

Ю.Н.Рябцев

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА**

На основе численных экспериментов описана структура течений в Керченском проливе, возбуждаемых ветрами северо-западного, северного, северо-восточного и восточного направлений. Выявлено наличие струйных течений прижатых к Кавказскому или Крымскому берегу в зависимости от направления ветра. Выявлено наличие циркуляций различного знака в Южной части пролива и в Таманском заливе. Проанализировано изменение водообмена на разрезе между косой Тузлой и косой Чушкой, произошедшее в результате строительства дамбы. Рассмотрены различные сценарии изменения скорости течений в Тузлинской промоине после создания дамбы в зависимости от различной глубины промоины при ветрах различных направлений.

Настоящая работа является продолжением и дополнением работы [1], в которой подробно изложены постановка и обоснование задачи по расчету течений в Керченском проливе.

Расчет течений выполнялся на сетке с 50 м разрешением по горизонтали, позволяющей учесть особенности циркуляции в районе косы Тузла. Вследствие мелководности Керченского пролива (рис.1) уровень моря быстро реагирует на ветровое влияние, вклад же термохалинных факторов в формирование течений является незначительным, т.е. жидкость можно считать однородной и использовать баротропную модель. Движение в проливе определяется заданным расходом воды, протекающей через пролив, и действием ветра.

Была использована линейная теория установившихся течений в однородной жидкости без горизонтального обмена количеством движения [2], обобщенная на случай учета внутреннего трения, пропорционального скорости течения [3]. Уравнения и граничные условия запишем в следующем виде

$$-fv = g\zeta_x + Au_{zz} - ru, \quad fu = g\zeta_y + Av_{zz} - rv; \quad (1)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0. \quad (2)$$

Здесь u, v, w – оставляющие скорости течения вдоль осей координат x, y, z , направленных на восток, север и вертикально вниз соответственно; g – ускорение силы тяжести; A – коэффициент вертикальной вязкости, который может зависеть от горизонтальных координат; $f = \text{const}$ – параметр Кориолиса; r – коэффициент внутреннего (горизонтального) трения; ζ – понижение уровня. Индексы внизу означают дифференцирование.

На поверхности моря, представляющей собой поверхность тока, тангенциальное напряжение ветра уравнивается турбулентным трением в морской воде, так что

$$\text{при } z = 0 \quad Au_z = -\tau^x, \quad Av_z = -\tau^y, \quad w = 0,$$

где τ^x, τ^y – составляющие тангенциального напряжения ветра, отнесенные к плотности морской воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

© Ю.Н.Рябцев, 2005

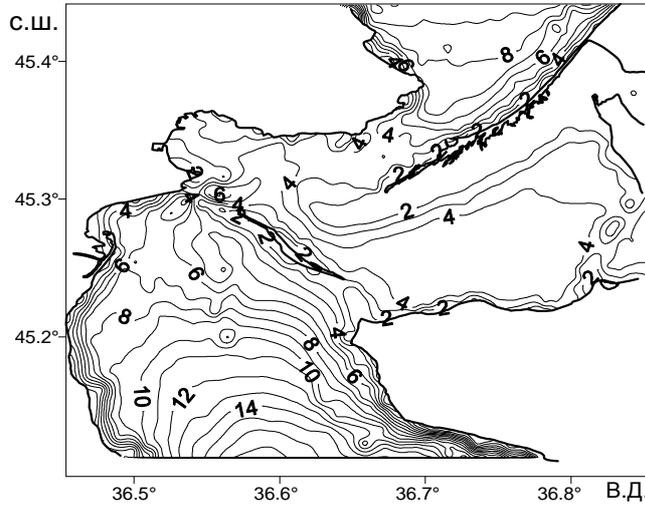


Рис. 1. Топография дна в Керченском проливе (м).

Компоненты τ^x, τ^y связаны с компонентами скорости ветра V_a^x, V_a^y формулами

$$\begin{aligned} \rho \tau^x &= \rho_a c_d V_a V_a^x, \\ \rho \tau^y &= \rho_a c_d V_a V_a^y, \end{aligned}$$

где $V_a = [(V_a^x)^2 + (V_a^y)^2]^{1/2}$ – модуль скорости ветра, $\rho_a = 0,00125 \text{ г/см}^3$ – плотность воздуха, $c_d = (0,7 + 0,08V_a)10^{-3}$ – коэффициент сопротивления (при $V_a \geq 5 \text{ м}$).

На дне принимается условие прилипания: при $z = H(x, y) \quad u = v = w = 0$.

Проинтегрируем теперь уравнение неразрывности (2) по вертикали от поверхности до дна. С учетом граничных условий получим интегральное уравнение неразрывности

$$U_x + V_y = 0, \quad (3)$$

где $U = \int_0^H u dz, V = \int_0^H v dz$ – составляющие полного потока.

