

Трехмерная модель бризовой циркуляции вод в Керченском проливе

Задача о расчете течений, обусловленных действием бризового ветра, обобщается на трехмерный случай. В приближении «твердой крышки» задача сводится к численному решению двумерного уравнения для интегральной функции тока (с комплексными коэффициентами) и к последующему расчету по аналитическим формулам компонент скорости течения.

Бриз задается действующим в узкой прибрежной полосе и представляет собой зональный ветер. Детально исследуются трехмерная структура и временная изменчивость течений у западной границы Керченского пролива.

Данная работа представляет собой обобщение на трехмерный случай исследования течений в Керченском проливе, вызванных действием нестационарного ветра [1]. Используется линейная модель периодических течений А.И. Фельзенбаума [2].

Моделированию циркуляции вод в Керченском проливе посвящено большое число работ, детальный обзор которых приведен в работе [3]. В статье [1] для расчета течений в Керченском проливе использовалась двумерная линейная модель. При этом рассматривалось движение, обусловленное суммарным действием стационарного ветра и периодического по времени бризового ветра. Здесь будем рассматривать линейную баротропную трехмерную модель течений в однородной жидкости с учетом рэлеевского трения, пропорционального скорости течения. Учет рэлеевского трения часто применяется в исследованиях динамики океана и атмосферы [4 – 6]. В частности, это позволяет объяснить структуру фоновое течения на севастопольском взморье [7].

Постановка задачи. Уравнения трехмерной нестационарной модели запишем в виде

$$u_t - fv = g\zeta_x + Au_{zz} - ru, \quad (1)$$

$$v_t + fu = g\zeta_y + Av_{zz} - rv,$$

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

Здесь u , v , w – составляющие скорости течения вдоль декартовых осей координат X , Y , Z , направленных на восток, север и вертикально вниз соответственно; f – параметр Кориолиса; g – ускорение силы тяжести; A – кинематический коэффициент вертикальной вязкости; r – коэффициент рэлеевского трения; ζ – понижение уровня моря; t – время; индексы внизу означают дифференцирование.

Граничные условия на поверхности моря и на дне запишем в следующем виде. На поверхности моря тангенциальное напряжение ветра уравновешивается турбулентным трением в морской воде:

$$\text{при } z = 0 \quad Au_z = -\tau^x, \quad Av_z = -\tau^y, \quad (3)$$

и задается равенство нулю вертикальной скорости, т.е., следуя работе [2], используется приближение «твердой крышки», а именно:

$$\text{при } z = 0 \quad w = 0. \quad (4)$$

На дне принимается условие прилипания:

$$\text{при } z = H(x, y) \quad u = v = w = 0. \quad (5)$$

В уравнениях (3), (5) τ^x, τ^y – составляющие тангенциального напряжения ветра, $H(x, y)$ – глубина моря.

Интегрируя уравнение неразрывности (2) по вертикали от поверхности моря до дна с учетом граничных условий (4), (5), как и в работе [2], получим интегральное уравнение неразрывности в виде (дивергенция полного потока равна нулю):

$$U_x + V_y = 0, \quad (6)$$

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

Уравнение (6) позволяет ввести интегральную функцию тока ψ :

$$U = -\psi_y, \quad V = \psi_x. \quad (7)$$

Представим составляющие напряжения ветра в виде разложения в ряд Фурье, а именно в виде суммы некоего среднего (стационарного) напряжения ветра и ряда гармоник. Ограничиваясь учетом только одной гармоники, компоненты напряжения ветра запишем в виде

$$\tau^x = \tau_0^x + \tau_1^x e^{i\sigma t}, \quad \tau^y = \tau_0^y + \tau_1^y e^{i\sigma t}, \quad (8)$$

где τ_0^x, τ_0^y – компоненты стационарного напряжения ветра, τ_1^x, τ_1^y – комплексные числа, σ – частота, i – мнимая единица.

В таком же виде представим величину расхода воды Q , протекающей через пролив:

$$Q = Q_0 + Q_1 e^{i\sigma t}.$$

В силу линейности задачи решение будем искать в виде

$$\psi = \psi_0 + \varphi e^{i\sigma t}, \quad (9)$$

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta e^{i\sigma t}, \quad (10)$$

$$u = u_0 + \tilde{u} e^{i\sigma t}, \quad v = v_0 + \tilde{v} e^{i\sigma t}, \quad (11)$$

где $\varphi = \varphi_1 + i\varphi_2$, $\zeta = \zeta_1 + i\zeta_2$, $\tilde{u} = u_1 + iu_2$, $\tilde{v} = v_1 + iv_2$.

Стационарную и периодическую циркуляции будем рассматривать отдельно. Решение стационарной трехмерной задачи подробно описано в работе [3]. Поэтому функции $\psi_0, \zeta_0, u_0, v_0$ можно считать известными, и здесь остановимся на расчете течений, обусловленных периодическим по времени ветром.

Для решения воспользуемся подходом, предложенным А.И. Фельзенбаумом и описанным подробно в работах [2, 8]. При таком подходе трехмерную задачу расчета периодических течений, так же как и расчета стационарных течений, можно свести к решению двумерного эллиптического уравнения для уровня или, при использовании приближения «твердой крышки», для интегральной функции тока и к последующему расчету по аналитическим формулам трех составляющих скорости течения.

