

ГЛАВА 4. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ НАГОНЫ В ДЕЛЬТЕ р. ДОН

УДК 519.6:532.5

DOI 10.23885/1993-6621-2020-8-65-71

4.1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СГОННО-НАГОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ТАГАНРОГСКОМ ЗАЛИВЕ

А.Л. Чикин, Л.Г. Чикина

Аннотация. Дается описание двухслойной математической модели гидродинамики водоемов с большой неоднородностью глубин, в которой используются как уравнения мелкой воды, так и трехмерные уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости. Модель тестируется по данным наблюдений за уровнем водной поверхности на береговых метеостанциях. Приводятся результаты расчетов изменения расходов воды и уровня водной поверхности в дельте Дона во время экстремального ветрового нагона 23–24 марта 2013 г.

Ключевые слова: ветровой нагон, математическая модель, вычислительный эксперимент, уравнения мелкой воды

Экстремальные наводнения в Таганрогском заливе и дельте Дона, обусловленные активностью черноморских циклонов, приносят огромный социально-экономический ущерб. Поэтому крайне необходимо оперативное прогнозирование экстремальных заток трансформированных черноморских вод в восточную часть Таганрогского залива и дельту р. Дон.

С этой целью используется двухслойная математическая модель гидродинамики Азовского моря [Чикин, 2005].

Суть подхода состоит в разбиении исходной трехмерной области расчета Ω (водной толщи водоема), ограниченной сверху акваториальной, а снизу – донной поверхностями, на две: глубоководную и мелководную части. Для декомпозиции пространственной области моделирования Ω проведем горизонтальную секущую плоскость P , отстоящую от невозмущенной поверхности водоема P_0 на глубину, равную максимальной глубине мелководья (рис. 1). Таким образом, плоскость P разделила исходную область на две подобласти: верхний слой Ω_1 (слой I) – все мелководье и верхняя часть глубоководного слоя и глубоководный слой Ω_2 (слой II). Предполагается, что эффект осушения из-за сгона воды может присутствовать только в мелководных районах.

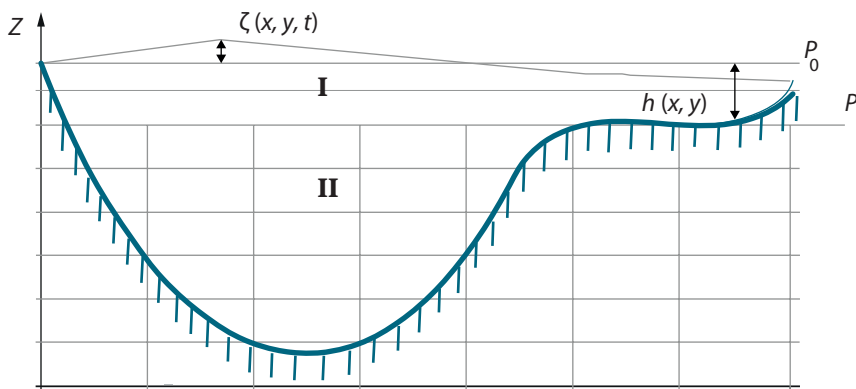


Рис. 1. Вертикальный разрез водоема с обширным мелководьем

Движение воды в слое I описывается уравнениями мелкой воды:

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

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

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

Здесь $H = h + \zeta$; $h = h(x, y)$ – 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; $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – возмущение уровня воды; Ω – коэффициент Кориолиса; 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 нижний 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:

$\bar{\tau}_s = \gamma |\bar{W}_B| \bar{W}_B$, $\bar{\tau}_B = \gamma |\bar{W}_T| \bar{W}_T$, $\beta(x, y)$ – коэффициент трения верхнего слоя жидкости о дно (или о глубоководный слой); γ – коэффициент трения ветра о слой I.

Движение воды в глубоководном слое II описывается системой, состоящей из уравнений количества движения, уравнения неразрывности среды и уравнения гидростатического давления:

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

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

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

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

Здесь $u = u(x, y, z, t)$, $v = v(x, y, z, t)$, $w = w(x, y, z, t)$ – компоненты вектора скорости; $p(x, y, z, t)$ – давление; x, y, z, t – пространственные переменные и время соответственно; $p_a = p_a(x, y)$ – атмосферное давление; ν_{xy} , $\nu_z(z)$ – коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости соответственно; ρ – плотность воды; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Уравнения (1)–(5) замыкаются соответствующими граничными условиями.

