

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-393-401>

УДК 001.891.53 [627.8.034:712.5]

Математическое моделирование прохождения паводка на реконструируемом гидроузле

Магистр О. В. Немеровец¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Беларусь имеет сравнительно небольшое количество крупных гидроузлов из-за равнинного рельефа и умеренного климата. Все они построены в последнее десятилетие и удовлетворяют требованиям нормативных документов. Также на территории страны располагаются более 140 гидроузлов, относящихся к 4-му классу надежности. Необходимо отметить, что эксплуатация водохозяйственных сооружений играет важную роль в регулировании стока рек, обеспечении водоснабжения, ирригации, судоходства и защите от паводков. В работе рассмотрены подходы к математическому моделированию процессов прохождения паводков через реконструируемые гидроузлы. Основное внимание уделено разработке и применению комплексных моделей, позволяющих прогнозировать изменение уровней воды, нагрузок на сооружения и возможных аварийных ситуаций. Разработанная методика основана на совместном решении уравнений баланса воды и гидродинамических уравнений (Сен-Венана) для описания движения потока в водохранилище и нижнем бьефе. Для учета особенностей реконструируемого гидроузла применяются уточненные расчеты пропускной способности водосбросов, влияние изменения профиля сооружений. Предлагается алгоритм, включающий: оценку исходных гидрологических данных и сценариев паводка; расчет динамики наполнения водохранилища; моделирование взаимодействия потоков с элементами гидроузла. Проведенные расчеты позволяют определить критические уровни воды, оптимальные режимы управления затворами и оценить риски перелива или разрушения сооружений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке проектов реконструкции, в оперативном управлении гидротехническими сооружениями и для подготовки планов мероприятий по предотвращению чрезвычайных ситуаций. На основании методики, разработанной автором, рассмотрен пример прогнозного расчета уровней в русловом водохранилище ГЭС «Яново» и определены параметры потока в нижнем бьефе с определением границ затопления.

Ключевые слова: расход, паводок, водохранилище, напор, водосброс, уравнение баланса воды, гидрограф паводка, моделирование, затопление, пойма

Для цитирования: Немеровец, О. В. Математическое моделирование прохождения паводка на реконструируемом гидроузле / О. В. Немеровец // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 5. С. 393–401. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-393-401>

Mathematical Modeling of Flood Flow at a Reconstructed Hydroelectric Complex

O. V. Nemerovets¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Belarus has a relatively small number of large hydroelectric power plants due to the flat terrain and moderate climate, all of them were built in the last decade and meet all the requirements of regulatory documents. There are also more

Адрес для переписки

Немеровец Ольга Владимировна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220014, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
fes@bntu.by

Address for correspondence

Nemeravets Volha V.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220014, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
fes@bntu.by

than 140 hydroelectric structures located in the country that belong to the 4th reliability class. It should be noted that the operation of water management structures plays an important role in regulating river flows, ensuring water supply, irrigation, navigation and flood protection. The paper considers approaches to mathematical modeling of the processes of flood flow through reconstructed hydroelectric structures. The main attention is paid to the development and application of complex models that allow forecasting changes in water levels, loads on structures and possible emergency situations. The developed methodology is based on the joint solution of water balance equations and hydrodynamic equations (Saint-Venant) to describe the flow in the reservoir and downstream. To take into account the features of the reconstructed hydroelectric structure, refined calculations of the capacity of spillways and the impact of changes in the profile of structures are used. An algorithm is proposed that includes: assessment of initial hydrological data and flood scenarios; calculation of reservoir filling dynamics; modeling of flow interactions with hydraulic structure

elements. The calculations performed allow us to determine critical water levels, optimal gate control modes, and assess the risks of overflow or destruction of structures. The results obtained can be used in developing reconstruction projects, in operational management of hydraulic structures, and for preparing plans for preventing emergency situations. Based on the methodology developed by the author, an example of predictive calculation of levels in the channel reservoir of the Yanovo hydroelectric power station (HPS) has been considered and the flow parameters in the downstream pool have been determined with the definition of flood boundaries.

Keywords: discharge, flood, reservoir, pressure, spillway, water balance equation, flood hydrograph, modeling, inundation, floodplain

For citation: Nemerovets O. V. (2025) Mathematical Modeling of Flood Flow at a Reconstructed Hydroelectric Complex. *Science and Technique*. 24 (5), 393–401. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-5-393-401> (in Russian)

Введение

Гидротехнические сооружения (ГТС) являются важнейшими элементами водохозяйственной инфраструктуры, обеспечивая регулирование стока, защиту от наводнений, энергетическую выработку и водоснабжение. Одним из наиболее ответственных режимов работы ГТС является пропуск паводковых расходов, при котором возникает комплексная нагрузка на сооружения, требующая высокой точности прогнозов гидродинамических процессов [1–4].