Далее будем полагать

$$\begin{aligned} \tau^x &= \tau_1^x e^{i\sigma t}, & \tau^y &= \tau_1^y e^{i\sigma t}, \\ \psi &= \varphi e^{i\sigma t}, & \zeta &= \zeta e^{i\sigma t}, \\ u &= \tilde{u} e^{i\sigma t}, & v &= \tilde{v} e^{i\sigma t}. \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя выражения (12) в уравнения движения (1), получим

$$\begin{aligned} I\sigma\tilde{u} - f\tilde{v} &= g\zeta_x + A\tilde{u}_{zz} - r\tilde{v}, \\ i\sigma\tilde{v} + f\tilde{u} &= g\zeta_y + A\tilde{v}_{zz} - r\tilde{v}. \end{aligned} \quad (13)$$

Следуя [2], введем комбинации горизонтальных компонент скорости

$$\hat{u} = \tilde{u} + i\tilde{v}, \quad u^* = \tilde{u} - i\tilde{v}. \quad (14)$$

Складывая и вычитая уравнения движения (13), с учетом того, что второе уравнение умножено на i , получим систему уравнений (в комплексном виде) для функций \hat{u}, u^* :

$$\begin{aligned} \hat{u}_{zz} - j_1^2 \hat{u} &= G, \\ u^*_{zz} - j_2^2 u^* &= G^*, \end{aligned} \quad (15)$$

где

$$\begin{aligned} j_1^2 &= [r + i(f + \sigma)]/A, & G &= -g(\zeta_x + i\zeta_y)/A, \\ j_2^2 &= [r + i(-f + \sigma)]/A, & G^* &= -g(\zeta_x - i\zeta_y)/A. \end{aligned}$$

Эти уравнения решаются при граничных условиях, вытекающих из условий (3):

$$\text{при } z = 0 \quad A\hat{u}_z = -\tau, \quad Au^*_z = -\tau^*, \quad (16)$$

$$\text{при } z = H \quad \hat{u} = 0, \quad u^* = 0, \quad (17)$$

где $\tau = \tau^x + i\tau^y, \quad \tau^* = \tau^x - i\tau^y$.

Решения уравнений (15), с учетом граничных условий (16), (17), имеют вид

$$\hat{u} = a\tau + bG, \quad u^* = c\tau^* + dG^*, \quad (18)$$

где

$$a = \frac{1}{j_1 A} \frac{\operatorname{sh} j_1 (H-z)}{\operatorname{ch} j_1 H}, \quad b = -\frac{1}{j_1^2} \left[1 - \frac{\operatorname{ch} j_1 z}{\operatorname{ch} j_1 H} \right],$$

причем выражения для c и d такие же, но вместо j_1 используется j_2 .

Интегрируя соотношения (18) по вертикали от поверхности до дна, получим выражения для комбинаций компонент полных потоков

$$\begin{aligned} \hat{U} &= U + iV = a_1 \tau + b_1 G, \\ U^* &= U - iV = c_1 \tau^* + d_1 G^*, \end{aligned} \quad (19)$$

где a_1, b_1, c_1, d_1 – это интегралы по вертикали от $z = 0$ до $z = H$ от функций a, b, c, d , т. е.

$$a_1 = \frac{1}{j_1^2 A} \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch} j_1 H} \right], \quad b_1 = \frac{1}{j_1^2 A} \left[H - \frac{\operatorname{th} j_1 H}{j_1} \right],$$

выражения для c_1 и d_1 такие же, но вместо j_1 используется j_2 .

Разделяя данные выражения на мнимую и действительную части, получим два уравнения, описывающие периодическое движение.

Учитывая, что

$$u = (\hat{u} + u^*)/2, \quad v = -i(\hat{u} - u^*)/2, \quad U = (\hat{U} + U^*)/2, \quad V = -i(\hat{U} - U^*)/2, \quad (20)$$

можно представить уравнения (18) и (19) в следующем виде:

$$\begin{aligned} u &= N \tau^x + M \tau^y + \Theta \zeta_x + \Lambda \zeta_y, \\ v &= -M \tau^x + N \tau^y - \Lambda \zeta_x + \Theta \zeta_y, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} U &= n \tau^x + m \tau^y + \theta \xi_x + \lambda \xi_y, \\ V &= -m \tau^x + n \tau^y - \lambda \xi_x + \theta \xi_y, \end{aligned} \quad (22)$$

где коэффициенты $N = (a + c)/2, M = (a - c)/2, \Theta = (b + d)/2, \Lambda = (b - d)/2$ являются известными комплексными функциями координат x, y, z и параметров, таких как частота σ , параметр Кориолиса f , глубина моря H , а $n = (a_1 + c_1)/2, m = (a_1 - c_1)/2, \theta = (b_1 + d_1)/2, \lambda = (b_1 - d_1)/2$.

Разрешая соотношения (22) относительно наклонов уровня и используя выражения (7), получим соотношения

$$\begin{aligned} \zeta_x &= -m' \tau^x + n' \tau^y - \lambda' \psi_x - \theta' \psi_y, \\ \zeta_y &= -n' \tau^x - m' \tau^y + \theta' \psi_x - \lambda' \psi_y, \end{aligned}$$

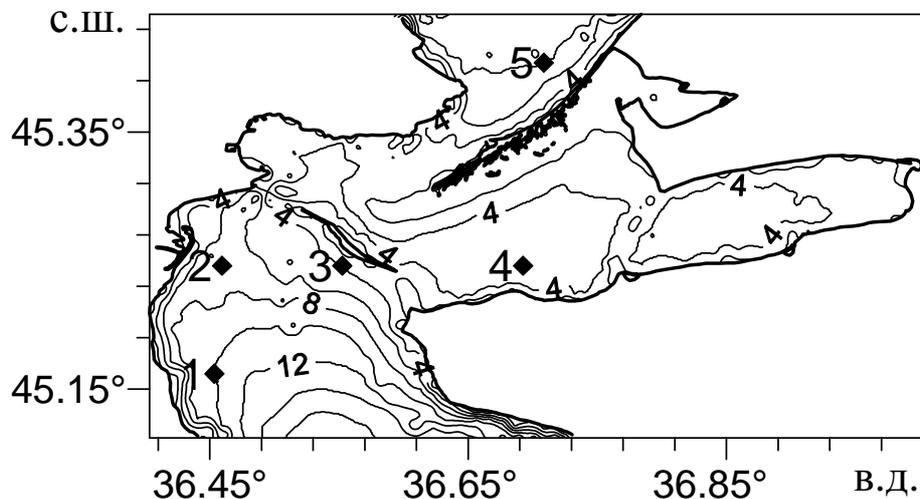
где $n' = n\lambda' - m\theta', m' = m\lambda' + n\theta', \lambda' = \lambda/(\lambda^2 + \theta^2), \theta' = \theta/(\lambda^2 + \theta^2)$.

