

УДК 627.15:556.5:532.52
DOI: 10.37890/jwt.vi85.657

Исследование влияния сбросного режима Нижегородского гидроузла на гидрологические условия в его нижнем бьефе

О.Д. Шишкина¹

ORCID: 0000-0002-7953-3605

Д.В. Доброхотова¹

ORCID: 0000-0001-5546-1670

И.А. Капустин^{1,2}

ORCID: 0000-0001-6845-3119

А.А. Мольков^{1,2}

ORCID: 0000-0002-8550-2418

¹*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия*

²*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия*

Аннотация. В работе проведен анализ влияния режимов сбросного расхода Нижегородского гидроузла на уровень воды в р. Волга по данным гидропоста у г. Городец. Получены зависимости уровня воды как от стационарных $H(Q_{\text{стац}})$, так и от средних значений суточного расхода $H(Q_{\text{ср}})$. Результаты исследования показали, что суточные изменения уровня воды за период с 18 по 25 мая 2022 года соответствуют изменениям стационарного сбросного расхода гидроузла $Q_{\text{стац}}$. А динамика повышенного дневного сброса $Q_{\text{дин}}$ на показатели уровня воды в исследуемом диапазоне расходов не влияет. При этом учет дневного динамического расхода $Q_{\text{дин}}$ в среднесуточном объеме $Q_{\text{ср}}$ приводит к завышению его расчетных значений. По данным проведенного ранее исследования причиной такого расхождения является влияние гидродинамики сбросного потока, которая определяется морфологией дна в энергетической части нижнего бьефа Нижегородского гидроузла [1]. Натурные измерения пространственных параметров волнового поля выявили наличие в исследуемой акватории двух ортогонально ориентированных потоков [2]. Каждый из которых является генератором волновой системы, состоящей из нескольких гармоник. При их пространственном наложении в дневное время формируется профиль волновой поверхности с выраженным понижением уровня к подводному каналу шлюзов под воздействием сбросного потока с повышенным динамическим расходом $Q_{\text{дин}}$.

Ключевые слова: Нижегородский гидроузел, нижний бьеф, сбросной расход, среднесуточный расход воды, динамика расхода воды, уровень воды, морфология дна, волновые гармоники.

A study of impact of discharge regime of Nizhny Novgorod hydroelectric complex on hydrological conditions of its lower reaches

Olga D. Shishkina¹

ORCID: 0000-0002-7953-3605

Darya V. Dobrokhotova¹

ORCID: 0000-0001-5546-1670

Ivan A. Kapustin^{1,2}

ORCID: 0000-0001-6845-3119

Alexander A. Molkov^{1,2}

ORCID: 0000-0002-8550-2418

¹*FRC Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. An effect of modes of flow discharge of the Nizhny Novgorod hydroelectric complex on the water level in the Volga River according to the data of the Gorodets hydraulic station is analyzed in the paper. The dependences of the water level on both the stationary $H(Q_{stac})$ and the average $H(Q_{sr})$ values of the daily flow rate are obtained. The results of the study showed that daily variations of the water level in the vicinity of the hydroelectric complex for the period from May 18 to May 25, 2022 correspond to changes in the stationary discharge flow Q_{stac} . And the dynamics of the daily discharge of Q_{din} does not affect the water level in the flow range studied. At the same time, taking into account the daily dynamic consumption of Q_{din} within the average daily volume of Q_{sr} leads to an overestimation of its calculated values. The previous study [1] showed that the source of this deviation is an effect of the hydrodynamics of the discharge stream being determined by the morphology of the bottom in the energy section of the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric complex. Field measurements of the spatial parameters of the wave field revealed the presence of two orthogonally oriented streams in the water area [2]. Each of them serves as a generator of a wave system consisting of several harmonics. And their spatial superposition in the daytime forms a wavy surface profile with a pronounced decrease of the water level towards the locks gateway under an action of the discharge stream with the increased dynamic volume of Q_{din} .

Keywords: Nizhny Novgorod hydroelectric power plant, lower reach, flow discharge, average daily water flow, dynamics of water flow, water level, bottom morphology, wave harmonics.

Введение

Участок р. Волга от Нижегородского гидроузла до г. Нижний Новгород в течение нескольких десятилетий является лимитирующим для безопасного прохода судов с большой осадкой. Ограничение судоходства возникает на данном участке в связи с неустойчивостью морфологии дна по фарватеру при подходе к гидроузлу со стороны г. Нижнего Новгорода.

Поиски решения этой проблемы были основаны на построении зависимости уровня воды на стационарных гидропостах на участке р. Волга от г. Городец до г. Нижний Новгород от среднесуточного сбросного расхода гидроузла [3, 4]. По результатам проведенных исследований был сделан вывод о существенном понижении уровня воды на данном участке судового хода.

Принятая в настоящее время методика получения такой зависимости основана на осредненных за сутки значениях сбросного расхода гидротехнического объекта⁵² без учета его суточной динамики. Однако в ряде гидрологических исследований внимание обращалось на недостаточность учета объемов среднесуточного расхода в решении практических задач регулирования речного стока.