В мировой практике анализ и прогноз поведения гидроузлов при паводках часто выполняются на основе математического моделирования, позволяющего воспроизводить сложные взаимодействия потока с элементами сооружений и прилегающей гидросистемой. Применение уравнений неустановившегося движения (Сен-Венана, Буссинеска) и балансовых моделей обеспечивает возможность расчета изменения уровней воды, скоростей течения и распределения расходов в пространстве и времени.

Особое внимание в литературе уделяется каскадным гидроузлам [5–7], где согласованность работы сооружений на разных ступенях определяет эффективность пропуска паводка. Несвоевременное открытие или закрытие водосбросных затворов может вызвать переливы через гребни плотин и привести к авариям, что

подтверждается анализом катастрофических событий в разных странах.

В Беларуси и странах СНГ исследования в этой области направлены на создание адаптированных расчетных схем, учитывающих местные гидрологические условия, конструктивные особенности сооружений и сценарии их реконструкции. Модели позволяют оценивать не только гидравлику потока, но и морфодинамические изменения, включая размыв грунтовых плотин, что критически важно при прогнозировании аварийных ситуаций.

Несмотря на значительные успехи, многие существующие подходы ограничены недостатком исходных данных о геометрии водохранилищ, коэффициентах шероховатости и характеристиках водосбросных устройств, что снижает точность прогнозов. Поэтому развитие комплексных методов расчета, интегрирующих балансовые и гидродинамические модели, остается актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка методики математического моделирования прохождения паводка через реконструируемый гидроузел, включающей расчет переполнения водохранилища и прогноз распространения потока в нижнем бьефе.

Основная часть

В 2025 г. проектной организацией РУП «Белнипиэнергопром» проводилась разработка

проектной документации на реконструкцию гидроузла ГЭС «Яново». Основная задача при выполнении реконструкции гидроузла – это пропуск основных расходов с учетом обновленных гидрологических данных. На основании этой задачи разработана и выполнена апробация методики математического моделирования прохождения паводка, включающей расчет переполнения водохранилища и прогноз распространения волны перемещения в нижнем бьефе

Водохранилище ГЭС «Яново» расположено у д. Изабелино Островецкого района, на р. Лоща. Построено в 1955 г. по проекту Белорусского филиала «Гипросельэлектро». Было запроектировано как русловое, регулирование – суточное. По проекту предназначалось для целей энергетики, водного благоустройства. Площадь зеркала – 63,24 га, площадь мелководий – 0,4 км², длина – 7,7 км, ширина: максимальная – 0,3 км, средняя – 0,13 км; средняя глубина – 2,1 м. Объем: полный – 2,3 млн м³, полезный – 0,1 млн м³. Разность отметок НПУ и УМО – 0,5 м.

План сооружений гидроузла представлен на рис. 1 и включает в себя бетонную водосливную плотину в виде водослива с широким порогом, состоящую из двух пролетов по 6 м, здания ГЭС и грунтовой однородной плотины.

Основу расчета уровня воды $\nabla_{\text{вдхр}}(t)$ в водохранилище при пропуске паводка составляет уравнение баланса воды в водохранилище, которое взято в [8] и дополнено:

$$\frac{dH}{dt} \Omega = Q_{\text{пав}} - Q_{\text{вых}} - Q_{\text{и}} - Q_{\text{р}}, \quad (1)$$

где $H = H(t) = \nabla_{\text{вдхр}}(t) - \nabla_{\text{л}}$ – напор в водохранилище на пороге бетонной плотины; $\Omega = \Omega(H)$ – площадь зеркала водохранилища; $Q_{\text{пав}}$ – расчетный расход паводка во входном створе водохранилища; $Q_{\text{вых}}$ – расход в створе водосбросных сооружений; $Q_{\text{и}}$ – расход, используемый для энергетики (предполагается постоянным), $Q_{\text{р}}$ – расход воды через резервный водосброс.

Для расчета уровней в водохранилище с использованием уравнения (1) предварительно выполняем ряд действий.

1. Нахождение эмпирической зависимости $\Omega = \Omega(H)$.

Площадь водной поверхности Ω водохранилища ГЭС «Яново» в зависимости от напора H в водохранилище была задана в виде таблицы проектных данных и графика, представленного на рис. 2.

