Численные гидродинамические исследования для обоснования компоновки Нижегородского низконапорного гидроузла

А.В. Глотко^{1,2}, В.В. Беликов¹, Н.М. Борисова¹, Е.С. Васильева¹, А.Б. Румянцев¹

¹Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН), 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3;

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен проблемный участок на р. Волга между Нижегородской ГЭС и г. Нижний Новгород, на котором в результате посадки уровня сложились неблагоприятные условия для судоходства, выработки электроэнергии, а также безопасного проживания в нижнем бьефе. Единственным решением проблемы является строительство низконапорного гидроузла (ННГУ), который уменьшит интенсивность переформирования рельефа в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла и остановит посадку отметок дна и уровня на этом участке. Цель исследования — изучение процессов, возникающих выше и ниже по течению от створа проектируемого объекта для определения опасных тенденций и выработки практических решений по минимизации негативного воздействия; а также обзор математических моделей, проведенных на данном участке с целью улучшения судоходных условий.

Материалы и методы. Используются материалы предыдущих исследований по данной проблеме, предпроектные инженерные изыскания и чертежи компоновки проектируемого гидроузла. Исследования производились численными методами на программном комплексе Stream 2D, в основе которого заложена система двумерных дифференциальных уравнений Сен – Венана. Рассмотрены варианты для меженных условий с учетом пропусков Нижегородской ГЭС, а также прохождения паводков редкой повторяемости.

Результаты. Получены планы распределения модулей и векторов скоростей, которые показали, что строительство ННГУ приводит к уменьшению уклонов и скоростей воды на проблемном участке Волжско-Камского каскада, в результате чего снижается интенсивность деформаций дна. Пропуск расходов редкой повторяемости показал, что перепад в бьефах незначительный, в то же время по левобережной пойме расход воды проходит больше, чем считался ранее. Расчеты меженных условий продемонстрировали ряд недостатков в компоновке, связанных с недостаточной пропускной способностью и неравномерностью распределения расходов водосбросной части напорного фронта.

Выводы. Полученные результаты показали практическую значимость использования математического моделирования численными методами в двумерной постановке, которые позволяют рассмотреть процессы более детально и своевременно изменить компоновку гидроузла.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: низконапорный гидроузел, меженные условия, пропуск весеннего половодья, обеспечение судоходства, Волжско-Камский каскад, водохранилище Чебоксарского гидроузла, численное моделирование, уравнения Сен-Венана

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Глотко А.В., Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Румянцев А.Б. Численные гидродинамические исследования для обоснования компоновки низконапорного Нижегородского гидроузла // Строительство: наука и образование. 2019. Т. 9. Вып. 2. Ст. 3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.3

Numerical hydrodynamic researches for justifying design of the Nizhny Novgorod low-head hydraulic system

Anna V. Glotko^{1,2}, Vitalii V. Belikov¹, Natalia M. Borisova¹,
Ekaterina S. Vasil'eva¹, Aleksey B. Rumjancev¹

¹ Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IVP RAN),
3 Gubkina st., Moscow, 119333, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU),
26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A problem area of the Volga river between the Nizhny Novgorod hydroelectric power station and the city of Nizhny Novgorod has been surveyed, where unfavourable conditions for navigation, power generation, and safe living in the downstream are formed as a result of the landing level. The only solution to the problem is construction of a low-head hydraulic system (NNGU) that will reduce intensity of relief re-formations in the downstream of the Nizhny Novgorod hydraulic

system and stop lowering of the bottom and level marks in this area. Purpose of this research is to study processes that occur upstream and downstream from the site of the facility to identify hazardous trends and develop practical solutions to minimize negative impacts; as well as a review of mathematical models conducted in this area for improving navigation conditions.

Materials and methods. Materials of previous researches on this subject, pre-design engineering surveys and layout drawings of the designed hydraulic system are used. The researches have been performed with numerical methods using Stream 2D software package that is based on the two-dimensional differential equation Saint-Venant system. Options for low-flow conditions are considered, taking into account passing of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station, as well as rare floods.

Results. Plans for distribution of velocity modules and vectors are created, which show that construction of the low-pressure hydraulic system results in decrease in slopes and velocities of water in the problem area of the Volga-Kama cascade, as a result of which intensity of bottom deformations decreases. Rare flow passage demonstrated that difference in pools is insignificant, while, at the same time, flow of water along the left-bank floodplain passes more than believed before. Calculations of low-flow conditions demonstrated a number of deficiencies in the design, which are associated with insufficient throughput and uneven distribution of flow rates in the discharge area of the waterfront.

Conclusion The results demonstrated a practical importance of using mathematical simulation with numerical methods in a two-dimensional formulation, which allow us to consider processes in more detailed manner and change the hydraulic system design in a timely manner.

KEYWORDS: low-head hydraulic system, low-flow conditions, passing the spring flood, providing navigation, Volga-Kama cascade, Cheboksary hydraulic system reservoir, numerical simulation, St. Venant's equations.

FOR CITATION: Kuznetsov V.S., Polekhina G.E., Shaposhnikova Y.A. Numerical hydrodynamic researches for justifying design of the Nizhny Novgorod low-head hydraulic system. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019; 9(2):3. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.3 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Водохранилище Чебоксарского гидроузла было введено в эксплуатацию в начале 80-х годов и по настоящее время осуществляет регулирование стока по временным правилам, в соответствии с которыми нормальный подпорный уровень (НПУ) в верхнем бьефе поддерживается на отметке 63 м в Балтийской системе (БС) вместо проектной 68 м БС. В результате участок р. Волга от г. Городец (нижний бьеф Нижегородского гидроузла) до г. Нижний Новгород протекает в своем естественном русле, т.е. с активными русловыми процессами.

С 1970 г. судоходная глубина 3,5 м на этом участке поддерживается путем дноуглубительных работ. Однако сохраняется тенденция посадки уровня, вызванная сбросом осветленной воды в нижний бьеф Нижегородским гидроузлом. В настоящее время прохождение судов через Городецкие шлюзы проблематично, так как сооружение не было рассчитано на отсутствие подпора со стороны Чебоксарского гидроузла и понижение отметок дна привело к непредусмотренному проектом понижению отметок воды в реке и в камере шлюза. Негативная тенденция, продолжавшаяся десятилетия, привела к возникновению еще больших проблем: достижению максимально допустимого напора на плотину 17,5 м, что требует при дальнейшем опускании уровня нижнего бьефа снижать НПУ в верхнем бьефе, а это в свою очередь приведет к понижению уровня воды в камере шлюза и вызовет аналогичные проблемы в створе Рыбинского гидроузла. Следует

отметить, что эти действия не решают еще одной проблемы — снижение выработки электроэнергии на гидроэлектростанции Нижегородского гидроузла, которая также не проектировалась на отсутствие подпора со стороны Чебоксарского гидроузла.