Исключая уровень с помощью перекрестного дифференцирования, получаем уравнение в комплексной форме для интегральной функции тока:

$$L(\psi) = (\theta' \psi_x)_x + (\theta' \psi_y)_y - (\lambda' \psi_x)_x + (\lambda' \psi_y)_y = (n' \tau_1^x + m' \tau_1^y)_x - (m' \tau_1^x + n' \tau_1^y)_y. \quad (23)$$

Отметим, что уравнение имеет точно такой же вид, как и в двумерной модели [1], за исключением коэффициентов, которые имеют более сложный вид.

Остановимся теперь на постановке условий на боковых границах. Рассматриваемая область показана на рис. 1. Так как в модели не учитывается горизонтальная вязкость, достаточно поставить условия только для полных потоков.



Р и с. 1. Рельеф дна (м) в Керченском проливе (показано положение точек 1 - 5, для которых проводится анализ решения)

На твердой границе для полного потока ставится условие непротекания, а на жидких открытых границах – условие свободного протекания (вода течет по нормали к границе).

В силу условия непротекания на твердых границах касательная производная от функции тока равна нулю, так что функция ψ на них должна быть постоянной величиной. Однако из-за неодносвязности рассматриваемой области константы на западной и восточной границах Керченского пролива и на контуре о. Тузла должны быть разными. Для определенности положим, что

$$\begin{aligned} \text{на восточном, кавказском, берегу пролива} \quad \psi_{\text{вост}} &= 0, \\ \text{на западном, крымском, берегу} \quad \psi_{\text{зап}} &= Q_1, \\ \text{на контуре о. Тузла} \quad \psi_{\text{ост}} &= C_1. \end{aligned} \quad (24)$$

Расход воды через пролив Q_1 считаем известным и задаем априори. Используя условие Каменковича (непрерывности уровня на любом замкнутом контуре, окружающем остров), из решения задачи определяем константу C_1 .

Условия свободного протекания на открытых северной и южной границах пролива для функции тока имеют вид

$$(\partial\psi/\partial y)_{\text{южн}} = (\partial\psi/\partial y)_{\text{сев}} = 0. \quad (25)$$

Решение уравнения (23) для нестационарной части интегральной функции тока ψ при граничных условиях (24) и (25) в силу линейности задачи можно представить в виде суммы решений трех однотипных задач:

$$\psi = \psi_1 + Q_1 \psi_2 + C_1 \psi_3, \quad (26)$$

$$L(\psi_1) = F, \quad (\psi_1)_{\text{вост}} = 0, \quad (\psi_1)_{\text{зап}} = 0, \quad (\psi_1)_{\text{ост}} = 0, \quad (\partial\psi_1/\partial y)_{\text{южн}} = (\partial\psi_1/\partial y)_{\text{сев}} = 0,$$

$$L(\psi_2) = 0, \quad (\psi_2)_{\text{вост}} = 0, \quad (\psi_2)_{\text{зап}} = 1, \quad (\psi_2)_{\text{ост}} = 0, \quad (\partial\psi_2/\partial y)_{\text{южн}} = (\partial\psi_2/\partial y)_{\text{сев}} = 0, \quad (27)$$

$$L(\psi_3) = 0, \quad (\psi_3)_{\text{вост}} = 0, \quad (\psi_3)_{\text{зап}} = 0, \quad (\psi_3)_{\text{ост}} = 1, \quad (\partial\psi_3/\partial y)_{\text{южн}} = (\partial\psi_3/\partial y)_{\text{сев}} = 0.$$

Для решения уравнений для функций ψ_i ($i = 1, 2, 3$) используется метод конечных разностей. Способ аппроксимации уравнений и метод решения подробно описаны в работах [1, 3]. Конечно-разностный аналог уравнения (23) получается непосредственно из конечно-разностных аналогов соотношений (19) и уравнения (6). При этом пространственная дискретизация проводится бокс-методом на сетке B (по терминологии Аракавы). В результате получается система линейных алгебраических уравнений на 9-точечном шаблоне, которые решаются с помощью итерационного метода верхней релаксации. Для решения аналогично построенных конечно-разностных аналогов уравнений для функций φ_i с комплексными коэффициентами также используется метод верхней релаксации. Подчеркнем, что, как и в работе [1], мы используем метод верхней релаксации для решения уравнений с комплексными коэффициентами.

Численный эксперимент

Следуя работе [1], рассмотрим движение в Керченском проливе, обусловленное действием бризового ветра, основываясь на данных наблюдений за 2004 г. с метеостанции на м. Ак-Бурун на Крымском побережье около г. Керчь. В статье [1] показано, что на энергетических спектрах с июня по сентябрь выделяется статистически значимый пик на периоде 24 ч, связанный, по-видимому, с наличием бризовой циркуляции ветра.

Как и в [1], напряжение бризового ветра задаем в виде гармоник с периодом 1 сут, что соответствует частоте $\sigma = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Согласно наблюдениям бриз действует в прибрежной полосе шириной несколько километров. Как и в [1], выбираем ширину этой полосы $L = 2$ км. На берегу амплитуду бризовой компоненты напряжения ветра принимаем постоянной и равной единице ($\tau = 1 \text{ см}^2/\text{с}^2$), а в море вне полосы – равной нулю. При этом напряжение ветра считаем зональным ($\tau_1^y = 0$), уменьшающимся (поперек полосы) от максимального значения τ на берегу до нуля по закону:

$$\tau_1^x = -\tau \cos[\pi(x - L_1)/(2L)] \quad \text{при} \quad L_1 < x < L_1 + L,$$

$$\tau_1^x = \tau \cos[\pi(L_2 - x)/(2L)] \quad \text{при} \quad L_2 - L < x < L_2,$$

$$\tau_1^x = \tau \quad \text{при} \quad L_2 < x,$$

где $L_1(y)$ – координаты западного берега, $L_2(y)$ – правая граница для задания бризового ветра. Границу $L_2(y)$ выбираем проходящей вдоль косы Чушка и кавказского берега с пересечением Таманского залива.

