frac{\partial v}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (6)$$

К системе уравнений (4)–(6) добавляется уравнение гидростатического давления

$$p = g\rho(\zeta - z) + p_a. \quad (7)$$

В (4)–(7) $u = u(x, u, z, t)$, $v = v(x, u, z, t)$, $w = w(x, y, z, t)$ – компоненты вектора скорости; x, y, z, t – пространственные переменные и время соответственно; $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – возмущение уровня воды; $p_a = p_a(x, y)$ – атмосферное давление; Ω – коэффициент Кориолиса; v_{xy} , $v_z(z)$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости соответственно; ρ – плотность воды; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Граничные условия задаются следующим образом. На твердой границе задается условие скольжения

$$\mathbf{V}_n = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{V}_\tau}{\partial \bar{n}} = 0,$$

где \mathbf{V}_n – нормальная составляющая вектора скорости, \mathbf{V}_τ – касательная составляющая вектора скорости.

На границе с атмосферой задается сила трения ветра о поверхность водоема, которая выносится в правую часть уравнений (1), (2). На поверхности слоя II ставятся условия

$$u = u_s, \quad v = v_s, \quad w = 0.$$

На открытых границах – границе с Азовским морем на севере и Черным морем на юге – значения скоростей на каждом временном слое задавались из условия равенства потоков соответственно в сечении $A-A$ и на северной границе, сечении $B-B$ и на южной границе (рис. 2). Такая процедура позволила улучшить выполнение закона сохранения массы, который несколько нарушался при использовании конечно-разностных схем. Сечения $A-A$ и $B-B$ вы-

браны там, где влияние перепада уровня поверхности воды на поток мало.

В качестве начальных данных можно задавать какое-либо известное распределение скоростей $u = u^0, u_s = u_s^0, v = v^0, v_s = v_s^0, w = w^0, \zeta = \zeta^0$ или считать эти скорости нулевыми.

КАЛИБРОВКА МОДЕЛИ

Южный научный центр РАН занимается сбором океанографических данных по Азовскому морю, Керченскому проливу и прилегающей акватории Черного моря. Результатом этой работы стало создание базы первичных океанографических данных и наблюдений.

Для анализа течений использовалась база данных Южного научного центра по Керченскому проливу, которая содержит 13 877 записей данных наблюдений за течениями с 1923 по 1974 гг. (табл. 1). В базе данных находится следующая информация: координаты станции, дата и время, глубина, горизонт, скорость и направление ветра, скорость и направление течения.

С помощью геоинформационной системы были выделены и проанализированы четыре характерных района с наиболее сильно выраженными течениями.

Район I: порт Крым – порт Кавказ. Это самое узкое место Керченского пролива, ширина около 4 км, и поэтому скорости течений здесь наиболее высоки. Площадь данного участка приблизительно

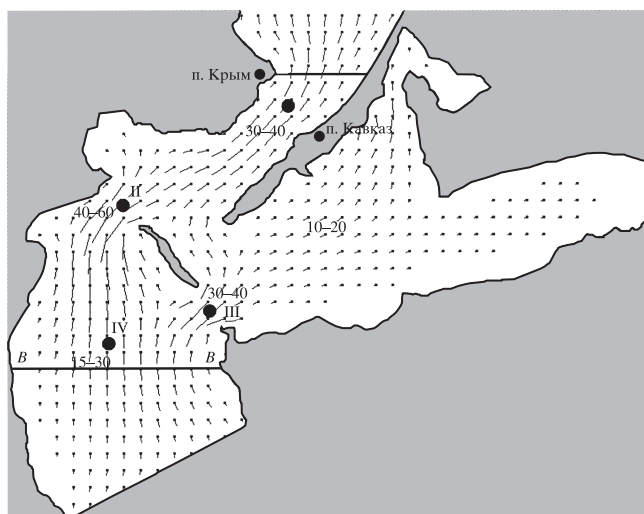


Рис. 2. Расположение метеорологических станций в Керченском проливе, натурные данные которых использовались в модели, а также картина течений (см/с) в Керченском проливе по расчетам на 30.06. 1927 г.

