

## ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И РЕЖИМ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 532.543.2

### ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К ЧИСЛЕННОМУ ИССЛЕДОВАНИЮ ГИДРОЛОГИИ ДЕЛЬТОВОЙ ОБЛАСТИ ДОНА<sup>1</sup>

© 2021 г. А. Л. Чикин<sup>а</sup>, \*, А. В. Клещенко<sup>а</sup>, Л. Г. Чикина<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Федеральный исследовательский центр ЮНЦ РАН,  
Ростов-на-Дону, 344006 Россия

<sup>б</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия  
\*e-mail: chikin1956@gmail.com

Поступила в редакцию 04.11.2020 г.

После доработки 23.03.2021 г.

Принята к публикации 30.03.2021 г.

Движение воды в дельте р. Дон описывается системой уравнений Сен-Венана, записанной в характеристической форме. Область расчета представлена в виде графа, ребра которого соответствуют открытым участкам русла, а вершины – узлам разветвления. Решение задачи проведено конечно-разностными методами, уравнения системы аппроксимируются неявными схемами. Проведено сравнение расходов воды и скоростей течения в основных рукавах дельты Дона по результатам расчетов и наблюдаемым данным, что показывает адекватность представленной модели. С помощью модели восстановлена картина течений в рукавах, которая наблюдалась в период с 13 по 15 сентября 2016 г.

*Ключевые слова:* русловой поток, вычислительный эксперимент, уравнения Сен-Венана.

**DOI:** 10.31857/S0321059621050072

#### ВВЕДЕНИЕ

Устьевая область Дона состоит из устьевого участка реки протяженностью от ст. Раздорской до вершины дельты в районе г. Ростова-на-Дону, дельтового участка, а также Таганрогского залива вплоть до условной линии, соединяющей Должанскую и Белосарайскую косы [13, 14]. В ее пределах наблюдаются такие опасные и неблагоприятные процессы, как сгонно-нагонные колебания уровня, заиление рукавов и морских каналов, а также поступление морских трансформированных вод в рукава дельты Дона [12].

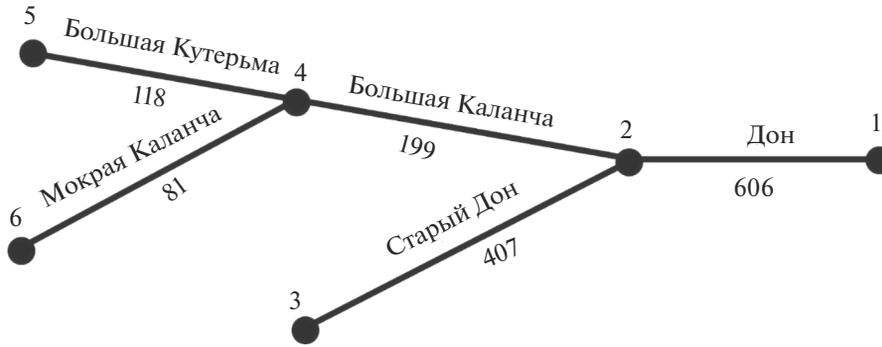
Устьевая область Дона – район с развитыми судоходством и хозяйственной деятельностью. Это приводит к необходимости изучения и прогнозирования гидрофизических явлений для управления природно-хозяйственной системой дельты Дона и минимизации последствий упомянутых выше опасных явлений и процессов. Так,

при значительных сгонных явлениях в устьевой области Дона возникают ситуации, когда суда вынуждены простаивать по несколько дней в восточной части Таганрогского залива или на рейде портов Азов и Ростов [11].

Понимание закономерностей распределения стока по рукавам дельты Дона в условиях преобладания как прямых (из реки в Таганрогский залив), так и обратных (из залива в реку) течений дает ключ к оценке развития водотоков дельты, их заиления и размыва, переформирования гидрографической сети дельты и, в конечном итоге, является ключевым элементом рационального природопользования в устьевой области Дона. Это особенно важно с учетом тенденций сокращения жидкого и твердого стока Дона в современный маловодный период. Недоучет гидрологических факторов может в ближайшем будущем привести к деградации дельтовых ландшафтов, что частично происходит уже сейчас – заиление и отмирание мелких рукавов и ериков дельты приводит к сокращению ценных нерестилищ, забочлачиванию отдельных участков [11].