Далее с помощью уравнений движения выразим составляющие полного потока через наклоны уровня. Для этого перепишем в комплексной форме уравнения движения и граничные условия на поверхности моря и на дне

$$W_{zz} - j^2 W = G,$$

$$\text{при } z=0 \quad AW_z = -\tau, \quad \text{при } z=H \quad W=0,$$

где $W = (u + iv)$ – комплексная скорость, $j^2 = (r + if)/A, G = -g(\zeta_x + \zeta_y)/A, \tau = \tau^x + i\tau^y, i^2 = -1$.

Решение уравнения (2) имеет вид

$$W = u + iv = (\tau/jA) \text{sh } j(H-z) / \text{ch } jH - (G/j^2) (1 - \text{ch } jz / \text{ch } jH).$$

Интегрируя его по вертикали, получим выражение для полного потока

$$\begin{aligned} U + iV &= (\tau/j^2) (1 / \text{ch } jH) - (GHA) (1 - \text{th } jH / jH); \\ U &= n \tau^x + m \tau^y + \vartheta \zeta_x + \lambda \zeta_y, \quad V = -m \tau^x + n \tau^y - \lambda \zeta_x + \vartheta \zeta_y. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставляя выражения (4) в интегральное уравнение неразрывности (3), получим двумерное эллиптическое уравнение для уровня

$$(\vartheta \zeta_x)_x + (\vartheta \zeta_y)_y + (\lambda \zeta_y)_x - (\lambda \zeta_x)_y = -(n \tau^x + m \tau^y)_x + (m \tau^x - n \tau^y)_y.$$

Выведем теперь двумерное эллиптическое уравнение для интегральной функции тока Ψ , которую можно ввести в силу бездивергентности полного потока (3), а именно:

$$U = -\Psi_y, \quad V = \Psi_x.$$

Разрешая (4) относительно наклонов уровня, получим соотношения

$$\begin{aligned}\zeta_x &= -m'\tau^x + n'\tau^y - \lambda'\psi_x - \vartheta'\psi_y; \\ \zeta_y &= -n'\tau^x - m'\tau^y + \vartheta'\psi_x - \lambda'\psi_y\end{aligned}\quad (5)$$

где $n' = n\lambda' - m\vartheta'$, $m' = m\lambda' + n\vartheta'$, $\lambda' = \lambda/(\lambda^2 + \vartheta^2)$, $\vartheta' = \vartheta/(\lambda^2 + \vartheta^2)$.

Исключая уровень из (5) с помощью перекрестного дифференцирования, получим искомое уравнение для функции ψ

$$\begin{aligned}(\vartheta'\psi_x)_x + (\vartheta'\psi_y)_y - (\lambda'\psi_y)_x + (\lambda'\psi_x)_y = \\ = (n'\tau^x + m'\tau^y)_x + (-m'\tau^x - n'\tau^y)_y.\end{aligned}\quad (6)$$

Также необходимо сформулировать условия на боковых границах рассматриваемой области. Условия для функций ψ следуют из граничных условий для полных потоков. На твердых границах бассейна ставится условие непротекания, т.е. равенство нулю нормальной составляющей полного потока. Из этого условия следует задание «косой» производной для уровня $\vartheta \partial \zeta / \partial n + \lambda \partial \zeta / \partial l = n\tau^n + m\tau^l$ или задание касательной производной для интегральной функции тока

$$\partial \psi / \partial l = 0. \quad (7)$$

Здесь $\partial / \partial n$ и $\partial / \partial l$ – производные по нормали и по касательной соответственно; τ^n , τ^l – нормальная и касательная к границе составляющие напряжения ветра.

Из условия (7) следует, что на твердых границах функция тока ψ должна быть постоянной величиной. Однако из-за неодносвязности рассматриваемой области константы на западной и восточной границах Керченского пролива и на контуре о-ва Тузла должны быть разными. Примем для определенности, что

$$\text{на восточной границе} \quad (\psi)_{\text{вост}} = 0, \quad (8)$$

$$\text{на западной границе} \quad (\psi)_{\text{зап}} = Q = \text{const}, \quad (9)$$

$$\text{на о-ве Тузла} \quad (\psi)_{\text{Тузла}} = C = \text{const}. \quad (10)$$

Полный расход воды Q задается априори.

