

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ДЕЛЬТЕ ДОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕТРОВОЙ СИТУАЦИИ

А.Л. Чикин¹, Л.Г. Чикина²

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

² Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону
chikin1956@gmail.com

Аннотация. Представлена математическая модель процесса колебаний уровня воды в дельтовой области реки Дон в зависимости от ветровой ситуации над Азовским морем и Таганрогским заливом. Данная модель объединяет в себе две модели, построенные и верифицированные ранее: модель гидродинамики Азовского моря и модель движения воды в рукавах дельты Дона. Гидродинамическая составляющая модели для Азовского моря описывается уравнениями мелкой воды, а движение в рукавах дельты Дона описывается уравнениями Сен-Венана. Для определения гидродинамических параметров в дельтовой области Дона одним из граничных условий является значение уровня воды в принимающем водоеме – Таганрогском заливе.

Предлагаемая модель позволяет в зависимости от ветровой ситуации над Азовским морем и Таганрогским заливом определять параметры течения в основных рукавах Дона. Это происходит за счет автоматической передачи данных их морской составляющей модели в русловую составляющую. Приводится сравнение расчетных значений уровня воды с наблюдаемыми данными. Предлагаемую модель можно применять для определения участков судоходного русла Дона, где движение судов затруднено из-за возможного низкого уровня воды.

Ключевые слова: устьевая область, уравнения мелкой воды, уравнения Сен-Венана, уровень свободной поверхности, навигационная глубина, вычислительный эксперимент.

Введение. Устьевая область Дона – ключевой район бассейна Азовского моря, где происходят сложные процессы взаимодействия речных и морских вод. Она состоит из устьевого участка реки (от станицы Раздорской до вершины дельты в районе г. Ростова-на-Дону), дельты Дона, которая включает в себя три основных рукава Дона: Старый Дон (судоходный рукав), Большая Каланча, переходящая в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму, а также включает Таганрогский залив (рис. 1). Устьевая область Дона характеризуется проявлением здесь сгонно-нагонных колебаний уровня.

По Дону осуществляется значительный объем речных перевозок страны. В этой связи возникает необходимость прогнозирования участков с лимитирующими глубинами. Это относится, прежде всего, к наличию многочисленных перекатов, которые распределены по всей рассматриваемой области.

Серьезную угрозу представляют значительные сгонные явления при экстремальных восточных и нагонных при западных ветрах. Установлено [1], что особенно опасна ситуация, когда

перед нагоном наблюдался сгон воды. При резкой смене восточного ветра на западный затопление происходит быстрее, и оно сильнее по масштабу, чем при постоянно действующим западным ветре. Подобная картина наблюдалась 23.09.2013, когда восточный ветер 3–11 м/с сменился на юго-западный 15 м/с с порывами 20–22 м/с.

Материалы и методы. Для основного русла Дона от ст. Раздорской до вершины дельты, состоящего только из одной открытой части, в [2] с помощью математической модели проведено численное исследование зависимости поверхностного уровня воды от расхода поступающей воды и уровня воды в принимающем водоеме. В работе [3] область расчета расширена до границы с Таганрогским заливом и включает в себя три основных рукава Дона – Старый Дон, Большую Каланчу, переходящую в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму. При расчете течений в рукавах Дона в качестве входных данных используются уровни воды в принимающем водоеме – Таганрогском заливе, а также расход поступающей в основное русло воды. Эти данные берутся, как правило, из наблюдений. Однако снять наблюдения в нужных точках (устьях



Рис. 1. Расположение гидропостов и расчетных точек уровней в устьях основных рукавов Дона: *кружками* обозначены точки, соответствующие устьям рукавов; *треугольниками* – гидропосты, где наблюдались уровни воды; *на врезке* – схема устьевой области

основных рукавов Дона) часто не представляется возможным. Для преодоления этой проблемы было предложено использовать модель гидродинамики Азовского моря для получения значений уровня воды в нужных точках при заданной ветровой ситуации. Таким образом, происходит своего рода объединение модели гидродинамики Азовского моря и модели гидродинамики устьевой участка реки Дон.

Принцип работы объединенной модели следующий. Для заданной ветровой ситуации на каждом временном шаге рассчитываются скорости течения и величина уровня воды. Расчет проводится для всего Азовского моря в целом, а не только для Таганрогского залива. Это объясняется тем, что гидродинамика Таганрогского залива определяется гидродинамикой Азовского моря. Кроме того, с вычислительной точки зрения такой подход существенно облегчает решение задачи, так как нет необходимости ставить граничные условия на открытой границе Таганрогского залива. Затем значения уровня воды, соответствующие точкам устьев основных рукавов Дона, передаются в модель руслового потока и производится расчет параметров течения в русле. Таким образом, имеется возможность наблюдать расчетные значения как в основных рукавах Дона, так и в точках принимающего водоема – Таганрогского залива.