В [5, 6] указывалось на наличие выраженной вариативности режима сброса воды через Нижегородский гидроузел в течение суток. Для оценки количественных изменений на суточном графике расхода выделялись несколько периодов времени с характерными режимами сброса, соответствующими различным периодам работы гидроэлектростанции.

В работах [7, 8] отмечается необходимость учета динамики речного стока в течение суток для достоверности оценки пространственного распределения различных гидрологических параметров.

⁵² Правила учета стока воды на гидроэлектрических станциях. РД 153-34.2-21.563-00. РАО Энергетики и электрификации ЕЭС России. 2001

На важность динамических показателей при регулировании работы Волжско-Камского каскада водохранилищ указывается в [9].

В [10] анализируется эффективность влияния суточного и недельного регулирования стока на уровень воды как на приплотинном участке, так и на расстоянии порядка 30 км от Нижнекамской ГЭС. По результатам исследования был сделан вывод о наличии существенной динамики уровней в районе ближайшего к плотине гидропоста при недельном регулировании стока.

Проведенные ранее исследования [11] показали, что осредненные за сутки данные сбросного расхода без учета его суточной динамики не дают полной и однозначной информации о реальных гидрологических процессах, влияющих на уровень воды на приплотинном участке Нижегородского гидроузла.

Выполненный в работе анализ гидрологических данных направлен на выявление причинно-следственных связей изменения уровня воды на подходе к системе Городецких шлюзов под воздействием различных режимов сброса воды через Нижегородский гидроузел.

Представленная статья состоит из двух основных разделов, первый посвящен анализу имеющихся гидрологических данных, второй представляет результаты собственных натурных измерений и их анализ.

Исследование гидрологических данных

Для корректного разрешения описанной выше проблемы актуальным является решение задачи по достоверному определению уровня воды на данном участке судового хода. С этой целью был проведен сравнительный анализ режимов изменения расхода воды Нижегородского гидроузла за период с 18 по 25 мая 2022 года и соответствующих данных уровня воды над нулевой отметкой гидропоста службы Росгидромета в г. Городец (рис. 1).

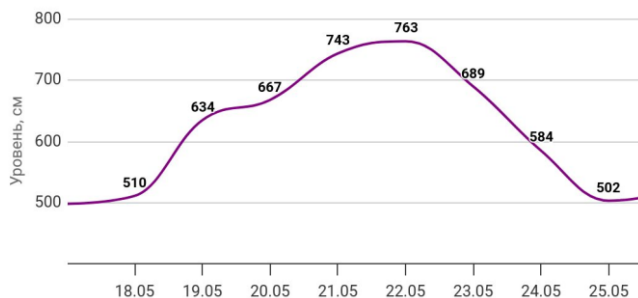


Рис. 1. График уровня воды по данным гидропоста г. Городец за период с 18 по 25 мая 2022 года (данные ИАЦ Регистра и Кадастра)

Для исследования факторов, влияющих на значения уровня воды H , были построены графики его изменения от стационарных $Q_{\text{стац}}$ и среднесуточных $Q_{\text{ср}}$ значений сбросного расхода гидроузла в период наблюдений.

Расчетные точки и графики аппроксимации полученных данных представлены на рис. 2. Точками отражены объемы стационарного $Q_{\text{стац}}$ и среднесуточного $Q_{\text{ср}}$ расходов для соответствующих суточных значений уровня воды H .

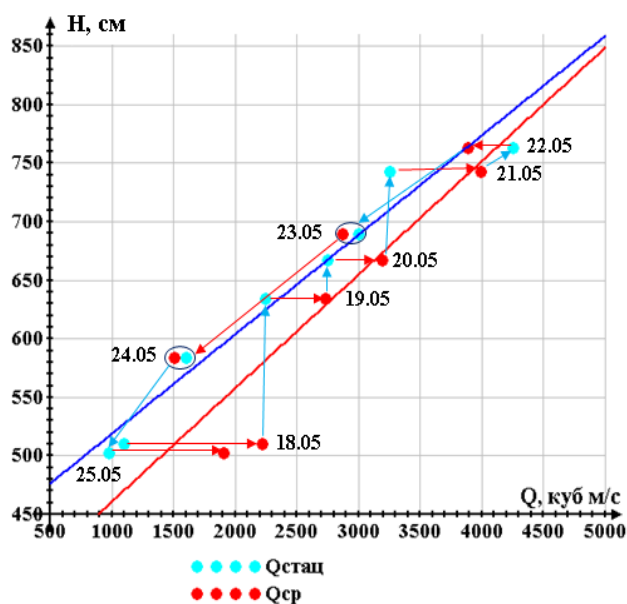


Рис. 2. Графики зависимости уровня воды от стационарных $Q_{\text{стац}}$ (синие точки и линии) и среднесуточных $Q_{\text{ср}}$ (красные точки и линии) значений сбросного расхода Нижегородского гидроузла по данным гидропоста г. Городец с 18 по 25 мая 2022 года (динамика расхода в период наблюдения показана стрелками)

Повышение расхода в течение каждых суток с 18 до 22 мая 2022 г. происходило таким образом, что его стационарное значение было равно среднесуточному расходу за предыдущие сутки $Q_{\text{стац}}^i = Q_{\text{ср}}^{i-1}$. При понижении расхода с 22 до 25 мая 2022 г. его среднесуточное значение было равно стационарному расходу за предыдущие сутки $Q_{\text{ср}}^i = Q_{\text{стац}}^{i-1}$.