Величина константы C , т.е. расход воды между о-вом Тузла и восточной границей пролива, определяется из решения задачи. Для этого используется условие В.М.Каменковича [4] непрерывности уровня на любом замкнутом контуре, окружающем остров

$$\oint d\zeta = \oint (\partial \zeta / \partial x) dx + (\partial \zeta / \partial y) dy = 0.$$

Определенную сложность представляет собой выбор условий на открытых границах Керченского пролива. Задание уровня на открытых границах эквивалентно заданию расхода воды через пролив Q . Если задача сводится к решению уравнения для интегральной функции тока и величина Q известна, то наиболее естественным условием на жидких границах является условие свободного протекания (для полного потока)

$$(\partial \psi / \partial n)_{\text{южн}} = 0, \quad (\partial \psi / \partial n)_{\text{сев}} = 0. \quad (11)$$

т.е. предполагается, что полный поток направлен по нормали к границе.

Решение уравнения (6) для интегральной функции тока, которое запишем в виде $L(\psi) = F$, при условиях (8) – (11) можно представить в виде суммы решений трех отдельных задач

$$\begin{aligned} L(\psi_1) &= F, \\ (\psi_1)_{\text{вост}} &= 0, \quad (\psi_1)_{\text{зап}} = 0, \quad (\psi_1)_{\text{Гузла}} = 0, \quad (\partial \psi_1 / \partial n)_{\text{южн}} = (\partial \psi_1 / \partial n)_{\text{сев}} = 0; \\ L(\psi_2) &= 0, \\ (\psi_2)_{\text{вост}} &= 0, \quad (\psi_2)_{\text{зап}} = 1, \quad (\psi_2)_{\text{Гузла}} = 0, \quad (\partial \psi_2 / \partial n)_{\text{южн}} = (\partial \psi_2 / \partial n)_{\text{сев}} = 0; \\ L(\psi_3) &= 0, \\ (\psi_3)_{\text{вост}} &= 0, \quad (\psi_3)_{\text{зап}} = 0, \quad (\psi_3)_{\text{Гузла}} = 1, \quad (\partial \psi_3 / \partial n)_{\text{южн}} = (\partial \psi_3 / \partial n)_{\text{сев}} = 0. \end{aligned}$$

В силу линейности исходной задачи: $\psi = \psi_1 + Q\psi_2 + C\psi_3$.

Подставляя это выражение в соотношения (5) для наклонов уровня и затем в условие В.М.Каменковича, получим линейное алгебраическое уравнение для определения константы C . Вычислив эту константу, получим искомую интегральную функцию тока ψ .

Численный алгоритм подробно описан в [1]. Отметим, что составляющие скорости течения рассчитывается по аналитическим формулам, причем она могут быть вычислены на любых горизонтах и вообще на любых поверхностях $z = \sigma H(x, y)$, $0 \leq \sigma \leq 1$.

Численный эксперимент. Использовалась равномерная сетка с шагами $\Delta x = 39,5$ м; $\Delta y = 55,5$ м. Минимальная глубина моря принималась равной 20 см. Коэффициент вертикальной вязкости A принимался постоянным и равным $A = 30$ см²/с. Коэффициент внутреннего трения принимался равным $r = 10^{-6}$ с⁻¹. Важность внутреннего трения в динамике Керченского пролива и обоснование выбора величины коэффициента r подробно обсуждаются в [5 – 7]. Параметр Кориолиса $f = 1,028 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹.

Расчеты проводились с условиями свободного протекания на открытых границах пролива.

В данной стационарной модели интегральная циркуляция определяется рельефом дна и особенностями поля ветра. Напряжение ветра полагаем равномерным, т.к. характерный масштаб изменения ветра значительно больше масштаба рассматриваемой области. Рассмотрены действие ветров северо-западного, северного, северо-восточного и восточного направлений. Скорость ветра принималась равной 8 м/с. Ветры северных направлений в районе Керченского пролива преобладают во все сезоны года за исключением весны. Наибольшей повторяемостью, силой и продолжительностью отличается северо-восточный ветер.

Одной из проблем при моделировании установившейся циркуляции в проливе является задание интегрального расхода Q . В [1] применен подход, основанный на использовании полуэмпирической зависимости расхода Q от скорости ветра. Эта зависимость получается из комбинации эмпирической формулы Э.Н.Альтмана [5, 6], связывающей осредненный за сутки перепад уровня моря на северной и южной границе пролива со среднесуточной скоростью ветра, и формулы, выведенной в рамках модели [7], связывающей искомый расход с этим перепадом уровня. Здесь же Q принимается постоянным и равным 10^8 см³/с.