Сложная ситуация на участке р. Волга от Нижегородского гидроузла до г. Нижний Новгород требовала серьезной оценки с привлечением современных средств анализа, к которым относится моделирование, в том числе численным методом. Рассматривались два варианта решения проблемы: наполнение водохранилища до проектных отметок (НПУ = 68 м БС) или строительство низконапорного гидроузла в зоне выклинивания водохранилища Чебоксарского гидроузла, который повысит уровень воды до проектной в меженных условиях.

С середины 90-х годов проводились исследования проблемы с помощью различных моделей с привлечением специалистов. К наиболее известным относятся исследования в рамках Федеральной целевой программы «Возрождение Волги», стартовавшей в 1996 г., а также российско-германской исследовательской программы «Волга–Рейн», финансировавшейся со стороны России Министерством промышленности, науки и технологий РФ, со стороны Германии — Министерством образования и научных исследований ФРГ. В период 1998–1999 гг. создана пионерная модель водохранилища Чебоксарского гидроузла (в одномерной постановке) [1], на которой была отработана технология подготовки исходных данных, а также проведены расчеты по затоплению территории при повышении НПУ во-

дохранилища Чебоксарского гидроузла до 65 и 68 м БС. Результаты работы представлены в ряде публикаций [2–5]. Приобретенный опыт был успешно применен для других ступеней Волжско-Камского каскада, а также получил свое развитие на аналогичных работах по р. Эльба [6, 7]. Методика использования численного моделирования и апробация ее на реальных объектах отражена в публикациях российских и зарубежных специалистов [8–15].

В 2003 г. сотрудниками АО «НИИЭС» по заказу ОАО «Гипроречтранс» рассматривался вариант решения проблемы путем строительства низконапорного гидроузла [16]. На одномерной модели рассматривались уровенные режимы верхнего и нижнего бьефов проектируемого сооружения в условиях суточного регулирования воды вышерасположенным гидроузлом.

Были выполнены расчеты пропуска постоянных и переменных расходов в диапазоне от 500 до 5500 м³/с при изменении НПУ низконапорного гидроузла (ННГУ) от 68 до 69 м.

В период 2004–2006 гг. в рамках диссертационной работы [17–19] на основании вышеописанных исходных данных построены несколько моделей в одномерной и двумерной постановке для меженных и паводковых условий, которые учитывали недостатки предыдущих моделей. Цель работы — выбор оптимальной технологии подготовки исходных данных и построения модели для конкретного объекта. Полученный опыт и уточненная информация об объекте исследований использованы в настоящей работе.

После проведенных многолетних научных исследований, общественных обсуждений, экономического анализа сложившейся ситуации, а также оценки экологических последствий было принято решение построить ННГУ, который бы решал две проблемы. А именно, снизил бы интенсивность русловых переформирований за счет снижения скоростей и продольного уклона русла, а также повысил и поддерживал бы в меженных условиях уровень воды, необходимый для судоходства.

Техническая характеристика проектируемого сооружения [20]

В состав основных гидротехнических сооружений (ГТС) проектируемого ННГУ (рис. 1) входят:

- 1 — земляная плотина длиной 800 м и шириной по гребню 12 м;
- 2 — водосливная плотина, состоящая из 16 пролетов шириной по 20 м каждый;
- 3 — водосброс-регулятор (4 пролета в составе водосливной плотины) (рис. 2);
- 4 — судоходный шлюз с подходными каналами;
- 5 — автоматический водосброс-регулятор в рукаве Никольский;
- 6 — правобережная глухая незатапливаемая безнапорная дамба от г. Сормово до пришлюзовой площадки общей протяженностью 3,6 км со служебной автодорогой по гребню.

Гидротехнические сооружения проектируемого ННГУ полностью перегораживают русло и правобережную пойму р. Волги. При пропуске весенних половодий эти сооружения образуют единый напорный фронт.

Рис. 1. Схема расположения сооружений ННГУ

Рис. 2. Разрез по оси водосливной плотины

Земляная плотина 1 перекрывает русло р. Волги и часть левобережной поймы и примыкает к левому устью водосливной плотины.

Площадка под водосбросные 2, 3 и судоходные 4 сооружения гидроузла находится на правобережной пойменной территории (остров Ревяжский).

Водосливная плотина 2 и судоходный шлюз 4 гидроузла расположены на правобережной пойме Волги, где искусственно создается спрямление с бифуркацией участка реки для обеспечения гидравлически плавного сопряжения потока с водосбросными сооружениями и уменьшения протяженности судоходного хода. Водосброс-регулятор 3 размещается в центре водосливного фронта плотины.

Автоматический водосброс-регулятор 5 в рукаве Никольский располагается в правобережной дамбе 6 в 650 м от судоходного шлюза.

Гидравлическая характеристика сооружений проектируемого гидроузла [20]

В проектных условиях в период половодья пропуск русловых расходов воды и расходов, проходящих по правобережной пойме, осуществляется через 16 пролетов водосливной плотины и водосброс-регулятор в рукаве Никольский. Левобережная пойма будет работать практически так же, как и в бытовых условиях. При прохождении расчетного половодья вероятностью превышения 0,1 %

часть паводковых вод пропускается через судоходный шлюз.

Расчетная пропускная способность напорного фронта гидроузла в половодье вероятностью превышения 0,1, 1,5 и 10 % приведена ниже в табл. 1.

Ранее проведенные исследования показали, что создание ННГУ не приведет к значительному дополнительному затоплению пойменных территорий при прохождении высоких половодий в виду малой величины подпора, создаваемого гидроузлом при пропуске максимальных половодных расходов воды.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках предпроектных работ 2015 г. было проведено исследование на численной модели компоновочного решения гидроузла с помощью программного комплекса Stream 2D для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках (свидетельство № 2014612181 от 20.02.2014).

Общее описание используемой численной модели

В основу программы заложена двумерная нестационарная система уравнений мелкой воды (уравнения Сен-Венана), описывающая движение жидкости в горизонтальной плоскости [21]

Табл. 1. Значения расходов воды через створ ННГУ в половодье различной вероятности превышения

№ п/п	Наименование	Значение расхода воды, м³/с, в половодье вероятностью превышения, %			
		0,1	1	5	10
1	Максимальный естественный расход воды в створе ННГУ	20 200	17 150	14 800	13 700
2	Максимальный проектный расход в створе ННГУ	23 134	17 649	14 865	14 081
3	Максимальный пропускной расход воды через сооружения ННГУ	21 134*	16 382	14 014	13 483
	в том числе через:				
	водосливную плотину	15 780	15 720	13 530	13 035
	камеры шлюза	5354	—	—	—
	водосброс-регулятор на рукаве Никольский	(700)	662	484	448
4	Левобережная пойма	1300	1267	851	598