Исследованиям гидрологии устьевой области Дона посвящены работы плеяды исследователей, таких как Н.А. Родионов, В.Г. Симов, В.В. Краюшин, В.Н. Михайлов, В.Ф. Полонский и др. С развитием научных знаний об устьевых областях рек в практику гидрологических исследований

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН в части анализа гидрологических процессов (государственная регистрация АААА-А18-118122790121-5), научного проекта РФФИ в части разработки методов численного моделирования (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 Южного федерального университета “Высокопроизводительные вычисления”.



**Рис. 1.** Схема дельты Дона и распределение расходов воды  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) по рукавам при среднем расходе поступающей воды (ст. Раздорская). 1–6 – концевые узлы и узлы разветвления.

стали применяться численные методы гидрологического моделирования. Они широко используются для задач исследования поступления морских вод в устья рек [5, 10], анализа перераспределения стока по рукавам в дельтах [1, 9], изучения колебаний уровенного режима [9].

Много работ посвящено моделированию течений в открытом русле, основанных на уравнениях мелкой воды. Численное исследование стратифицированных многослойных речных потоков приведено в [4]; при этом допускается, что рельеф дна может иметь сложную морфометрию. В работе [16] подробно описан алгоритм моделирования течений, где область расчета может иметь как разрывы дна, так и зоны осушения. Алгоритм основан на методе конечных объемов с использованием неструктурированных треугольно-четырёхугольных сеток.

В настоящей работе представлен один из подходов к численному исследованию гидрологии дельтовой части Дона, когда основное русло распадается на несколько рукавов, впадающих в Таганрогский залив.

### ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Для основного русла Дона от ст. Раздорской до вершины дельты, состоящего только из одной открытой части, в [15] с помощью математической модели проведено численное исследование зависимости поверхностного уровня воды от расхода поступающей воды и уровня воды в принимающем водоеме. В данной работе область расчета состоит из открытых русел, концевых узлов и узлов разветвления.

Следуя [3], дельту Дона представим в виде основных рукавов – Старый Дон, Большая Каланча, переходящая в Мокрую Каланчу и Большую Кутерьму, и узлов разветвлений. Дельта Дона схематично изображена на (рис. 1) и представля-

ет собой граф из пяти ребер, соответствующих участкам открытых русел, и шести вершин, четыре из которых соответствуют концевым узлам, а две – узлам разветвлений.

Нумерацию отрезков можно проводить произвольно. На решение задачи это не влияет, влияет только на ширину ленты матрицы системы линейных алгебраических уравнений, получаемых при конечно-разностной аппроксимации уравнений движения воды в русле.

Отрезкам соответствуют распределенные параметры  $Q(x, t), z(x, t)$ , а узлам разветвлений – сосредоточенные параметры  $Q_*(x, t), z_*(x, t)$ .

Движение воды в открытом русле без распределенного бокового притока задается следующей системой дифференциальных уравнений [8, 17]:

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

где  $Q$  – расход воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $t$  – время, с;  $W$  – площадь живого сечения,  $\text{м}^2$ ;  $z$  – уровень воды, м;  $x$  – координата, м;  $K$  – модуль расхода,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $g = 9.81$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ . Коэффициент  $\alpha_s \geq 1$  учитывает неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока. Для идеализированных русел рукавов с параболической формой поперечного сечения  $\alpha_s$  обычно близок к единице. Модуль расхода  $K$  вычисляется по формуле:  $K = WC\sqrt{R}$ , здесь  $R$  – гидравлический радиус;  $C$  – коэффициент Шези, найденный

по формуле Маннинга:  $C = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{n}$ ,  $n$  – шероховатость дна.

В случае, когда поперечное сечение русла имеет параболический профиль, система (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + \alpha_{s,v} \frac{\partial Q}{\partial x} = -\alpha_s Q \frac{\partial v}{\partial x} - gW \frac{Q|Q|}{K^2}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $B$  – ширина русла, м. Здесь воспользовались тем, что  $\frac{Q}{W} = v$  – скорости течения.

Систему (2) запишем в операторном виде:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + A \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} = \bar{b}, \quad (3)$$

где  $\bar{U} = \begin{pmatrix} z \\ Q \end{pmatrix}$ ,  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ gW & \alpha_{s,v} \end{pmatrix}$ ,  $\bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}$ ,  $\varphi = -\alpha_s Q \frac{\partial v}{\partial x} - gW \frac{Q|Q|}{K^2}$ .