Такая методика изменения сбросного расхода позволяла напрямую оценить влияние на уровень воды его динамической составляющей $Q_{\text{дин}}^i = Q_{\text{ср}}^i - Q_{\text{стац}}^i$ по сравнению со стационарной компонентой $Q_{\text{стац}}$.

Сравнение двух графиков $H(Q_{\text{стац}})$ и $H(Q_{\text{ср}})$ на рис. 2 указывает на то, что включение объема дневного динамического расхода в общий объем сброса приводит к завышению его расчетных среднесуточных значений $Q_{\text{ср}}$.

Проведем количественную оценку расхождения расчетных значений уровня воды $H(Q)$ у г. Городец по данным для стационарных $Q_{\text{стац}}$ и среднесуточных $Q_{\text{ср}}$ значений сбросного расхода Нижегородского гидроузла.

На рис. 3 приведен конкретный пример такого расхождения для фиксированного расхода $Q = 1100 \text{ м}^3/\text{с}$, установленного в качестве навигационного объема сброса воды из Горьковского водохранилища⁵³. Стрелки на рисунке указывают на «методическое» расхождение при определении уровней воды по графикам для среднесуточного $Q_{\text{ср}}$ и стационарного $Q_{\text{стац}}$ расходам гидроузла.

⁵³ Основные правила использования водных ресурсов Рыбинского и Горьковского водохранилища на р. Волге. – М.: Министерство мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1983. – 16 с. + прил.

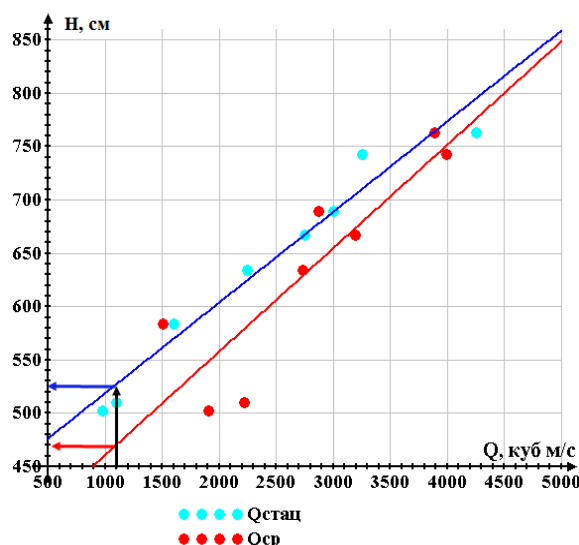


Рис. 3. Определение уровня воды в р. Волга на гидропосту г. Городец при $Q = 1100 \text{ м}^3/\text{с}$ (черная стрелка) для стационарного $Q_{\text{стационар}}$ (синяя стрелка) и среднесуточного $Q_{\text{среднесуточный}}$ (красная стрелка) расходов воды

Зависимости $H(Q_{\text{стационар}})$ и $H(Q_{\text{среднесуточный}})$ на рис. 3 аппроксимируются следующими уравнениями:

$$H(Q_{\text{стационар}}) = 434 + 0.085 * Q \tag{1}$$

$$H(Q_{\text{среднесуточный}}) = 364 + 0.097 * Q \tag{2}$$

Согласно расчетам по формулам (1) и (2) для гидрологических условий в районе гидропоста г. Городец за период наблюдения отклонение уровня воды, определенного по объему среднего расхода $Q_{\text{среднесуточный}} = 1100 \text{ м}^3/\text{с}$, относительно уровня по стационарному расходу $Q_{\text{стационар}}$ составит

$$\Delta H_{\text{дин}} = H(Q_{\text{среднесуточный}}) - H(Q_{\text{стационар}}) = - 0,57 \text{ м}, \tag{3}$$

где $H(Q_{\text{среднесуточный}})$ и $H(Q_{\text{стационар}})$ – значение уровня воды в течение суток, определенное по среднесуточному и стационарному сбросному расходу соответственно.

То есть для фиксированного объема сбросного расхода расчетное значение уровня воды при определении по среднесуточному объему $H(Q_{\text{среднесуточный}})$ будет существенно заниженным относительно его фактического значения $H(Q_{\text{стационар}})$, определяемого величиной стационарного расхода.

На рис. 4 показан график рассчитанного по уравнениям (1), (2) и (3) относительного понижения уровня воды $\Delta H(Q)$ для диапазона расходов гидроузла за период наблюдения. Результат расчетов показывает, что наибольшее отклонение от фактического уровня воды получается при относительно малых значениях сбросного расхода $Q \sim 1000 \text{ м}^3/\text{с}$, характерных для навигационного периода.

Проведем также количественную оценку влияния динамики сбросного расхода на значение уровня воды в дневное время. Для чего введем коэффициент динамического изменения расхода:

$$K_{\text{дин}}(Q) = Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}},$$

где Q_{max} и Q_{min} – объем максимального и минимального сбросного расхода в течение суток.