Примечание: * Расход указан без учета расхода воды через водосброс-регулятор в рукаве Никольский. С учетом указанных расходов для пропуска половодья возможно использование одной нитки шлюза.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{w})h &= 0, \\ \frac{\partial (h\vec{w})}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{w})h\vec{w} + gh\nabla(h+z) &= \vec{f}, \end{aligned} \quad (1)$$

где t, x, y — время и декартовы координаты на горизонтальной плоскости; $h = h(x, y, t)$ — глубина потока жидкости; $\vec{w} = \vec{w}(x, y, t) = (u, v)^T$ — вектор скорости, осредненный по глубине потока; g — ускорение свободного падения вдоль вертикального направления; $z = z(x, y)$ — вертикальные отметки рельефа дна, который отсчитывается от какого-либо горизонтального уровня; $\zeta = h + z$ — уровень свободной поверхности жидкости; $\vec{f}$ — учет действия внешних сил, например, силы Кориолиса или

трения: $\vec{f} = \lambda \vec{w} |\vec{w}| / 2$, λ — коэффициент гидравлического трения, в частности, $\lambda = 2gn^2 h^{-1/3}$, n — ко-

эффициент шероховатости; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$; $(\vec{a} \cdot \vec{b})$ —

скалярное произведение векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$.

Численный метод решения уравнений приведен в работе [21].

Построение математической модели

На первом этапе моделирования производилось построение цифровой модели рельефа по крупномасштабным картографическим материалам, материалам съемок и чертежам сооружений (рис. 3).

На следующем этапе была проведена схематизация расчетной области полигонами и построена

Рис. 3. Цифровая модель рельефа на участке моделирования, контурной линией обозначена граница математической модели

нерегулярная гибридная треугольно-четырёхугольная сетка (113 810 ячеек). Расчетная сетка покрывает область на 35 км выше и на 10,6 км ниже по течению р. Волги от проектируемого створа ННГУ (рис. 4).

В модели использовано зонирование по значению коэффициента шероховатости с использованием изображений из космоса, представленных в открытых интернет-источниках. Параметры назначались с учетом предыдущих аналогичных расчетов на данном участке, области распространения заданного значения шероховатости определялись по космическому снимку.

В районе водосливной плотины, в камерах шлюза, в подходных каналах коэффициент шероховатости n в формуле Маннинга назначался равным 0,02, для русла р. Волга — $n = 0,025$, в русле рукава Никольский и на некоторых прирусловых участках — $n = 0,03$. На пойменных участках значение варьировалось от 0,04 до 0,06 и для зоны, соответствующей пойме, сильно заросшей кустарником и лесом, рассматривались два значения 0,11 и 0,17. Правильность их распределения по модели подтверждается нормативными значениями.

В соответствии с вариантами моделирования было назначено 29 граничных условий (табл. 2).

Для прогнозных расчетов были рассмотрены 3 варианта меженных условий и 12 вариантов половодья (с учетом подпора со стороны р. Ока и при разной шероховатости левобережной поймы).

Достаточность исходных данных, детально прорисованный рельеф и подробная схематизация модели позволяют полученные результаты считать корректными и достаточно достоверными.

Результаты проведенных исследований численными методами

Для анализа гидродинамических параметров были выбраны шесть вариантов (табл. 2), для которых были построены планы свободной поверхности воды (рис. 5, а; 6, а), модули средних значений по глубине скоростей воды (рис. 5, б; 6, б).

Выводы по результатам расчетов численными методами

По результатам численного гидродинамического моделирования сделаны следующие выводы:

- в верхнем бьефе ННГУ в меженных условиях для судоходства обеспечены необходимые глубины;
- скорости воды и уклон в проектируемом водохранилище по сравнению с бытовыми значениями снижаются до безопасного уровня, что минимизирует интенсивность деформаций дна на данном участке;

Рис. 4. Фрагмент расчетной сетки

Табл. 2. Сводная таблица граничных условий участка моделирования

№ створа п/п	Наименование	Характеристика створ	Значение параметра, задаваемого на границе					
			половодье			межень		
			0,1 %	1 %	10 %			
1	Вход в модель	Расход, м³/с	20 200	17 150	13 700	3000	2000	1000
2	Выход из модели	Уровень, м БС	75,6 (76,6)*	74,7 (76,0)*	73,5 (74,6)*	65,6	64,7	63,7
3	Пролет ВП № 16	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
4	Пролет ВП № 15	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
5	Пролет ВП № 14	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
6	Пролет ВП № 13	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
7	Пролет ВП № 12	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
8	Пролет ВП № 11	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
9	Пролет ВП № 10	Уровень, м БС	Транзит	Транзит	Транзит	65,9	67,4	67,86
10	Пролет ВП № 10	Расход, м³/с	Нет	Нет	Нет	714	471	236
11	Пролет ВП № 09	Уровень, мБС	Транзит	Транзит	Транзит	65,9	67,4	67,86
12	Пролет ВП № 09	Расход, м³/с	Нет	Нет	Нет	772	517	257
13	Пролет ВП № 08	Уровень, м БС	Транзит	Транзит	Транзит	65,9	67,4	67,86
14	Пролет ВП № 08	Расход, м³/с	Нет	Нет	Нет	780	522	261
15	Пролет ВП № 07	Уровень, м БС	Транзит	Транзит	Транзит	65,9	67,4	67,86
16	Пролет ВП № 07	Расход, м³/с	Нет	Нет	Нет	723	471	234
17	Пролет ВП № 06	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
18	Пролет ВП № 05	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
19	Пролет ВП № 04	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
20	Пролет ВП № 03	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
21	Пролет ВП № 02	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
22	Пролет ВП № 01	Контрольно-управляющий	Транзит	Транзит	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт
23	Шлюз правая камера вход	Контрольно-управляющий	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт
24	Шлюз правая камера выход	Контрольно-управляющий	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт
25	Шлюз левая камера вход	Контрольно-управляющий	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт
26	Шлюз левая камера выход	Контрольно-управляющий	Транзит	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт	Закрыт
27	Автоматический водосброс-регулятор в рукаве Никольский	Контрольный	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит
28	Левобережная пойма	Контрольный	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит
29	Верхний бьеф ВП	Контрольный	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит	Транзит

Примечание: ВП — водосливная плотина; * — уровни с учетом подпора от р. Ока, цветом выделены параметры, полученные моделированием.