Собственные значения оператора  $A$  находим из уравнения  $\det |A - \lambda E| = 0$ , откуда получаем

$$\begin{vmatrix} \lambda & 1/B \\ gW & \alpha_{s,v} - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Решая это уравнение, получаем два собственных значения  $\lambda_{1,2} = \frac{\alpha_{s,v} \pm \sqrt{(\alpha_{s,v})^2 + 4c^2}}{2}$ , где  $c^2 = \frac{gW}{B}$ . Собственные векторы  $I^k = \begin{pmatrix} x_1^k \\ x_2^k \end{pmatrix}$ ,  $k = 1, 2$  находим из системы уравнений

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_1^k & x_2^k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ gW & \alpha_{s,v} - \lambda \end{pmatrix} &= \\ = \frac{\alpha_{s,v} \pm \sqrt{(\alpha_{s,v})^2 + 4c^2}}{2} \begin{pmatrix} x_1^k & x_2^k \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Обозначим  $C^+ = \frac{\alpha_{s,v} + \sqrt{(\alpha_{s,v})^2 + 4c^2}}{2}$ ,  $C^- = \frac{\alpha_{s,v} - \sqrt{(\alpha_{s,v})^2 + 4c^2}}{2}$ . Полагая  $x_1^k = gW$ , получим собственные векторы  $\bar{I}_1 = (gW; C^+)$ ,  $\bar{I}_2 = (gW; C^-)$ . Умножая (3) слева на собственные векторы, получим характеристическую форму системы (3):

$$\begin{cases} \left( gW \ C^+ \right) \begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} \end{pmatrix} + \left( gW \ C^+ \right) \times \\ \times \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ gW & \alpha_{s,v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial x} \end{pmatrix} = \left( gW \ C^+ \right) \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix} \\ \left( gW \ C^- \right) \begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial t} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} \end{pmatrix} + \left( gW \ C^- \right) \times \\ \times \begin{pmatrix} 0 & 1/B \\ gW & \alpha_{s,v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial z}{\partial x} \\ \frac{\partial Q}{\partial x} \end{pmatrix} = \left( gW \ C^- \right) \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (4)$$

Перемножив матрицы (4) и разделив первое из уравнений на  $C^+ \neq 0$ , а второе на  $C^- \neq 0$ , получаем уравнения течения в характеристическом виде:

$$\begin{cases} \frac{gW}{C^+} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + C^+ \frac{\partial Q}{\partial x} = \varphi \\ \frac{gW}{C^-} \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gW \frac{\partial z}{\partial x} + C^- \frac{\partial Q}{\partial x} = \varphi \end{cases}. \quad (6)$$

В качестве граничных условий в начальной точке задается расход поступающей воды  $Q_0(0, t)$ , в конечных точках  $X_k$  задается уровень в принимающем водоеме  $z_k(X_k, t)$ . Для сосредоточенных параметров задаются условия сопряжения, которые связывают значения распределенных параметров на концах отрезков и значения сосредоточенных параметров в вершинах. Условия сопряжения задаются следующим образом: сумма притоков–оттоков в узле разветвления равна нулю:  $\sum_i Q_*^i = 0$  ( $i$  – число рукавов, приходящих в узел разветвления), а уровни водной поверхности равны между собой:  $z_i = z_*$ .

### КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ

Приведем конечно-разностную аппроксимацию системы (6) на произвольном отрезке. Разобьем каждый отрезок, соответствующий открытому руслу, на  $L$  узлов с шагом  $\Delta = x_{j+1} - x_j$ ,  $j = 2, 3, \dots, L - 1$  (число  $L$  для каждого отрезка может быть различным). Шаг по времени обозначим через  $\tau$ . При аппроксимации во внутренних точках отрезков разностный аналог системы (6) имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{gW_j^n}{C^+\tau} (z_j^{n+1} - z_j^n) + \frac{1}{\tau} (Q_j^{n+1} - Q_j^n) + \\ & + \frac{gW_j^n}{\Delta} (z_j^{n+1} - z_{j-1}^{n+1}) + \frac{C^+}{\Delta} (Q_j^{n+1} - Q_{j-1}^{n+1}) = \\ & = - \left( gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K^2} + \alpha_s \frac{v_j^n - v_{j-1}^n}{\Delta} \right) Q_j^{n+1} \\ & \frac{gW_j^n}{C^-\tau} (z_j^{n+1} - z_j^n) + \frac{1}{\tau} (Q_j^{n+1} - Q_j^n) + \\ & + \frac{gW_j^n}{\Delta} (z_{j+1}^{n+1} - z_j^{n+1}) + \frac{C^-}{\Delta} (Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) = \\ & = - \left( gW_j^n \frac{|Q_j^n|}{K^2} + \alpha_s \frac{v_{j+1}^n - v_j^n}{\Delta} \right) Q_j^{n+1}. \end{aligned} \right. \quad (7)$$