Его расчетные значения и аппроксимирующая зависимость от среднесуточного расхода $Q_{\text{ср}}$ также приведены на рис. 4.

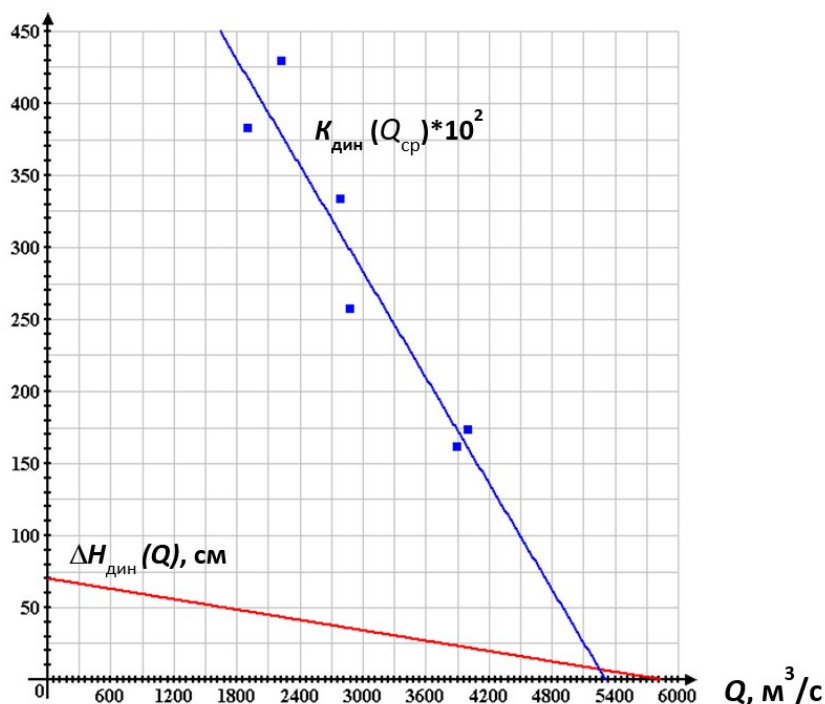


Рис. 4. График зависимости от расхода воды Q разности значений уровня воды $\Delta H_{\text{дин}}(Q)$, определенных по среднесуточному $Q_{\text{ср}}$ и стационарному $Q_{\text{стац}}$ расходам (красная линия), и графика суточной динамики сбросного расхода $K_{\text{дин}}(Q_{\text{ср}})$ (синяя линия)

Сравнение двух графиков на рис. 4 показывает, что рост динамической составляющей в общем объеме сбросного расхода гидроузла приводит к увеличению расхождения в расчетах уровня воды $\Delta H_{\text{дин}}(Q)$ при его определении по среднесуточному $Q_{\text{ср}}$ и стационарному $Q_{\text{стац}}$ объему сброса.

Натурный эксперимент

Для выяснения гидрологических причин такого расхождения на приплотинном участке нижнего бьефа Нижегородского гидроузла были выполнены комплексные натурные измерения с помощью акустического доплеровского профилографа течений (ADCP WorkHorse Monitor 1200 kHz), установленного на маломерном судне [2]. Для проведения анализа, усреднения и вывода данных ADCP использовались специализированные программы Winriver II [12]. Для представления пространственного распределения взвеси создавался массив сеточных значений в результате аппроксимации данных ADCP методом минимальной кривизны (Minimum Curvature) при помощи пакета Surfer 7.0 (13.0.383) [13].

Результаты измерений распределения взвеси (мутности), проведенных в период с 12:00 до 18:00 ч. 25 мая 2022 г. в толще воды на глубинах от 0.6 м с шагом 0.25 м как в поперечном сечении сбросного потока, так и в акватории нижнего бьефа гидроузла, представлен на рис. 5.

Полученные натурные данные показали, что вертикальная структура поля мутности потока в приповерхностном слое (рис. 5, слева) имеет выраженную

периодическую структуру, где определяются волны различной кратной длины и $L_1 \sim 150$ м и $L_2 \sim 75$ м.

Что свидетельствует о наличии в поле взвеси волновых возмущений, состоящих из нескольких гармоник, ориентированных поперек сбросного потока (красный пунктир на рис. 5, справа).