Рис. 5. Фрагмент плана, по результатам расчета 1 % половодья: *a* — уровней воды; *b* — средних значений скоростей

Рис. 6. Фрагмент плана по результатам расчета межженных условий $1000 \text{ м}^3/\text{с}$: *a* — уровней воды; *b* — средних значений скоростей

Табл. 3. Сравнение проектных и расчетных значений расходов воды через левобережную пойму

Наименование варианта		Значение расхода воды, проходящего через левобережную пойму, в процентном отношении от общего расхода воды в половодье вероятностью превышения, %		
		0,1	1	10
По проекту		4,4	7,4	6,4
Расчет без учета влияния р. Оки	$n = 0,11$	16	23,6	23,7
	$n = 0,17$	11,3	17	17
Расчет с учетом влияния р. Оки	$n = 0,11$	22	30	27,5
	$n = 0,17$	15,8	22	20,2

Табл. 4. Сравнение расчетных значений скорости воды при разных значениях коэффициента шероховатости

Наименование варианта		Максимальная скорость течения на участке левобережного примыкания земляной русловой плотины в половодье вероятностью превышения		
		0,1 %	1 %	10 %
Расчет без учета влияния р. Оки	$n = 0,11$	2,34 м/с	1,95 м/с	1,46 м/с
	$n = 0,17$	2,03 м/с	1,62 м/с	1,62 м/с
Расчет с учетом влияния р. Оки	$n = 0,11$	1,66 м/с	1,82 м/с	1,21 м/с
	$n = 0,17$	1,57 м/с	1,78 м/с	1,28 м/с

- на входах в подводящий и отводящий каналы шлюза поперечные скорости незначительны и не усложняют условия судоходства;

- при пропуске расхода 0,1 % через створ гидроузла в шлюзе наблюдаются максимальные скорости воды от 4,6 до 5,58 м/с;

- при пропуске высоких половодий перепад уровней (подпор) на сооружениях ННГУ составляет 0,20–0,30 м, что не приводит к заметному увеличению зоны затопления в верхнем бьефе по сравнению с существующими условиями.

В отношении компоновки ННГУ для меженных условий были сделаны следующие замечания:

1. Не обеспечен плавный вход в четыре центральных водосбросных пролета, работающих в меженных условиях. Из-за этого возникает существенная неравномерность в распределении расходов между крайними и средними пролетами (разница около 10 %), косина потока, уменьшение пропускной способности крайних пролетов на 10 %, повышенные пульсации скорости течения.

2. При пропуске расхода 3000 м³/с скорости на подходе к водосбросным отверстиям достигают 5 м/с, при этом наблюдается ярко выраженная кривая спада водной поверхности. Скорости в нижнем бьефе на водосбросе достигают 10 м/с, справа и слева от четырех работающих пролетов возникают интенсивные водоворотные (циркуляционные) зоны с повышенными пульсациями скоростей.

Таким образом, гидравлические условия пропуска меженных расходов в проекте недостаточно оптимизированы.

По результатам моделирования прохождения половодий 0,1, 1 и 10 % обеспеченности была произведена оценка пропускной способности левобережной поймы и сопоставление ее с проектными значениями.

При пропуске весеннего половодья были проведены две серии расчетов без учета и с учетом влияния р. Оки, в каждой из которых рассматривались два варианта значения коэффициента шероховатости поймы заросшей лесом и кустарником ($n = 0,11$ и $n = 0,17$). Расчеты показали, что даже с увеличением значения коэффициента шероховатости на пойме до 0,17 не удастся достичь проектных пропускных расходов по сооружениям ННГУ (табл. 3).

Оценка скоростей течения вдоль откосов русловой земляной плотины по левобережной пойме в половодье 0,1, 1 и 10 % обеспеченности (табл. 4) указала на необходимость на участке сопряжения глухой земляной плотины с поймой произвести крепление материалом, который будет производить гашение потока (например, каменной наброской).

Общий вывод по результатам проведенных исследований — строительство ННГУ решает многие проблемы на участке р. Волга от Нижегородского гидроузла до г. Нижний Новгород, но компоновка требует корректировки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Modellierung eines Wolgaabschnitts von km 850–1185. Karlsruhe: Technische Universität Karlsruhe. Institut für Wasservirtschaft und Kulturtechnik, 1999.
2. Щербаков А.О., Талызов А.А., Румянцев И.С., Пручкин С.И., Бубер А.Л. Совершенствование управления каскадом волжских водохранилищ на основе гидродинамических моделей и ГИС-технологий // Мелиорация и водное хозяйство. 2002. № 2. С. 8–12.
3. Нестманн Ф., Кроммер Р. Стратегии управления бассейном реки Волги и оптимальной эксплуатации Волжского каскада гидроузлов // Великие реки 2004 : тез. докл. междунар. науч.-пром. форума. Н. Новгород : ННГАСУ, 2004. С. 44–47.
4. Щербаков А.О., Румянцев И.С., Талызов А.А. Разработка модели Волжского каскада гидроузлов в рамках Международного проекта «Волга—Рейн» // Материалы VI гидрологического съезда, Санкт-Петербург, 28 сентября–1 октября 2004. СПб. : Гидрометеиздат, 2004. С. 87–89.
5. Нестманн Ф., Кроммер Р. Результаты исследований по интегрированному управлению водными ресурсами в проблемных регионах Волги и Оки (на примере проекта Волга—Рейн) // Великие реки 2010 : тр. конгр. Междунар. науч.-пром. форума. Н. Новгород : ННГАСУ, 2011. С. 49–51.
6. Merkel U., Kron A., Oberle P. Combined 1- and 2-dimensional numerical modelling techniques for operational flood simulation in complex river systems. Case study «Middle Elbe». Special aspects of urban flood management / ed. E. Pasche // Proceedings of the Cost Session Aquaterra Conference 2007. Hamburg-Harburg : Inst. für Wasserbau, 2007. Pp. 241–264.
7. Büchele B., Helms M., Mikovec R., Ihringer J., Nestmann F. Hydrologische Modellierung für das operationelle Hochwassermanagement in großen Flussgebieten (Beispiel Elbe) // Kurzbeiträge an der Universität der Bundeswehr München. Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse. Tag der Hydrologie, 22–23 März 2006. DWA, Hennef : M. Disse, 2006. Pp. 99–110.
8. Belikov V.V., Zaitsev A.A., Militeev A.N. Mathematical modeling of complex reaches of large river channels // Water Resources. 2002. Vol. 29. Issue 6. Pp. 643–650. DOI: 10.1023/a:1021132929378
9. Zaitsev A.A., Belikov V.V., Militeev A.N. Using computer modeling for regulation of sediment transport under hydraulic structures on a large river // Proceedings of the international symposium on sediment transfer through the fluvial system. IAHS Publication. 2004. Pp. 386–394.
10. Lehmann B., Nestmann F., Bernhart H. Methodik zur eindimensionalen Strömungsberechnung naturnaher Fließgewässer // Konferenzbericht. IWD, Dresden : H.-B. Horlacher, 2006. Pp. 437–444.
11. Musall M., Stelzer C., Theobald S., Nestmann F. Numerische Modelle bei der wasserbaulichen Planung // WasserWirtschaft. 2006. Vol. 96 (9). Pp. 20–25.
12. Belikov V.V., Vasil'eva E.S., Prudovskii A.M. Numerical modeling of a breach wave through the dam at the Krasnodar reservoir // Power Technology and Engineering. 2010. Vol. 44. Issue 4. Pp. 269–278. DOI: 10.1007/s10749-010-0176-2
13. Алабян А.М., Беликов В.В., Крыленко И.Н., Лебедева С.В. Применение двумерных гидродинамических моделей для решения проблем регулирования русла Нижней Волги в условиях дефицита данных гидрологических изысканий // Инженерные изыскания. 2014. № 2. С. 24–34.
14. Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Беликов В.В., Кочетков В.В., Норин С.В. Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6–7 июля 2012 г. // Гидротехническое строительство. 2014. № 3. С. 29–35.
15. Belikov V.V., Krylenko I.N., Alabyan A.M., Sazonov A.A., Glotko A.V. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. 2015. Vol. 370. Pp. 69–74. DOI: 10.5194/piahs-370-69-2015
16. Компьютерное моделирование течений в бьефах проектируемой Нижегородской ГЭС с учетом суточных попусков Горьковского гидроузла : отчет. М. : НИИЭС, 2003.
17. Беликов В.В., Глотко А.В. Компьютерное моделирование паводковых и меженных течений в Чебоксарском водохранилище с применением различных численных методов // Природообустройство и рациональное природопользование — необходимые условия социально-экономического развития России : сб. науч. тр. конф., 19–21 апреля 2005, Москва. Ч. I. М. : МГУП, 2005. С. 204–210.
18. Беликов В.В., Глотко А.В. Математическое моделирование сложных русловых течений на участке Чебоксарского водохранилища между Нижегородским гидроузлом и Нижним Новгородом // Природообустройство и рациональное природопользование — необходимые условия социально-экономического развития России : сб. науч. тр. конф., 19–21 апреля 2005, Москва. Ч. I. М. : МГУП, 2005. С. 210–215.
19. Глотко А.В. Совершенствование методов имитационного моделирования движения водных потоков в бьефах речных гидроузлов : дисс. ... канд. техн. наук. М. : МГУП, 2006. 173 с.
20. Численное математическое моделирование гидравлических режимов водотока в бьефах проектируемого Нижегородского низконапорного гидроузла. Этап I. М. : НПП «Аквариус», 2015.
21. Руководство пользователя Stream_2D (свидетельство № 2014612181 от 20.02.2014). Версия 2014 г. М. : НПП «Аквариус Аналитик», 2015.