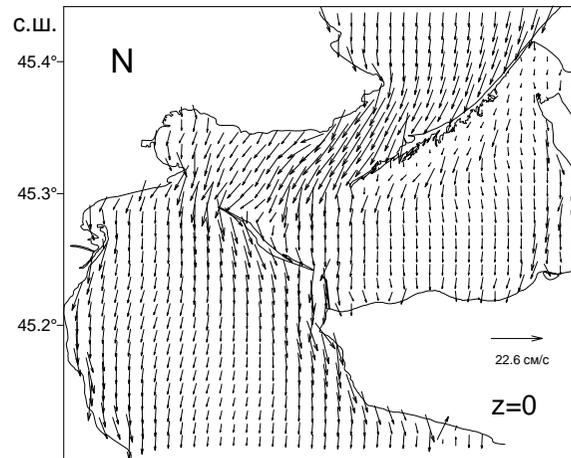
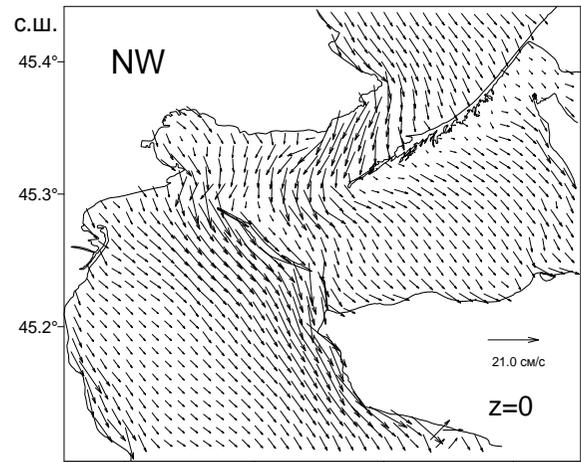
Обсуждение результатов. Для ветров северного направления характерна направленность течения из Азовского моря в Черное море. В северной, наиболее узкой, части пролива течения на всех горизонтах направлены одинаково: из Азовского моря в направлении Черного моря. В южной части Керченского пролива, в зависимости от направления ветра, также возможно течение струйного вида и циркуляция того или иного знака, причем с глубиной течение может перестраиваться и иметь направленность противоположную течению на поверхности (рис.2).

Основной поток в зависимости от направления ветра может интенсифицироваться в северной части пролива как у Кавказского побережья (при восточном, северо-восточном и отчасти северных ветрах), так и у Крымского побережья (при северо-западном ветре). В южной более широкой части пролива поведение основного потока более разнообразно. Может наличествовать циркуляция того или иного знака. При северо-восточном и восточном ветрах имеет место циклоническая циркуляция, при северном и северо-западном ветрах в придонном слое имеет место антициклоническая циркуляция. Интенсификация течения у Кавказского берега наблюдается при северо-западном и северном ветрах в сторону Черного моря и в обратную сторону при восточном ветре. А интенсификация течений у Крымского берега наблюдается при северо-восточном, северном и северо-западном (но при северном и северо-западном ветрах течения вдоль Кавказского побережья интенсивнее). Таким образом, при северном и северо-западном ветрах течение, попадая из Павловской узости в широкую часть пролива, разделяется на две ветки, причем часть идущая вдоль Кавказского берега имеет большую интенсивность. Поток, выходящий из северной части пролива, при подходе к косе Тузла разветвляется и обтекает его. По оценкам, через Тузлинскую промоину шириной порядка 4 км проходило 10 – 20 % транзитного водообмена между Черным и Азовским морями. Теперь, после строительства дамбы, Павловская узость выступает как основной канал водообмена между Черным и Азовским морями.

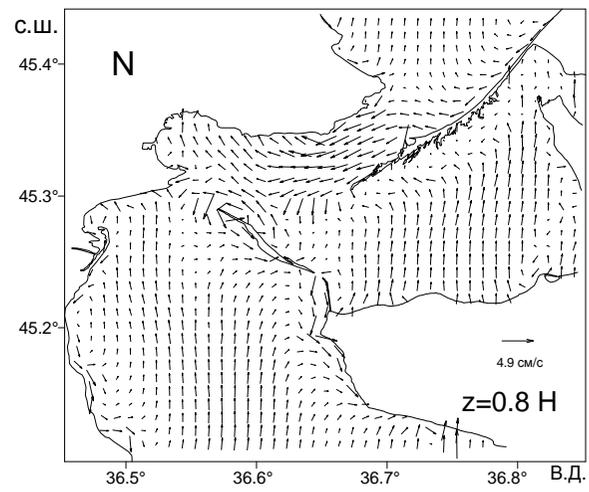
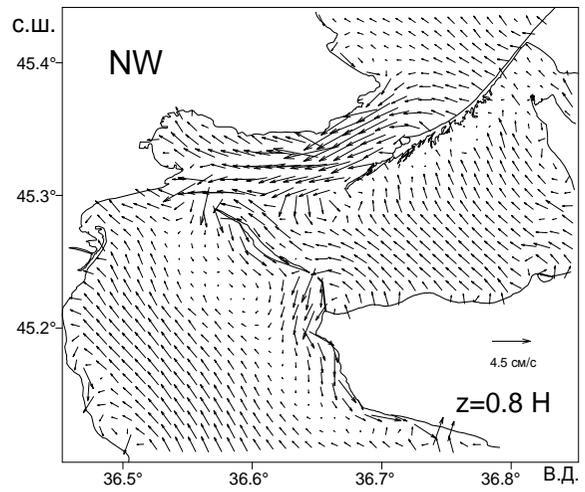
В Таманском заливе циркуляция представляет собой ряд круговоротов с очень слабой интенсивностью. Таманский залив превращен в существенно изолированный с юга бассейн.

