УДК 532.543.2+556.5
DOI: 10.23885/2500-0640-2017-13-3-39-49

СГОННО-НАГОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ДОНА: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СЦЕНАРИИ ИЗМЕНЕНИЯ

© 2017 А.Л. Чикин¹, А.В. Клещенков¹, Л.Г. Чикина², А.М. Коршун³

Аннотация. Устьевая область р. Дон является наиболее вовлеченным в хозяйственную деятельность районом Нижнего Дона с интенсивным развитием морского и речного транспорта. Колебания уровня воды, вызываемые различными факторами, оказывают существенное влияние на судоходство в данном регионе. В этой связи решение проблемы прогнозирования уровня на различных участках русла в зависимости от расходов воды в реке и уровня воды в принимающем водоеме представляется своевременной и актуальной задачей.

В работе описана математическая модель неустановившегося течения в дельтовой части Дона. Модель основана на уравнениях Сен-Венана, которые решаются конечно-разностными методами с использованием неявных схем. Для расчета уровня свободной поверхности русла был выбран устьевый участок р. Дон от второго узла дельты (исток рукава Каланча) до станицы Раздорская. Калибровка предлагаемой модели произведена с использованием данных статистической обработки натурных наблюдений. Приведены результаты численного расчета уровня водной поверхности в зависимости от расходов воды и величины сгонов и нагонов. Сравнение результатов расчета с наблюдавшимися данными и значениями, полученными ранее другими авторами, показывает, что предлагаемая методика расчета более эффективна. Приведены результаты расчетов двух сценариев колебания уровня воды. Рассмотрено влияние строительства плотины Багаевского гидроузла на морфометрию реки.

Ключевые слова: неустановившееся течение, математическая модель, вычислительный эксперимент, сгонно-нагонные явления.

WIND-DRIVEN WATER LEVEL VARIATION OF THE MOUTH AREA OF THE DON: NUMERICAL MODELLING AND CHANGE SCENARIOS

A.L. Chikin¹, A.V. Kleshchenkov¹, L.G. Chikina², A.M. Korshun³

Abstract. The mouth area of the Don is the region of the Lower Don that is most involved in economic activity, where intensive development of sea and river transport is noted. Fluctuations in the water level caused by various factors have a significant impact on navigation in the area. In that context, the problem solution of forecasting the position of the level at different intervals of the riverbed, depending on the water flow in the river and the water level in the receiving reservoir, seems to be a timely and urgent task.

The paper describes a mathematical model of unsteady flow in the delta part of the Don. The model is based on the Saint-Venant equations, which are solved by finite-difference methods using implicit schemes. To calculate the level of the free surface of the bed, the estuary section of the lower Don was selected from the second node of the Don delta (the source of the Kalancha sleeve) to the village of Razdorskaya. The proposed model is calibrated using statistical processing of field observations. The results of the numerical calculation of

¹ Институт аридных зон Южного научного центра Российской академии наук (Institute of Arid Zones, Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: chikin@sfedu.ru

² Южный федеральный университет (Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, корп. 2

³ Северо-Кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики (North Caucasus Branch of Moscow Technical University of Communications and Informatics, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344002, г. Ростов-на-Дону, ул. Серафимовича, 62

the water surface level are presented, depending on the water flow and the magnitude of the drifts and surges. Comparison of the obtained results with the observed data and values gained earlier by other authors shows that the proposed calculation technique is more effective. The results of calculations of two scenarios for water level fluctuating are presented. The influence of the Bagaevsky hydroscheme dam construction on the morphometry of the river is considered.

Keywords: unsteady flow, mathematical model, computational experiment, wind surges.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень воды на нижнем участке р. Дон от Кочетовского гидроузла до устья подвержен различным по величине и периоду колебаниям. Выделяют длиннопериодные (многолетние и годовые) колебания, связанные с изменением климатически обусловленной водности Дона, сезонные колебания водности реки, связанные с основными фазами водного режима, такими как межень и половодье, и кратковременные колебания, длящиеся несколько часов (реже дней), обусловленные ветром, вызывающим сгоны и нагоны воды [1]. Сочетание стоковых колебаний уровня со сгонно-нагонными колебаниями, возбуждаемыми на взморье, создает в устьевой области Дона весьма сложный и быстро меняющийся рельеф водной поверхности [2].