Поступила в редакцию 15 января 2019 г.

Принята в доработанном виде 16 марта 2019 г.

Одобрена для публикации 29 марта 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: **Глотко Анна Владимировна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории численного гидродинамического моделирования, **Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)**, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3; доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, GlotkoAV@mgsu.ru;

Беликов Виталий Васильевич — доктор технических наук, заведующий лабораторией численного гидродинамического моделирования, главный научный сотрудник, **Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)**, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, belvv@bk.ru;

Борисова Наталья Михайловна — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории численного гидродинамического моделирования, **Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)**, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, borisovanm@mail.ru;

Васильева Екатерина Сергеевна — инженер лаборатории численного гидродинамического моделирования, **Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)**, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, vasiljevaes@yandex.ru;

Румянцев Алексей Борисович — младший научный сотрудник лаборатории численного гидродинамического моделирования, **Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)**, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3, iwp.alex.rum@gmail.com.

INTRODUCTION

The Cheboksary hydraulic system reservoir was commissioned at the beginning of the 80s and currently controls flow according pursuant to temporary rules, according to which the normal headwater level (NPU) in the upstream is kept at 63 m in the Baltic System (BS) instead of the design 68 m of the Baltic System. As a result, the part of the Volga river between Gorodets (Nizhny Novgorod hydroelectric complex downstream) and the city of Nizhny Novgorod flows in its natural channel, i.e. accompanied with active channel processes.

Since 1970, the navigation depth of 3.5 m in this part has been kept by dredging. However, a level descending trend that is caused by discharging of clarified water into the Nizhny Novgorod hydraulic system downstream, still exists. Currently, navigation through Gorodets gateways is problematic, since the facility was not designed for lack of backwater from the Cheboksary hydraulic system, and lowering of the bottom resulted in lowering of the water level in the river and in the gateway chamber, which is not supported by the design. The negative trend that has developed for decades resulted in even more serious problems: achieving the maximum allowable head of the dam of 17.5 m, which requires lowering the normal headwater level in the headwater at further lowering of the level, and this in turn results in decrease in the water level in the chamber gateway and causes similar problems in the Rybinsk hydraulic system site. Besides, these actions do not solve another problem of reducing electric power production at the hydroelectric power station of

the Nizhny Novgorod hydraulic system, which was not designed for lack of backwater from the Cheboksary hydraulic system.

Difficult situation on the Volga river between the Nizhny Novgorod hydraulic system and the city of Nizhny Novgorod demanded a serious assessment and using of modern analysis tools, which include simulation, including the numerical method. Two options of the solutions to the problem were considered: filling the reservoir to the design elevations (normal headwater level is 68 m of the Baltic System) or building a low-head hydraulic system in the transient zone of the Cheboksary hydraulic system reservoir, which will raise the water level to the design level in low-flow conditions.

Since mid-1990s, researches of the problem have been conducted using various models and involved specialists. The most famous researches are ones carried out within the Volga Revival Federal Target Program, which started in 1996, and the Volga-Rhine Russian-German Research Program, which was funded both by Russia (the Ministry of Industry, Science and Technology of the Russian Federation), and Germany (the Ministry of Education and Scientific Researches of Germany). A pioneer model of the Cheboksary hydraulic system reservoir (one-dimensional) was created in 1998–99 [1], where a technology for preparing the initial data was tested, and calculations were carried out for flooding of the area at the Cheboksary hydraulic system reservoir increase to 65 and 68 m of the Baltic System. Results of the work are presented in a number of publications [2–5]. The experience gained was successfully applied to other stages of the Volga-Kama cascade, and was developed while carrying out analogous projects on the

Elba river [6, 7]. Procedure of using numerical simulation and testing it on real objects is reflected in publications of Russian and foreign experts [8–15].

In 2003, employees of NIIES JSC considered a solution to the problem by building a low-head hydraulic system upon a request of Gipproechtrans OJSC [16]. The one-dimensional model considered level modes of the upstream and downstream of the designed structure under conditions of daily water control by an upstream hydraulic system.

Calculations were made for passing of regular and variable flows of 500 to 5500 m³/s when changing the normal headwater level of the low-head hydraulic system (NNGU) from 68 to 69 meters.

For a period 2004–2006, several models were constructed in one-dimensional and two-dimensional settings for low-flow and flood conditions, which took into account the shortcomings of the previous models, as a part of the thesis [17–19], based on the above-described raw data. Purpose of the work is to select the optimal technology for preparing raw data and building a model for a specific object. The experience gained and updated data on the object of research were used in this work.

A resolution to build a low-head hydraulic system that would solve two problems was taken after many years of research, public discussion, economic analysis of the situation, and environmental impact assessment. Namely, it would reduce intensity of channel re-formations by reducing velocities and longitudinal slope of the channel, and would also increase and keep the water level required for navigation in low-flow conditions.