равна 26 км². В районе всего находится 37 станций наблюдений, за весь рассмотренный период на них проведено 5326 измерений. Через район проходит Еникальский канал, поэтому максимальная глубина составляет 10 м, а средняя 4 м.

Район II: мыс Белый (Ак-Бурун) – остров Тузла. Район занимает площадь, равную 12 км². В районе находится 18 станций, на которых проведено 2806 измерений. Через район также проходит судо-

Таблица 1. Распределение измерений по годам и месяцам

Месяц \ Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1923	–	–	–	–	–	–	6	27	–	–	–	–
1924	–	–	–	–	51	15	29	12	19	24	12	9
1925	–	–	16	20	35	31	23	30	58	21	–	90
1926	–	–	–	–	–	–	32	175	147	112	72	105
1927	41	–	15	73	354	633	468	573	818	639	534	52
1928	6	–	45	324	53	18	1040	1081	755	63	57	36
1929	24	–	6	24	47	90	85	150	308	6	45	33
1930	62	28	57	15	–	73	39	96	30	39	39	–
1931	–	–	–	36	–	168	144	42	51	6	3	6
1932	–	–	–	–	–	5	109	69	7	58	53	42
1933	–	–	–	–	5	23	59	76	17	103	41	–
1934	–	–	3	32	6	–	165	53	47	7	43	–
1935	–	–	–	–	–	51	68	113	171	113	–	–
1948	–	–	–	–	–	–	–	–	50	57	–	–
1949	–	–	–	–	–	–	103	56	605	–	–	–
1958	87	87	81	93	51	56	–	87	15	15	30	–
1970	–	–	–	–	–	28	–	–	–	–	–	–
1974	–	–	–	–	60	55	–	–	76	94	76	–
Сумма	220	115	223	417	737	1246	2370	2640	3174	1357	1005	373

ходный Еникальский канал, максимальная глубина около 10 м, средняя 4 м.

Район III: мыс Тузла – остров Тузла. Площадь 19 км². В районе расположены 35 станций с 922 измерениями. Данный район Керченского пролива является мелководным, максимальная глубина 4 м, средняя – менее 3 м. В 1925 г. после сильного шторма в косе образовалась промоина, и Тузла стала островом. Сразу же после прорыва ширина Тузлинской промоины составляла 300 м, к 1950 г. она увеличилась до 3 км, а в конце 1970-х гг. достигла почти 4 км. В рассматриваемый период с 1925 по 1974 гг. Тузлинской дамбы не существовало.

Район IV: мыс Малый – мыс Тузла. Район расположен юго-западнее острова Тузла. Он содержит 310 измерений на 7 станциях. Максимальная скорость течения, зарегистрированная в этом районе, составляет 42 см/с, а средняя – 13 см/с. В связи с непосредственной близостью Черного моря средняя глубина в районе около 10 м.

Так как после строительства дамбы в 2003 г. натурные данные по гидродинамике не собирались, то настройка модели проводилась без учета современной береговой линии по натурным данным, полученным до 2003 г. Калибровка модели проводилась по данным на метеорологических станциях I, II, III, IV (рис. 2), при этом выбирались натурные данные за те даты наблюдений, когда эти данные существовали одновременно хотя бы на трех рассматриваемых станциях. Этот критерий оказался очень жестким, и количество наблюдений, к сожалению, резко сократилось. Данные, по которым калибровалась модель, относились к 1926, 1927 и 1934 гг. Затем на настроенной модели проводились расчеты течений с учетом построенной дамбы.

В силу относительно небольших геометрических размеров Керченского пролива предполагалось, что ветровое поле над всей акваторией постоянно и равномерно. Оценка погрешности проводилась с одновременным учетом данных по всем четырем метеостанциям

$$\delta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^4 (U_{inat} - U_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 U_{inat}^2}}$$

Задача решается конечно-разностными методами с использованием противопотоковых неявных схем. Расчеты проводились на разностной сетке с шагом 60 м по горизонтали и 1 м по вертикали, что дало порядка 9 000 000 ячеек. После индексации ячеек в расчетной области число неизвестных в каждом уравнении стало равным примерно 202 000 для мелководного слоя и 626 000 для глубоководного слоя.