Математическое представление объединенной модели моря и русла можно дать следующим образом. Движение воды в Азовском море (морская составляющая модели) описывается уравнениями мелкой воды:

$$\begin{aligned} \frac{du_s}{dt} - \Omega v_s &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H} - \frac{\tau_{bx}}{H}, \\ \frac{dv_s}{dt} + \Omega u_s &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H} - \frac{\tau_{by}}{H}, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial H u_s}{\partial x} + \frac{\partial H v_s}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

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, компоненты скорости; $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – 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. Эти величины зависят от скорости ветра $\vec{W}_B = \{W_x; W_y\}$ и течения $\vec{W}_T = \{u_s; v_s\}$ и определяются так:

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

где β – коэффициент трения жидкости о дно; γ – коэффициент трения ветра о свободную поверхность.

В качестве граничных условий ставится условие скольжения на твердой границе, кроме точек, где происходит втекание или вытекание воды. Начальные условия нулевые.

Движение воды в открытом русле без распределенного бокового притока (русловая составляющая модели) задается следующей системой дифференциальных уравнений [4; 5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \alpha_s \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{W} \right)}{\partial x} + gW \left(\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \end{cases}$$

где Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; t – время, с ; W – площадь живого сечения, м^2 ; z – уровень воды, м ; x – координата, м ; K – модуль расхода, $\text{м}^3/\text{с}$; $g = 9,81$ – принятое значение ускорения свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$. Коэффициент $\alpha_s \geq 1$ учитывает неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока [5]. Для идеализированных русел рукавов с параболической формой поперечного сечения α_s обычно близок к единице. Модуль расхода K вычисляется по формуле $K = W \cdot C \sqrt{R}$, здесь R – гидравлический радиус; C – коэффициент Шези, найденный по формуле Маннинга

$$C = \frac{R^{1/6}}{n},$$

где n – шероховатость дна.

Устьевую область Дона представим в виде графа (см. врезку на рис. 1), состоящего из пяти ребер, соответствующих участкам открытых русел, и шести вершин, четыре из которых соответствуют конечным узлам (1, 3, 5, 6), а две – узлам разветвлений (2, 4). В качестве граничных условий в начальной точке (узел 1) задается расход поступающей воды $Q_0(0, t)$, в конечных точках X_k (узлы 3, 5, 6) задается уровень в принимающем водоеме $z_k(X_k, t)$. В узлах ветвления граничные условия задаются следующим образом: сумма притоков-оттоков равна нулю $\sum_i Q_i^* = 0$ (i – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой $z_i = z_j$.

Задача решается конечно-разностными методами на равномерной сетке с использованием неявных разностных схем. Численная реализация модели осуществлялась на высокопроизводительных вычислительных системах в среде MPI.

Результаты и обсуждение. Были рассмотрены различные ветровые ситуации разной продолжительности и в разное время года. Расчетные и наблюдаемые значения уровня воды сравнивались на гидропосту (ГП) Донской, расположенном в русле Старый Дон, в 7 км от его устья, ГП Взморье, расположенном в Таганрогском заливе, в 5 км от устья рукава Старый Дон, а также на ГП в Ростове-на-Дону в 42 км от устья. Данные ГП изображены на рисунке 1 треугольниками. Сравнение расчетных и наблюдаемых значений уровня воды старались проводить в периоды, когда фиксировались как нагоны, так и сгоны воды в Таганрогском заливе.

Адекватность морской составляющей модели проверяли по наблюдаемым значениям уровня воды на гидропосте Взморье, расположенном в Таганрогском заливе, в 5 км от устья рукава Старый Дон.

Численно установлено, что, несмотря на относительную близость устьев рукавов Дона, уровни воды в них могут быть различными, что оказывает влияние на движение воды в рукавах Дона. Значения уровней воды в данных точках нужны для задания граничных условий при дальнейших расчетах гидродинамики во всей устьевой области Дона с помощью русловой составляющей модели. При действии слабого ветра уровни воды в устьях практически совпадают, но с усилением ветра значения уровней начинают существенно отличаться. При нагонах воды, когда сила ветра достигала 12–14 м/с, различие уровней составляет порядка 30 см. При сгонах это различие равно 25 см, если ветер дует силой 10–12 м/с. При ветрах силой 2–8 м/с значения уровней в устьях рукавов практически не отличаются или отличаются незначительно.

