

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В ЦИМЛЯНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ НАПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА

А.В. Клещенко<sup>1</sup>, А.Л. Чикин<sup>1</sup>, Л.Г. Чикина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

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

**Аннотация.** Дается описание математической модели гидродинамики Цимлянского водохранилища. В мелководных районах течения описаны уравнениями мелкой воды, а в глубоководных районах как уравнениями мелкой воды, так и трехмерными уравнениями движения несжимаемой вязкой жидкости. Задача решается конечно-разностными методами на равномерной разностной сетке. Расчеты проводились при различных уровнях наполнения водохранилища. Были получены картины течений при различных уровнях наполнения водохранилища. Для периода экспедиционных полевых работ в мае 2019 на Приплотинном плесе проведен расчет гидродинамики по ветровым данным, полученным на данный период, и выполнено сравнение с результатами полевых измерений течений. Сравнение полученных результатов численного моделирования со схемой поверхностных течений, измеренных с борта судна, обнаруживают высокую долю сходимости расчетных и натурных данных. Полученные оценки результатов моделирования позволяют перейти к задаче прогнозирования неблагоприятных гидрометеорологических обстановок в Цимлянском водохранилище, несущих риск нарушения работы водозаборов г.Волгодонска, расположенных в южной части Приплотинного плеса.

**Ключевые слова:** математическая модель, уравнения гидродинамики, урез воды, вычислительный эксперимент.

Цимлянское водохранилище, образовано плотинной Цимлянской ГЭС (1952 г.) на р. Дон на территории Ростовской и Волгоградской областях РФ. Оно является одним из крупнейших искусственных водоемов степной зоны юга России. Площадь водного зеркала 2702 кв. км при нормальном подпорном уровне 36 м. Объем при нормальном подпоре 23,75 куб. км. Длина береговой линии 641 км, длина от Цимлянской плотины до г. Калач-на-Дону 180 км, средняя ширина 14,9 км, максимальная ширина 38 км (на траверзе устья р. Цимла), средняя глубина 8 м, наибольшая глубина 35 м. В целом рельеф ложа водохранилища весьма изменчив. Это связано с тем, что акватория водоема занимает не только площадь русла и поймы Дона, но и большую часть надпойменных террас. Поэтому в пределах одного и того же участка глубины заметно изменяются в зависимости от распределения различных элементов рельефа на дне водохранилища. Так в отдельных районах глубина может достигать 20–25 метров (старое русло Дона), и в то же время в районе Волгодонска и устья реки Цимла глубина составляет 0,5–2 м.

Значительно возросшая антропогенная нагрузка на Цимлянское водохранилище, интенсивное судоходство и связанное с ним загрязнение водоема, отбор воды на промышленные и сельскохозяйственные цели, многолетняя маловодность и другие факторы оказывают негативное влияние на биоценоз водохранилища. Уменьшение глубины водохранилища ведёт к более интенсивному прогреванию воды, что создаёт благоприятные условия для развития

сине-зелёных водорослей. Если к этому добавить неблагоприятную метеорологическую обстановку, то могут возникать ситуации, когда возникает опасность жизнедеятельности определенных регионов. Так при продолжительном действии ветров восточного направления возникает опасность засорения фильтров на водозаборе г. Волгодонска [1].

В настоящее время на зоны мелководья (до 6 м глубины) приходится свыше 12–15 % всей площади Цимлянского водохранилища, поэтому для численного исследования гидродинамики водохранилища используем двухслойную математическую модель гидрофизических процессов в водоемах с большой неоднородностью глубин [2].

В области, охватывающей все водохранилище, вводится равномерная по всем направлениям разностная сетка с соответствующими шагами  $h_x$ ,  $h_y$ ,  $h_z$ . Прямоугольная разностная сетка выбирается с шагом 170 м по горизонтали и 0,5 м по вертикали размера, что дает количество ячеек  $300 \times 799 \times 52$ . После индексации ячеек количество неизвестных в расчетной области для каждого искомого параметра зависит от рассматриваемого уреза воды. Число неизвестных для мелководного и глубоководного слоев в зависимости от урезов воды приведено в табл. 1.

Наличие большого числа неизвестных предъявляет высокие требования как к вычислительной системе, так и к пакетам используемых программ решения систем линейных алгебраических уравнений. Данные системы уравнений имеют сильно раз-

реженную структуру, поэтому предпочтение отдается тем пакетам, которые хранят и обрабатывают только ненулевые элементы получаемых матриц. Численная реализация поставленной задачи производилась на многопроцессорных вычислительных системах в центре коллективного пользования «Высокопроизводительные вычисления» Южного федерального университета. Для решения систем линейных алгебраических уравнений, получающихся при дискретизации исходных дифференциальных уравнений, использовалась библиотека параллельных подпрограмм Aztec.