Designed facility specification [20]

The main hydraulic facilities of the designed low-head hydraulic system (Fig. 1) include the following:

- 1 — earth dam with a length of 800 m and a ridge width of 12 m;
- 2 — spillway dam, which consists of 16 spans with a width of 20 m each;
- 3 — spillway-regulator (4 spans as a part of the spillway dam) (Fig. 2);
- 4 — shipping gateway with access channels;
- 5 — automatic spillway-regulator in the Nikolsky arm;
- 6 — the right-bank dead end flood-free head-free dam between the town of Sormovo to the gateway entrance area with a total length of 3.6 km and a service road along the ridge.

Fig. 1. Low-head hydraulic system location map

Fig. 2. Spillway day axial section

Hydraulic facilities of the low-pressure hydraulic system projected completely block the channel and the right-bank floodplain of the Volga. When passing spring floods, these facilities form a single waterfront.

Earth dam 1 blocks the Volga river channel as well as a part of the left bank floodplain and adjacent to the left abutment of the spillway dam.

Site for water discharge 2, 3 and navigation 4 hydraulic system facilities is located in the right-bank floodplain area (Revyaksky Island).

Hydraulic system spillway dam 2 and navigation gateway 4 are located on the right bank of the Volga, where straightening with the river bifurcation is artificially created to ensure hydraulically smooth coupling of the flow with the spillway facilities and reduce length of the navigable channel. Spillway regulator 3 is located in the centre of the dam waterfront.

Automatic spillway-regulator 5 in the Nikolsky arm is located in the right-bank dam 6 at a distance of 650 meters from the navigation gateway.

Hydraulic characteristics of the hydraulic system facilities designed [20]

Passing of channel water flows and flows through the right-bank floodplain is carried out through 16 spans of the spillway dam and spillway regulator in the Nikolsky arm in the project conditions during flood period. The left-bank floodplain will work in almost the same way as in the routine conditions. Part of a flood water is passed through the navigation gateway if the calculated flood water is passed with a probability of exceeding of 0.1%.

Table 1 below includes the estimated flow capacity of the hydraulic system waterfront at flood, with a probability of exceeding of 0.1, 1.5 and 10 %.

Previous researches have demonstrated that creation of a low-head hydraulic system will not result in a significant additional flooding of floodplain areas while high floods passing due to small amount of back-

water created by the hydroelectric system while passing of the maximum water discharge.

MATERIALS AND METHODS

As a part of the pre-project work in 2015, a research was carried out with a numerical model of a hydraulic system design solution, using the Stream 2D software package for calculating currents, deformations of the bottom and pollutant transport in open streams (Certificate No. 2014612181 of February 20, 2014).

General description of the numerical model used

The program is based on the two-dimensional non-stationary system of shallow water equations (Saint-Venant equations) that describes motion of the liquid in the horizontal plane [21]

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{w})h &= 0, \\ \frac{\partial (h\vec{w})}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{w})h\vec{w} + gh\nabla(h+z) &= \vec{f}, \end{aligned} \quad (1)$$

where t, x, y are time and Cartesian coordinates on the horizontal plane; $h = h(x, y, t)$ is the fluid flow depth; $\vec{w} = \vec{w}(x, y, t) = (u, v)^T$ is a velocity vector averaged over the flow depth; g is a gravitational acceleration along the vertical direction; $z = z(x, y)$ are vertical elevation marks of the bottom, which is measured from any horizontal level; $\zeta = h + z$ is the free liquid surface level; $\vec{f}$ is a consideration of effect of external forces, e. g. the Coriolis forces or friction: $\vec{f} = \lambda \vec{w} |\vec{w}| / 2$, λ is the hydraulic friction factor, in particular, $\lambda = 2gn^2 h^{-1/3}$, n is the roughness factor; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$; $(\vec{a} \cdot \vec{b})$ is a scalar product of vectors $\vec{a}$ and $\vec{b}$.

Table 1. Water flow through the low-head hydraulic system at flood with a different probability of exceeding

Item No.	Name	Water consumption, m ³ /s, at high water, exceedance probability, %			
		0.1	1	5	10
1	Maximum natural water consumption on the low-pressure hydraulic system site	20 200	17 150	14 800	13700
2	Maximum design consumption on the low-pressure hydraulic system site	23 134	17 649	14 865	14 081
3	Maximum water flow rate through the low-pressure hydraulic system facilities	21 134*	16 382	14 014	13 483
	Including through:				
	Spillway dam	15 780	15 720	13 530	13 035
	Gateway chamber	5354	—	—	—
	Spillway regulator on the Nikolsky arm	(700)	662	484	448
4	Left-bank bottomland	1300	1267	851	598

Note: *The flow rate is specified without taking into account the water flow through the spillway-regulator in the Nikolsky arm. One line of the gateway can be used, taking into account the indicated flow rates for the high water passing.

Document [21] includes the numerical method for solving equations.

Creating a mathematical model

At the first stage of simulation, a digital relief model (TsMR) was built using large-scale cartographic materials, survey materials and construction drawings (Fig. 3).

At the next stage, schematization of the computational domain was carried out with polygons and an irregular hybrid triangular-quadrangular grid (113,810 cells) was created. The calculated grid covers the area of 35 km Volga upstream and 10.6 km downstream from the low-head hydraulic system site projected (Fig. 4).

The model used zoning by the roughness factor using images from the space that are available in free Internet sources. The parameters were assigned taking into account previous similar calculations in this area,

the areas of distribution of the specified roughness value were determined from the satellite image.

N roughness factor in the Manning formula was set equal to 0.02 for the spillway dam area, gateway chambers and approach channels, $n = 0.025$ for the Volga channel, $n = 0.03$ for the Nikolsky arm channel and some near-channel areas. The value is varied from 0.04 to 0.06 in floodplain areas, and two values of 0.11 and 0.17 were considered for the zone corresponding to the floodplain, heavily overgrown with shrubs and forests. Correctness of their distribution in the model is confirmed by regulation values.

In accordance with the simulation options, 29 boundary conditions were assigned (Table 2).

For predictive calculations, 3 options of low water conditions and 12 options of floods were considered (taking into account backwater from the Oka river and at different roughness of the left bank floodplain).