Рассчитанные поля скоростей принимались к рассмотрению, если общая (по четырем метеостанциям) погрешность не превышала 50%. В противном случае считалось, что при рассматриваемой ветровой ситуации на течение в проливе сильное влияние оказывают факторы, которые математическая модель не учитывает, например, сейшевые колебания. В таблице 2 приведена только часть сравниваемых наблюдаемых и вычисленных скоростей течения, удовлетворяющих данному условию, указаны даты наблюдений и станции, где эти наблюдения проведены.

На рисунке 2 показано поле скоростей, полученное на 30.06.1927, когда действовал се-

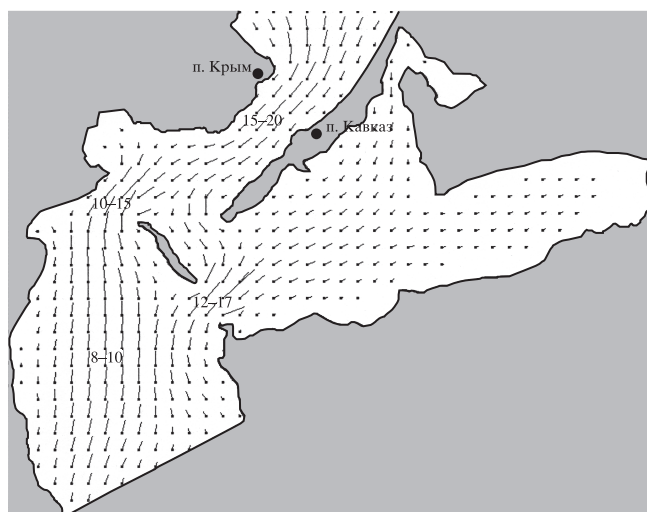


Рис. 3. Поле скоростей (см/с) в Керченском проливе при отсутствии дамбы вдоль косы Тузла

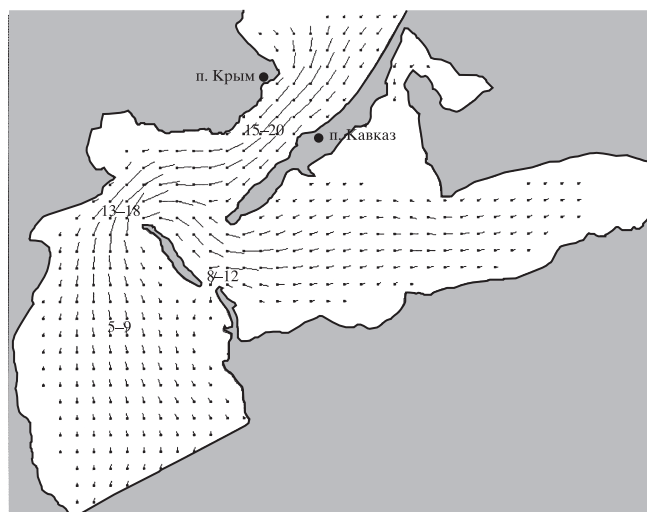


Рис. 4. Поле скоростей (см/с) в Керченском проливе при наличии дамбы вдоль косы Тузла

Таблица 2. Замеренные и рассчитанные скорости течения

Дата	Станции	Нап. данные	Расчет	Погр., %	Дата	Станции	Нап. данные	Расчет	Погр., %
10.09.1926	I	30	28	6,2	27.08.1927	I	24	23	2,9
	II	51	45	12,1		II	69	38	44,9
	III	44	26	41,4		III	29	32	11,8
	IV	18	18	0,1		IV	26	40	54,6
Общая погрешность 25,5%					Общая погрешность 41,4%				
11.06.1927	I	52	38	27,8	31.08.1927	I	18	19	5,7
	II	97	55	42,9		II	55	25	54,0
	III	78	41	46,8		III	29	21	29,1
	IV	–	31	–		IV	10	15	49,4
Общая погрешность 42,4%					Общая погрешность 47,7%				
22.06.1927	I	13	13	1,6	26.09.1927	I	20	29	46,7
	II	43	19	54,8		II	54	34	36,9
	III	68	64	5,3		III	44	32	28,4
	IV	9	16	79,4		IV	18	24	31,6
Общая погрешность 30,4%					Общая погрешность 34,7%				
30.06.1927	I	33	42	26,2	28.09.1927	I	19	18	3,4
	II	–	56	–		II	27	22	17,1
	III	50	34	32,3		III	12	23	91,0
	IV	13	20	53,2		IV	–	13	–
Общая погрешность 32,0%					Общая погрешность 33,8%				
08.08.1927	I	13	13	1,2	14.10.1927	I	17	6	64,7
	II	36	30	15,7		II	–	14	–
	III	32	25	23,4		III	21	23	8,5
	IV	13	15	19,1		IV	11	14	23,0
Общая погрешность 19,4%					Общая погрешность 39,7%				