Результаты расчетов по русловой составляющей сравнивали с наблюдениями, полученными на ГП в Ростове-на-Дону и Донском. В период с 12.02.2021 по 18.02.2021 ветер принимал несколько направлений. После действия восточного ветра силой 8–10 м/с 12.02.2021 в Ростове наблюдался небольшой сгон воды (–0,16 м). Затем ветер резко изменил направление на западное силой 8–11 м/с и действовал до 14.02.2021, что привело к существенному нагону воды (1,81 м). Затем ветер ослаб до 1–2 м/с и принял северные направления. На рисунке 2 представлены графики наблюдаемых и расчетных значений уровня в основном русле

Дона в Ростове-на-Дону. Расчетные значения повторяют динамику колебаний уровня воды в точке наблюдения, погрешность не превышает 22 %.

Экстремальный сгон воды в Таганрогском заливе наблюдался в период 12.10.2016 по 28.10.2016. Этот сгон воды привел к тому, что суда были вынуждены простаивать по несколько дней в восточной части Таганрогского залива. Так, 24.10.2016 практически на неделю было остановлено движение 45 судов из-за резкого снижения уровня воды [6].

С 12.10.2016 по 13.10.2016 дул ветер восточного направления силой 9–11 м/с. Затем он ослаб до 1–2 м/с и принял направление Ю–ЮЮЗ, но с 17.10.2016 вновь стал восточным сначала силой 2–4 м/с, а затем усилился до 10–17 м/с. Такая ветровая ситуация сохранялась с 23.10.2016 по 25.10.2016. В этот период уровнемер перестал работать, что привело к отсутствию данных. Однако расчетные значения позволили оценить колебание уровня воды на ГП Донской в этот период (рис. 3).

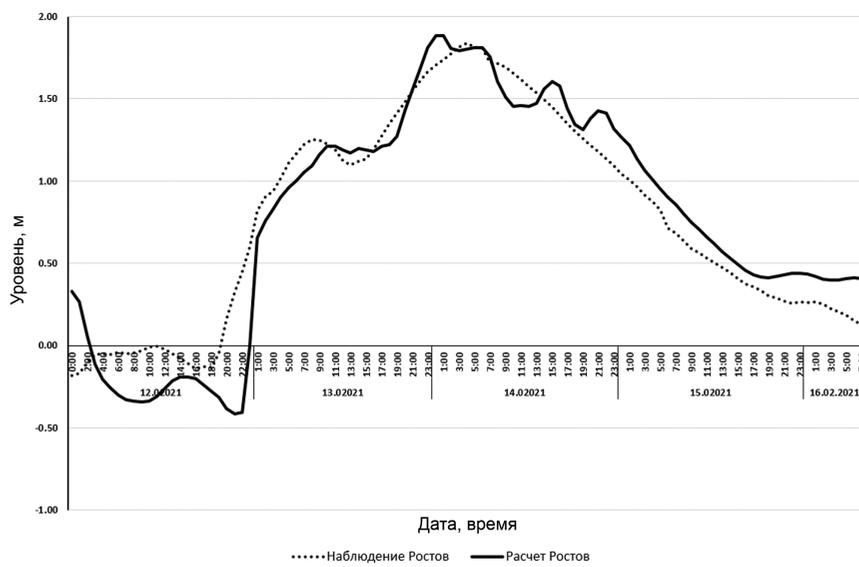


Рис. 2. Сравнение наблюдаемых и расчетных колебаний уровня воды на ГП в Ростове (период с 11.02.2021 по 16.02.2021)



Рис. 3. Сравнение наблюдаемых и расчетных колебаний уровня воды на ГП в Донском (период с 12.10.2016 по 27.10.2016)

При малых расходах поступающей воды (меньше 300 м³/с) гарантированная навигационная глубина, меньше 3,4 м, наблюдалась как в верхнем районе устьевой области (3031–3039 км судовой хода), так и в рукаве Старый Дон. Если расход воды был больше 300 м³/с, то гарантированная навигационная глубина, меньше 3,4 м, отмечалась только в рукаве Старый Дон. Уменьшение навигационной глубины 3,4 м на участках русла наблюдалось дважды за этот период. Этого следовало ожидать вследствие двойного падения уровня воды в период с 11.10.2016 по 28.10.2016.

Расчеты показали, что при данной ветровой ситуации глубина 4,0 м может соблюдаться только на начальном участке устьевой области при больших расходах воды (больше 500 м³/с). В устьевой же части рукава Старый Дон глубина 4,0 м не соблюдается при любом расходе поступающей в основное русло Дона воды. Условие гарантированной глубины 3,4 м начинает выполняться при расходе воды не меньше 300 м³/с.

Выводы. Данная модель позволяет определять гидродинамические характеристики руслового потока в основных рукавах дельты Дона

в зависимости от ветровой ситуации в Азовском море и Таганрогском заливе.

