

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ ШЕЛЬФА

УДК 551.465

Н.Б.Шапиро

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

К ТЕОРИИ ТЕЧЕНИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ

В Керченском проливе градиент уровня (отмеряемого вниз от поверхности моря) имеет тот же знак, что и соответствующая компонента скорости ветра. Ветер приводит как бы к сгону воды из пролива. Показано, что для воспроизведения такого нестандартного положения уровня необходимо выполнение двух условий: пропорциональность расхода воды, протекающей через пролив, скорости ветра и зависимость коэффициента придонного трения от глубины моря.

Приведен обзор оценок указанного расхода, полученных на основании данных наблюдений и теоретических расчетов.

В [1] представлены результаты расчета течений в Керченском проливе, проведенного в рамках модели Фельзенбаума [2] – линейной трехмерной модели установившихся течений в однородной жидкости. Предполагается, что движение в проливе, которое вызывается ветром и заданным расходом воды через пролив, можно считать стационарным. Выявлена относительная роль компонент циркуляции, обусловленных по отдельности действием ветра, наличием водообмена между Азовским и Черным морем, а также обусловленной наличием о-ва Коса Тузла. Расчет проведен для наиболее типичного в этом районе северо-восточного ветра и на сравнительно мелкой сетке по горизонтали (40 × 55 м). Исследованы особенности пространственной структуры течений в различных районах пролива. Показано, что течения резко интенсифицируются у «острых» краев о-ва Коса Тузла и что наличие построенной дамбы между Кавказским побережьем и о-вом Коса Тузла приводит к усилению основного струйного потока в западной части пролива и препятствует проникновению этого потока в Таманский залив.

Цель настоящей работы, которая является дополнением к [1], – определение необходимых условий, требующихся для воспроизведения в гидродинамической модели типовой, но довольно нестандартной схемы положения уровня поверхности в системе Азовское море – Керченский пролив – Черное море.

Уровень в Керченском проливе и прилегающих морях. Особенностью динамики вод в Керченском проливе является тот факт, что квазистационарный, т.е. осредненный за достаточно большой срок по времени, градиент уровня (по существу меридиональный) имеет тот же знак, что и соответствующая (меридиональная) компонента напряжения ветра [3]. При этом как в Азовском, так и в Черном море вблизи пролива меридиональный градиент уровня имеет противоположный знак, т.е. на границах пролива мери-

© Н.Б.Шапиро, 2005

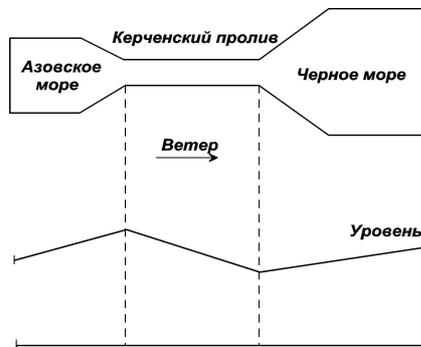


Рис. Типовая схема положения уровня в системе Азовское море – Керченский пролив – Черное море.

диональный градиент уровня терпит разрыв; хотя сам уровень остается непрерывным. Типовая схема положения уровня поверхности в системе Азовское море – Керченский пролив – Черное море при наиболее часто повторяющихся в районе Керченского пролива северо-восточных ветрах приведена на рис. (по [3]).

На первый взгляд, этот факт представляется неестественным. Представим, например, Керченский пролив в виде канала постоянной глубины, вытянутого в меридиональном направлении и заполненного однородной по плотности жидкостью. В

теории установившихся морских течений существуют две модели течений в канале: «открытый канал» и «канал, замкнутый на бесконечности» [4, 5].

По определению, в этих моделях канала такие характеристики, как напряжение ветра, глубина моря, компоненты скорости течения, не меняются вдоль канала. В «открытом канале», кроме этого, вдоль канала не меняется и уровень. Тогда меридиональный градиент уровня в нем тождественно равен нулю, а интегральный расход воды через поперечное сечение канала, вообще говоря, не равен нулю и определяется из решения задачи. В «канале, замкнутом на бесконечности», меридиональный градиент уровня предполагается отличным от нуля и, наоборот, определяется заданием интегрального расхода воды через поперечное сечение канала.

Покажем это на примере линейной теории установившихся течений в однородном море без учета горизонтальной вязкости [1, 2]. Проинтегрируем по вертикали от поверхности моря до дна уравнения движения и неразрывности, полагая трение у дна пропорциональным полному потоку. Получим уравнения так называемой двумерной модели

$$-fV = gH\zeta_x + \tau^x - rU, \quad fU = gH\zeta_y + \tau^y - rV; \quad (1)$$

$$U_x + V_y = 0. \quad (2)$$

Здесь $U = \int_0^H u dz$, $V = \int_0^H v dz$ – составляющие полного потока, где u , v – компоненты горизонтальной скорости течения вдоль осей координат x , y , направленных поперек и вдоль канала соответственно; z – вертикальная координата, направленная вниз; H – глубина моря; g – ускорение силы тяжести; f – параметр Кориолиса; r – коэффициент придонного трения; ζ – уровень, отмеряемый вниз от невозмущенной поверхности моря; τ^x , τ^y – составляющие тангенциального напряжения ветра, отнесенные к плотности морской воды. Индексы внизу означают дифференцирование.