Систему (7) представим в виде

$$\begin{cases} c_1 z_{j-1} + c_2 Q_{j-1} + c_3 z_j + c_4 Q_j = f_j^n \\ m_3 z_j + m_4 Q_j + m_5 z_{j+1} + m_6 Q_{j+1} = q_j^n, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= -\frac{gW_j^n}{\Delta}, \quad c_2 = -\frac{C^+}{\Delta}, \quad c_3 = \frac{gW_j^n}{C^+\tau} + \frac{gW_j^n}{\Delta}, \\ c_4 &= \frac{1}{\tau} + \frac{C^+}{\Delta} + \frac{gW_j^n |Q_j^n|}{K^2} + \alpha_s \frac{v_j^n - v_{j-1}^n}{\Delta}, \\ f_j^n &= \frac{gW_j^n}{C^+\tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}, \\ m_3 &= \frac{gW_j^n}{C^-\tau} - \frac{gW_j^n}{\Delta}, \quad m_4 = \frac{1}{\tau} - \frac{C^-}{\Delta} + \frac{gW_j^n |Q_j^n|}{K^2} + \\ & + \alpha_s \frac{v_{j+1}^n - v_j^n}{\Delta}, \quad m_5 = \frac{gW_j^n}{\Delta}, \quad m_6 = \frac{C^-}{\Delta}, \\ q_j^n &= \frac{gW_j^n}{C^-\tau} z_j^n + \frac{Q_j^n}{\tau}. \end{aligned}$$

При аппроксимации на левом конце каждого отрезка ( $j = 1$  – его начало) берем второе уравнение из (7)

$$\begin{aligned} & \frac{gW_1^n}{C^-\tau} (z_1^{n+1} - z_1^n) + \frac{1}{\tau} (Q_1^{n+1} - Q_1^n) + \\ & + \frac{gW_1^n}{\Delta} (z_2^{n+1} - z_1^{n+1}) + \frac{C^-}{\Delta} (Q_2^{n+1} - Q_1^{n+1}) = \\ & = - \left( gW_1^n \frac{|Q_1^n|}{K^2} + \alpha_s \frac{v_2^n - v_1^n}{\Delta} \right) Q_1^{n+1}. \end{aligned}$$

При аппроксимации на правом конце каждого отрезка ( $j = L$  – его конец) берем первое уравнение из (7)

$$\begin{aligned} & \frac{gW_L^n}{C^+\tau} (z_L^{n+1} - z_L^n) + \frac{1}{\tau} (Q_L^{n+1} - Q_L^n) + \frac{gW_L^n}{\Delta} (z_L^{n+1} - z_{L-1}^{n+1}) + \\ & + \frac{C^+}{\Delta} (Q_L^{n+1} - Q_{L-1}^{n+1}) = - \left( gW_L^n \frac{|Q_L^n|}{K^2} + \alpha_s \frac{v_L^n - v_{L-1}^n}{\Delta} \right) Q_L^{n+1}. \end{aligned}$$

При конечно-разностной аппроксимации всей области расчета ведется сквозная нумерация узлов сетки, и для каждого отрезка в системе (8) будет свой индекс  $j$ .

Получаемая матрица системы (8) будет иметь преимущественно пятидиагональный вид. Исключения составляют строки, соответствующие узлам разветвления, где кроме элемента на главной диагонали находится элемент, отстоящий от главной диагонали на расстоянии, равном удвоенному количеству узлов рукава плюс один.

### ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ

Задача решалась конечно-разностными методами на равномерной сетке. Весь расчетный участок от ст. Раздорской до Таганрогского залива был разбит на ячейки с шагом 1000 м. Шаг по времени был равен 600 с. После индексации ячеек и конечно-разностной аппроксимации системы уравнений получена ленточная матрица общего вида с шириной ленты 85 и общим числом неизвестных 378. Решение системы линейных алгебраических уравнений проводилось с помощью пакета LAPACK.