Сравнение расчетных значений уровня воды со значениями в точках наблюдения показывает идентичную динамику их изменения, что говорит о достаточной адекватности представленной модели. В то же время модель лучше работает при сгонных явлениях, чем при нагонных. Это объясняется тем, что при нагонах происходит подтопление всей поймы рукавов, а модель предполагает, что рукава Дона имеют параболический профиль, что не совсем соответствует действительности. Для моделирования нагонов в дельте Дона с подтоплением всей поймы целесообразно использовать двухмерные модели.

Как следует из численного исследования, различие в значениях уровня воды в устьях основных рукавов Дона, скорее всего, наблюдается при достаточно сильных ветрах. При слабых и умеренных ветрах значения уровней в устьях совпадают.

Предлагаемая методика может применяться и для других водоемов при совместном расчете течений в устьевых руслах и ветровых течений в принимающем водоеме.

Список литературы

1. Матишов Г., Чикин А.Л., Бердников С.В., Шевердяев И.В. Экстремальное наводнение в дельте Дона (23–24 марта 2013 г.) и факторы, его определяющие // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 3. С. 342–345.
2. Чикин А.Л., Клещенок А.В., Чикина Л.Г. Один из подходов к численному исследованию гидрологии дельтовой области Дона // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 5. С. 492–499. DOI: 10.31857/S0321059621050072
3. Чикин А.Л., Клещенок А.В., Чикина Л.Г. Моделирование изменения солености в Таганрогском заливе при штормовых нагонах // Водные ресурсы. 2019. Т. 46. № 6. С. 592–597
4. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 200 с.
5. Savenije, H.H.G. Salinity and Tides in Alluvial Estuaries // Second Completely Revised Edition. 2012. URL: <http://www.salinityandtides.com> (Accessed: 08.01.2015).
6. Матишов Г.Г., Ермолаев А.И. Мир каравайки и взморья глазами донских казаков. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2016.

WATER LEVEL FLUCTUATIONS IN THE DON DELTA DEPENDING ON THE WIND SITUATION

A.L. Chikin¹, L.G. Chikina²

¹ Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don

² Southern Federal University, Rostov-on-Don

chikin1956@gmail.com

Abstract. A mathematical model of the process of water level fluctuations in the delta region of the Don River, depending on the wind situation over the Sea of Azov and the Taganrog Bay, is presented. This model combines two models built and verified earlier: a model of the hydrodynamics of the Sea of Azov and a model of water movement in the branches of the Don Delta. The hydrodynamic component of the model for the Sea of Azov is described by the shallow water equations, and the movement in the arms of the Don Delta is described by the Saint-Venant equations. To determine the hydrodynamic parameters in the Don Delta area, one of the boundary conditions is the value of the water level in the receiving reservoir – the Taganrog Bay. The proposed model allows, depending on the wind situation over the Sea of Azov and the Taganrog Bay, to determine the flow parameters in the main branches of the Don. This is done by automatically transferring data from the marine component of the model to the channel component. Comparison of the calculated values of the water level with the observed data is given. The proposed model can be used to determine the sections of the navigable channel of the Don, where the movement of ships is difficult due to a possible low water level.

Keywords: mouth area, shallow water equations, Saint-Venant equations, free surface level, navigation depth, computational experiment.

References

1. *Matishov G.G., Chikin A.L., Berdnikov S.V., Sheverdyayev I.V.* The extreme flood in the Don River Delta (March 23–24, 2013), and determining factors. *Doklady Akademii nauk*. [Reports of the Academy of Sciences]. 2014. Vol. 455. No. 3. P. 342–345 (In Russian).
2. *Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., and Chikina L.G.* Approach to Numerical Studies of the Hydrology an of Don Delta Area. *Water Resources*. [Water resources]. 2021. Vol. 48. No. 5. P. 646–653. (In Russian). DOI:10.1134/S0097807821050079
3. *Chikin A.L., Kleshchenkov A.V., Chikina L.G.* Simulating Salinity Variations in the Gulf of Taganrog at Storm Surges. *Vodnye resursy* [Water resources]. 2019. Vol. 46. No. 6. P. 919–925. (In Russian). URL: <https://doi.org/10.1134/S0097807819060046>
4. *Koren' V.I.* *Matematicheskie modeli v prognozakh rechnogo stoka*. [Mathematical models in river flow forecasts.]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. 200 p. (In Russian).
5. *Savenije, H.H.G.* *Salinity and Tides in Alluvial Estuaries*. Second Completely Revised Edition. 2012. URL: <http://www.salinityandtides.com> (Accessed: 08.01.2015).
6. *Matishov G.G., Ermolaev A.I.* *Mir karavajki i vzmor'ja glazami donskih kazakov*. [The world of the loaf and the seaside through the eyes of the Don Cossacks. Rostov-on-Don]. Rostov-on-Don: SCC RAS, 2016. (In Russian).