При прохождении потока через Павловскую узость наблюдается заметное увеличение скорости течения. Это, видимо, связано с тем, что рельеф дна имеет здесь как бы порожек, т.е. уровень дна выше, чем перед узостью и за ней.

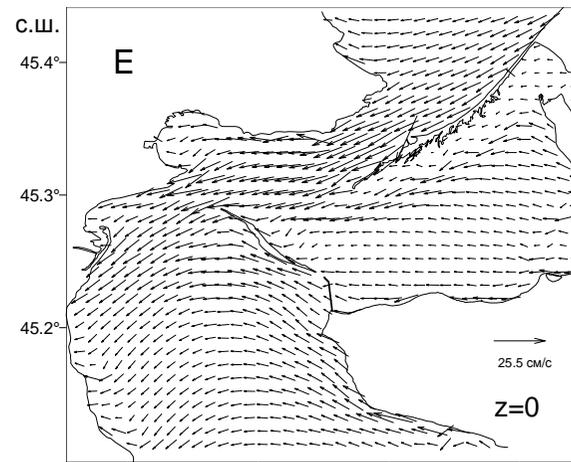
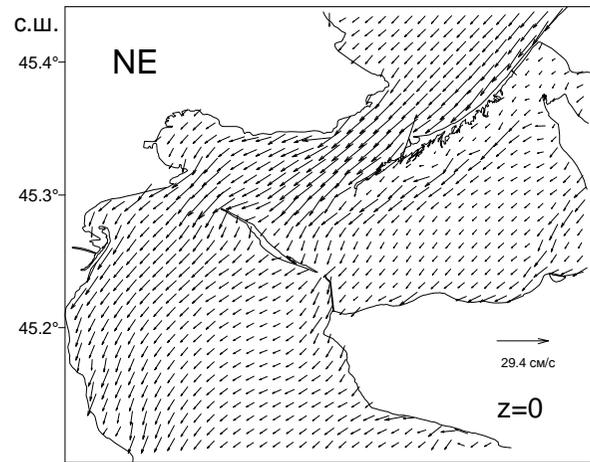
Исследовался вопрос влияния глубины Тузлинской промоины на скорости течений через нее. Как повлияли работы по углублению промоины? Проведены расчеты течений для глубин в промоине 0,9 – 1; 3 – 4; 8 – 10 м (глубины в прилегающем районе 3 – 4 м). Отметим, что глубины 0,4 – 1,5 м соответствуют исходной глубине Тузлинской промоины до строительства дамбы. Течение в промоине для всех вариантов, рассмотренных здесь, было направлено в сторону Черного моря по всей глубине (рис.3). Наиболее интенсивное течение имело место при наименьших глубинах, при увеличении глубины до 4 м величины скоростей уменьшались примерно вдвое, при дальнейшем увеличении глубины с 4 до 10 м интенсивность течения падала, но незначительно. Наибольших значений скорости течения на поверхности



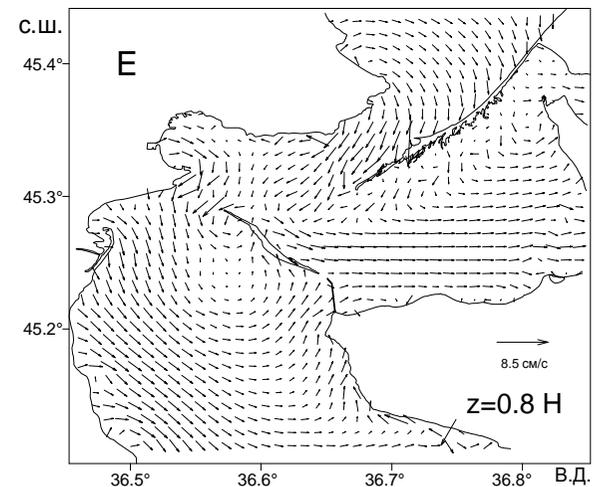
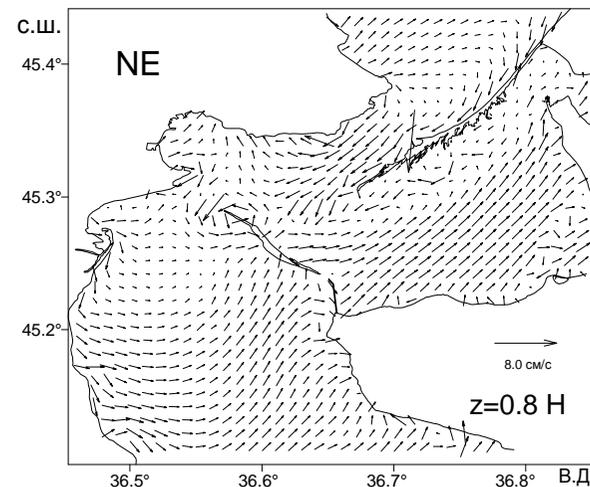
a