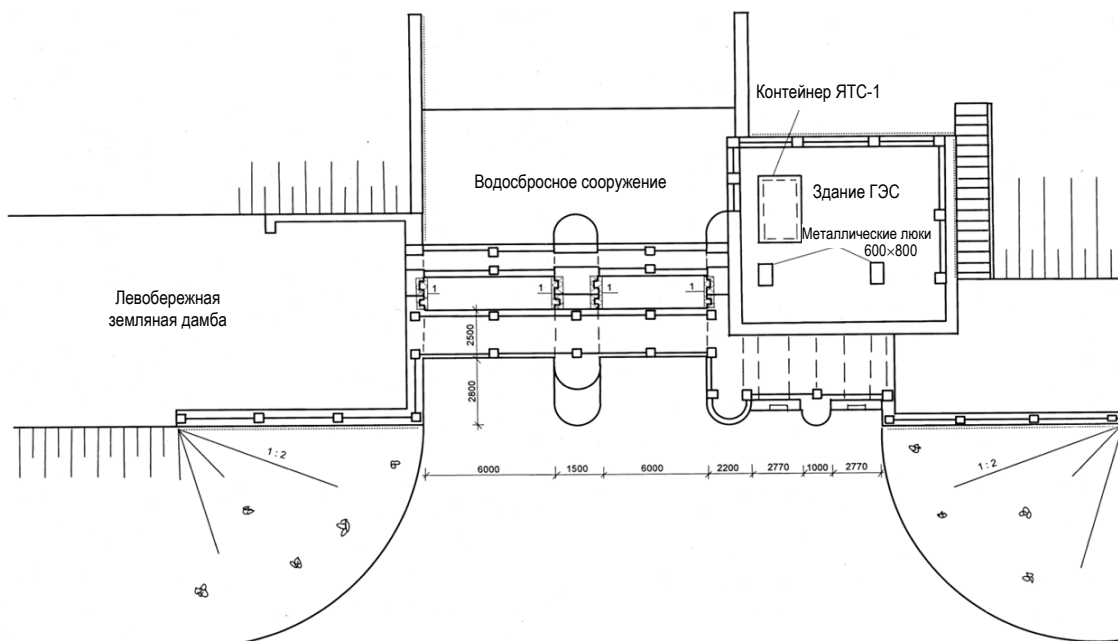


Рис. 1. План сооружений гидроузла

Fig. 1. Hydroelectric power station construction plan

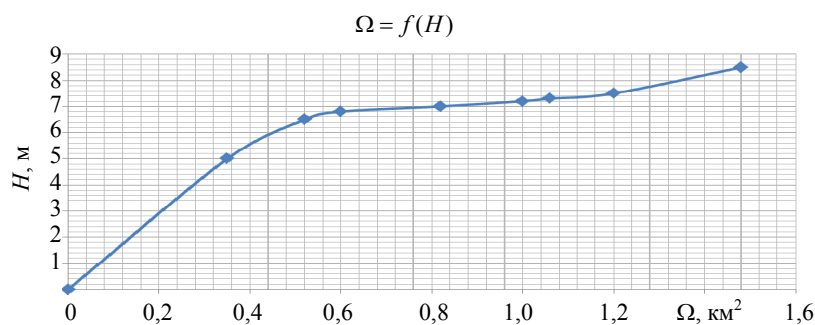


Рис. 2. График зависимости площади зеркала водохранилища от напора $\Omega = \Omega(H)$, построенный по исходным данным

Fig. 2. Graph of the reservoir surface area versus pressure $\Omega = \Omega(H)$, constructed using the initial data

2. Определение расхода в створе водосбросного сооружения $Q_{\text{вых}}$.

Учитывая конструктивные особенности сооружения расход $Q_{\text{вых}}$ определяется по формуле [9]:

$$Q_{\text{вых}} = \sigma_n \varepsilon m n b \sqrt{2g} (\nabla_{\text{вдхр}} - \nabla_{\Lambda}), \quad (2)$$

где n – число водосливных отверстий, открытых полностью; ε – коэффициент бокового сжатия; m – то же расхода для водослива с широким порогом; σ_n – то же подтопления; b – ширина одного водосливного отверстия, м; $\nabla_{\text{вдхр}}$ – отметка уровня воды в водохранилище в зависимости от периода прохождения паводка, м; ∇_{Λ} – то же гребня водосливной плотины, м.