Калибровка модели проводилась с учетом двух условий. Во-первых, расчетные отметки уровня водной поверхности должны быть равны определенным значениям на станциях наблюдений в городах Ростове-на-Дону и Аксае, станицах Багаевской и Раздорской. При этом предполагалось, что расход воды, вышеуказанные отметки уровня воды и уровень в Таганрогском заливе – средние за период наблюдений с 2001 по 2015 г. [7]. Результаты статистической обработки данных наблюдений приведены в [15], откуда видно, что среднее значение расхода равно 599 м<sup>3</sup>/с; а уровни водной поверхности на станциях наблюдений приведены в табл. 1. Уровень воды в Таганрогском заливе считался равным -0.34 м (БС). Во-вторых, расчетные величины расходов воды и скорости течения должны совпадать с измеренными величинами на станциях наблюдений (рис. 2). Измерения проводились в период 22–23 сентября 2014 г.

Калибровка модели проводилась путем подбора коэффициентов шероховатости (табл. 2), каждый из которых задавался на определенном участке русла и в процессе расчета не менялся. Для этой цели дельтовая область Дона была разбита на следующие участки: рукава Большая Кутерьма, Мокрая Каланча, Большая Каланча, Старый Дон; участки русла Дона от вершины дельты

до Ростова, от Ростова до Аксая, от Аксая до Багаевской, от Багаевской до Раздорской.

Бесспорно, коэффициенты шероховатости русла имеют большое значение для распределения расходов воды и наносов по рукавам дельты, описывая реальные изменения шероховатости участков русла и их гидравлические сопротивления потоку [2, 5]. Однако в представленной работе значения коэффициентов шероховатости подбираются с целью получения наблюдаемых значений уровня водной поверхности на гидропостах при заданном расходе поступающей воды, в том числе с использованием соответствующих таблиц (коэффициенты шероховатости  $n$  по М.Ф. Срибному и И.Ф. Карасеву) [2]. При этом сохраняются реальные соотношения изменчивости шероховатости отдельных участков русла. Из табл. 2 видно, что рукава Большая Каланча, Мокрая Каланча, Большая Кутерьма характеризуются большим сопротивлением потоку, что обусловлено отсутствием здесь прорези судоходного канала, характерной для остальных рассмотренных участков дельты Дона, чередованием плесов и перекатов, сильным развитием водной растительности и меньшей средней глубиной. Также следует отметить, что в других моделях эти коэффициенты могут принимать иные значения. Также эти коэффициенты могут несколько отличаться от коэффициентов, полученных опытным путем. Например, в работе [12] приведено значение  $n = 0.023$ , определенное по данным натуральных экспериментов, выполненных в 1981 и 1982 гг.

Большое влияние на результаты расчета оказывает начальное приближение исходных дан-

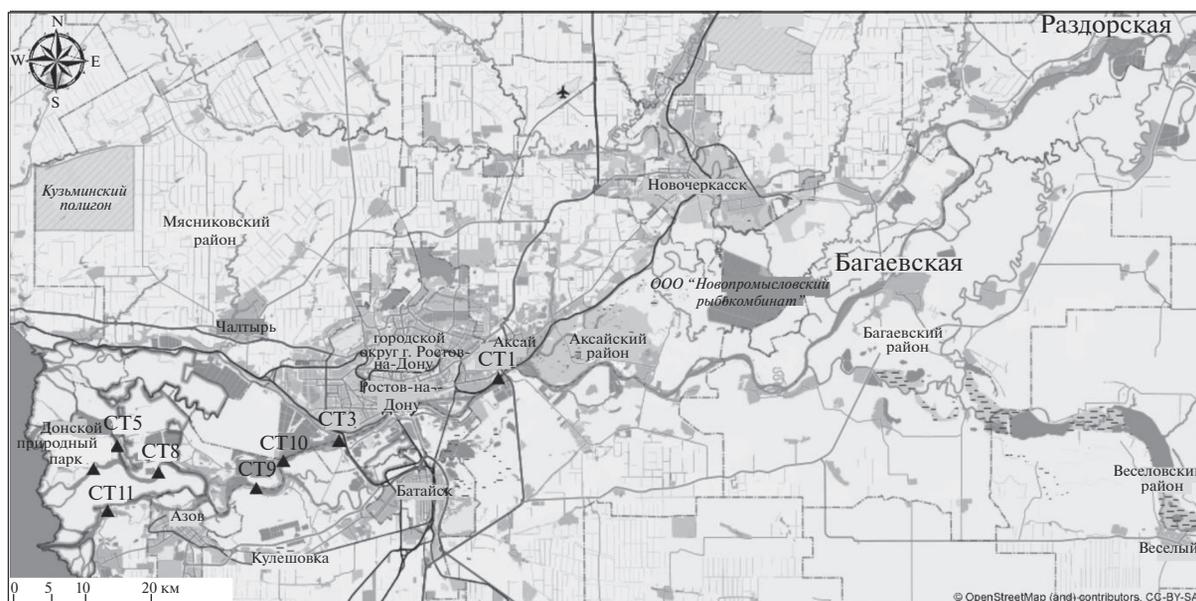
**Таблица 1.** Средние значения уровня воды на станциях наблюдений за гидрологическими параметрами р. Дон