Как в «открытом» канале, так и в «замкнутом на бесконечности» меридиональном канале принимается, что

$$U_y = V_x = (\tau^x)_y = (\tau^y)_x = H\zeta = 0. \quad (3)$$

Отсюда следует, что $V = \text{const}$, $U \equiv 0$ в силу равенства $U_x = 0$, вытекающего

из уравнения неразрывности (2) и условия непротекания $(U)_{x=0} = (U)_{x=L} = 0$ через границы канала $x = 0$ и $x = L$. Кроме того, из уравнений движения (1) следует, что $(\zeta_x)_y = (\zeta_y)_x = 0$, или

$$\zeta_y = \text{const.} \quad (4)$$

В «открытом канале», помимо условий (3), принимается

$$\zeta_y = 0, \quad (5)$$

и, следовательно, согласно второму уравнению движения (1), получаем

$$V = \tau^y / r. \quad (6)$$

Пренебрегая изменчивостью ветра по ширине канала, т.е. учитывая, что ширина канала мала по сравнению с характерным горизонтальным масштабом изменчивости ветра, получаем, что расход воды через поперечное сечение канала Q в случае равномерного ветра ($\tau^y = \text{const}$) равен

$$Q = \int_0^L V dx = (L\tau^y) / r. \quad (7)$$

В канале, «замкнутом на бесконечности», меридиональный градиент уровня ζ_y предполагается отличным от нуля и определяется из условия, что интегральный расход воды через поперечное сечение канала задается, например, равным нулю: $Q = 0$.

Тогда из второго уравнения движения (1) получаем равенство

$$L\zeta_y = - \int_0^L [(\tau^y)/gH] dx, \quad (8)$$

откуда в случае постоянной глубины канала $H = \text{const}$ и равномерного ветра $\tau^y = \text{const}$ следует

$$\zeta_y = - \tau^y / gH, \quad (9)$$

$$V = 0. \quad (10)$$

Таким образом, меридиональная компонента полного потока $V = 0$ (скорости течений на отдельных горизонтах, разумеется, не равны нулю), а меридиональный градиент уровня имеет знак, противоположный знаку продольной компоненты напряжения ветра. Это означает, что поверхностные течения направлены по ветру, а глубинные, градиентные течения направлены против ветра. Равенство нулю интегрального расхода воды Q и полного потока V является следствием «замкнутости» канала, т.е. наличия на «бесконечности» твердой границы – стенки. Решение для канала, «замкнутого на бесконечности», – это, по существу, решение для срединного сечения прямоугольной области, вытянутой в меридиональном направлении вдали от зональных границ [4, 5].

В качестве отступления отметим, что в случае постоянной глубины моря ($H \equiv \text{const}$), равномерного ветра ($\tau^x, \tau^y \equiv \text{const}$) и при постоянном параметре Кориолиса ($f = \text{const}$), что естественно для анализа течений на рассматриваемых здесь сравнительно малых горизонтальных масштабах, полный поток вообще равен нулю в каждой точке любой замкнутой области. В самом деле,

поле полных потоков описывается с помощью интегральной функции тока ψ , которую можно ввести в силу бездивергентности полного потока по формулам $U = -\psi_y$, $V = \psi_x$. Интегральная функция тока удовлетворяет уравнению

$$((r/H)\psi_x)_x + ((r/H)\psi_y)_y + ((f/H)\psi_x)_y - ((f/H)\psi_y)_x = (\tau^y/H)_x - (\tau^x/H)_y, \quad (11)$$

которое получается исключением с помощью перекрестного дифференцирования уровня из уравнений движения (1). В случае постоянной глубины моря, при постоянном параметре Кориолиса и при равномерном ветре это уравнение сводится к уравнению Лапласа

$$\Delta \psi = 0, \quad (12)$$

так что $\psi \equiv 0$ в любой замкнутой области, т.к. на ее границе $\psi = 0$ в силу условия непротекания для полного потока.

Таким образом, в замкнутой системе Черное море – Керченский пролив – Азовское море в случае, когда $H \equiv \text{const}$, $f \equiv \text{const}$, $\tau^x \equiv \text{const}$, $\tau^y \equiv \text{const}$ и не учитывается сток рек, осадки, испарение, водообмен через пролив Босфор, имеем

$$U \equiv 0, \quad V \equiv 0, \\ \zeta_x \equiv -\tau^x/gH, \quad \zeta_y \equiv -\tau^y/gH. \quad (13)$$

Т.к. в «открытом» и в «замкнутом на бесконечности» каналах $\tau^y \zeta_y \leq 0$, то указанный в начале статьи факт, что в Керченском проливе $\tau^y \zeta_y > 0$, представляется удивительным и поэтому требует объяснения.