Устьевая область р. Дон является наиболее освоенным и вовлеченным в хозяйственную деятельность районом Нижнего Дона [3]. Особо стоит отметить интенсивное развитие морского и речного транспорта на данном участке. Здесь расположены морские порты Азов и Ростов-на-Дону, эксплуатирующие акваторию р. Дон, наблюдается

активная речная навигация вверх по Дону (порты Усть-Донецк, Волгодонск) на Волгу и Каспий. Ежегодно из-за колебаний уровня воды в Дону происходит простой судов на рейдах, транспортные компании терпят многомиллионные убытки. В настоящее время ведется проектирование и озвучиваются планы по строительству Багаевского гидроузла, призванного ликвидировать лимитирующие участки судового хода в Единой глубоководной системе европейской части России на отрезке от Кочетовского гидроузла до устья Дона.

В этой связи решение проблемы прогнозирования положения уровня на различных участках русла в зависимости от силы и направления ветра, уровня воды в принимающем водоеме (Таганрогском заливе) и расходах в замыкающем створе в ст. Раздорская представляется своевременной и актуальной задачей.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Для построения нормальной кривой свободной поверхности русла, то есть кривой при среднем расходе и средних уровнях на гидрологических

Таблица 1. Результаты первичной статистической обработки
Table 1. Results of primary statistical manipulation

Уровни на ГП Hydrological station levels	N	$M \pm m$	Me	min	max	25 %	75 %
Ростов-на-Дону Rostov-on-Don	4150	$0,05 \pm 0,01$	0,05	-1,31	1,64	-0,15	0,25
Аксай Aksai	4140	$0,23 \pm 0,01$	0,2	-1,31	1,81	-0,02	0,45
Багаевская Bagaevskaya	4128	$0,99 \pm 0,01$	0,89	-0,94	3,6	0,59	1,3
Раздорская Razdorskaya	4136	$2,23 \pm 0,01$	2,12	-0,03	5,65	1,73	2,63
Расход Q , м ³ /с Discharge rate Q , м ³ /s	3893	599 ± 4	535	150	2150	440	690

Примечание. N – объем выборки; M – среднее; m – стандартная ошибка среднего; Me – медиана; min, max – минимальное и максимальное значения соответственно; 25 %, 75 % – нижний и верхний квартили соответственно

Note. N – sample size; M – the mean; m – the standard error of the mean; Me – the median; min, max – minimum and maximum values, respectively; 25 %, 75 % – lower and upper quartiles respectively

постах (ГП) в г. Ростове-на-Дону, г. Аксае, ст. Багаевской и ст. Раздорской, был проведен статистический анализ значений, наблюдавшихся в период с 2001 по 2015 г. [4]. Основные статистические характеристики по расходу и уровням, приведенным в Балтийской системе высот (БС), представлены в таблице 1. При калибровке модели использовали медианные значения, так как они не подвержены влиянию случайных выбросов в наблюдениях.

Используя значения квартилей, по значениям расхода все годы наблюдений можно условно разделить на годы, когда было мало воды ($Q < 440 \text{ м}^3/\text{с}$), воды было в норме ($440 \leq Q \leq 690 \text{ м}^3/\text{с}$) и воды было много ($Q > 690 \text{ м}^3/\text{с}$).