б



6

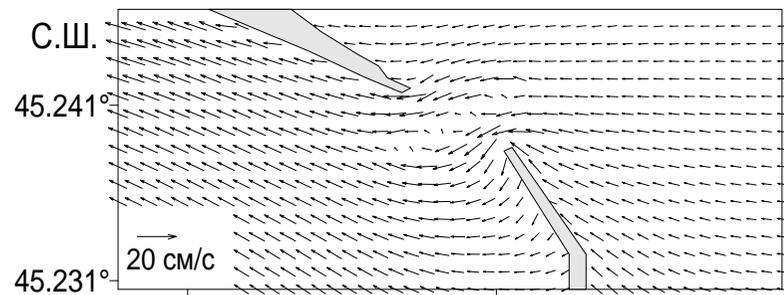
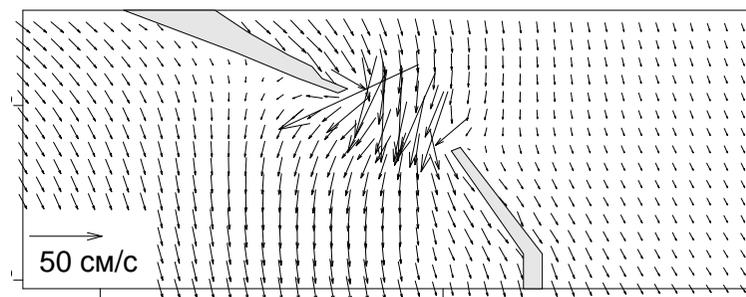
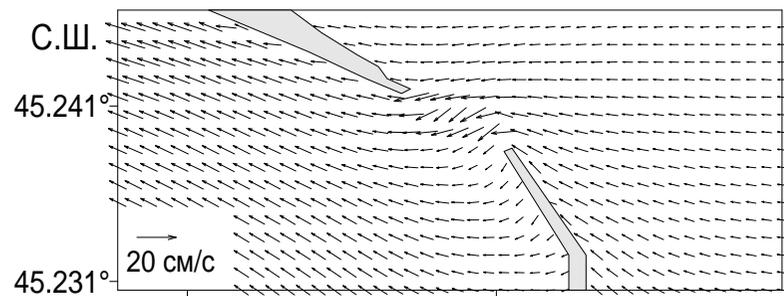


2

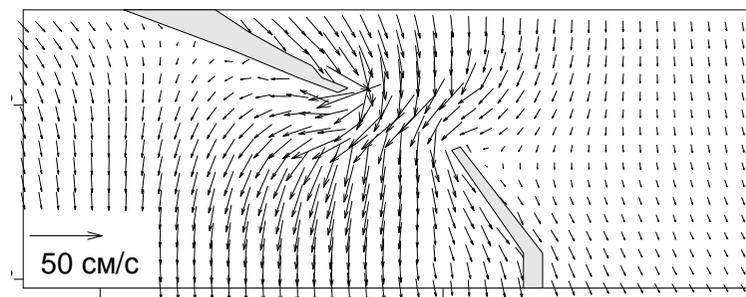
Р и с . 2 . Вектора скорости течения для северо-западного (a), северного (b), северо-восточного (c) и восточного (d) ветров на поверхности моря $z = 0$ (вверху) и на поверхности $z = 0,8H$ (внизу). В правом нижнем углу максимальный вектор скорости течения.

Продолжение рис.2.