Рассмотрим опять меридиональный канал постоянной глубины, движение в котором вызывается равномерным ветром. Поскольку в таком канале $U \equiv 0$, $\zeta_y = \text{const}$, то при $H = \text{const}$ и $\tau^y = \text{const}$ из уравнения (1) имеем $V = \text{const}$ и всегда выполняется равенство

$$gH \zeta_y = -\tau^y + rV. \quad (14)$$

Таким образом, причиной искомого неравенства $\tau^y \zeta_y > 0$ может служить обязательное наличие меридионального потока в канале ($V \neq 0$ и $Q \neq 0$, т.к. $V_x = 0$), причем потока направленного по ветру ($V\tau^y > 0$). При этом либо поток должен быть достаточно сильным, либо достаточно большим должен быть коэффициент придонного трения r , чтобы выполнялось неравенство $r > (\tau^y)^2/(V\tau^y)$.

Поскольку этот поток направлен по ветру, можно предположить, что он формируется ветром, а именно при достаточно длительном действии ветра, когда течения в проливе выходят на квазиустановившийся режим. Разумеется, в установившемся режиме в проливе может существовать поток, который непосредственно не связан с действием ветра, а обусловлен только водообменом между Черным и Азовским морями. Поток воды из одного моря в другое может быть связан с дисбалансом, например, в Азовском море между стоком впадающих в море рек, осадками и испарением, но этот поток не обязательно будет направлен по ветру [6].

Итак, удается объяснить знак наклона уровня вдоль пролива, однако требует объяснения другой факт, а именно противоположность знаков наклона уровня в проливе и около границ пролива в прилегающих областях открытого моря. Формально, открытые границы пролива являются поверх-

ностями слабого разрыва (уровень непрерывен, но существует скачок нормальной к границам производной уровня).

В литературе [3, 7] этот факт связывается с тем, что Керченский пролив практически не оказывает существенного влияния на динамику вод в предпроливных зонах Черного и Азовского морей. Так, например, при воздействии ветров северных румбов (ветер дует с севера) у северной границы Черного моря в окрестности Керченского пролива происходит сгон и уровень моря при удалении от пролива поднимается. В тоже время у южной границы Азовского моря у северной границы Керченского пролива происходит нагон вод и уровень воды при удалении от пролива, наоборот, опускается. Важно, что в этих случаях (согласно данным наблюдений) у северной границы пролива уровень моря выше, чем у южной границы, с чем и связано появление наклона уровня в проливе пропорционального ветру ($\zeta_y < 0$, $\tau^y < 0$). Именно с этим наклоном уровня и связана интенсификация потока в проливе ($V = \tau^y/r + gH\zeta_y/r$) по отношению к переносу в «открытом» канале, обусловленному одним ветром ($V = \tau^y/r$); в канале, «замкнутом на бесконечности», как было показано выше, вообще $V = 0$. Подчеркнем, что в областях открытого моря, прилегающих к проливу, роль придонного трения уменьшается и имеет место баланс $gH\zeta_y \approx -\tau^y$, т.е. $\zeta_y > 0$.

Покажем, что скачок градиента уровня на открытых границах пролива можно объяснить двумя причинами. Во-первых, рельефом дна, а именно резким уменьшением глубины моря H в проливе, по сравнению с глубиной морей около пролива. Во-вторых, особенностями придонного трения в проливе, а именно зависимостью коэффициента придонного трения от глубины моря, конкретно увеличением r при уменьшении H .

Рассмотрим для этого в рамках теории «мелкого» моря ($f = 0$) систему Керченский пролив – прилегающие моря, предполагая $\tau^x = 0$, $\tau^y = \text{const}$ и не учитывая сток рек, осадки и испарение. При этом Керченский пролив будем представлять в виде меридионального канала, на открытых границах которого терпят разрыв глубина моря и коэффициент придонного трения. Положим, что в Черном море $H = H_1 = \text{const}$, $r = r_1 = \text{const}$, в Азовском море $H = H_3 = \text{const}$, $r = r_3 = \text{const}$, а в Керченском проливе $H = H_2 = \text{const}$, $r = r_2 = \text{const}$. На границах пролива уровень и нормальная к границе компонента полного потока являются непрерывными функциями, т.е. на границах $V_1 = V_2$, $V_3 = V_2$, $\zeta_1 = \zeta_2$, $\zeta_3 = \zeta_2$. Будем считать, что в проливе (канале) скорость течения не меняется в меридиональном направлении (вдоль канала) Тогда $(V_2)_y = 0$ и из уравнения неразрывности следует $U_2 \equiv 0$, $V_2 = V_2(x)$, из уравнений движения $(\zeta_2)_x = 0$, $(V_2)_x = 0$, т.е. $V_2 = V = \text{const}$. Считая V известной величиной, для определения меридиональных наклонов уровня на открытых границах пролива, где $V_1 = V$, $V_3 = V$, получим систему уравнений:

$$gH_1\zeta_{1y} = -\tau^y + r_1V, \quad gH_2\zeta_{2y} = -\tau^y + r_2V, \quad gH_3\zeta_{3y} = -\tau^y + r_3V. \quad (15)$$