Для описания неустановившегося движения воды в открытом русле воспользуемся следующей системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \left(\frac{\partial z}{\partial s} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q, \end{cases} \quad (1)$$

где s – координата, м; t – время; Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; z – уровень воды, м; W – площадь поперечного сечения, м^2 ; q – распределенный боковой приток, $\text{м}^2/\text{с}$; K – модуль расхода, $\text{м}^3/\text{с}$; $g = 9,81$ – принятое значение ускорения свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Данная система замыкается граничными и начальными условиями:

$$\begin{aligned} Q(0, t) &= Q_1(t), z(L, t) = z_1(t), \\ Q(s, 0) &= Q_0(s), z(x, 0) = z_0(s). \end{aligned} \quad (2)$$

Предположим, что поперечное сечение русла имеет параболический профиль $z = \alpha \left(\frac{b}{2} \right)^2$, где b – ширина русла, м; α – коэффициент параболы, м^{-1} .

Тогда $\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = b \frac{\partial z}{\partial t}$, и систему (1) можно переписать в виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \left(\frac{\partial z}{\partial s} + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0, \\ b \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q. \end{cases} \quad (3)$$

Данная задача решается конечно-разностными методами с использованием неявных схем. Конечно-разностная аппроксимация системы (3) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n) + (Q_j^{n+1} - Q_j^n)}{2\Delta t} + \\ + gW_j^n \left(\frac{z_{j+1}^{n+1} - z_j^{n+1}}{\Delta s} + \frac{Q_j^{n+1}|Q_j^n|}{K_j^{n^2}} \right) = 0, \\ b_j^n \frac{(z_{j+1}^{n+1} - z_{j+1}^n) + (z_j^{n+1} - z_j^n)}{2\Delta t} + \\ + \frac{Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}}{\Delta s} = q_j^n. \end{cases} \quad (4)$$

После преобразований система (4) запишется в виде:

$$\begin{cases} c_1 Q_j^{n+1} + c_2 z_j^{n+1} + c_3 Q_{j+1}^{n+1} + c_4 z_{j+1}^{n+1} = f_j^n \\ m_1 Q_j^{n+1} + m_2 z_j^{n+1} + m_3 Q_{j+1}^{n+1} + m_4 z_{j+1}^{n+1} = g_j^n \end{cases} \quad (5)$$

Здесь коэффициенты в уравнениях имеют следующий вид:

$$c_1 = -\frac{1}{\Delta s}; \quad c_2 = \frac{b_j^n}{2\Delta t}; \quad c_3 = \frac{1}{\Delta s}; \quad c_4 = \frac{b_j^n}{2\Delta t};$$

$$f_j^n = \frac{b_j^n}{2\Delta t} (z_j^n + z_{j+1}^n) + q_j^n;$$

$$m_1 = \frac{1}{2\Delta t} + gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K_j^{n^2}}; \quad m_2 = -\frac{gW_j^n}{\Delta s};$$

$$m_3 = \frac{1}{2\Delta t}; \quad m_4 = \frac{gW_j^n}{\Delta s}; \quad g_j^n = \frac{1}{2\Delta t} (Q_j^n + Q_{j+1}^n).$$

Для расчета уровней свободной поверхности русла был выбран устьевый участок р. Дон от второго узла дельты Дона – исток рукава Каланча (левая граница) – до ст. Раздорская (правая граница), который был разбит на четыре отрезка с правыми границами в наблюдательных постах: г. Ростов-на-Дону, г. Аксай, ст. Багаевская и ст. Раздорская. Длина всего участка составила 134 км.

При подборе значений коэффициентов шероховатости n для рассматриваемых отрезков была получена нормальная кривая поверхности воды (в абсолютных значениях), удовлетворяющая медианным значениям наблюдений на наблюдательных постах в период с 2001 по 2015 г. На правой границе задавался средний расход ($Q = 535 \text{ м}^3/\text{с}$). Так как на левой границе значения уровня не наблюдали, то расчет проводили в предположении, что при отсутствии сгонов и нагонов уровень $z = 0 \text{ м}$. Коэффициенты шероховатости для выбранных четырех участков получились равными $n_1 = 0,0155$,

Рис. 1. Кривые свободной поверхности z_0 русла при среднем расходе

Fig. 1. Curves the free surface z_0 of the channel with average flow rate

$n_2 = 0,0228$, $n_3 = 0,0197$, $n_4 = 0,0166$ с/м^{1/3}, что несколько ниже по сравнению со значением, приведенным в предшествующих работах [6]. Согласно подходам, изложенным в литературе [6], для расчета силы трения было принято значение коэффициента $n = 0,023$ с/м^{1/3}. На рисунке 1 представлена рассчитанная по уравнениям (3) нормальная кривая свободной поверхности русла. Данная кривая была взята в качестве начального распределения значений z при последующих расчетах.