верный ветер со скоростью 4–5 м/с (вектор скорости исходит из точки, обозначенной черным квадратиком). Наблюдается сгон воды из Таманского и Динского заливов.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Создание дамбы вдоль косы Тузла в 2003 г. привело к изменению течений в центральной части Керченского пролива. К сожалению, за период с 2003 г. по настоящее время натурных данных по скоростям течений не имеется.

На рисунках 3 и 4 показаны поля скоростей при наличии или отсутствии дамбы в случае действия юго-западного ветра со скоростью 8 м/с в течение 8 часов.

Сравнивая полученные поля течений, можно установить подобие этих течений в проливе в целом. Исключение составляют течения в окрестности о. Тузла. Так, например, при отсутствии дамбы примерно половина объема воды, проходящей через разрез III, нагоняется в Таманский залив, а другая половина движется вдоль северной стороны острова Тузла в сторону Азовского моря (рис. 3). При наличии дамбы расход воды через разрез III значительно сокращается, и вода в Таманский залив пос-

тупает в основном с северной стороны о. Тузла, но движется уже в юго-восточном направлении (рис. 4).

Трехмерность модели позволяет рассчитать скорость течения на любом горизонте от поверхности до дна. Численно получена динамика изменения эпюры скоростей в центре Павловской узости при описанной выше смене течений (рис. 5). В первые три часа происходит ослабление северного течения, затем, начиная с четвертого часа, начинает набирать силу южное течение. Это происходит на всех горизонтах – от поверхности до дна.