Сразу же отметим, что при одинаковых коэффициентах трения $r = r_1 = r_2 = r_3$ мы никогда не получим скачок знака производной уровня на открытых границах пролива. В самом деле, из формул (15) следует

$$\zeta_{1y}\zeta_{2y} = (-\tau^y + rV)^2/(g^2H_1H_2) > 0, \quad \zeta_{2y}\zeta_{3y} = (-\tau^y + rV)^2/(g^2H_2H_3) > 0. \quad (16)$$

Для того чтобы знак производной уровня терпел разрыв на границе пролива, необходимо различие коэффициентов r_i . Тогда

$$\begin{aligned}\zeta_{1y} \zeta_{2y} &= (-\tau^y + r_1 V)(-\tau^y + r_2 V)/(g^2 H_1 H_2), \\ \zeta_{2y} \zeta_{3y} &= (-\tau^y + r_2 V)(-\tau^y + r_3 V)/(g^2 H_2 H_3),\end{aligned}\quad (17)$$

Так что правые части могут иметь любой знак.

Т.к. в соответствии с существующими представлениями придонное трение уменьшается с увеличением глубины моря, при $H_1 \gg H_2$ и $H_3 \gg H_2$ получим

$$gH_1 \zeta_{1y} \approx -\tau^y, \quad gH_2 \zeta_{2y} = -\tau^y + r_2 V, \quad gH_3 \zeta_{3y} \approx -\tau^y. \quad (18)$$

Можно принять, что $r_i = r_0/H_i$, $i = 1, 2, 3$. В этом случае принимается пропорциональность придонного трения не полному потоку, а средней по глубине скорости течения, что более правильно с физической точки зрения. Тогда при $\tau^y < 0$ и $V = \lambda \tau^y < 0$ ($\lambda > 0$) получим $\zeta_{1y} > 0$, $\zeta_{3y} > 0$, и при достаточно больших значениях коэффициента трения r_0 и/или при сравнительно малых глубинах пролива $\zeta_{2y} < 0$.

Подчеркнем еще раз, что для формирования наблюдаемого наклона уровня вдоль пролива принципиальное значение имеет наличие потока в проливе, направленного по ветру, и учет сильного придонного трения (из-за малых глубин пролива). Введение скачкообразного изменения глубины моря и коэффициента трения на открытых границах пролива не существенно, это сделано для простоты и ясности.

Заметим, однако, что если для Керченского пролива приближение «мелкого» моря выполняется с достаточной точностью, то для Черного моря и, в меньшей степени, для Азовского моря это является серьезным допущением, для них лучше использовать приближение «глубокого» моря или моря «средней глубины» [2]. Тогда ($f \neq 0$) в формулы для меридионального наклона уровня на границах пролива со стороны Черного и Азовского моря (15) войдет зависимость от зональной компоненты полного потока U_i .

На открытых границах пролива U_i может терпеть разрыв. В проливе $U_2 = 0$, но со стороны моря на открытых границах пролива, вообще говоря, $U_1 \neq 0$, $U_3 \neq 0$, тем более для ветра, дующего вдоль пролива. В этом случае меридиональный наклон уровня будет определяться формулами

$$gH_1 \zeta_{1y} \approx -\tau^y + fU_1, \quad gH_2 \zeta_{2y} = -\tau^y + r_2 V, \quad gH_3 \zeta_{3y} \approx -\tau^y + fU_3. \quad (19)$$

Априори нельзя утверждать, что слагаемые fU_1 и fU_3 малы по сравнению с τ^y . Тем не менее, тот факт, что по данным наблюдений наклоны уровня ζ_{1y} и ζ_{3y} противоположны по знаку напряжению ветра τ^y , может указывать все же на относительно малую величину членов fU_1 и fU_3 в соотношениях (19). По-видимому, из-за сравнительной узости пролива происходит втекание (и вытекание) воды в пролив по нормали к его открытой границе, т.е. не только $U_2 = 0$, но $U_1 \approx 0$ и $U_3 \approx 0$. Формально, это можно получить, предполагая дополнительно, что на открытых границах пролива непрерывна не только меридиональная компонента полного потока, но и ее меридиональный градиент. Тогда на границах $(V_1)_y = (V_3)_y = 0$ и в силу уравнения неразрывности и соответствующих граничных условий на берегах

морей $U_1 = U_3 = 0$. В результате, соотношения (19) будут совпадать с соотношениями (18), полученными в приближении «мелкого» моря.

Подчеркнем, что в трехмерной модели [2], используемой в [1] для описания стационарных течений в Керченском проливе, коэффициент придонного трения на самом деле зависит от глубины моря. Так, связь наклонов уровня с ветром и компонентами полного потока в общем случае имеет вид:

$$-fV = gH\zeta_x + \tau^x + (\tau^x)_H, \quad fU = gH\zeta_y + \tau^y + (\tau^y)_H, \quad (20)$$

где $(\tau^x)_H = A(\partial u/\partial z)_{z=H}$, $(\tau^y)_H = A(\partial v/\partial z)_{z=H}$ – компоненты придонного трения, A – кинематический коэффициент вертикальной вязкости.