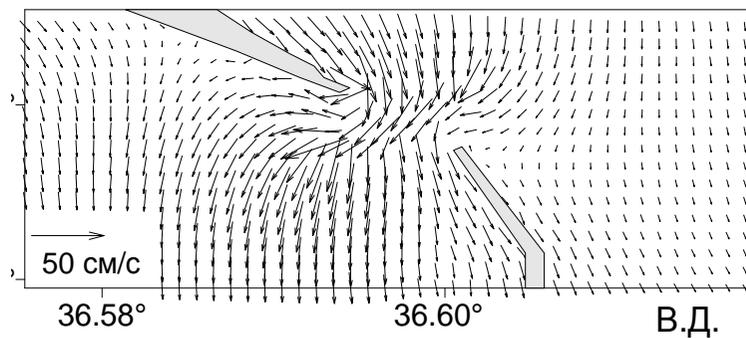
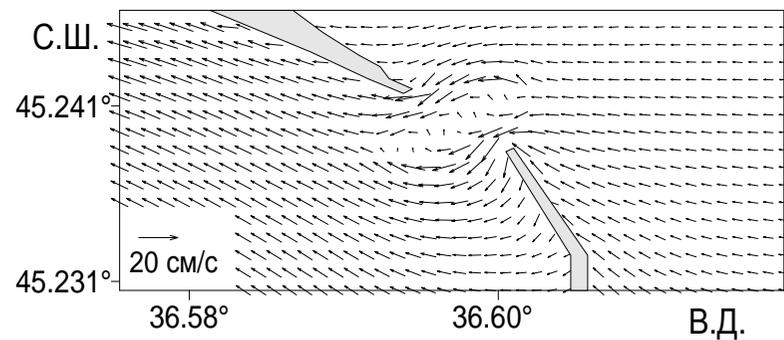
350



a



б



Р и с . 3 . Распределения течений между дамбой и косой Тузла для различных глубин дна в промоине (соответственно сверху вниз: 0,9 – 1; 3 – 4; 8 – 10 м) для ветра восточного (а) и северо-западного (б) направлений. Масштаб указан в левом нижнем углу рисунка.

достигали при северо-западном ветре (> 1 м/с). В табл. приведены максимальные значения скоростей на поверхности для рассмотренных направлений ветров и трех вариантов глубин промоины.

На рис.3 представлены распределения течений между дамбой и косой Тузла для различных глубин дна в промоине (соответственно сверху вниз: 0,9 – 1; 3 – 4; 8 – 10 м) для ветров восточного и северо-западного направления (масштаб на рисунках разный и указан в левом нижнем углу рисунка).

Отметим, что значения величин скоростей в данной работе ниже, чем в [1] и по данным натурных исследований и это связано с выбором коэффициентов вертикальной вязкости A и внутреннего трения, которые здесь другие, чем в [1]. Разумеется, величина скорости течения зависит и от величины скорости ветра.

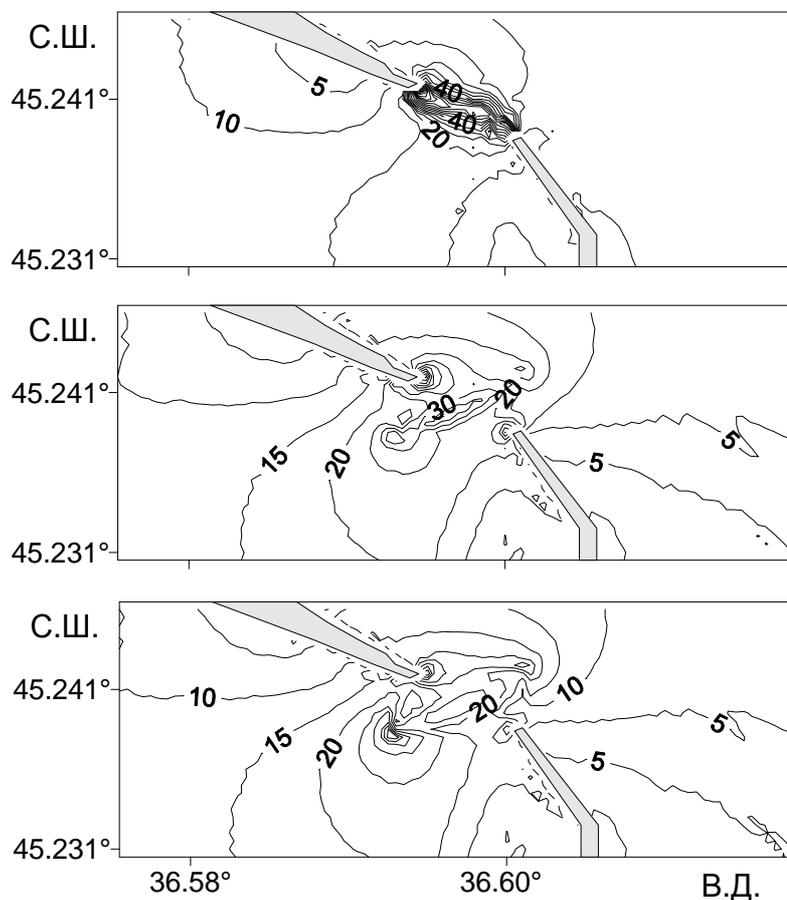
На рис.4 представлена картина пространственного распределения модуля скорости течений в районе канала между островом Тузла и дамбой.