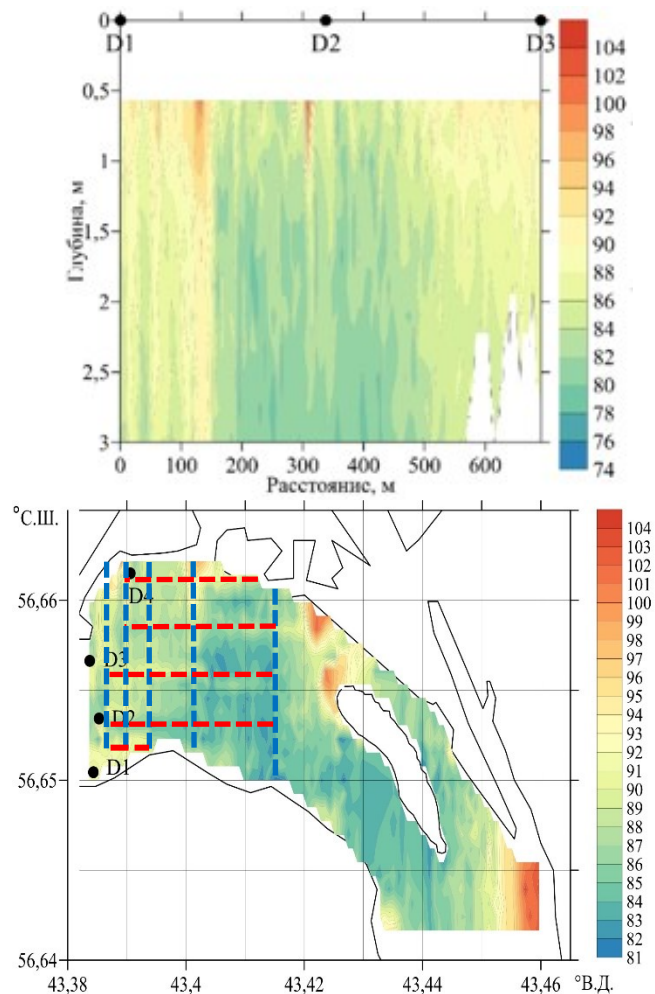


Рис. 5. Распределение взвеси в акватории приплотинного участка нижнего бьефа Нижегородского гидроузла по данным измерений с 12:00 до 18:00 ч. 25 мая 2022 г. (слева - вертикальное распределение поперек сбросного потока, справа – горизонтальное распределение на глубине 0.6 м)

По результатам исследования горизонтального распределения взвеси в структуре волнового поля было выявлено наличие более длинной гармоники длиной $L_0 \sim 450$ м, ориентированной вниз по потоку (синий пунктир на рис. 5, справа).

Данные пространственного моделирования волновой поверхности для гидрологических условий рис. 5 приведены на рис. 6 [11].

Очевидно, что от набора и пространственной ориентации гармоник в структуре волнового поля зависит форма водной поверхности. При этом количество волновых гармоник определяется динамикой сбросного расхода. В результате их пространственного наложения профиль поверхности имеет выраженное понижение на

подходе к подводному каналу системы шлюзов гидроузла. Этот эффект наблюдается в дневное время под действием сбросного потока с повышенным динамическим расходом.

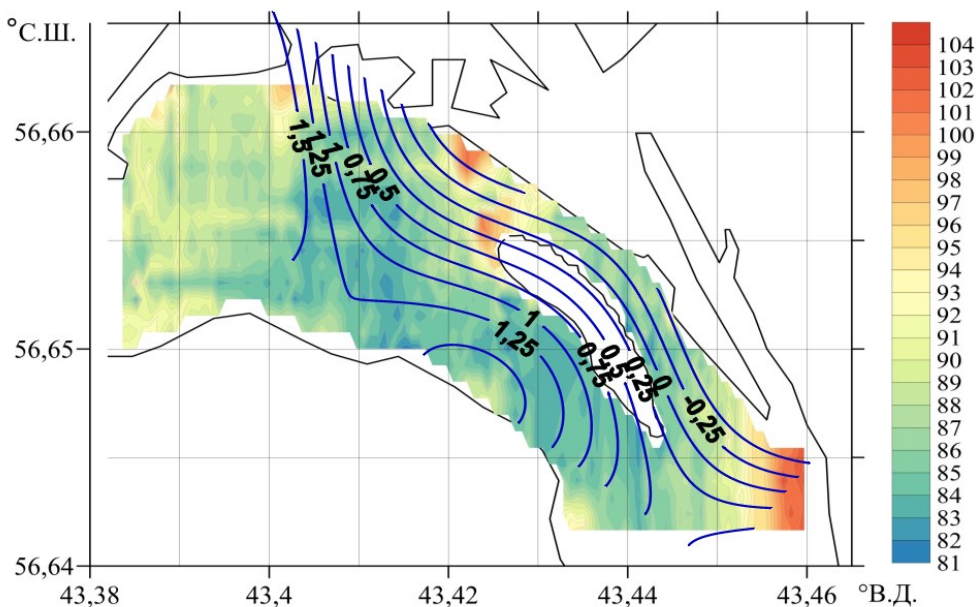


Рис. 6. Сравнение расчетной формы водной поверхности с распределением взвеси на глубине 0.6 м в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла по данным измерений с 12:00 до 18:00 ч. 25 мая 2022 г. (цифрами на изолиниях уровня воды указано отклонение поверхности от горизонтали в метрах)

Обсуждение полученных результатов

Выявленные на приплотинном участке Нижегородского гидроузла гидрологические особенности позволяют дать интерпретацию зависимости уровня воды в р. Волга на подходе к системе Городецких шлюзов от режимов сбросного расхода.

Согласно утвержденной методике построения расчетной зависимости уровня воды H от расхода Q энергетического гидросооружения используются объемы полного среднесуточного расхода $Q_{\text{ср}}$.