**Табл. 1. Число неизвестных для мелководного слоя I и глубоководного слоя II для различных урезов воды**

Урез, м	Слой I	Слой II
31,4	64000	750000
32,9	68000	940000
34,1	72000	1100000
34,4	74000	1140000
35,7	78000	1300000
36,0	78000	1400000

Для периода экспедиционных полевых работ 24–25 мая 2019 на Приплотинном плесе проведен расчет гидродинамики по ветровым данным, полученных на данный период для сравнения с результатами полевых измерений течений. Урез воды составлял 34,4 м. Ветровая ситуация сложилась таким образом, что в первой половине дня 24.05.2019 направление ветра было юго-западным, но во второй половине дня направление сменилось на восточное и северо-восточное и таким оставалось до конца дня 25.05.2019. Поля скоростей выводились через каждый час расчетного времени. Огражденная зона в юго-восточной части Приплотинного плеса соответствует охлаждающему водоему Ростовской АЭС.

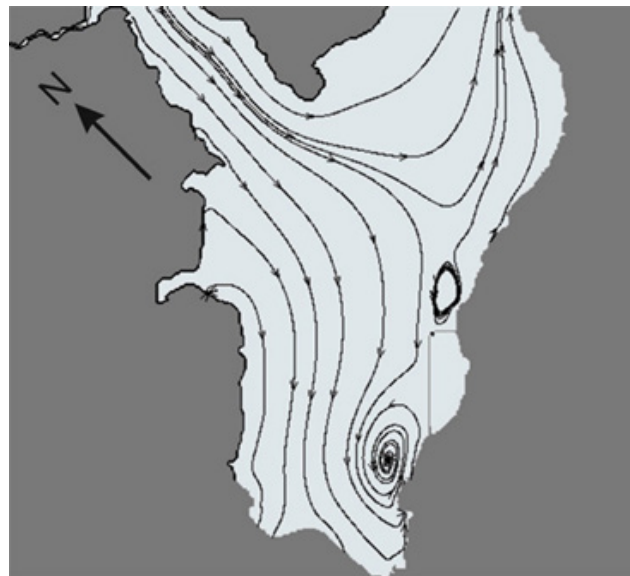
Сравнение полученных результатов со схемой поверхностных течений, построенной по результатам полевых работ, выполненных весной 2019 года, обнаруживают высокую долю сходимости расчетных и натурных данных.

Картина рассчитанного поверхностного течения, соответствующая времени 24 мая 2019 18 часов, изображена на Рис. 1.

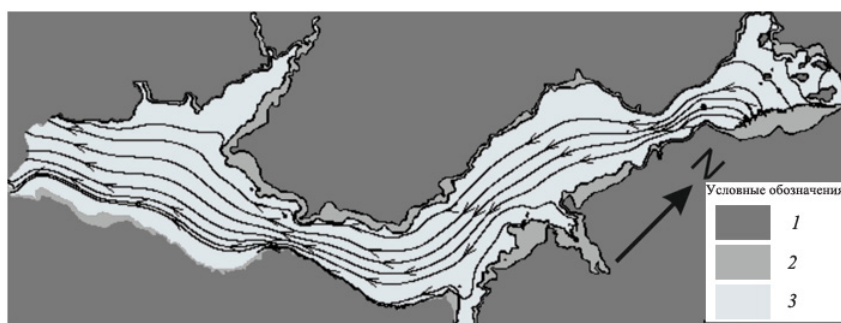
Полученные оценки результатов моделирования позволяют перейти к задаче прогнозирования неблагоприятных гидрометеорологических обстановок в Цимлянском водохранилище, несущих риск нарушения работы водозаборов г.Волгодонска, расположенных в южной части Приплотинного плеса.

Критически низкий урез воды наблюдался 22–26 сентября 2015 года, когда он был равен 31,37 м [3]. В это время преобладали ветра восточного и северо-восточного направлений силой 2–4 м/с. На Рис. 2 приведена рассчитанная по модели картина течения в Цимлянском водохранилище на 24 сентября 2015 года. Представленная картина подтверждает возможность засорения водозабора г. Волгодонска при данной ветровой ситуации.

Многолетние метеорологические наблюдения за ветровой ситуацией на Приплотинном плесе установили, что наиболее частыми являются ветра восточного и западного направлений [4].