В работе [7] расчет уровней свободной поверхности для русла Дона предлагается вести по формуле

$$\frac{\Delta H_x}{\Delta H_{Az}} = e^{-kx}, \quad (6)$$

где ΔH_{Az} – нагон в г. Азове, м; ΔH_x – нагон в сечении x , м; $k = 1,21 \cdot 10^{-5} Q_{Razd} + 0,011$, м⁻¹; Q_{Razd} – расход на посту в ст. Раздорской, м³/с; x – расстояние от г. Азова, м.

В таблице 2 показаны расчетные и наблюдавшиеся значения уровня воды в точках, соответствующих наблюдательным постам. Были рассмотрены случаи разной наполненности Дона, а расчетные

значения вычисляли двумя способами: по формулам (5) до получения установившегося течения и (6). Течение считали установившимся, если

было выполнено условие $\max_j \left| \frac{Q_j^{n+1} - Q_j^n}{\Delta t} \right| < 0,0001$.

В последних двух столбцах таблицы 2 приведены относительные погрешности вычислений по соответствующим формулам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из таблицы 2 видно, что расчет по предлагаемой нами методике дает более высокую точность по сравнению с предложенным ранее подходом [7]. При средних расходах воды погрешность не превышает 5 %; при маловодности расчетные значения в основном занижены, и погрешность не превышает 10 %; при многоводности расчетные значения завышены, и погрешность не превышает 12 %. Такую неоднородность погрешности можно объяснить тем, что модель настраивалась по среднестатистическим наблюдавшимся значениям.

Была смоделирована ситуация, когда уровень воды на правой границе сначала повышается (случай нагона), а затем снижается с переходом в условия сгона. Наблюдения показали, что скорость подъема воды при нагоне и понижения при сгоне может составлять 0,1–0,15 м/час. В этом случае зависимость изменения уровня воды z (м) от времени t (час) может быть представлена следующей формулой:

$$z(t) = \begin{cases} 0,10t, & t \leq 12 \\ 1,20, & 12 \leq t \leq 14 \\ 1,20 - 0,15(t - 14), & 14 \leq t \leq 24 \end{cases}$$

Расход воды в ст. Раздорской не менялся и был равен 535 м³/с.

На рисунке 2 представлено изменение повышения ($z - z_0$) уровня воды на наблюдательных постах.

Естественным было ожидать, что изменение уровня на левой границе оказывает наибольшее влияние на постах Ростова и Аксая.

На рисунке 3 представлено изменение расходов воды на наблюдательных постах при моделировании нагона.

Кривые графиков расхода показывают, что с поднятием уровня воды на правой границе расход уменьшается (увеличивается объем русла). В какой-то момент может возникнуть обратное течение (ГП Ростов-на-Дону) или течение может остановиться (ГП Аксай). Затем, с падением уровня на границе, происходит резкое увеличение расхода за счет уменьшения объема русла. Этот расход временно может даже превышать расход поступления с левой границы.