Граничные условия на твердой границе $\partial\Omega_T$ задаются условиями скольжения:

$$\mathbf{V}_n|_{\partial\Omega_T} = 0, \quad \left. \frac{\partial \mathbf{V}_\tau}{\partial n} \right|_{\partial\Omega_T} = 0,$$

где $\mathbf{V}_n$ – нормальная составляющая вектора скорости, $\mathbf{V}_\tau$ – касательная составляющая вектора скорости. В местах втекания или вытекания воды $\partial\Omega_R$ задаются соответствующие значения скоростей

$$u|_{\partial\Omega_R} = u_1, v|_{\partial\Omega_R} = v_1, u_s|_{\partial\Omega_R} = u_{s1}, v_s|_{\partial\Omega_R} = v_{s1}.$$

На границе между слоями $\partial\Omega_l$ ставится условие равенства скоростей

$$u|_{\partial\Omega_l} = u_s, v|_{\partial\Omega_l} = v_s.$$

Функции $F_x(x, y)$ и $F_y(x, y)$, описывающие взаимодействие I и II слоя, задаются следующим образом:

$$F_x(x, y) = \frac{uw}{H}, \quad F_y(x, y) = \frac{vw}{H}.$$

В качестве начальных данных можно задавать известное распределение скоростей и уровня воды

$$u|_{t=0} = u^0, u_s|_{t=0} = u_s^0, v|_{t=0} = v^0, v_s|_{t=0} = v_s^0, w|_{t=0} = w^0, \zeta|_{t=0} = \zeta^0$$

или считать эти значения нулевыми.

Уравнения модели решаются конечно-разностными методами. Алгоритм вычисления параметров течения воды на $(n+1)$ -ом временном слое основан на том принципе, что каждое уравнение является «определяющим» для своего неизвестного. Все остальные переменные считаются известными и берутся с n -го слоя. При конечно-разностной аппроксимации уравнений количества движения используются неявные «противопотоковые» схемы. Перепад уровня воды и вертикальная компонента скорости определяются из разностных аналогов уравнений дифференциальных уравнений.

Для численного исследования влияния ветра на уровненный режим Азовского моря и оценки результатов расчета использовались данные следующих метеостанций: Геническ, Бердянск, Мариуполь, Таганрог, Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк, Мысовое [Морской ... 1974]. На рисунке 2 показано поведение уровня воды относительно его среднего значения в течение 24 суток (данные снимались через каждые 6 ч) на метеорологическом посту в районе г. Геническа. Варьирование коэффициентов трения ветра о свободную поверхность воды и вязкости позволило добиться наилучшего согласования результатов расчета с натурными данными [Морской ... 1974].

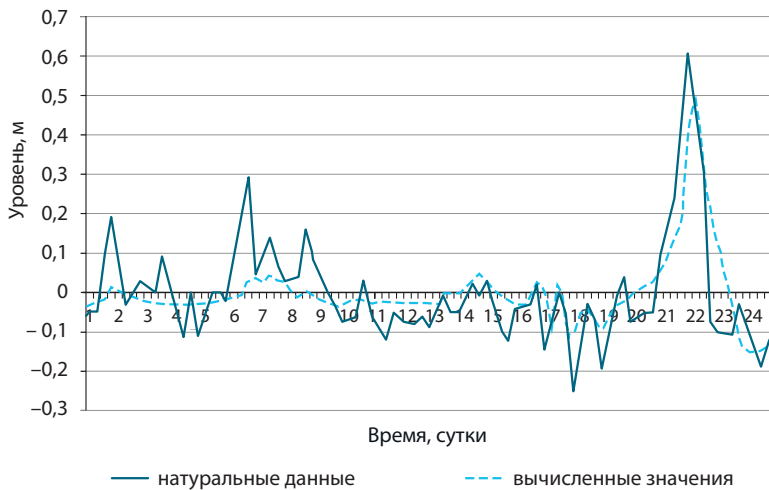


Рис. 2. Сопоставление вычисленных (штриховая кривая) и натуральных (сплошная) значений уровня Азовского моря в районе г. Геническа (01–24.10.1974)

Аналогичные исследования были проведены для метеостанций г. Ейска и г. Темрюка.

Оценку качества прогнозируемых значений, вычисляемых с помощью предлагаемой модели, проводили по методике [Наставления ... 1975]. В таблице 1 приведены значения стандартной ошибки S рассчитанных значений, среднего квадратического отклонения σ наблюдаемых значений от среднего их значения, отношения S/σ и коэффициенты корреляции r между натурными данными и расчетными значениями по перепадам уровня воды. Согласно п. 6.2.5 и 6.9.1 из [Наставления ... 1975] предлагаемый метод расчета дает приемлемые результаты при соотношении $S/\sigma < 0,67$ для числа измерений $n \geq 25$. Полученные результаты удовлетворяют данному условию.