**Рис. 1. Предполагаемое течение на момент 18:00 24 мая 2019 года**



**Рис. 2. Течения в Цимлянском водохранилище на момент 24 сентября 2015 года. Обозначения: 1 – суша; 2 – урез 36 м; 3 – урез 31,4 м**

Проведенные с помощью математической модели расчеты показали, что при действии восточных и северо-восточных ветров формируются течения вдоль длинной оси, что в свою очередь в условиях интенсивного цветения может приводить к скоплению фитопланктона в зоне водозаборов г.Волгодонска, как это произошло в октябре 2009 года [1]. Причем это справед-

ливо для разных отметок уровня, заложенных в модель.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и РГО в рамках научного проекта № 17-05-41145 РГО\_а «Изучение трансформации среды и биоты Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона в условиях изменения климата»*

### Литература

1. Матишов Г.Г., Ковалева Г.В. «Цветение» воды в водоемах юга России и сбои в водоснабжении (на примере г. Волгодонска) // Вестник Южного научного центра. 2010. Т. 6. № 1. С. 71–79.
2. Чикин А.Л. Двухслойная математическая модель ветровых течений в водоемах, имеющих большие площади мелководья // Матем. моделирование, т. 21, № 12, 2009 г., С. 152–160.
3. Клещев А.В. Отчет о проведении комплексных экспедиционных исследований состояния Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона в период с 22 по 29 сентября 2015 г. г.Ростов-на-Дону, 2015. 16 с.
4. Кравченко Н.К. Режим метеорологических условий Цимлянского района Ростовской области. Бакалаврская работа. Туапсе. 2017. 46 с.

## NUMERICAL STUDY OF CURRENTS IN TSIMLYANSK RESERVOIR AT DIFFERENT LEVELS OF RESERVOIR FILLING

**A.V. Kleshchenkov<sup>1</sup>, A.L. Chikin<sup>1</sup>, L.G. Chikina<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Federal Research Center Southern Scientific Center RAS, Rostov-on-Don, Russia

<sup>2</sup>South Federal University, Rostov-on-Don, Russia

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

**Abstract.** A description of the mathematical model of the hydrodynamics of the Tsimlyansk reservoir is given. In shallow water regions, the flows are described by the equations of shallow water, and in deep-water regions by both the equations of shallow water and the three-dimensional equations of motion of an incompressible viscous fluid. The problem is solved by finite difference methods on a uniform difference grid. The calculations were carried out at different levels of reservoir filling. A comparison of the results obtained with the surface currents scheme constructed based on the results of field work performed in the spring of 2019 is carried out. The pictures of currents were obtained at different water edges. For the period of expeditionary field work in May 2019, hydrodynamics was calculated on the near-dam site using wind data obtained for this period and compared with the results of field measurements of currents. Comparison of the obtained results of numerical modeling with the scheme of surface currents measured from the research vessel reveals a high proportion of convergence of the calculated and field data. The obtained estimates of the modeling results allow us to proceed to the problem of predicting unfavorable hydrometeorological conditions in the Tsimlyansk reservoir, which carry the risk of disrupting the operation of the water intakes of Volgodonsk located in the southern part of the near-dam site.

**Keywords:** mathematical model, hydrodynamic equations, water edge, computational experiment.

### References

1. *Matishov G.G., Kovaleva G.V. "Tsvetenie" vody v vodoemakh yuga Rossii i sbor v vodosnabzhenii (na primere g. Volgodonska) ["Blooming" of water in reservoirs of southern Russia and disruptions in water supply (for example, Volgodonsk)] // Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra. 2010. T. 6. № 1. S. 71–79 (In Russian).*
2. *Chikin A.L. Dvukhsloynaya matematicheskaya model' vetrovykh techeniy v vodoemakh, imeyushchikh bol'shie ploshchadi melkovod'ya [Two-layer mathematical model of wind currents in reservoirs with large areas of shallow water] // Matem. modelirovanie, t. 21, № 12, 2009 g., S. 152–160 (In Russian).*
3. *Kleshchenkov A.V. Otchet o provedenii kompleksnykh ekspeditsionnykh issledovaniy sostoyaniya Tsimlyanskogo vodokhranilishcha i Nizhnego Dona v period s 22 po 29 sentyabrya 2015 g. [Report on the implementation of comprehensive expeditionary studies of the state of the Tsimlyansk reservoir and the Lower Don in the period from 22 to 29 September 2015]. Rostov-na-Donu, 2015. 16 s (In Russian).*
4. *Kravchenko N.K. Rezhim meteorologicheskikh usloviy Tsimlyanskogo rayona Rostovskoy oblasti. Bakalavrskaya rabota [Mode of meteorological conditions of the Tsimlyansk district of the Rostov region. Bachelor's work]. Tuapse. 2017. 46 s (In Russian).*