Для гидроэлектростанций, в частности, «учету подлежит весь сток, прошедший за сутки через работавшие отверстия, с включением в него протечек через неплотности конструкций затворов закрытых водосбросных отверстий»⁵⁴.

При этом суточный период в электроэнергетике является минимальным расчетным периодом времени, за который среднесуточный расход считается постоянным [14]. Регулирование мощности ГЭС в течение суток ведется в основном путем изменения пропускаемого через электростанцию расхода воды. Учет динамики сбросного расхода в течение суток для организации регулирования стока при неравномерном потреблении воды ГЭС в дневное время является актуальной проблемой.

В [9] был проведен сравнительный анализ изменения уровня водохранилищ и расхода в нижние бьефы ГЭС Волжско-Камского каскада. По результатам было

⁵⁴ Методические указания по учету стока воды на гидроэлектрических станциях. РД 153-34.2-21.564-00. РАО Энергетики и электрификации ЕЭС России. 2001

показано, что при использовании в расчетах статических и динамических гидрологических характеристик имеются существенные различия в количественной оценке объема водохранилищ.

Результаты проведенных авторами исследований [1, 11] также показали, что сложная пространственная структура волнового поля со стороны энергетической части нижнего бьефа Нижегородского гидроузла существенно зависит не только от объема, но и от динамики сбросного расхода в дневное время. Что, в свою очередь, создает неоднозначность при построении зависимости уровня воды у г. Городец от учитываемого в расчетах конкретного объема сброса воды через плотину.

Согласно существующей методике⁵⁵ фиксация уровня воды H производится в утреннее и вечернее время (8 ч. и 20 ч.), которое соответствует режиму стационарного сбросного расхода Нижегородского гидроузла $Q_{\text{стац}}$. Учет полного среднесуточного расхода $Q_{\text{ср}}$ приводит к его «методическому» завышению и соответствующему занижению расчетного уровня воды $H(Q)$ на подходе к системе шлюзов (см. пример на рис. 3).

Следовательно, учет динамических особенностей сбросного потока в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла необходим при формировании режимов его эксплуатации для обеспечения безопасного судоходства на участке р. Волга от г. Городец до г. Нижний Новгород.

Эти данные в дальнейшем являются основным источником гидрологической информации при решении различных практических задач, связанных с эксплуатацией как гидротехнических сооружений, так и речного транспорта.

Заключение

Проведенные в работе исследования выявили особенности в применении существующей методики определения уровня воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла в зависимости от динамических изменений его сбросного расхода.

В частности, было отмечено, что утвержденная нормативными документами методика оценки уровня воды по объему среднесуточного расхода не является универсальной.

Для участков рек с регулировкой потока гидросооружениями уровень воды в течение суток может изменяться в соответствии с режимом работы гидротехнического объекта, а также с морфологией дна в его нижнем бьефе. Поэтому учет влияния гидродинамики потока на параметры течения вблизи гидросооружения имеет важное практическое значение.

В этой связи необходимо проведение целевых исследований, направленных на уточнение методики систематической фиксации уровня и расхода воды на гидропостах вблизи гидротехнических сооружений, а также последующего применения данных измерений в гидрологических расчетах.

Полученные результаты открывают новые возможности для комплексной оптимизации работы гидротехнических сооружений и водного транспорта.

Благодарности

Работа Шишкиной О.Д. финансируется из средств государственного задания по программе FFUF-2024-0026. Исследования, выполненные Капустинным И.А., Мольковым А.А. и Доброхотовой Д.В., финансируются из средств государственного задания по программе FFUF-2024-0033. Авторы выражают благодарности Каменскому С.Б. за подборку нормативной документации по предмету исследования.

⁵⁵Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках. (3-е издание, переработанное и дополненное)/ Информационный материал от 05.04.1977