В приближении «мелкого» моря, когда безразмерный параметр $aH \ll 1$, где $a = (f/2A)^{1/2}$, $(\tau^x)_H = \tau^x/2 - 3AU/H^2$, $(\tau^y)_H = \tau^y/2 - 3AV/H^2$ и фактически $r = 3A/H^2$, из уравнений (20) вместо уравнений (1) получаем:

$$gH\zeta_x + 3\tau^x/2 - 3AU/H^2 = 0, \quad gH\zeta_y + 3\tau^y/2 - 3AV/H^2 = 0, \quad (21)$$

В приближении «глубокого» моря, когда параметр $aH \gg 1$, получаем $(\tau^x)_H = -fU/2aH$, $(\tau^y)_H = -fV/2aH$, т.е. $r = f/2aH$, и уравнения:

$$-fV = gH\zeta_x + \tau^x - fU/2aH, \quad fU = gH\zeta_y + \tau^y - fV/2aH, \quad (22)$$

Таким образом, для воспроизведения типовой схемы положения уровня в Керченском проливе целесообразно использовать трехмерную модель.

Оценки расхода воды, протекающей через Керченский пролив. В приведенных выше теоретических рассуждениях предполагалось, что движение в Керченском проливе и в его окрестности является установившимся и формируется под действием двух факторов, а именно ветра, дующего непосредственно над проливом, и переноса воды из Азовского моря в Черное (или наоборот), характеризуемого расходом Q (или перепадом уровня на открытых границах пролива).

Строго говоря, водообмен между Азовским и Черным морями существенно зависит от того, является ли движение установившимся или неустановившимся. В случае установившегося движения расход Q не зависит от ветра и связан только с компонентами водного баланса – стоком рек, осадками и испарением. Зависимость расхода Q от ветра, требуемая для объяснения приведенного на рис. типowego положения уровня в Керченском проливе, указывает на нестационарность движения. Предполагается, однако, что движение является квазистационарным, а именно непосредственно в Керченском проливе установившимся, а в Азовском и Черном морях неустановившимся. Это может иметь место вследствие мелководности пролива и, в силу этого, достаточно большого влияния придонного трения (характерное время t адаптации течений к ветру обратно пропорционально коэффициенту придонного трения r , $t = 1/r$). Тем не менее, необходимо признать, что допущение о квазистационарности является существенным ограничением данной теории в ее применении к реальным процессам.

Остановимся теперь на анализе существующих в литературе оценок величины расхода Q . Как уже отмечалось, существуют две причины неравенства нулю этого расхода. Во-первых, это перенос, связанный с водным дисбалансом в Азовском и/или Черном морях. Во-вторых, это непосредственное действие ветра. Первая причина проявляется в чистом виде на больших

временных масштабах, например, при годовом или сезонном осреднении и не связана с действием ветра. Вторая причина, поскольку связана с ветровым нагоном, проявляется на сравнительно малых временных масштабах, например, при суточном осреднении.

Проиллюстрируем сказанное, рассматривая водный баланс Азовского моря. В самом общем виде такой баланс описывается проинтегрированным по всему объему моря уравнением неразрывности, которое можно записать в виде

$$\partial V^A / \partial t - Q_p^A - Q_K^A - Q_0^A = 0, \quad (23)$$

где верхний индекс А означает Азовское море; $V^A = (H^A - \zeta^A) \sigma^A$ – объем моря; σ^A – площадь моря; H^A , ζ^A – средние по площади глубина и уровень моря; $Q_p^A > 0$ – суммарный расход рек, втекающих в Азовское море; Q_K^A – расход воды, протекающей через северную границу Керченского пролива ($Q_K^A > 0$, когда поток направлен из пролива в море), $Q_0^A = Q_{ос}^A + Q_{ис}^A$, $Q_{ос}^A > 0$ и $Q_{ис}^A < 0$ – расходы воды, связанные с осадками и испарением.

Аналогичную формулу можно записать для акватории Керченского пролива. Запишем ее в виде:

$$Q_K^A - Q_K^Ч = Q_0^K - \partial V^K / \partial t, \quad (24)$$

где $V^K = (H^K - \zeta^K) \sigma^K$ – объем акватории; σ^K – площадь пролива; H^K , ζ^K – средние по площади пролива глубина и уровень, $Q_0^K = Q_{ос}^K + Q_{ис}^K$ – расход воды, связанный с осадками и испарением непосредственно в проливе.

Представляется, что в уравнении (24) можно пренебречь членом Q_0^K , т.е. осадками и испарением. Если к тому же пренебречь и изменением по времени объема воды в проливе, получим равенство

$$Q = Q_K^A = Q_K^Ч, \quad (25)$$

как при стационарном водном балансе (сколько воды втекает в пролив, столько же и вытекает, независимо от количества воды циркулирующей внутри пролива).