Fig. 3. Digital model of the relief in the simulation area. The contour line indicates the boundary of the mathematical model

Fig. 4. A fragment of the calculated grid

Table 2. Summary Table of the simulation site boundary conditions

Site No.	Name	Site Features	Parameter set at the border					
			High water			Low water		
			0.1 %	1 %	10 %			
1	Model log in	Consumption, m ³ /s	20 200	17 150	13 700	3000	2000	1000
2	Model log out	Baltic System Level, m	75.6 (76.6)*	74.7 (76.0)*	73.5 (74.6)*	65.6	64.7	63.7
3	Spillway dam span No. 16	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
4	Spillway dam span No. 15	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
5	Spillway dam span No. 14	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
6	Spillway dam span No. 13	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
7	Spillway dam span No. 12	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
8	Spillway dam span No. 11	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
9	Spillway dam span No. 10	Baltic System Level, m	Transit	Transit	Transit	65.9	67.4	67.86
10	Spillway dam span No. 10	Consumption, m ³ /s	No	No	No	714	471	236
11	Spillway dam span No. 09	Baltic System Level, m	Transit	Transit	Transit	65.9	67.4	67.86
12	Spillway dam span No. 09	Consumption, m ³ /s	No	No	No	772	517	257
13	Spillway dam span No. 08	Baltic System Level, m	Transit	Transit	Transit	65.9	67.4	67.86
14	Spillway dam span No. 08	Consumption, m ³ /s	No	No	No	780	522	261
15	Spillway dam span No. 07	Baltic System Level, m	Transit	Transit	Transit	65.9	67.4	67.86
16	Spillway dam span No. 07	Consumption, m ³ /s	No	No	No	723	471	234
17	Spillway dam span No. 06	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
18	Spillway dam span No. 05	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
19	Spillway dam span No. 04	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
20	Spillway dam span No. 03	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
21	Spillway dam span No. 02	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed

Site No.	Name	Site Features	Parameter set at the border					
			High water			Low water		
			0.1 %	1 %	10 %			
22	Spillway dam span No. 01	Monitoring and control	Transit	Transit	Transit	Closed	Closed	Closed
23	Gateway input, right chamber	Monitoring and control	Transit	Closed	Closed	Closed	Closed	Closed
24	Gateway output, right chamber	Monitoring and control	Transit	Closed	Closed	Closed	Closed	Closed
25	Gateway input, left chamber	Monitoring and control	Transit	Closed	Closed	Closed	Closed	Closed
26	Gateway output, left chamber	Monitoring and control	Transit	Closed	Closed	Closed	Closed	Closed
27	Automatic spillway regulator in Nikolsky arm	Monitoring	Transit	Transit	Transit	Transit	Transit	Transit
28	Left-bank bottomland	Monitoring	Transit	Transit	Transit	Transit	Transit	Transit
29	Spillway dam headwater	Monitoring	Transit	Transit	Transit	Transit	Transit	Transit

Note: VP is a spillway dam; * levels including backwater from the Oka river, parameters obtained with simulation are highlighted in colour.

Sufficiency of the raw data, detailed relief and detailed schematization of the model allow us to consider the results as correct and rather reliable.

Results of the numerical method research

Calculations have been made for six options, for which water plans were created and analysed (Fig. 5, a; 6, a), modules of average values over the depth of water velocities (Fig. 5, b; 6, b).

Conclusions on the results of numerical method calculations

According to the results of the numerical hydrodynamic simulation, the following conclusions have been made:

- depths required are provided for navigation in the low-head hydraulic system headwater in the low-water conditions;
- water velocities and slope in the designed reservoir are reduced to a safe level compared with everyday values, which minimizes the bottom deformation intensity in this area;
- transverse velocities are insignificant at the entrances to the inlet and outlet gateway-approach canals and do not complicate navigation;
- maximum water speeds are observed 4.6 to 5.58 m/s when passing a flow rate of 0.1 % through the hydraulic system site in the gateway;
- when high floods passing, change of levels (backwater) at the low-head hydraulic system facilities is 0.20 to 0.30 m, which does not result in a noticeable increase in the flooded area in the upstream in comparison with the existing conditions.

Regarding the low-head hydraulic system design for low-water conditions, the following observations have been made:

1. There is no provided smooth entrance to the four central spillway spans that operate in low water conditions. Because of this, there is a significant unevenness in distribution of flow rates between the extreme and

middle spans (difference about 10 %), cutting angle of the flow, decrease in the throughput capacity of the extreme spans by 10 %, and increased flow velocity pulsations.

2. When passing a flow rate of 3000 m³/s, the speed at the approach to the water discharge openings reaches 5 m/s, while there is a pronounced decline curve of the water surface. The downstream speeds on the spillway reach 10 m/s, intense whirlpool (circulation) zones arise with increased speed pulsations to the right and left of the four activated spans.

Thus, hydraulic conditions of the low-water passing are not sufficiently optimized in the project.

Both an assessment of the carrying capacity of the left-bank floodplain and its comparison with design values have been made according to the results of the flood passing simulation, 0.1, 1 and 10 % of supply.

When passing spring flood, two series of calculations have been performed without taking into and taking into account influence of the Oka, each of which included two considered options of the roughness factor of the floodplain overgrown with forests and shrubs ($n = 0.11$ and $n = 0.17$). According to the calculations, the designed passing flow rates cannot be achieved for the hydraulic system facilities (Table 3) even if the roughness factor in the floodplain raise up to 0.17.

Assessment of the flow speeds along the slopes of the channel earthen dam along the left-bank floodplain at floods of 0.1, 1 and 10 % of supply (Table 4) indicated the need to make strengthening with a material that will slow the flow (e. g. rock fill) in the area of connection of the dead-end earth dam with the floodplain.

The general conclusion of the results of the research is that construction of the low-head hydraulic system solves many problems in the area of the Volga between the Nizhny Novgorod hydraulic system and the city of Nizhny Novgorod, but the design requires additional adjustment.

Fig. 5. Fragment of the plan, based on the calculation of 1 % flood: *a* — water levels; *b* — average velocities

Fig. 6. Fragment of the plan, according to calculation of the low-flow conditions, 1000 m³/s: *a* — water levels; *b* — average velocities

Table 3. Comparison of the design and calculated values of water flow through the left-bank floodplain

Name of the Option		Flow rate of water passing through the left-bank floodplain, as a percentage of the total water flow at flood, probability of exceeding, %		
		0.1	1	10
As specified in the project		4.4	7.4	6.4
Calculation without taking into account influence of the Oka river	$n = 0.11$	16	23.6	23.7
	$n = 0.17$	11.3	17	17
Calculation taking into account influence of the Oka river	$n = 0.11$	22	30	27.5
	$n = 0.17$	15.8	22	20.2

Table 4. Comparison of water velocity values computed for various roughness factors

Name of the Option		The maximum flow rate in the area of the left-bank connection of the earthen channel dam in flood with a probability of exceeding		
		0.1 %	1 %	10 %
Calculation without taking into account influence of the Oka river	$n = 0.11$	2.34 m/s	1.95 m/s	1.46 m/s
	$n = 0.17$	2.03 m/s	1.62 m/s	1.62 m/s
Calculation taking into account influence of the Oka river	$n = 0.11$	1.66 m/s	1.82 m/s	1.21 m/s
	$n = 0.17$	1.57 m/s	1.78 m/s	1.28 m/s