Список литературы

1. Шишкина О.Д., Капустин И.А., Доброхотова Д.В. Особенности влияния гидрологии речного потока на морфологию размываемого русла с неоднородным поперечным профилем. // Проблемы экологии Волжского бассейна: Труды 8-й всероссийской научной конференции (ВОЛГА-2023). – ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2023. – URL: http://вф-река-море.рф/ЕСО/2023/PDF_ЕСО/eco58.pdf (дата обращения 09.10.2025).
2. Molkov A.A., Kapustin I.A., Grechushnikova M.G., Dobrokhotova D.V., Leshchev G.V., Vodeneeva E.L., Sharagina E.M., Kolesnikov A.A. Investigation of water dynamics nearby hydroelectric power plant of the Gorky Reservoir on water environment: case study of 2022 // *Water*. 2023. Vol 15. Is 17, Pp. 3070. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15173070>
3. Фролов Р.Д. Улучшение судоходного состояния Волги в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС путем корректировки режима регулирования речного стока каскадом верхне - волжских водохранилищ, Эрозийные и русловые процессы, ред. Р.С. Чалов, М.Ю. Белоцерковский, С.Н. Ковалев. Москва, Издательство МГУ, 2000, С. 190–200.
4. Глотко А.В., Беликов В.В., Борисова Н.М., Васильева Е.С., Румянцев А.Б. Численные гидродинамические исследования для обоснования компоновки Нижегородского низконапорного гидроузла // *Строительство: наука и образование*. 2019. №9(2). С. 1–21. DOI: [10.22227/2305-5502.2019.2.3](https://doi.org/10.22227/2305-5502.2019.2.3).
5. Агеев С.О. Обоснование целесообразности суточного регулирования стока низконапорным гидроузлом // *Научные проблемы водного транспорта*. 2020. №62. С. 136–146. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.44>
6. Ситнов А.Н., Агеев С.О. Математическая модель и алгоритмизация процесса решения задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через Нижегородский низконапорный гидроузел // *Научные проблемы водного транспорта*. 2021. №66(1). С. 153–164. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.153>.
7. Рахуба А.В. Моделирование динамики примеси в нижнем бьефе водохранилища при экстремальных пущах ГЭС // *Водное хозяйство России*. 2010. № 4. С. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2010-4-3>.
8. Рахуба А.В. Длинноволновая динамика и ее влияние на формирование качества водохранилища суточного регулирования // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. №5(13). С. 196–203. URL: https://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_5_196_203.pdf (дата обращения 09.10.2025).
9. Александровский А.Ю., Борщ А.С. Пропуск максимальных расходов воды через гидроузлы Волжско-Камского каскада с учётом негоризонтальности зеркала и предполоводной сработки водохранилища // *Новое в российской электроэнергетике*. 2019. №2. С. 47 – 54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36995735> (дата обращения 03.09.2025).
10. Сазонов А.А. Особенности гидрологического и руслового режимов на приплотинном участке нижнего бьефа Нижнекамской ГЭС // *Вестник ВГАВТ*. 2013. №37. С. 206–212. URL: http://journal.vsuwt.ru/public/v_arc/v37.pdf (дата обращения 09.10.2025).
11. Шишкина О.Д. Исследование влияния морфологии приплотинного участка на гидрологические условия подходов к системе шлюзов Городецкого гидроузла. // *Транспорт. Горизонты развития*. 2024: Материалы международного научно-практического форума. ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2024. – URL: http://вф-река-море.рф/2022/6_15.pdf (дата обращения 09.10.2025).
12. WinRiver II Software User's Guide. – URL: https://corr-tek.it/wp-content/uploads/2022/07/WinRiver-II-User-Guide_.pdf (дата обращения 09.10.2025).
13. Мальцев К.А., Мухарамова С.С. Построение моделей пространственных переменных (с применением пакета Surfer). Казань.: Казанский университет, 2014. 103 с.
14. Асарин А.Е., Бестужева К.Н. Водно-энергетические расчёты. Москва.: Энергоатомиздат, 1986. 224 с.