Моделирование сгона воды с последующим повышением уровня задавалось зависимостью изменения уровня воды z (м) от времени t (час) и представлено следующей формулой:

$$z(t) = \begin{cases} -0,10t, & t \leq 12 \\ -1,20, & 12 \leq t \leq 14 \\ -1,20 + 0,15(t - 14), & 14 \leq t \leq 24 \end{cases}$$

Таблица 2. Результаты расчетов уровней (БС)
Table 2. Results of level calculations (BES)

Дата Date	Характеристика года Year description	Расход, м ³ /с Discharge rate Q , m ³ /s	Ростов-на-Дону Rostov-on-Don			Аксай Aksai			Багаевская Bagaevskaya			Раздорская Razdorskaya			Погрешность (1), % Error (1), %	Погрешность (6), % Error (6), %
			Наблюдение, м Observation, m	Расчет по уравнениям (1), м Calculation by Equations (1), m	Расчет по формуле (6), м Calculation by formula (6), m	Наблюдение, м Observation, m	Расчет по уравнениям (1), м Calculation by equations (1), m	Расчет по формуле (6), м Calculation by formula (6), m	Наблюдение, м Observation, m	Расчет по уравнениям (1), м Calculation by Equations (1), m	Расчет по формуле (6), м Calculation by formula (6), m	Наблюдение, м Observation, m	Расчет по уравнениям (1), м Calculation by Equations (1), m	Расчет по формуле (6), м Calculation by formula (6), m		
26.10.2011	мало воды little water	380	-0,66	-0,67	-0,40	-0,53	-0,53	-0,13	0,15	0,16	0,74	1,33	1,44	2,04	7,0	65,4
27.10.2011		380	-0,57	-0,58	-0,34	-0,49	-0,46	-0,9	0,13	0,18	0,76	1,31	1,44	2,05	9,4	70,7
28.10.2011		380	-0,39	-0,40	-0,23	-0,33	-0,30	0	0,19	0,27	0,79	1,34	1,34	2,07	5,9	70,1
29.10.2011		380	-0,53	-0,54	-0,32	-0,39	-0,42	-0,7	0,23	0,21	0,76	1,36	1,45	2,05	6,4	62,5
30.10.2011		380	-0,44	-0,45	-0,26	-0,33	-0,35	-0,3	0,23	0,25	0,78	1,35	1,46	2,06	7,7	65,7
11.04.2008	норма norm	490	0,3	0,1	0,4	0,13	0,16	0,19	0,77	0,85	0,89	2,03	2,03	2,12	4,0	7,3
12.04.2008		490	0,1	0,1	0,3	0,13	0,14	0,18	0,81	0,80	0,88	2,02	2,00	2,12	1,1	6,1
13.04.2008		500	-0,3	0,3	0,4	0,14	0,17	0,19	0,82	0,83	0,89	2,07	2,04	2,12	3,3	5,3
19.04.2003	много воды much water	2010	0,65	1,03	0,27	1,32	1,88	0,31	3,43	3,95	0,91	5,46	5,98	2,12	10,7	65,3
20.04.2003		2060	0,69	1,14	0,28	1,45	2,06	0,31	3,55	4,17	0,91	5,55	5,97	2,12	11,1	66,2
21.04.2003		2070	0,85	1,27	0,33	1,85	2,16	0,34	3,47	4,22	0,91	5,57	6,00	2,13	11,1	66,6
22.04.2003		2090	0,89	1,31	0,34	1,50	2,20	0,34	3,52	4,26	0,91	5,61	6,04	2,13	9,5	66,2

Рис. 2. Изменение уровня воды при моделировании нагона
Fig. 2. The change of water level in the modeling of surge

Расход воды в ст. Раздорская также был постоянно равным $535 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рисунке 4 представлено изменение повышения ($z - z_0$) уровня воды на наблюдательных постах при моделировании сгона. Видно, что влияние сгонов и нагонов на уровень водной поверхности при движении вверх по реке уменьшается. Этот факт также был отмечен в предшествующих работах [8].

На рисунке 5 представлено изменение расходов воды на наблюдательных постах при моделировании сгона. Видно, что с понижением уровня воды на правой границе расход в г. Ростове-на-Дону резко увеличивается за счет уменьшения объема русла. Повышение расхода наблюдается в г. Аксае, в ст. Багаевской оно незначительно. Затем, при повышении уровня воды, может возникнуть даже обратное течение (Ростов-на-Дону).