Как и в статье [1], основное внимание в данной работе уделяется процессам, проходящим в центральной зоне Керченского пролива. Предполагая, что нестационарные процессы в мелководном Таманском заливе слабо влияют на течения в центральной части пролива, над Таманским заливом бризовый ветер задаем однородным по пространству и имеющим такую же величину, как над сушей. Влияние о. Тузла на формирование бриза не учитываем. Заметим, что в наиболее узкой части пролива зоны действия крымского и кавказского бризов не пересекаются.

Несмотря на то, что моделируемый бриз действует в зональном направлении, а не по нормали к берегу, имеющему довольно изрезанный контур, общий характер пространственной структуры бризового ветра в Керченском проливе, по-видимому, сохраняется.

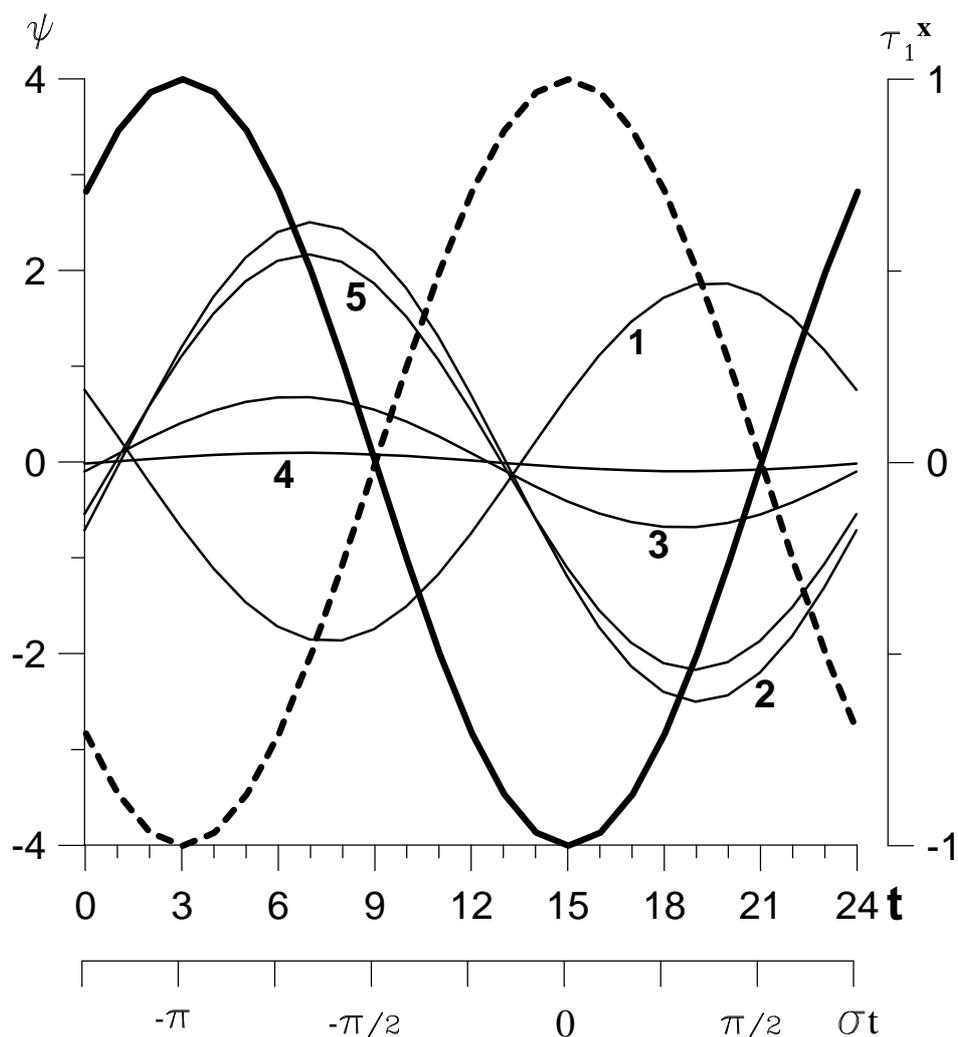
Серьезной проблемой при расчете течений в Керченском проливе является задание расхода воды Q . Величина расхода воды Q_0 , обусловленного среднесуточным ветром, пропорциональна, как показано Э.Н. Альтманом [9], значению проекции напряжения ветра на «ось» пролива. Полагаем, что и расход Q_1 , обусловленный нестационарным ветром, также пропорционален проекции напряжения ветра на «ось» пролива. Тогда, с достаточной точностью, можно принять Q_1 равным нулю.

Расчеты были проведены при следующих значениях параметров: коэффициент вертикальной вязкости $A = 20 \text{ см}^2/\text{с}$; коэффициент внутреннего, рэлеевского, трения $r = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; параметр Кориолиса $f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; шаги сетки – $\Delta x = 39 \text{ м}$; $\Delta y = 55 \text{ м}$.

Обсуждение результатов. Перейдем к описанию результатов численного эксперимента. Вначале отметим, что обусловленная бризовым ветром интегральная циркуляция, полученная в трехмерной модели, оказывается качественно и количественно близкой к интегральной циркуляции, рассчитанной в двумерной модели [1].

