МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОНИКНОВЕНИЯ СОЛЕННЫХ ВОД ИЗ ТАГАНРОГСКОГО ЗАЛИВА В УСТЬЕ ДОНА

А.Л. Чикин¹, Л.Г. Чикина²

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

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

E-mail: chikin1956@gmail.com, lchikina@sfedu.ru

Аннотация. Приводится описание комплексной математической модели течения и распространения соли в открытом русле реки. Рассматривается участок реки Дон, состоящий из рукава Старый Дон и части основного русла. Поступление соли происходит через принимающий водоем – Таганрогский залив. Модель описывается системой уравнений Сен-Венана и уравнением конвекции-диффузии. Задача решается конечно-разностными методами. Получены результаты численного исследования влияния величины уровня поверхности воды в Таганрогском заливе на характер течения в дельтовой части Дона, а также на степень проникновения соли вверх по течению реки. Численно установлено, что величина расхода не оказывает существенного влияния на концентрацию соли в основном русле Дона. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что решающее значение поступления осолоненной воды из Таганрогского залива в дельту Дона имеет существенное повышение уровня воды, приводят экстремальные ветровые нагоны, а предшествующие им сгоны еще усиливают этот эффект. Представленная модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

Ключевые слова: русловой поток, дельта реки, уравнения Сен-Венана, уравнение конвекции-диффузии, сгонно-нагонные колебания, вычислительный эксперимент.

Процесс проникновения соленых вод из Таганрогского залива в устье Дона рассматривается на примере основного русла и рукава Старый Дон протяженностью от станицы Раздорская до места впадения в Таганрогский залив.

Математическая модель состоит из двух составляющих – гидродинамической и транспортной. Гидродинамическая составляющая описывается уравнением движения [1].

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

где s – координата; t – время; Q – расход воды; z – уровень воды; W – площадь поперечного сечения; q – распределенный боковой приток; K – модуль расхода; b – текущая ширина русла; g – ускорение свободного падения.

Данная система замыкается граничными и начальными условиями:

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

Транспортная составляющая консервативного вещества при отсутствии внутренних источников описывается уравнением конвекции-диффузии в недивергентной форме:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial s} - \mu \frac{\partial C}{\partial s} = 0, \quad (2)$$

где C – концентрация; u – скорость движения воды в русле; μ – коэффициент вязкости. Предполагается, что коэффициент вязкости не зависит от точки пространства ($\mu = \text{const}$).

На верхней границе русла (входе) задается значение концентрации, например, можно считать, что соль отсутствует ($C = 0$). На нижней границе (устье) условие меняется в зависимости от знака скорости течения. В случае поступления воды из залива в устье $u < 0$, как это происходит во время сильных нагонов, ставится условие $\frac{\partial C}{\partial s} = \frac{u}{\mu}(C - C_{\text{zal}})$ – поступление соли из залива в устье. В случае нормального состояния или сгона, когда вода поступает из устья в залив $u > 0$, ставится условие $\frac{\partial C}{\partial s} + C = 0$, которое соответствует удалению соли из устья.

Было рассмотрено несколько случаев, характерных для устьевой части Дона.

Случай 1. $Q = 350 \text{ м}^3/\text{с}$, $C_{\text{zal}} = 2\text{‰}$. Изменение уровня воды в устьевой точке $z(\text{см})$ от времени $t(\text{час})$ задается формулой

$$z(t) = \begin{cases} 0,15t, & t \leq 18, \\ 1,80 + 0,10(t-12), & 12 < t \leq 18, \\ 2,40, & 18 < t \leq 20, \\ 2,40 - 0,15(t-20), & 20 < t \leq 26, \\ 1,50 - 0,05(t-26), & 26 < t \leq 48. \end{cases} \quad (3)$$

Случай 2. $Q = 350 \text{ м}^3/\text{с}$, уровень воды изменяется по формуле (3). Изменение концентрации соли в устьевой области задается формулой

$$C(t) = \begin{cases} 0,2t, & t \leq 12, \\ 2,4+0,5(t-12), & 12 < t \leq 20, \\ 6,4-0,9(t-20), & 20 < t \leq 26, \\ 1,0-0,08(t-26), & 26 < t \leq 48. \end{cases} \quad (4)$$

Такие значения концентрации соли возможны при поступлении морской воды в случае экстремальных ветровых нагонов [2].