Считая, что равенство (25) выполняется с достаточной точностью, проанализируем результаты расчетов расхода Q . Отметим, что она может быть определена из уравнения водного баланса (23) или вычислена непосредственно по измеренным скоростям течения.

Сначала рассмотрим ситуацию, когда движение в Азовском море можно считать установившимся, например, осредненное за год. Для оценки среднегодового расхода Q используем правдоподобные значения компонент водного баланса Азовского моря [7]. На самом деле эти величины (расход рек, осадки и испарение) имеют заметную межгодовую изменчивость и, кроме того, определяются с недостаточной точностью. В качестве среднегодовых величин расходов примем $Q_p^A = 35 \text{ км}^3/\text{год}$, $Q_{ос}^A = 15 \text{ км}^3/\text{год}$, $Q_{ис}^A = -35 \text{ км}^3/\text{год}$. Полагая $\partial V^A / \partial t = 0$, получим

$$Q = -Q_{ос}^A - Q_{ис}^A - Q_p^A = -15 \text{ км}^3/\text{год} \approx -500 \text{ м}^3/\text{с},$$

т.е. в среднем за год преобладает течение из Азовского моря в Черное (азовское течение). Подчеркнем, что этот расход совершенно не связан с ветром и, кроме того, не очень велик. Так, если рассмотреть поперечное сечение в северной узости Керченского пролива между пунктами Крым и Кавказ

площадью около 30000 м^2 , то этот расход соответствует средней скорости течения приблизительно $1,7 \text{ см/с}$.

Существуют оценки среднегодового расхода Q , полученные суммированием расходов, основанных на измерениях скорости течений в конкретных ситуациях [8]. В этом случае среднегодовой расход представляет собой разность больших чисел, поскольку расходы воды, вычисленные по измерениям течений в конкретных синоптических ситуациях, примерно на порядок превышают среднегодовую величину и имеют разные знаки. За период с 1963 по 1974 гг. было получено свыше 400 определений расходов воды, измеренных в различные сезоны года и при различных синоптических ситуациях. Повторяемость течений составила 62 % (227 суток за год) для азовского течения и 38 % (139 суток за год) для черноморского. При этом средние величины расходов были равны $0,34 \text{ км}^3/\text{сут}$ для азовского и $0,37 \text{ км}^3/\text{сут}$ для черноморского течения. Среднегодовой расход через Керченский пролив составил $\approx 77 \text{ км}^3/\text{год}$ ($227 \times 0,34$) для азовского и $\approx 51 \text{ км}^3/\text{год}$ ($139 \times 0,37$) для черноморского потока. Получилось опять преобладание азовского потока ($Q \approx -26 \text{ км}^3/\text{год}$), что неплохо согласуется с предыдущей величиной расхода, полученной на основании водного баланса для Азовского моря.

Существуют также оценки среднегодового расхода Q , полученные суммированием расходов, вычисленных в конкретных синоптических ситуациях с помощью гидродинамической модели [9]. В рамках теории «мелкого» моря рассматривался прямоугольный пролив переменной ширины $b = b(y)$ и глубины $H = H(y)$. Скорость течения усреднялась поперек канала от берега до берега. Фактически использовались уравнения

$$gH \zeta_y + \tau^y - rV = 0, \quad bV = Q = \text{const}. \quad (26)$$

Задавая известные из наблюдений напряжение ветра и значения уровня на краях пролива и интегрируя первое уравнение (26), получаем зависимость между перепадом уровня, интенсивностью ветра и расходом воды Q . В результате [6] среднемноголетний расход за периоды 1927 – 1940 гг., 1948 – 1970 гг. составил $50,6 \text{ км}^3/\text{год}$ для азовского потока, $32,7 \text{ км}^3/\text{год}$ для черноморского потока и в целом $Q = -17,9 \text{ км}^3/\text{год}$, что опять неплохо согласуется с величиной расхода, полученной на основании водного баланса для Азовского моря.

Отметим, наконец, расчет среднегодового расхода Q выполнен в рамках нестационарной трехмерной модели [10], в которой рассчитывались ветровые течения в системе Азовское море – Керченский пролив – Черное море. При расчете течений в Керченском проливе (на 2 км сеточной области) в качестве граничных условий принимались значения уровня на северной границе пролива, полученные в результате расчета течений в Азовском море (на 10 км сеточной области) при различных подтипах ветровых условий. На южной границе сеточной области, примерно в 50 км от выхода из пролива в Черном море, колебания уровня полагались равными нулю. При расчете уровня Азовского моря Керченский пролив полагался перекрытым. На основе полученных результатов вычислялся расход воды при данном подтипе ветра как интеграл по времени, начиная с возникновения ветра и до конца его действия. После этого рассчитывался расход для различных сезонов года. Все типы синоптических ситуаций были разбиты на две группы:

1) ветры северных и западных румбов, при которых уровень у северного входа в пролив выше, чем у южного и поток направлен из Азовского моря в Черное; 2) ветры южных и восточных румбов, при которых поток имеет обратное направление. В результате расход получился равным $55,5 \text{ км}^3/\text{год}$ для азовского и $38,1 \text{ км}^3/\text{год}$ для черноморского потоков, в целом $Q = -17,4 \text{ км}^3/\text{год}$, что согласуется с предыдущими величинами среднегодового расхода.