На рис. 2, следуя работе [1], показано изменение интегральной функции тока по времени в различных точках пролива, указанных на рис. 1. На этом же рисунке представлена также зависимость от времени тангенциального напряжения ветра τ_1^x для западного и восточного берегов пролива. Видно, что максимальные (по модулю) значения ψ в указанных точках пролива не совпадают по времени с максимальными значениями напряжения ветра, имеет место сдвиг фаз между напряжением ветра и полными потоками. В основной зоне пролива (точки 1, 2, 5) максимум смещен приблизительно на 4 ч, в районе о. Тузла (точка 3) – на 3 ч. Подчеркнем, что точка 3 расположена вне зоны действия бриза, где циркуляция заметно слабее, чем в основной зоне пролива. Кривая 4 показывает поведение интегральной функции тока ψ в Таманском заливе, где ветер не меняется по горизонтали. Сдвиг фазы в точке 4, так же как и в основной зоне пролива, составляет приблизительно 3 ч. Отметим, что в точках 1 и 5 функция тока меняется в противофазе, так как эти точки находятся в зонах с противоположными направлениями ветра. Как видно на

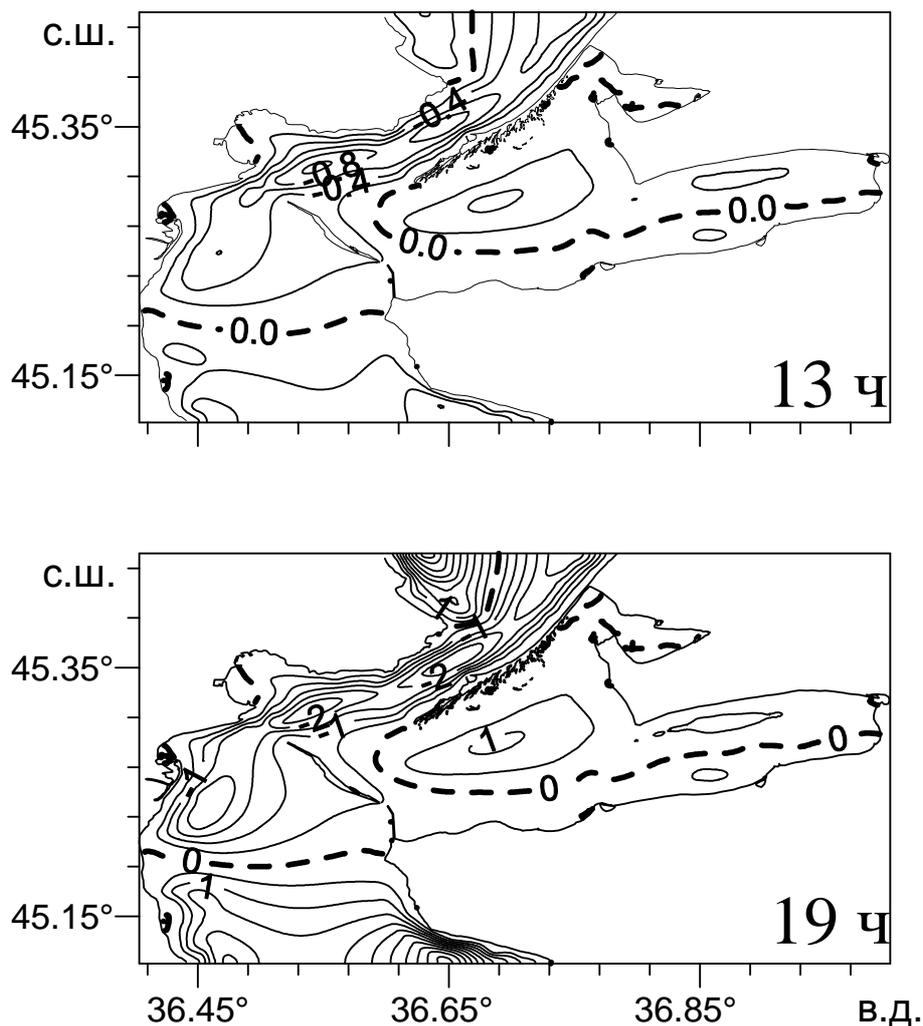
рисунке, наиболее интенсивная циркуляция наблюдается в периоды с 5 до 10 ч (во время дневного бриза, когда ветер дует с моря на сушу) и с 17 до 21 ч (во время ночного бриза, когда ветер дует с суши на море).



Р и с. 2. Зависимость от времени (t , ч) интегральной функции тока $\psi \cdot 10^{-8}$ ($\text{см}^3/\text{с}$) для точек, указанных на рис. 1, и напряжения бризового ветра τ_1^x ($\text{см}^2/\text{с}^2$) на западном (сплошная жирная кривая) и восточном (штриховая линия) берегах

На рис. 3 представлены изолинии интегральной функции тока для момента времени $t = 13$ ч, когда происходит перестройка на дневной тип циркуляции, и для момента времени $t = 19$ ч, когда дневная циркуляция наиболее интенсивна. Видно, что в 19 часов отмечается наличие интенсивных циклонических круговоротов, вытянутых вдоль пролива. При этом в северной части пролива круговороты расположены по центру между берегами, а в цен-

тральной части – прижаты к западному берегу. В южной широкой части пролива, южнее о. Тузла и дамбы, имеет место циркуляция с другим знаком завихренности. Антициклонический круговорот наблюдается и в северной части пролива у его западного берега.