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами работы [6], где экспериментально доказано, что в дельте р. Дон при существующем режиме регулирования стока реки практически всегда

доминируют нестационарные потоки, значительно отличающиеся по значениям расходов воды от стоковых, особенно при развитии сгонно-нагонных явлений.

ВЛИЯНИЕ БАГАЕВСКОГО ГИДРОУЗЛА НА МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУСЛА УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ДОНА

Строительство Багаевского гидроузла планируется вести в районе острова Арпачинский (Белый) с нормальным подпорным уровнем верхнего бьефа 2,8 м БС [9]. Так как нормальный уровень водной поверхности при среднем расходе $535 \text{ м}^3/\text{с}$ в этом районе равен 0,6 м БС, то относительно него подъем воды будет равным 2,2 м. Расчеты показали, что в районе ст. Раздорская уровень водной поверхности станет равным 3,27 м БС, что на 1,15 м выше нормального уровня (2,12 м БС) [10].

Осенью 2015 и 2016 гг. при действии сильного ветра восточных румбов и пониженных расходах

Рис. 3. Изменение расхода воды при моделировании нагона
Fig. 3. The change in water flow during surging simulation

Таблица 3. Наличие проблемных участков (километры судового хода) в зависимости от гидрологических условий
Table 3. The presence of problem areas (kilometer of the navigational course), depending on the hydrological conditions

Уровень сгона Set-down level	Расход Discharge rate				
	260 м³/с (m³/s)	300 м³/с (m³/s)	400 м³/с (m³/s)	520 м³/с (m³/s)	550 м³/с (m³/s)
-1 м (m)	3031–3034, 3036, 3039, 3047, 3049, 3054, 3066, 3069, 3072, 3079, 3085, 3089 3109	3031, 3034, 3049, 3072, 3079, 3085, 3089 3109	3031, 3034, 3079	3031, 3034	3034
-1,2 м (m)	3031–3034, 3036, 3039, 3047, 3049, 3054, 3066, 3068, 3069, 3072, 3079, 3085, 3089, 3090 3098, 3109, 3120	3031, 3034, 3049, 3069, 3072, 3079, 3085, 3089 3098, 3109, 3120	3031, 3034, 3079, 3085	3031, 3034	3034

Примечание. Выделенные жирным шрифтом участки соответствуют следующим главным перекатам в русле Дона: 3098 км – Герасимовский; 3109 км – Алитубское колено; 3120 км – Аксайский

Note. Bolded areas correspond to the following main rifts in the canal of the Don: 3098 km – Gerasimovsky; 3109 km – Alitub reach; 3120 km – Aksai

Рис. 4. Изменение уровня воды при моделировании сгона
Fig. 4. The change of water level in the modeling of drift

воды в ст. Раздорская (270–360 м/с) уровень воды в Дону резко понизился до рекордных отметок. Так, зафиксированный нами в октябре 2016 г. на гидропосту Южного научного центра РАН в х. Донском уровень воды составил –1,44 м БС. Подобная гидрологическая ситуация неизбежно приводит к такому обмелению Дона, когда судоходство становится невозможным. Для определения проблемных участков были проведены расчеты для различных расходов воды и уровней водной поверхности в устье Дона.

Проведенные расчеты гидродинамики русла Дона до ст. Раздорская без учета гидроузла в районе х. Арпачин показали наличие проблем для судоходства (проходная глубина 3,4 м) на приведенных в таблице 3 участках судового хода по Атласу единой глубоководной системы России [11].

Расчеты проводили для следующих расходов воды: 520, 400, 300 и 260 м³/с. Понижение уровня на правой границе (второй узел дельты) составляло –1 м и –1,2 м. При расходе 600 м³/с и выше при

любых понижениях уровня воды на левой границе на всем протяжении исследуемого участка русла соблюдалась проходная глубина 3,4 м. При меньших расходах проходная глубина соблюдалась не везде. Если рассматривать гарантированную глубину судового хода 4 м (как заявлено в проекте) [9], то проблемных участков ниже гидроузла будет еще больше (езде, где нормальная глубина не больше 5 м), вплоть до 3160 км (район ст. Елизаветинская). Выделенные жирным шрифтом в таблице 3 участки соответствуют следующим главным перекатам в русле Дона: 3098 км – Герасимовский, 3109 км – Алитубское колено, 3120 км – Аксайский.