Станция наблюдения	Уровень воды, м (БС)
Ростов-на-Дону	0.05
Аксай	0.23
Багаевская	0.99
Раздорская	2.23

**Таблица 2.** Значения коэффициентов шероховатости  $n$  для участков Дона и основных рукавов его дельты

Русло Дона	$n$
Дон (от вершины дельты до Ростова)	0.0284
Дон (от Ростова до Аксая)	0.0189
Дон (от Аксая до Багаевской)	0.0164
Дон (от Багаевской до Раздорской)	0.0144
Старый Дон	0.0238
Большая Каланча	0.0360
Мокрая Каланча	0.0396
Большая Кутерьма	0.0414

ных, так как счет ведется не до получения установившегося решения, а на определенный промежуток времени, как правило – 1–2 сут. При проведении расчетов 22–23 сентября 2014 г. в качестве начального распределения скоростей, расхода и уровня поверхности воды взяты параметры установившегося течения при расходе  $453 \text{ м}^3/\text{с}$  и



**Рис. 2.** Расположение станций, где проводились наблюдения за гидрологическими параметрами рукавов Дона.

**Таблица 3.** Наблюденные и расчетные значения скорости течения  $V_{\text{nat}}$  и  $V = \frac{Q}{W}$ , наблюдаемые и расчетные величины расхода воды  $Q_{\text{nat}}$  и  $Q$  и относительная погрешность  $\delta$  при их сравнении (22–23 сентября 2014 г.)

Станции	Время	$V$ , м/с	$V_{\text{nat}}$ , м/с	$\delta$ , %	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_{\text{nat}}$ , м <sup>3</sup> /с	$\delta$ , %
СТ3	22.09.2014, 19:15	0.25	0.281	11.03	452.6	457	0.96
СТ5	23.09.2014, 12:50	0.06	0.079	24.05	66.3	77.3	14.23
СТ7	23.09.2014, 13:50	0.11	0.042	161.90	29.7	32.5	8.62
СТ8	23.09.2014, 14:45	0.1	0.063	58.73	104.5	104	0.48
СТ9	23.09.2014, 16:15	0.17	0.145	17.24	372.9	303	23.07
СТ10	23.09.2014, 17:00	0.18	0.196	8.16	392	382	2.62
СТ11	23.09.2014, 18:10	0.13	0.139	6.47	267.1	152.5	75.15

уровне воды в Таганрогском заливе  $-0.65$  м (БС) (эти данные зафиксированы 22 сентября 2014 г.).

В табл. 3 представлены наблюдаемые на станциях и рассчитанные в ходе подбора коэффициентов шероховатости величины скорости течения и расхода, а также время снятия этих показаний.

Большие расхождения значений скорости течения (СТ7, СТ8), возможно, появляются из-за того, что при моделировании предполагается параболический профиль поперечного сечения русла с наибольшей глубиной в его середине, что на самом деле не совсем так. Возникающая при этом ошибка в вычислении площади сечения приводит к ошибке при расчете скорости течения.

Большое расхождение расчетных и наблюдаемых величин расхода на СТ11 (75%), возможно, произошло из-за влияния локального подпора воды со стороны моря при формировании противотечения. По закону сохранения объема несжимаемой жидкости сумма расходов на СТ8 и СТ11 должна быть равна расходу на СТ9 с приближением. В данном случае сумма расходов на  $47$  м<sup>3</sup>/с меньше расхода на СТ9, что связано с ослаблением восточного ветра и с формированием во время наблюдений на данной станции противотечения из Таганрогского залива в дельту Дона по глубокому врезу судоходного канала в системе рукавов Песчаный – Старый Дон. Расчетные же значения расходов дают практически точное совпадение суммы расходов на СТ8 и СТ11 с расходом на СТ9.