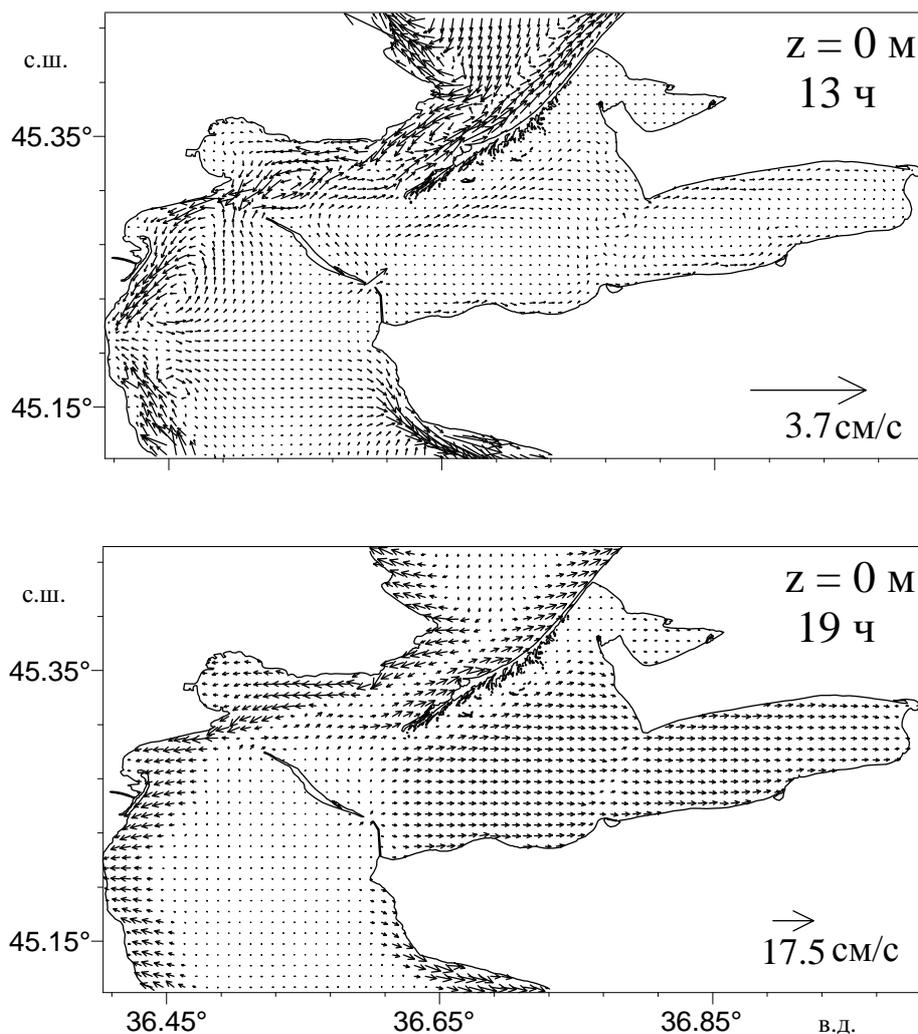


Р и с. 3. Изолинии интегральной функции тока бризовой циркуляции $\psi \cdot 10^{-8}$ (см³/с) для моментов времени $t = 13$ ч и $t = 19$ ч

В 13 ч циркуляция менее интенсивна, чем в 19 ч. Однако также в северной части пролива наблюдаются циклонические круговороты, а в южной части – антициклонические. Отметим, что в ночное время при $t = 1$ и 7 ч циркуляция будет иметь тот же вид, но другой знак.

Несмотря на то, что над Таманским заливом задан однородный по пространству ветер, в этой области наблюдается довольно интенсивная антициклоническая циркуляция. Это связано, очевидно, с тем, что в модели учитывается рельеф дна.

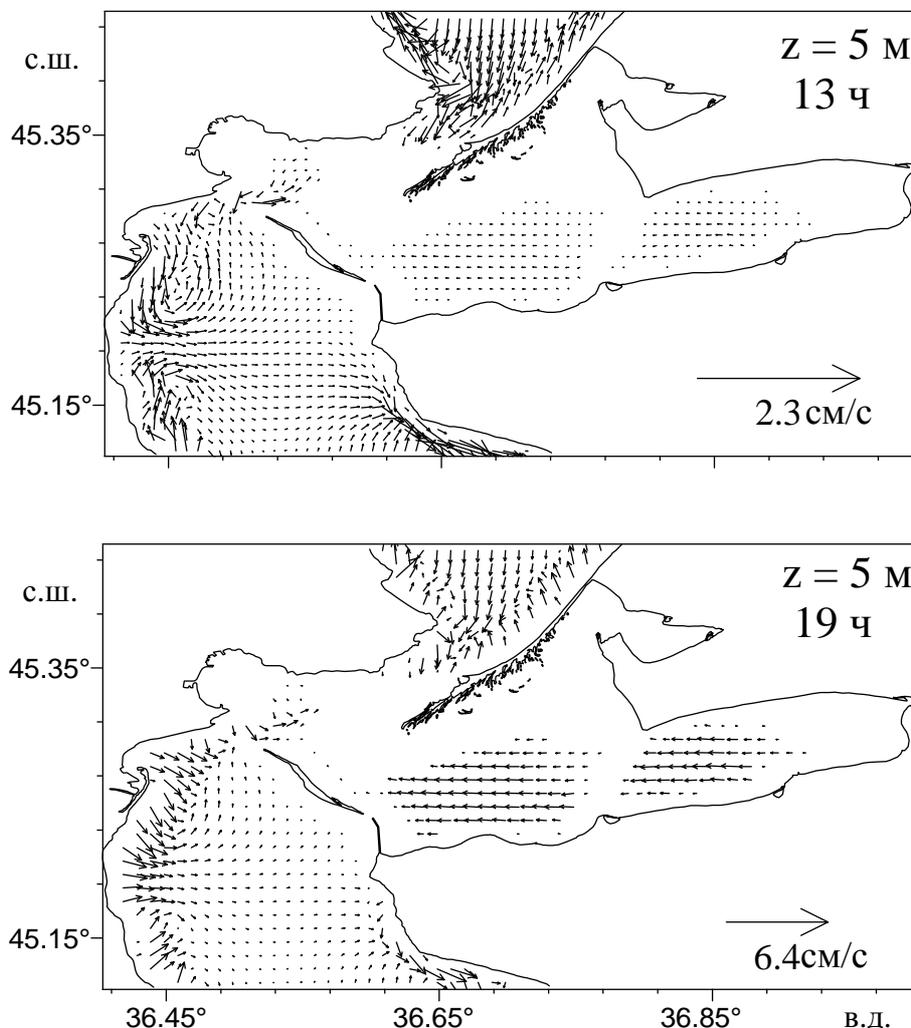
Перейдем теперь к анализу течений на различных горизонтах. На рис. 4 представлена картина течений на поверхности моря во всей рассматриваемой области Керченского пролива, причем для тех же моментов времени 13 и 19 ч. В 13 ч, когда происходит перестройка с ночного на дневной тип циркуляции, как видно на рисунке, течения сосредоточены и направлены вдоль границ пролива. Причем вдоль косы Чушка течения направлены с юга на север, а у противоположного, крымского, берега, наоборот, – с севера на юг. Представляет интерес распределение векторов скорости течения у юго-западной границы Керченского пролива, где течения образуют два круговорота противоположной завихренности. (Более детальная картина течений в этом районе будет рассмотрена ниже.)