На рисунке 6 представлены профили свободной поверхности уровня воды в русле до сооружения плотины и после. Были рассмотрены два случая: нормальный – значения расхода 535 м³/с, величины сгона 0 м и сгон – значения расхода 260 м³/с, величины сгона –1,2 м. Кроме того, на рисунке 6 приведен профиль поверхности дна на всем исследуемом участке. Видно, что сооружение плотины существенно повысило бы уровень воды до ст. Раздор-

Рис. 5. Изменение расхода воды при моделировании сгона
Fig. 5. The change in water flow during drifting simulation

ской, причем сгон не оказывает влияния на величину верхнего бьефа. Наличие гидроузла сделало бы участок реки выше 3090 км судоходным при любых гидрологических условиях, однако ниже по течению остались бы проблемные участки. В таблице 2 они выделены жирным шрифтом, а на рисунке 6 восклицательными знаками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование уравнений гидродинамики (1) дает возможность достаточно точно рассчитывать гидродинамические параметры руслового потока р. Дон на участке от ст. Раздорская фактически до впадения Дона в Таганрогский залив. Кроме того, данная методика позволяет также прогнозировать возможность судоходства по основному руслу в зависимости от сгонно-нагонных явлений в дельтовой части Дона.

Проведенные расчеты уровня режима дельтовой части Дона в зависимости от наличия или

отсутствия плотины в районе х. Арпачин показали сохранение проблемных для судоходства участков, расположенных ниже предполагаемого строительства. Это еще раз подтверждает необходимость всестороннего и взвешенного подхода к оценке необходимости строительства Багаевского гидроузла и анализу прогнозируемых положительных и отрицательных эффектов от реализации этого проекта.

Сбор и анализ данных об уровненом режиме и глубинах русла выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Русского географического общества (проект № 13-05-41528-РГО_а «Интегральная оценка эколого-геохимического состояния аквальных систем устьевой области Дона»). Численное моделирование гидродинамики устьевой области выполнено в рамках темы «Современное состояние и многолетняя изменчивость прибрежных экосистем южных морей России» № госрегистрации ЦИТИС: 01201363187.

Рис. 6. Профили дна и свободных поверхностей русла устьевой области Дона
Fig. 6. The profiles of the bottom and free surface of the mouth area of the Don

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономаренко Е.П., Сорокина В.В., Бирюков П.А. 2012. Сгонно-нагонные явления в дельте реки Дон в 2007–2010 гг. и их прогнозирование. *Вестник Южного научного центра*. 8(1): 28–37.
2. Родионов Н.А. 1958. *Гидрология устьевой области Дона*. М., Гидрометеиздат: 95 с.
3. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Дон. 2016. *Донское бассейновое водное управление*. URL: http://www.donbv.ru/activities/use_and_protection_don/ (дата обращения: 19.06.2017).
4. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 19.06.2017).
5. Корень В.И. 1991. *Математические модели в прогнозах речного стока*. Л., Гидрометеиздат: 200 с.
6. Мишин Д.В., Полонский В.Ф. 2013. Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон. *Труды Государственного океанографического института*. 214: 166–179.
7. Михайлов В.Н., Рогов М.М., Чистяков А.А. 1986. *Речные дельты. Гидролого-морфологические процессы*. Л., Гидрометеиздат: 280 с.
8. Симов В.Г. 1989. *Гидрология устьев рек Азовского моря*. М., Гидрометеиздат: 328 с.
9. Азово-Донской бассейн: Багаевский гидроузел – решение для Нижнего Дона. 2013. *Морские вести России*. URL: <http://www.morvesti.ru/analitics/detail.php?ID=26981> (дата обращения: 19.06.2017).
10. Матишов Г.Г. 2016. *Климат, водные ресурсы и реконструкция гидротехнических сооружений с учетом интересов населения, рыболовства и сельского хозяйства, судоходства и энергетики. Доклад на расширенном заседании Президиума Южного научного центра РАН (г. Ростов-на-Дону, 25 мая 2016 г.)*. Ростов н/Д, Изд-во ЮНЦ РАН: 64 с.
11. Навигационный Атлас Единой Глубоководной Системы России. Том 8 (часть 2) – р. Дон от Волгодонска до устья. 2009. *DeckOfficer.ru*. URL: <http://deckofficer.ru/titul/handbook/item/navigatsionnyj-atlas-edinoj-glubokovodnoj-sistemy-rossii> (дата обращения: 19.06.2017).