Проведен расчет распределения расходов воды по рукавам Дона при поступающем расходе воды  $599$  м<sup>3</sup>/с (ст. Раздорская) и нулевом уровне воды в Таганрогском заливе. Результаты расчетов представлены на рис. 1.

С помощью представленной модели рассмотрена ситуация, когда после сгона воды наблюда-

ся ее резкий подъем. Расход воды у ст. Раздорской задан равным  $600$  м<sup>3</sup>/с, начальный уровень воды в Таганрогском заливе был равен  $-0.20$  м (БС). Затем в течение  $1.5$  ч уровень восстановился до  $0$  м (БС) и оставался таким на протяжении  $8$  ч. На рис. 3 представлен график изменения расхода воды в точках, соответствующих станциям наблюдений в рукавах Дона. При таком скачке уровня воды в Таганрогском заливе наблюдается резкое снижение расхода воды в основном русле Дона и рук. Большая Каланча, а в рукавах Старый Дон, Большая Кутерьма и Мокрая Каланча расход принимает отрицательные значения, что соответствует обратному течению воды. Затем в течение  $8-12$  ч расход становится близким к первоначальному.

Похожая картина течений в рукавах наблюдалась в период с 13 по 15 сентября 2016 г. В десятых числах сентября преобладал ветер северо-восточного направления, что вызвало сгон воды, а затем был ветер северо-западного направления, что способствовало быстрому поднятию уровня воды.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный математический подход позволяет достаточно точно аппроксимировать гидрологические параметры в узлах сопряжения, что дает хорошую оценку гидрологической ситуации в дельтовой области Дона. Существенное ограничение применения данной модели – предположение об отсутствии поймы русла и о его параболической форме сечения. Такая идеализация русла при моделировании потоков в рукавах дельты Дона требует дальнейшего изучения. Кроме того, модель не предполагает влияния возможного противотечения, формирующегося по глубокому