Рассмотрим теперь сезонную изменчивость расхода воды через Керченский пролив, предполагая опять выполнение равенства (25). Вначале оценим изменчивость величины Q по изменчивости компонент водного баланса. Для этого условно разделим год на две части: зимне-весенний и осенне-летний сезоны. Далее, в соответствии с приведенными в [7, 11] данными наблюдений, примем, что в зимне-весенний сезон сток рек $Q_p^A = 50 \text{ км}^3/\text{год}$, осадки $Q_{oc}^A = 15 \text{ км}^3/\text{год}$, испарение $Q_{ис}^A = -10 \text{ км}^3/\text{год}$; изменение объема моря из-за изменения среднего уровня Азовского моря $\partial V^A/\partial t = -25 \text{ км}^3/\text{год}$ ($\sigma^A = 40000 \text{ км}^2$, $\partial \zeta^A/\partial t \approx 60 \text{ см}/\text{год}$); в осенне-летний сезон $Q_p^A = 20 \text{ км}^3/\text{год}$, $Q_{oc}^A = 15 \text{ км}^3/\text{год}$, $Q_{ис}^A = -60 \text{ км}^3/\text{год}$; $\partial V^A/\partial t = 25 \text{ км}^3/\text{год}$. Здесь учтено весеннее половодье и резкое усиление испарения с поверхности Азовского моря в конце лета и начале осени. В результате получаем, что в зимне-весенний сезон $Q = -30 \text{ км}^3/\text{год}$, в осенне-летний сезон $Q = 0$.

Разумеется, полученный результат не выдерживает серьезной критики. Важно, однако, что в летний сезон расход Q существенно меньше, чем в зимний сезон. Если данные о расходах рек, осадках и испарении не вызывают особых нареканий, то данные об изменчивости объема моря, т.е. изменчивости среднего уровня Азовского моря, представляются недостаточно точными. Дело в том, что они получены на основе фактических данных по наблюдениям уровня на прибрежных станциях [11] и с допущением, что изменение по времени среднего по площади моря уровня равно изменению по времени уровня, осредненного по прибрежным станциям. При уточнении компонент водного баланса, а также величины изменчивости объема моря вполне может получиться, что в летний сезон течение направлено как из Черного моря в Азовское, так и из Азовского моря в Черное.

На основе данных непосредственных измерений течений с учетом их повторяемости, приведенных в [8], были вычислены среднемесячные величины расходов. Результаты расчета среднемесячных расходов вместе с данными наблюдений приведены в таблице. Осреднение за сезон показывает, что для зимне-весеннего периода (декабрь – май) $Q = -28,2 \text{ км}^3/\text{год}$, а для летне-осеннего сезона $Q = -15,3 \text{ км}^3/\text{год}$. В оба сезона преобладающим является азовское течение.

В [6] приведены величины среднемесячных расходов, вычисленных по модели [9] за периоды 1927 – 1940 гг., 1948 – 1970 гг. Использование этих данных дает $Q = -27,2 \text{ км}^3/\text{год}$ для зимне-весеннего периода, $Q = -8,6 \text{ км}^3/\text{год}$ для летне-осеннего. В оба сезона вода течет из Азовского моря в Черное. При этом расход азовского и черноморского течения составляют $60,6$ и $33,4 \text{ км}^3/\text{год}$ в зимне-весенний сезон и $40,6$ и $32 \text{ км}^3/\text{год}$ в осенне-летний сезон соответственно.

Отметим, что все перечисленные способы расчета величины Q приводят к достаточно близким оценкам для среднегодового расхода и для средне-

месячных значений. Суммарный расход получается не очень большим, по отдельности расходы азовского и черноморского течений в несколько раз превышают суммарный расход. В отдельных случаях (при штормовых ветрах) расход, вычисленный по измеренным скоростям течений, достигал сравнительно больших величин и превышал $10000 \text{ м}^3/\text{с} \approx 315 \text{ км}^3/\text{год}$. В этих случаях скорость течения между пунктами Крым и Кавказ (в северной узости Керченского пролива), осредненная по площади поперечного сечения, превышала 30 см/с [8]. Расход воды через пролив, связанный со штормовым нагоном, имеет сравнительно большую величину, но штормовой нагон происходит на синоптических временных масштабах.