REFERENCES

1. Ponomarenko E.P., Sorokina V.V., Biryukov P.A. 2012. [Wind surges in the Don River delta in 2007–2010, research and prediction]. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra*. 8(1): 28–37. (In Russian).
2. Rodionov N.A. 1958. *Gidrologiya ust'evoy oblasti Dona*. [Hydrology of the Don mouth area]. Moscow, Gidrometeoizdat: 95 p. (In Russian).
3. [Scheme of complex use and protection of water objects of the Don River basin]. 2016. *Donskoe basseynovoe vodnoe*

- upravlenie. [Don Basin Water Administration]. Available at: http://www.donbv.ru/activities/use_and_protection_don (accessed 19 June 2017). (In Russian).
4. *Informatsionnaya sistema po vodnym resursam i vodnomu khozyaystvu basseynov rek Rossii*. [Information system on water resources and water management of Russian river basins]. Available at: <http://gis.vodinfo.ru> (accessed 19 June 2017). (In Russian).
 5. Koren V.I. 1991. *Matematicheskie modeli v prognozakh rechnogo stoka*. [Mathematical models in river flow forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 200 p. (In Russian).
 6. Mishin D.V., Polonsky V.F. 2013. [Investigation of non-stationary water flows in the non-tidal estuary of the Don River]. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta*. 214: 166–179. (In Russian).
 7. Mikhaylov V.N., Rogov M.M., Chistyakov A.A. 1986. *Rechnye del'ty. Gidrologo-morfologicheskie protsessy*. [River deltas. Hydrological and morphological processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 280 p. (In Russian).
 8. Simov V.G. 1989. *Gidrologiya ust'ev rek Azovskogo morya*. [Hydrology of the mouths of the rivers of the Sea of Azov]. Moscow, Gidrometeoizdat: 328 p. (In Russian).
 9. [Azov-Don basin: Bagaevsky hydro-power plant – a solution for the Lower Don]. 2013. *Morskie vesti Rossii*. [Maritime News of Russia]. Available at: <http://www.morvesti.ru/analitics/detail.php?ID=26981> (accessed 19 June 2017). (In Russian).
 10. Matishov G.G. 2016. *Klimat, vodnye resursy i rekonstruktsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy s uchetom interesov naseleniya, rybolovstva i sel'skogo khozyaystva, sudokhodstva i energetiki. Doklad na rasshirennom zasedanii Prezidiuma Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN (g. Rostov-na-Donu, 25 maya 2016 g.)*. [Climate, water resources and reconstruction of hydraulic structures, taking into account the interests of the population, fisheries and agriculture, shipping and energy. Report at the enlarged meeting of the Presidium of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Rostov-on-Don, 25 May 2016)]. Rostov-on-Don: Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences Publishers: 64 p. (In Russian).
 11. [Navigational Atlas of the United Deep-Water System of Russia. Volume 8 (part 2) – the river Don from Volgodonsk to the mouth]. 2009. *DeckOfficer.ru*. Available at: <http://deckofficer.ru/titul/handbook/item/navigatsionnyj-atlas-edinoj-glubokovodnoj-sistemy-rossii> (accessed 19 June 2017). (In Russian).

Поступила 27.06.2017