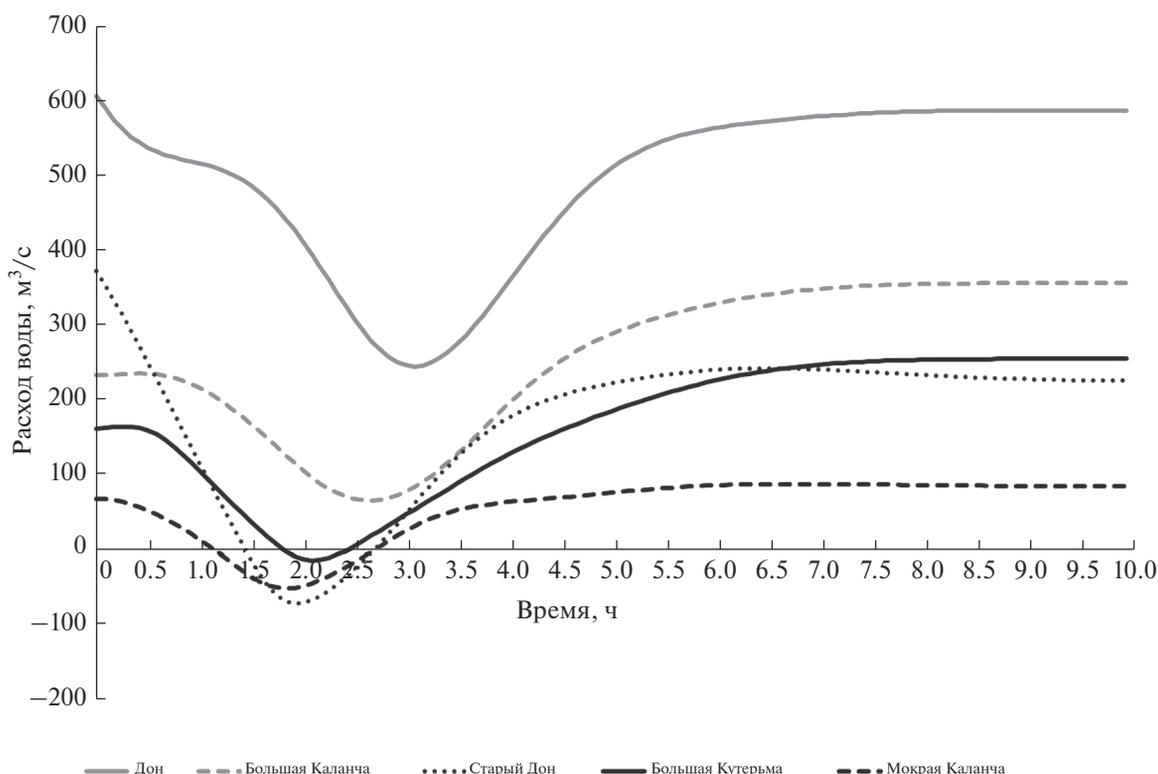


Рис. 3. Прогноз изменения расхода воды в рукавах Дона при подъеме уровня воды в Таганрогском заливе.

врезу судоходного канала, на расход в рук. Старый Дон. При выполнении этих условий модель позволяет рассчитывать изменение одних гидрологических параметров в зависимости от других. Предложенная математическая модель позволяет выполнить оценку распределения расходов воды по основным рукавам Дона в разных гидродинамических ситуациях. Сравнение результатов расчета и наблюдаемых данных подтверждает адекватность построенной математической модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешкин С.А. Математическое моделирование гидролого-морфологических процессов в неприливых дельтах рек. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2004. 243 с.
2. Барышников Н. Б. Гидравлические сопротивления речных русел. СПб.: РГГМУ, 2003. 146 с.
3. Воеводин А.Ф., Никифоровская В.С., Овчарова А.С. Численные методы решения задачи о неустановившемся движении воды на устьевых участках рек // Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат, 1983. Т. 378. С. 23–34.
4. Жуликов Г.А., Алексюк А.И., Беликов В.В. Численное моделирование речных течений в приближении многослойной мелкой воды // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сб. науч. тр. Нижний Новгород: Изд-во Студия Ф1, 2019. С. 131–135.
5. Иванов В.В., Михалев М.А., Марченко А.С., Пискун А.А., Чернин К.Е. Гидравлический метод расчета водного и руслового режима в многорукавных руслах рек // Тр. ААНИИ. 1984. Т. 378. С. 5–22.
6. Иванов В.В., Святский А.З. Численное моделирование вторжения морских вод в устья рек в сезонном временном масштабе // Вод. ресурсы. 1987. № 5. С. 116–122.
7. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. [Электронный ресурс]. <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 19.06.2017)
8. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 200 с.
9. Крыленко И.Н. Исследование подпорных явлений в узле слияния рек Сухоны и Юга на основе компьютерного моделирования // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5, География. 2009. № 1. С. 53–58.
10. Лебедева С.В. Динамика потока в многорукавном приливном устье крупной реки (на примере р. Северная Двина). Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2016. 211 с.
11. Матишов Г.Г., Ермолаев А.И. Мир каравайки и взморья глазами донских казаков. Ростов-на-Дону: ЮНЦ РАН, 2016. 224 с.

12. *Мишин Д.В., Полонский В.Ф.* Исследование нестационарных водных потоков в неприливном устье реки Дон // Тр. ГОИН. 2013. № 214. С. 166–179.
13. *Остроумова Л.П.* Исследование нагонных и стгонных явлений в морских устьях рек на примере устьевой области р. Дон // Метеорология и гидрология. 2017. № 12. С. 69–82.
14. *Симов В. Г.* Гидрология устьев рек Азовского моря. М.: Гидрометеиздат, 1989. 328 с.
15. *Чикин А.Л., Клещенко А.В., Чикина Л.Г., Кориун А.М.* Сгонно-нагонные колебания уровня воды устье-вой области Дона: численное моделирование и сценарии изменения // Наука Юга России. 2017. Т. 13. № 3. С. 39–49.
16. *Aleksyuk A.I., Belikov V.V.* Simulation of Shallow Water Flows With Shoaling Areas and Bottom Discontinuities // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. Т. 57. № 2. С. 318–339.
17. *Savenije H.H.G.* Salinity and Tides in Alluvial Estuaries. Second Completely Revised Edition. 2012. [Электронный ресурс]. <http://www.salinityandtides.com> (дата обращения: 08.01.2015)