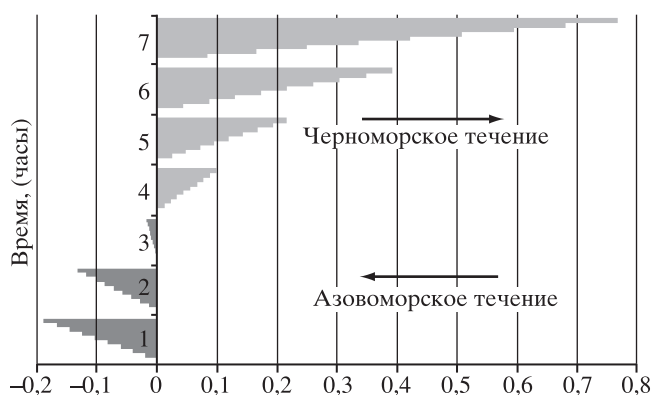


Рис. 5. Изменение во времени эпюры скоростей в Павловской узости

ВЫВОДЫ

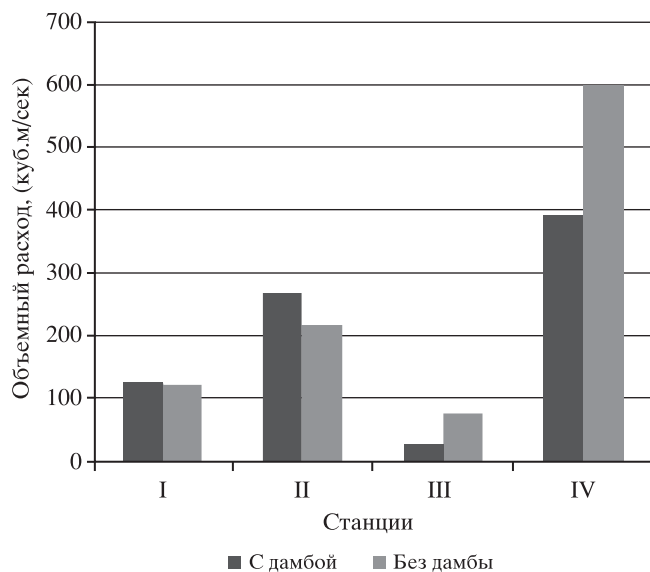


Рис. 6. Влияние дамбы на расход воды

С использованием трехмерной модели было проведено численное исследование влияния дамбы на расход воды. В каждой из четырех станций расход вычислялся в поперечном сечении. Установлено, что на разрезе I наличие или отсутствие дамбы не оказывают существенного влияния (рис. 6). На разрезе II расход увеличился при наличии дамбы, на разрезах III и IV – уменьшился. Такое перераспределение потока, вероятно, объясняется тем, что наличие дамбы естественным образом резко сократило поступление воды через разрез III, а это привело к уменьшению потока и через разрез IV. В то же время возросла нагрузка на западный створ пролива, где располагается разрез II, а за счет того, что уменьшился нагон воды в Таманский залив, поток через разрез I не изменился.

Рассмотренная двухслойная математическая модель ветрового течения позволяет получить адекватную оценку основных гидрологических параметров исследуемых водоемов. Разбиение области расчета на два слоя существенно упрощает решение задачи, если водоем наряду с глубоководной частью содержит обширные районы мелководья. Предлагаемая методика построения модели позволяет в кратчайшие сроки получить оценочные картины гидрофизических параметров. Простая численная реализация построенной модели осуществляется за счет использования конечно-разностных методов на равномерной прямоугольной сетке без предварительного преобразования расчетной области из нерегулярной в регулярную область. Время, затраченное на адаптацию программы для нового водоема, ее отладку, проведение тестовых расчетов и получение первых результатов, составляет всего несколько дней в зависимости от степени готовности входных данных, к которым относятся карта глубин исследуемого водоема, а также характерные для данного водоема метеорологические параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чикин А.Л. Математическая модель ветровых течений в Керченском проливе // Вестник Южного научного центра РАН. 2009. Т. 5. № 2. С. 58–63.
2. Матишов Г.Г. Батиметрия и закономерности формирования рельефа дна Азовского моря // Экосистемные исследования Азовского, Черного, Каспийского морей. Т. VIII. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2006. С. 31–42.
3. Чикин А.Л., Чикина Л.Г. Моделирование процесса переноса и оседания ила в подходных судоходных каналах (на примере Таганрогского залива) // Вестник Южного научного центра. 2011. Т. 7. № 2. С. 45–48.

STUDY OF WIND CURRENTS IN THE KERCH STRAIT APPLYING MATHEMATICAL MODELING

Academician RAS G.G. Matishov, A.L. Chikin

Approach to modeling of wind currents in the Kerch Strait, applying a two-layer mathematical simulation, has been described. To calibrate mathematical model and analyze the currents, the database of the Southern Scientific Center on the Kerch Strait was used. Different flow patterns of wind situations were obtained. Effect of the presence or absence of a dam along the Tuzla Spit on the flow and currents in the Central Kerch Strait has been studied.

Key words: mathematical modeling, wind current.

REFERENCES

1. Chikin A.L. 2009. [Mathematical of wind currents in the Kerch Strait]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 5(2): 58–63. (In Russian).
2. Matishov G.G. 2006. [Bathymetry and regularities of formation of the Sea of Azov bottom relief]. In: *Ekosistemnye issledovaniya Azovskogo, Chernogo, Kaspiyskogo morey*. [Ecosystem studies of the Sea of Azov, Black Sea, and the Caspian Sea]. Vol. VIII. Apatity, Karelian Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 31–42. (In Russian).
3. Chikin A.L., Chikina L.G. 2011. [Modelling of siltage and sedimentation process in navigation canals (for example, the Taganrog Bay)]. *Vestnik Yuzhnogo Nauchnogo Tsentra*. 7(2): 45–48. (In Russian).