С помощью моделирования установлено, что резкая смена направления ветра с северо-восточного на юго-западное увеличивает скорость поступления воды в дельту Дона, существенно усиливая эффект ее затопления. Для установления этого факта сравнивались две ситуации:

- а) начало нагона при юго-западном ветре после штилевой погоды;
- б) начало нагона после сгонного явления, то есть после действия восточного ветра. Сгон моделировался при скорости восточного ветра 9 м/с, который затем изменялся на ветер юго-западного направления скоростью 15 м/с.

Таблица 1. Значения основных параметров оценки точности метода для перепада уровня воды

Станции	n	σ , м	S , м	S/σ	r
Геническ	96	0,134	0,089	0,665	0,77
Ейск	48	0,096	0,045	0,473	0,99
Темрюк	48	0,105	0,051	0,484	0,98

В случае предварительного сгона значительно увеличивается скорость нагонного течения, а соответственно и объем поступающей в дельту воды. Хотя в обоих случаях затопление дельты длилось условных 22–23 часа, изменения уровня воды существенно различаются. Если нагон начинается при штилевой погоде, то уровень воды поднимается от нулевой отметки, соответствующей естественной глубине водоема (рис. 3), и дальше монотонно возрастает по мере поступления излишков воды. Если перед нагоном наблюдался сгон воды, то сначала уровень отрицателен (что характерно для сгонного явления), но затем быстро увеличивается и в конце концов становится выше нагона после штиля. Этот результат показывает, что при резкой смене восточного ветра на западный затопление происходит быстрее и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующим западным ветре.

23–24 марта 2013 г. в результате сильного штормового нагона воды из акватории Азовского моря значительная территория в дельте Дона чрезвычайно быстро была затоплена. Уровень воды поднимался со скоростью 11–12 см/час. К 18 часам 24 марта наблюдался максимальный уровень воды (280 см) по данным самописца, установленного на посту в п. Донском. По метеорологическим наблюдениям, полученным с береговой научно-экспедиционной базы Южного научного центра РАН на период с 20 по 26 марта 2013 года, было промоделировано развитие нагонного явления в дельте Дона.

Верификация подъема уровня проводилась по рейке, установленной на БНЭБ «Кагальник». Максимальные значения подъема уровня оценивались (фиксируются) путем нивелировки отметок уровня высоких вод сразу после спада нагона (рис. 4). Расчет проводился с шагом по времени $dt = 5$ минут и данные снимались через каждые 3 часа. Видно, что модель достаточно хорошо описывает развитие гидрологической ситуации в данном районе.

Для расчета объема поступающей в дельту Дона воды (куб. м/с) из Таганрогского залива было рассмотрено поперечное сечение восточной части залива длиной около 30 км. Считалось, что на затопление расходуется только нагонная составляющая перепада уровня, которая с учетом скорости течения давала объемный расход поступающей воды.

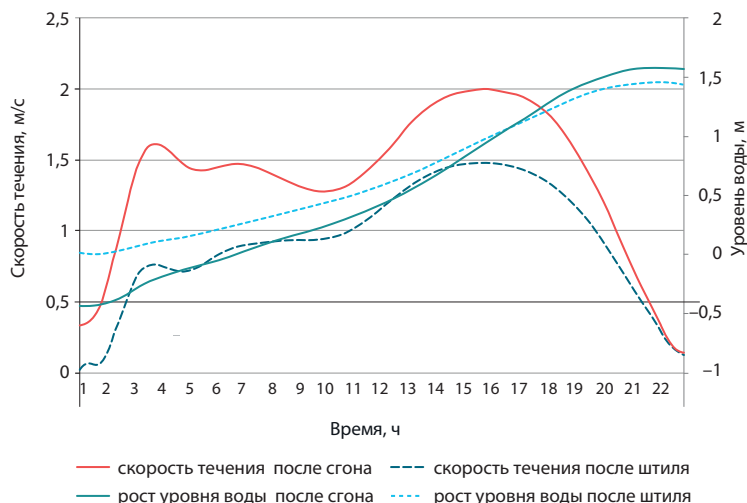


Рис. 3. Поведение скорости течения и уровня воды при различных начальных условиях нагона