Р и с. 4. Распределение векторов скорости течения в Керченском проливе на поверхности моря для моментов времени $t = 13$ ч и $t = 19$ ч (приведены значения максимальной скорости течения во всей рассматриваемой области)

В 19 ч, когда дневная циркуляция наиболее интенсивна, максимальная скорость течений достигает 17,5 см/с, в отличие от 3,7 см/с в 13 ч. Заметим, что течения в этот момент времени направлены с моря на сушу, что соответствует направлению ветра.

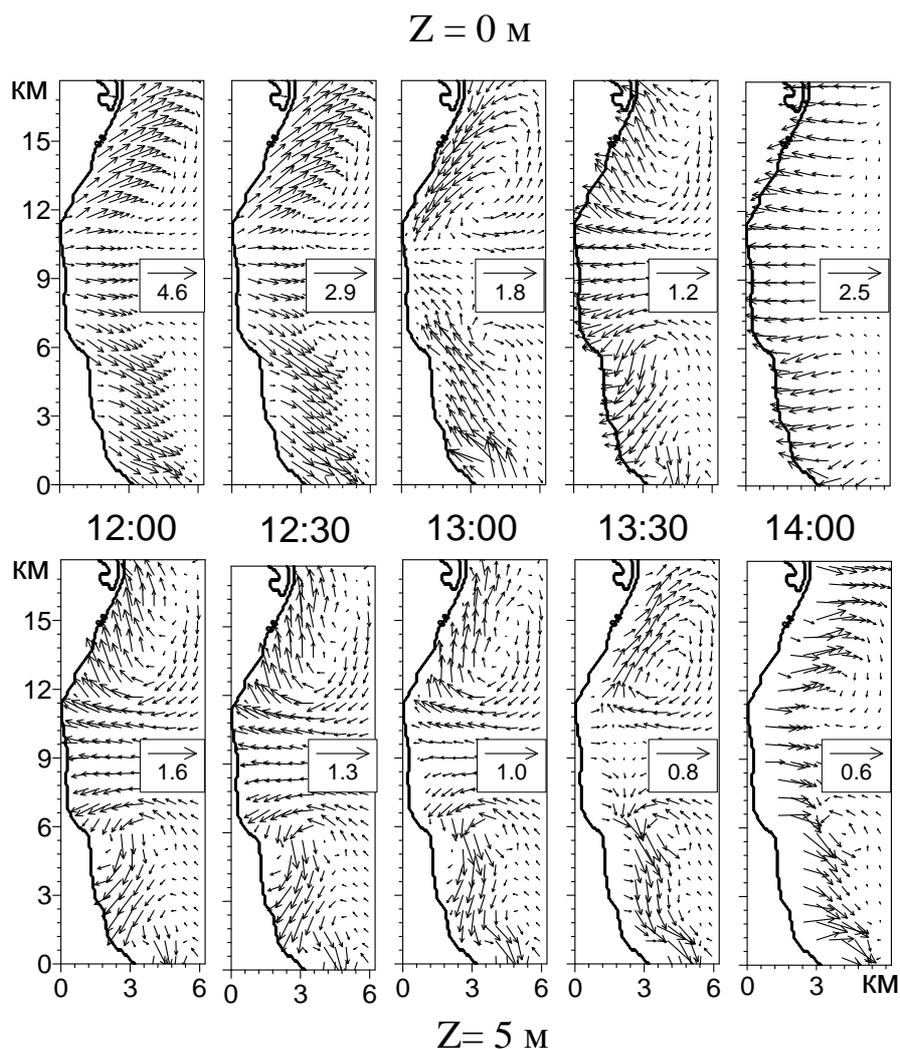
На рис. 5 представлена картина течений на горизонте 5 м во всей рассматриваемой области Керченского пролива для тех же моментов времени 13 и 19 ч. Видно, что с глубиной течения ослабевают и меняют свое направление на противоположное.



Р и с. 5. Распределение векторов скорости течения в Керченском проливе на горизонте 5 м для моментов времени $t = 13$ ч и $t = 19$ ч (приведены значения максимальной скорости течения во всей рассматриваемой области)

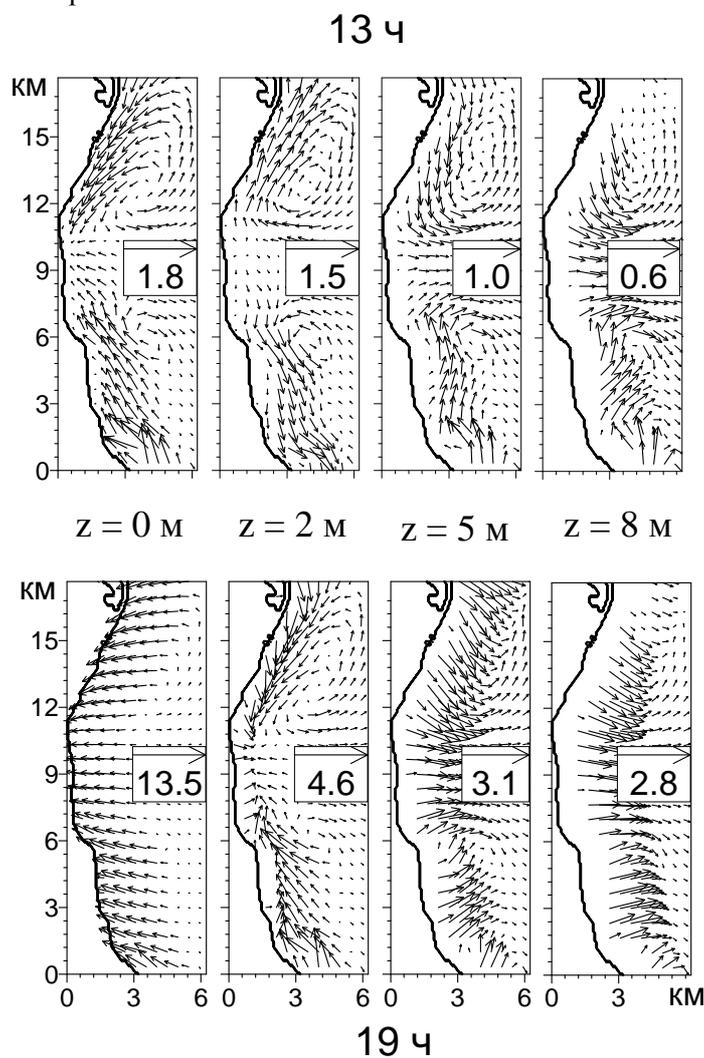
На рис. 6 приведено распределение векторов скорости течения в период с 12 до 14 ч у юго-западной границы Керченского пролива на поверхности моря и на глубине 5 м. Этот период времени выбран не случайно. За этот доста-