Зная порядок величины расхода, можно оценить величину коэффициента придонного трения, при котором имеет место типовое положение уровня моря в проливе. Для этого воспользуемся вторым уравнением (18)

$$gH_2 \zeta_{2y} = -\tau^y + r_2 V$$

и соотношением $V = \lambda \tau^y$ ($\lambda > 0$). Учитывая неравенство $\zeta_{2y} \tau^y > 0$, имеющее место при типом наклоне уровня, получим $(-1 + \lambda r_2) > 0$, или $r_2 > 1/\lambda$. Примем (в качестве типичных значений) напряжение ветра $\tau^y = 0,5 \text{ см}^2/\text{с}^2$, т.е. скорость ветра 5 м/с , среднюю скорость течения в Керченском проливе между пунктами Крым и Кавказ 10 см/с , ширину L и глубину H сечения 5 и 6 м соответственно. Тогда $V = 0,6 \text{ м}^2/\text{с} = 6000 \text{ см}^2/\text{с}$, $Q = 3000 \text{ м}^3/\text{с} \approx 100 \text{ км}^3/\text{год}$, $\lambda = 1,2 \cdot 10^4 \text{ с}$ и, следовательно, $r_2 > 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Принимая, в соответствии с данными наблюдений [3], перепад уровня между северной и южной границей $\Delta \zeta_2 = 5 \text{ см}$, расстояние между границами $B = 40 \text{ км}$, получим

$$\lambda r_2 = 1 + gH_2 \Delta \zeta_2 / (B \tau^y) = 2,5,$$

т.е. $r_2 \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, или $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ см/с}$ при $r_2 = r_0/H_2$. При этом характерное время адаптации течений к ветру $t = 1/r_2 \approx 1,4 \text{ ч}$.

Т а б л и ц а . Результаты расчета среднемесячных расходов вместе с данными наблюдений.

параметры	месяцы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	год
повторяемость (%) (по [8])	азовские течения	69	55	60	61	60	73	52	51	63	78	40	73	62
	черноморские течения	31	45	40	39	40	27	48	49	37	22	60	27	38
средние значения измеренных расхо- дов (м ³ /с) (по [8])	азовский поток (-)	3640	4650	3540	4400	3980	4500	4260	3580	2780	3410	4320	4560	3920
	черноморский поток (+)	4170	6700	3190	5680	3480	4190	3480	3550	4070	3820	6190	4300	4300
рассчитанные среднемесячные расходы (км ³ /год)	азовские течения	-80,7	-76,9	-68,3	-83,5	-76,8	-102	-71,2	-58,7	-54,5	-85,5	-53,8	-107	-76,9
	черноморские течения	41,6	90,6	41,0	68,9	44,7	35,2	53,7	55,9	46,8	27,0	115	37,3	51,7
	суммарные течения	-39,1	13,7	-27,3	-14,6	-32,1	-67,0	-17,5	-2,8	-7,7	-58,5	61,7	-69,7	-25,2

В заключение отметим, что в рамках теории установившихся течений рассматривается движение в Керченском проливе, обусловленное двумя причинами: непосредственным действием ветра и переносом воды из одного моря в другое. Определение расхода этого переноса является проблемой. Расход, по существу, задается априори или, более точно, с помощью полуэмпирической зависимости от величины и направления ветра. Альтернативное заданию расхода задание уровня моря на открытых границах пролива также не решает указанной проблемы хотя бы из-за отсутствия таких данных об уровне, причем меняющегося вдоль достаточно протяженных открытых границ.

Разумеется, для более точного описания течений в Керченском проливе необходима нестационарная модель, но пока неясно, как в модели Керченского пролива правильно ставить условия на открытых границах. Неясно, как наиболее оптимально учитывать процессы в прилегающих к проливу районах Азовского и Черного моря, чтобы получить на открытых границах пролива изменяющиеся по времени распределения уровня или, что еще лучше, непосредственно скорости течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Шапиро 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.233-242.
2. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений.– М.: Изд. АН СССР, 1960.– 126 с.
3. *Альтман Э.Н.* Динамика вод Керченского пролива // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.ИВ. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические условия.– СПб: Гидрометеоздат, 1991.– С.291-324.
4. *Фельзенбаум А.И., Шапиро Н.Б.* Метод «срединного сечения» и его развитие // Морские гидрофизические исследования.– 1969.– 2.– С.9-27.
5. *Фельзенбаум А.И.* Динамика морских течений // Итоги науки и техники. Серия: Гидромеханика.– М.: ВИНТИ, 1970.– С.97-338.
6. *Гаргона Ю.П., Гонтарев Н.П., Заклинский Г.В.* Водный баланс // Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т.V. Азовское море.– СПб: Гидрометеоздат, 1991.– С.96-101.
7. *Альтман Э.Н.* Исследование водообмена между Черным и Азовским морями // Сб. работ ЛЮМ ГОИН.– 1972.– 10, №11.– С.3-47.
8. *Альтман Э.Н.* К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе (по натурным наблюдениям) // Тр. ГОИН.– 1976.– вып.132.– С.17-28.
9. *Альтман Э.Н., Толмазин Д.М.* Метод расчета течений и водообмена в Керченском проливе // Океанология.– 1970.– 10, №3.– С.438-446.
10. *Белов В.П., Филиппов Ю.Г.* Основные черты динамики вод Азовского моря и Керченского пролива // Тр. ГОИН.– 1978.– вып.139.– С.11-20.
11. *Фомичева Л.А.* Сезонная изменчивость уровня Азовского моря // Тр. ГОИН.– 1981.– вып.153.– С.24-32.

Материал поступил в редакцию 2.02.2005 г.