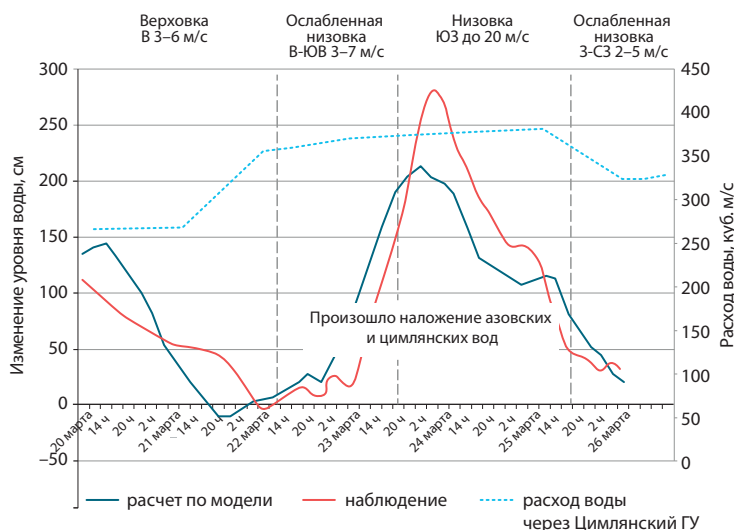


Рис. 4. Изменение относительного уровня воды на период с 20 по 26 марта 2013 г. на посту «Кагальник»

На рисунке 5 приведен график изменения объема воды, поступающей из Таганрогского залива в дельту Дона. Видно, что максимальный объем воды поступал в ночь с 23 на 24 марта и составил около 10 тыс. куб. м/с. Затем поступление стало резко уменьшаться, но все равно скорость поступления воды оставалось положительной, что вело к продолжению процесса затопления. И только к вечеру 24 марта поступление воды прекратилось и вода стала убывать. Вечером 25 марта расход убывающей в Таганрогский залив воды составил примерно 5 тыс. куб. м/с.

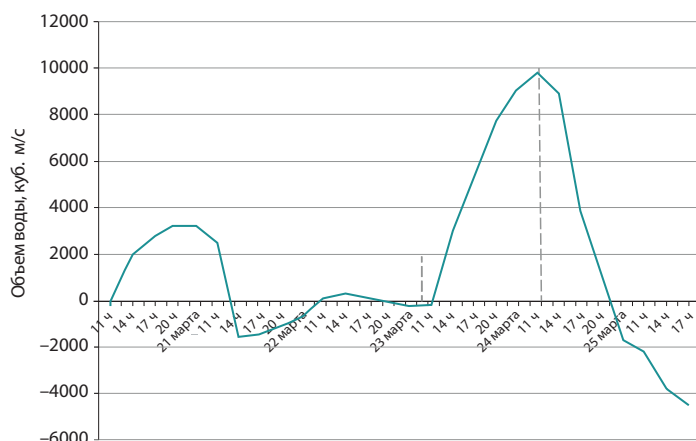


Рис. 5. Изменение объемного расхода воды на период с 20 по 26 марта 2013 г.

Сравнение результатов расчета с наблюдаемыми данными показало, что представленная математическая модель достаточно адекватно описывает гидродинамику течений в северо-восточной части Таганрогского залива, а также сгонно-нагонные явления. Данная модель позволяет рассчитывать ветровые течения и сгоны-нагоны в случае изменения береговой линии, что позволит в дальнейшем прогнозировать степень опасности затопления дельты Дона.

Публикация подготовлена в части сбора натурных данных в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН гр. проекта № АААА-А18-118122790121-5, в части разработки методов численного моделирования в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80010 «Исследование и прогноз опасных гидрометеорологических и геолого-геоморфологических процессов в районах функционирования стратегических объектов на Азово-Черноморском побережье (исторические и современные аспекты)». Расчеты выполнены на кластере ЦКП «Высокопроизводительные вычисления».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Морской гидрометеорологический ежемесячник. Черное и Азовское моря. Севастополь, 1974. № 10. С. 22–32.

Наставление по службе прогнозов (служба морских гидрологических прогнозов). Разд. 3, ч. 3. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 136 с.

Чикин А.Л. Об одном из методов расчета параметров течений в водоемах с большой неоднородностью глубин // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 1. С. 55–60.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Чикина Любовь Григорьевна – д.ф.-м.н., проф., Южный федеральный университет; lchikina@sfnu.ru

Чикин Алексей Львович – д.ф.-м.н., гл.н.с. ЮНЦ РАН; chikin@sfnu.ru