точно короткий промежуток времени происходит перестройка с ночного на дневной тип циркуляции. Нетрудно заметить, что в 12 ч циркуляция еще соответствует ночному типу (ветер дует с суши на море и течения направлены по ветру). Затем происходит поворот течений в противоположную сторону, что хорошо видно на рисунке, соответствующем 13 ч. И, наконец, к 14 ч картина течений полностью меняется. Ветер дует с моря на сушу (дневной тип циркуляции), и течения тоже направлены по ветру. Интересно отметить, что поворот течений происходит достаточно быстро, буквально за 30 мин. В то время как на поверхности моря течения достаточно стремительно изменяют свое направление с 12.30 до 13.30, на глубине течения перестраиваются несколько позже, с 13.00 до 14.00, т. е. имеет место некоторое запаздывание.



Р и с. 6. Распределение векторов скорости течения у юго-западной границы Керченского пролива на поверхности моря и на горизонте 5 м в период с 12 до 14 ч (приведены значения максимальной скорости течения (см/с) в показанной области)

На рис. 7 показано поле течений на поверхности моря и на горизонтах 2, 5 и 8 м для моментов времени 13 и 19 ч у юго-западной границы Керченского пролива. На поверхности моря в 13 ч наблюдаются два круговорота противоположных направлений. На горизонте 2 м сильных изменений в характере течений не происходит, так же как и на горизонте 5 м, только скорость течений с глубиной уменьшается. Но на горизонте 8 м течения принимают противоположное направление.



Р и с. 7. Распределение векторов скорости течения у юго-западной границы Керченского пролива на различных глубинах для моментов времени 13 и 19 ч (приведены значения максимальной скорости течения (см/с) в показанной области)

В 19 ч на поверхности моря скорости течения достигают максимума и направлены с моря на сушу (дневной тип циркуляции), на глубине течения находятся в стадии перестройки. На горизонте 2 м эта перестройка выражена в двух круговоротах, на горизонтах 5 и 8 м наблюдаются течения, направленные в противоположную сторону по сравнению с поверхностными течениями.

Выводы. В данной работе с помощью трехмерной баротропной модели исследована пространственно-временная изменчивость течений в Керченском проливе, обусловленных действием бризового ветра. Детально исследована структура течений на различных горизонтах у юго-западной границы Керченского пролива. Показано, что существенная перестройка течений с дневного на ночной тип циркуляции (как и с ночного на дневной) происходит за достаточно короткий период времени около 30 мин.

К сожалению, в настоящее время отсутствуют данные наблюдений, которые позволили бы верифицировать модель. В то же время сопоставление результатов полученного решения с решением задачи, в которой рассчитываются течения, вызванные действием среднесуточного ветра [3], как это было сделано в рамках двумерной модели [1], показывает, что учет бризовой циркуляции может быть существенен для объяснения динамических процессов в Керченском проливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рябцев Ю.Н., Терещенко И.В., Шапиро Н.Б.* Моделирование бризовой циркуляции вод в Керченском проливе // *Морской гидрофизический журнал.* – 2007. – № 6. – С. 16 – 27.
2. *Фельзенбаум А.И.* К теории периодических течений // *Проблемы теории океанических течений.* – Киев: Наук. думка, 1966. – С. 5 – 23.
3. *Иванов В.А., Шапиро Н.Б.* Моделирование течений в Керченском проливе // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2004. – С. 206 – 354.
4. *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.
5. *Коротаев Г.К., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Теория экваториальных противотечений в Мировом океане. – Киев: Наук. думка, 1986. – 208 с.
6. *Гилл А.* Динамика атмосферы и океана. В 2-х томах. – М.: Мир, 1986. – 396 + 415 с.
7. *Шапиро Н.Б.* Моделирование течений на севавтопольском взморье // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – С. 119 – 134.
8. *Михайлова Э.Н.* Некоторые задачи теории периодических течений // *Проблемы теории океанических течений.* – Киев: Наук. думка, 1966. – С. 90 – 106.
9. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива // *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.IV. Черное море. Вып. I. Гидрометеорологические условия.* – СПб.: – Гидрометеоздат, 1991. – С. 291 – 324.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 10.07.08
После доработки 23.09.08

АНОТАЦІЯ Задача про розрахунок течій, обумовлених дією бризового вітру, узагальнюється на тривимірний випадок. У наближенні «твердої кришки» задача зводиться до чисельного розв'язування двовимірного рівняння для інтегральної функції потоку (з комплексними коефіцієнтами) і до подальшого розрахунку за аналітичними формулами компонент швидкості течії.

Бриз задається діючим у вузькій прибережній смузі і є зональним вітром. Детально досліджуються тривимірна структура і часова мінливість течій біля західної межі Керченської протоки.

ABSTRACT Problem on calculation of currents conditioned by the breeze wind action is generalized for a three-dimensional case. In approximation of a «solid cap» the problem is deduced to numerical solution of a two-dimensional equation for the current integral function (with complex coefficients) and further calculation of current velocity components using analytical formulae.

Breeze is preset to be acting in a narrow seaside and represents a zonal wind. Three-dimensional structure and temporal variability of currents near the western boundary of the Kerch strait are studied in details.