References

1. Shishkina O.D., Kapustin I.A., Dobrokhotova D.V. *Osobennosti vliyaniya gidrologii rechnogo potoka na morfologiyu razmyvaemogo rusla s neodnorodnym poperechnym profilem* [Features of effect of hydrology of river flow on morphology of eroded riverbed with non-uniform transverse profile]. *Problemy ehkologii Volzhskogo basseina* [Ecology problems of Volga basin]. Trudy 8-i vsrossiiskoi nauchnoi konferentsii. Available at: <http://вф-пека-мопе.пф/ECO/2023/PDF_ECO/eco58.pdf> (accessed 09.10.2025)
2. Molkov A.A., Kapustin I.A., Grechushnikova M.G., Dobrokhotova D.V., Leshchev G.V., Vodeneeva E.L., Sharagina E.M., Kolesnikov A.A. Investigation of water dynamics nearby hydroelectric power plant of the Gorky Reservoir on water environment: case study of 2022 // *Water*. 2023. Vol 15. Is 17, Pp. 3070. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15173070>
3. Frolov R.D. Uluchshenie sudokhodnogo sostoyaniya Volgi v nizhnem b'efe Nizhegorodskoi GEHS putem korrekcirovki rezhima regulirovaniya rechnogo stoka kaskadom verkhnevolzhskikh vodokhranilishch [Improvement of the condition of navigation of the Volga in the lower reaches of the Nizhny Novgorod hydroelectric power station by adjustment of the flow control regime of reservoirs of the Upper Volga cascade], *Eroziionnye i ruslovye protsessy* [Erosion and riverbed processes], eds. R.S. Chalov, M.Yu. Belotserkovskii, S.N. Kovalev. Moscow, Izdatelstvo MGU, 2000, pp. 190-200. (in Russ.)
4. Glotko A.V., Belikov V.V., Borisova N.M., Vasil'eva E.S., Rumjancev A.B. *Chislennye gidrodinamicheskie issledovaniya dlya obosnovaniya komponovki Nizhegorodskogo nizkonapornogo gidrouzla* [Numerical hydrodynamic researches for juctifying design of the Nizhny Novgorod low-head hydraulic system] *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2019, no. 9(2), pp. 1–21. (in Russ.) DOI: 10.22227/2305-5502.2019.2.3.
5. Ageev S.O. Obosnovanie tselesoobraznosti sutochnogo regulirovaniya stoka nizkonapornym gidrouzлом [Drain regulation of low-headed hydraulic unit] *Russian Journal of Water Transport*. 2020, no. 62, pp. 136–146. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi62.44>
6. Sitnov A.N., Ageev S.O. Matematicheskaya model' i algoritimizatsiya protsessa resheniya zadachi vnutrisutochnogo regulirovaniya sbrosa vody cherez Nizhegorodskii nizkonapornyi gidrouzel [Mathematical model and algorithmic process of solving the problem of the intra-day regulation of discharge of water through the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex] *Russian Journal of Water Transport*. 2021, no. 66, pp. 153–164. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.153>.
7. Rakhuba A.V. Modelirovanie dinamiki primesi v nizhnem b'efe vodokhranilishcha pri ehkstremal'nykh popuskakh GEHS [Simulation of Admixture Dynamics in a Reservoir Lower Pool in Case of Hydro Power Station Extreme Release] *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water sector of Russia], 2010, no. 4, pp. 28–40. (in Russ.) DOI: <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2010-4-3>.
8. Rakhuba A.V. Dlinnovolnovaya dinamika i ee vliyanie na formirovanie kachestva vod vodokhranilishcha sutochnogo regulirovaniya [Long-wave dynamics and its influence on the quality of water in the reservoir daily regulation] *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2011, no. 13/5, pp. 196–203. (in Russ.) URL: https://www.ssc.smr.ru/media/journals/izvestia/2011/2011_5_196_203.pdf
9. Aleksandrovskii A.Yu., Borshch A.S. Propusk maksimal'nykh raskhodov vody cherez gidrouzly Volzhsko-Kamskogo kaskada s uchedom negorizonta'nosti zerkala i predpolovodnoi srabotki vodokhranilishcha, *Novoe v rossiiskoi ehlektroehnergetike*. 2019, no. 2, pp. 47 – 54. (in Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36995735>.
10. Sazonov A.A. Osobennosti gidrologicheskogo i ruslovogo rezhimov na priplotinnom uchastke nizhnego b'efa Nizhnekamskoi GEHS [Peculiarities of the hydrological and chanel modes for dam part the lower bay Nizhnekamsk HPP] *Bulletin VSAWT*. 2013, no. 37, pp. 206–212. (in Russ.) URL: http://journal.vsuwt.ru/public/v_arc/v37.pdf
11. Shishkina O.D. *Issledovanie vliyaniya morfologii priplotinnogo uchastka na gidrologicheskie usloviya podkhodov k sisteme shlyuzov Gorodetskogo gidrouzla* [A study of effect of morphology of dam site on hydrological conditions of lower approaches of waterway of Gorodetsky complex]. *Transport. Gorizonty razvitiya -2024* [Transport. Horizons of Development - 2024]. Materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma. Available at: <http://вф-пека-мопе.пф/2024/PDF/6_16.pdf> (accessed 09.10.2025)

12. WinRiver II Software User's Guide. – Available at: <https://corr-tek.it/wp-content/uploads/2022/07/WinRiver-II-User-Guide.pdf> (accessed 09.10.2025)
13. Mal'tsev K.A., Mukharamova S.S. *Postroenie modelei prostranstvennykh peremennykh (s primeneniem paketa Surfer)* [Modelling of 3D variables (by the Surfer package)]. Kazan': Kazanskii universitet, 2014. 103 p. (in Russ.)
14. Asarin, A.E., Bestuzheva, K.N. *Vodno-ehnergeticheskie raschety* [Water-energy calculations]. Moscow.: Ehnergoatomizdat, 1986. 224 p. (in Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шишкина Ольга Дмитриевна, к.т.н., научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, e-mail: olsh@ipfran.ru

Olga D. Shishkina, Ph.D. in Engineering Science, Research Fellow, FRC Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46, Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950

Доброхотова Дарья Васильевна, стажер-исследователь, ФИЦ Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46, e-mail: vostryakova@ipfran.ru

Dar'ya V. Dobrokhotova, Assistant Researcher, FRC Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46, Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950

Капустин Иван Александрович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ФИЦ Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46, старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: kia@ipfran.ru

Ivan A. Kapustin, Ph.D. in Physico-Mathematical Science, Senior Researcher, FRC Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46, Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st., Nizhny Novgorod, 603950

Мольков Александр Андреевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), 603950, г. Нижний Новгород. БОКС - 120, ул. Ульянова, 46, старший научный сотрудник кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности, Волжский государственный университет водного транспорта (ФГБОУ ВО «ВГУВТ»), 603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5, e-mail: molkov@ipfran.ru

Alexander A. Molkov, Ph.D. in Physico-mathematical science, Research Fellow, FRC Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences (IAP RAS), 46, Ul'yanov st., Nizhny Novgorod, 603950, Senior researcher of the Department of Hydrodynamics, Vessel Theory and Ecological Safety, Volga State University of Water Transport, 5, Nesterov st., Nizhny Novgorod, 603950

Статья поступила в редакцию 13.10.2025; принята к публикации 10.11.2025; опубликована онлайн 20.12.2025. Received 13.10.2025; published online 20.12.2025.