REFERENCES

1. *Modellierung eines Wolgaabschnitts von km 850-1185. Forschungsbericht.* Karlsruhe, Technische Universität Karlsruhe, Institut für Wasserversorgung und Kulturtechnik, 1999. (ger.).
2. Sherbakov A.O., Talysov A.A., Rumjancev I.S., Pruchkin S.I., Buber A.L. Improving the management of the cascade of the Volga reservoirs based on hydrodynamic models and GIS technologies. *Melioration and Water Management.* 2002; 2:8-12. (rus.).
3. Nestmann F., Kromer R. Cromer management strategy river basin of the Volga and the optimum exploitation of Volga cascade of hydroknots. *Great river 2004 : tezisy reports International scientifically-industrial forum.* Nizhny Novgorod, NNGASU Publ., 2004; 44-47. (rus.).
4. Shcherbakov A.O., Romyantsev I.S., Talipov A.A. Development of models of the Volga cascade of hydroknots in the framework of the international project "Volga-Rhine". *Materials of the VI hydrological Congress, September 28–October 1, 2004. St. Petersburg.* St. Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2004; 87-89. (rus.).
5. Nestmann F., Kromer R. Results of studies on integrated water resources management in the problem regions of the Volga and Oka (on the example of the Volga-Rhine project). *Great river 2010 : materials of the International scientific-industrial forum.* Nizhny Novgorod, NNGASU Publ., 2011; 49-51. (rus.).
6. Merkel U., Kron A., Oberle P. Combined 1- and 2-dimensional numerical modelling techniques for operational flood simulation in complex river systems. Case study "Middle Elbe". Special aspects of urban flood management / ed. E. Pasche. *Proceedings of the Cost Session Aquaterra Conference 2007.* Hamburg-Harburg, Inst. für Wasserbau, 2007; 241-264.
7. Büchele B., Helms M., Mikovec R., Ihringer J., Nestmann F. Hydrologische Modellierung für das operationelle Hochwassermanagement in großen Flussgebieten (Beispiel Elbe). *Kurzbeiträge an der Universität der Bundeswehr München. Risikomanagement extremer hydrologischer Ereignisse. Tag der Hydrologie, 22–23 März 2006.* DWA, Hennef, M. Disse. 2006; 99-110. (ger.).
8. Belikov V.V., Zaitsev A.A., Milteev A.N. Mathematical modeling of complex reaches of large river channels. *Water Resources.* 2002; 29(6):643-650. DOI: 10.1023/a:1021132929378
9. Zaitsev A.A., Belikov V.V., Milteev A.N. Using computer modelling for regulation of sediment transport under hydraulic structures on a large river. *Proceedings of the international symposium on sediment transfer through the fluvial system.* IAHS Publication. 2004; 386-394.
10. Lehmann B., Nestmann F., Bernhart H. Methodik zur eindimensionalen Strömungsberechnung naturnaher Fließgewässer. *Konferenzbericht.* IWD, Dresden, H.-B. Horlacher, 2006; 437-444. (ger.).

11. Musall M., Stelzer C., Theobald S., Nestmann F. Numerische modelle bei der wasserbaulichen Planung. *WasserWirtschaft*. 2006; 96(9):20-25. (ger.).
12. Belikov V.V., Vasil'eva E.S., Prudovskii A.M. Numerical modeling of a breach wave through the dam at the Krasnodar reservoir. *Power Technology and Engineering*. 2010; 44(4):269-278. DOI: 10.1007/s10749-010-0176-2
13. Alabyan A.M., Belikov V.V., Krylenko I.N., Lebedeva S.V. Application of two-dimensional hydrodynamic models to solve problems of the lower volga channel improvement under the condition of shortcoming of hydrological surveys data. *Engineering Survey*. 2014; 2:24-34. (rus.).
14. Alekseevskii N.I., Krylenko I.N., Belikov V.V., Kochetkov V.V., Norin S.V. Numerical hydrodynamic modeling of inundation in Krymsk on 6–7 July 2012. *Power technology and engineering*. 2014; (3):29-35. (rus.).
15. Belikov V.V., Krylenko I.N., Alabyan A.M., Sazonov A.A., Glotko A.V. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2015; 370:69-74. DOI: 10.5194/piahs-370-69-2015
16. *Computer simulation of currents in the bays of the projected Nizhny Novgorod HPP taking into account the daily releases of Gorky hydroelectric: report*. Moscow, NIIES Publ., 2003. (rus.).
17. Belikov V.V., Glotko A.V. Computer simulation of flood and low-water flows in the Cheboksary reservoir using various numerical methods. *Environmental management and rational use of natural resources — necessary conditions for social and economic development of Russia : collection of proceedings scientific conferences, April 19–21, 2005, Moscow*. Part I. Moscow, MGUP Publ., 2005; 204-210. (rus.).
18. Belikov V.V., Glotko A.V. Mathematical modeling of complex fluvial currents at the site of the Cheboksary reservoir between the dam and the Nizhny Novgorod Nizhny Novgorod. *Environmental management and rational use of natural resources — necessary conditions for social and economic development of Russia : collection of proceedings scientific conferences, April 19–21, 2005, Moscow*. Part I. Moscow, MGUP Publ., 2005; 210-215. (rus.).
19. Glotko A.V. *Improvement of simulation methods for the movement of water flows in the pools of river waterworks : dissertation of the candidate of technical sciences*. Moscow, MGUP Publ., 2006; 173. (rus.).
20. *Numerical mathematical modeling of hydraulic regimes of the watercourse in the bays of the designed Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric unit. Phase 1*. Moscow, NPP “Aquarius” Publ., 2015. (rus.).
21. *User manual Stream_2D (certificate No. 2014612181 from 20.02.2014). Version 2014*. Moscow, NPP “Aquarius Analyst” Publ., 2015. (rus.).

Received January 15, 2019

Adopted in a modified form on March 16, 2019

Approved for publication March 29, 2019

BIONOTES: **Anna V. Glotko** — Candidate of Technical Sciences, Senior researcher, Laboratory of Numerical Hydrodynamic Modeling, **Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IWP RAS)**, 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation; Associate Professor of Hydraulics and Hydraulic Engineering, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, GlotkoAV@mgsu.ru;

Vitalii V. Belikov — Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of Numerical Hydrodynamic Modeling, chief researcher, **Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IWP RAS)**, 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation, belvv@bk.ru;

Natalia M. Borisova — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher of Laboratory of Numerical Hydrodynamic Modeling, **Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IWP RAS)**, 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation, borisovanm@mail.ru;

Ekaterina S. Vasil'eva — engineer of Laboratory of Numerical Hydrodynamic Modeling, **Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IWP RAS)**, 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation, vasil'evaes@yandex.ru;

Aleksey B. Rumjancev — Research Assistant of Laboratory of Numerical Hydrodynamic Modeling, **Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IWP RAS)**, 3 Gubkin st., Moscow, 119333, Russian Federation, iw.p.alex.rum@gmail.com.