Случай 3. Уровень воды изменяется по формуле (3), концентрация соли изменяется по формуле (4). Изменения расхода поступающей воды ($\text{м}^3/\text{с}$) от времени t (час) задается формулой

$$Q(t) = \begin{cases} 250+10t, & t \leq 12, \\ 370+20(t-12), & 12 < t \leq 20, \\ 530-20(t-20), & 20 < t \leq 26, \\ 410, & 26 < t \leq 48. \end{cases}$$

Численное исследование показало, что на скорость течения в рукаве Старый Дон существенно влияет изменение уровня воды в принимающем водоеме, а не объем поступающей воды. Солёные воды могут попасть в устье реки только при резком повышении уровня воды в принимающем водоеме, что приводит к обратному течению в русле.

Изменение скорости течения и солёности в точке, отстоящей от устья на расстоянии 16 км, представлены на Рис. 1. Изменение концентрации соли зависит как от скорости течения, так и от направления потока. В начальный момент концентрация была равна нулю, что соответствует пресной воде, а затем стала возрастать, как только скорость течения приобрела отрицательные значения. Возрастание концентрации соли проходило до тех пор, пока обратное течение не прекратилось ($V=0$). Затем концентрация соли стала снижаться при появлении прямого течения в русле. Изменение солёности для третьего случая не приводится на рисунке, так как он практически совпадает со случаем 2.

Рис. 1. Изменения солёности в наблюдаемой точке в зависимости от скорости течения

Проведенные вычислительные эксперименты на модельной задаче показали, что решающее значение поступления осолоненной воды из Таганрогского залива в дельту Дона имеет изменение

уровня воды. Представленная модель дает представление об общей тенденции развития процесса возможного осолонения дельты Дона при нагонных явлениях.

Публикация подготовлена в части постановки задачи в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН № в рамках научного проекта РФФИ 18-05-80025 «Опасные явления». Расчеты выполнены на кластер. проекта АААА-А18-118122790121-5, в части стере ЦКП ЮФУ «Высокопроизводительные разработки методов численного моделирования вычисления».

Список литературы

1. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Ленинград Гидрометеиздат 1991. 200 с.
2. Матишов Г.Г., Григоренко К.С. Маловодье и роль грунтовых вод в осолонении авандельты Дона // Доклады Академии наук. 2018. Т. 483. № 4. С. 442–446.

MODELLING THE PROCESS OF SALTWATER PENETRATION FROM THE TAGANROG BAY AT THE MOUTH OF THE DON

A.L. Chikin¹, L.G. Chikina²

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

²South Federal University, Rostov-on-Don, Russia

E-mail: chikin1956@gmail.com, lchikina@sfedu.ru,

Abstract. The description of a complex mathematical model of the flow and distribution of salt in an open riverbed is given. We consider the channel of the Don River, consisting of the Stary Don and the main channel. Salt is delivered through the host reservoir, the Taganrog Bay. The model is described by the system of Saint-Venant equations and the convection-diffusion equation. The problem is solved by finite-difference methods. The results of a numerical study of the influence of the water surface level in the Taganrog Bay on the nature of the flow in the delta part of the Don, as well as on the degree of salt penetration upstream of the river, are obtained. It has been numerically established that the flow rate does not significantly affect the salt concentration in the main Don channel. Computational experiments have shown that the decisive factor in the supply of saline water from the Taganrog Bay to the Don Delta is a significant increase in the water level due to extreme wind surges, and the preceding runoffs further enhance this effect. The presented model gives an idea of the general trend in the development of the process of possible salinization of the Don Delta with surge phenomena.

Keywords: channel flow, river delta, Saint-Venant equations, convection-diffusion equation, tide – storm surge oscillations, computational experiment.

References

1. *Koren V.I.*, 1991. *Matematicheskie modeli v prognozhakh rechnogo stoka*. [Mathematical models in river flow forecasts]. L.: «Gidrometeoizdat», 200 p. (In Russian).
2. *Matishov G.G., Grigorenko K.S.*, 2018. *Malovode i rol' gruntovykh vod v osolonenii avandel'ty Dona* [Shallow water and the role of groundwater in the salinization of the Don Avandelta]. // *Doklady Akademii nauk*, 483(4), pp. 442–446 (In Russian).