Построение дамбы должно было сказаться на общем расходе воды через сечение расположенное между косой Тузла и косой Чушка. На рис.5 показано соотношение объемов, проходящих через эту область: состояние до и после построения дамбы. Как и следовало ожидать, основной поток уменьшился на 10,3; 13,1; 11,9 и 46,5 % для ситуаций с северо-западным, северным, северо-восточным и восточным направлениями ветров соответственно. Обратный поток наоборот незначительно вырос.

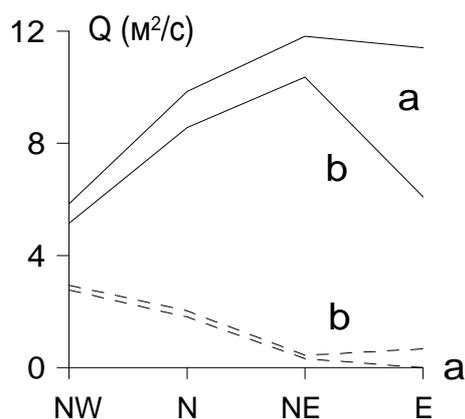
После строительства дамбы и проведения углубительных работ между дамбой и косой Тузла начался процесс интенсивного размыва южной оконечности косы. Согласно наблюдениям, величина размыва за первые месяцы составила приблизительно 800 м и затем только увеличивалась. Проведены расчеты с учетом изменения величины косы на 2000 м. Глубины на месте размыва предполагались равными от 3 до 1 м. На рис.6 показано соотношение объемов, проходящих через Тузлинскую промоину. После построения дамбы расход через Тузлинскую промоину, примерно, соответствует расходу, имевшему место до построения дамбы. Но после увеличения промоины за счет размыва расход через промоину для ветров восточного и северо-восточного направлений увеличивается на 29 %, а для ветров северного и северо-западного направлений остается, примерно, на том же уровне.

Т а б л и ц а . Максимальные величины скоростей (см/с) на поверхности моря и в придонном слое в Тузлинской промоине для различных направлений ветра.

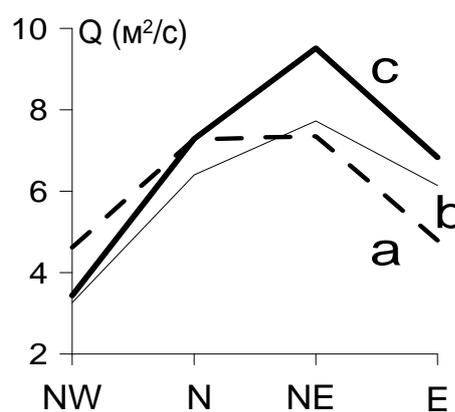
глубина, м	северо-западный	северный	северо-восточный	восточный
поверхность моря ($z = 0$)				
0,9 – 1	106,1	97,8	61,2	18,0
3 – 4	47,0	49,5	38,8	14,9
8 – 10	45,1	38,5	38,7	18,2
придонный слой ($z = 0,8H$)				
0,9 – 1	38,8	34,6	20,5	4,9
3 – 4	18,5	35,6	11,6	3,7
8 – 10	17,9	12,9	9,3	4,1



Р и с . 4 . Распределения модуля скорости течений в районе канала между о-вом Тузла и дамбой для различных глубин дна в промоине (соответственно сверху вниз: 0,9 – 1; 3 – 4; 8 – 10 м) при северо-западном ветре.



Р и с . 5 . Расход воды через разрез между косой Тузла и косой Чушка для различных направлений ветров (— — количество воды в направлении с севера на юг; ---- в обратном направлении).



Р и с . 6 . Расход воды через разрез между косой Тузла и дамбой для всех рассматриваемых направлений ветров: (а) до строительства дамбы, (б) с дамбой, (с) коса Тузла утратила 2000 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Шатино Н.Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– вып.10.– С.207-232.
2. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений.– М.: Изд. АН СССР, 1960.– 126 с.
3. *Михайлова Э.Н.* Об одном способе учета горизонтального обмена количеством движения в теории установившихся течений // Проблемы теории ветровых и термохалинных течений.– Севастополь: МГИ АН УССР, 1968.– С.137-144.
4. *Каменкович В.М.* Об интегрировании уравнений теории морских течений в не-одноосвязных областях // ДАН СССР.– 1961.– т.138, №5.– С.1076-1079.
5. *Альтман Э.Н.* Исследование водообмена между Черным и Азовским морями // Тр. ЛЮМ ГОИН.– 1972.– 10, №11.– С.3-47.
6. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– СПб: Гидрометеоздат, 1991.– С.291-324.
7. *Альтман Э.Н., Толмазин Д.М.* Метод расчета течений и водообмена в Керченском проливе // Океанология.– 1970.– 10, №3.– С.438-446.

Материал поступил в редакцию 22.02.2005 г.
После доработки 15.03.2005 г.