Коэффициент бокового сжатия ε определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0,1}{\sqrt[3]{0,2}} \cdot 4 \sqrt{\frac{b}{b+d}} \cdot \left(1 - \frac{b}{b+d}\right), \quad (3)$$

где $\alpha = 0,1$ – при плавном очертании быков и устоев; d – осредненная толщина быка, м.

Определим коэффициент расхода m для водослива с широким порогом при прямоугольной входной грани

$$m = 0,36 + 0,01 \cdot \frac{3 - \frac{\nabla_{\Lambda} - \nabla_{\text{дно } p}}{\nabla_{\text{вдхр}} - \nabla_{\Lambda}}}{0,46 + 0,75 \frac{\nabla_{\Lambda} - \nabla_{\text{дно } p}}{\nabla_{\text{вдхр}} - \nabla_{\Lambda}}}. \quad (4)$$

3. Моделирование расхода $Q_{\text{пав}}(t)$ во входном створе первого водохранилища.

На равнинных реках территории Республики Беларусь, а также близлежащих соседних стран чаще всего бывают одновершинные гидрографы половодий, которые рассчитывают по уравнению [10, с. 32]:

$$Q_{\text{пав}} = Q_0 + Q_{\text{max}} \cdot 10^{-a \frac{(1-x)^2}{x}}, \quad (5)$$

где Q_0 – расход предполоводной сработки; $x = t/t_n$; t_n – условная продолжительность подъема половодья; a – параметр, зависящий от коэффициента формы гидрографа λ^* , функционально связанного с коэффициентом несимметричности гидрографа K_s ; Q_{max} – максимальный расход при наводнении, вероятность наступления которого в столетний период составляет p , % (значение p задается).

Методика нахождения всех необходимых параметров для (5) описана в [10–12].

Итак, чтобы определить напор $H(t)$ в водохранилищах при паводке, который описывается гидрографом $Q_{\text{пав}}$, надо выполнить действия, описанные в п. 1–3, и найти начальные значения Q_0 , H_0 . Затем решить уравнение (1) с учетом п. 3. Данная задача не допускает точного решения. Ее приближенное решение можно искать, например, методом Рунге – Кутты.

После определения уровней воды в водохранилище производится их сравнение с проектными и оценивается возможность возникновения чрезвычайной ситуации на гидроузле в результате перелива воды через гребень или превышения максимальных проектных уровней. На следующем этапе производится моделирование течения в нижнем бьефе с учетом расхода в створе водосбросного сооружения. Методика определения параметров потока в

нижнем бьефе, которая описана ниже, позволяет получить графики, учитывающие истечение через водосбросные сооружения в зависимости от периода прохождения паводка, и позволяет получить данные в различные интервалы времени.

Моделирование течения в нижнем бьефе

Решение поставленной задачи заключается в моделировании потока в нижнем бьефе с помощью уравнений Сен-Венана.

Система уравнений Сен-Венана для течения воды в открытом русле произвольного профиля имеет вид [13]:

$$\begin{cases} \alpha \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{W} \right) \right] + gW \left(\frac{\partial h}{\partial x} + i_f - i_p \right) = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь x – протяженность по водотоку; t – время; $W(x, t)$ – площадь живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока в момент времени t ; $Q(x, t)$ – расход воды; $h(x, t)$ – глубина; $i_f(x, t)$ – уклон течения потока; i_p – то же дна в нижнем бьефе.

Коэффициент α учитывает неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока. В [13] отмечается, что имеется достаточно удовлетворительная связь α с коэффициентом шероховатости, по Маннингу: $\alpha = 14,8n + 0,884$, причем если результат расчета по этой формуле составит значение $\alpha > 2$, то рекомендуются принимать $\alpha = 2$.

Скорость потока находим по формуле

$$v(x, t) = \frac{Q(x, t)}{W(x, t)}. \quad (7)$$

Уклон трения i_f потока выразим из формулы Шези

$$i_f = \frac{Q^2}{W^2 C^2 R} = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}}, \quad (8)$$

где $R = \frac{W(x, h)}{P(x, h)}$ – гидравлический радиус живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока и имеющего глубину h , м;

$P(x, h)$ – смоченный периметр сечения, м; C – скоростной коэффициент Шези, вычисленный по формуле Маннинга, $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, м^{0,5}/с;

n – коэффициент шероховатости дна русла [14], с/м^{1/3}.

Учитывая (7) и (8), система (6) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial (v \cdot W)}{\partial x} = 0; \\ \alpha \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \left(\frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} - i_p \right) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

С данной системой мы будем работать в дальнейшем.

Используемый способ

описания поверхности в нижнем бьефе

Чтобы система (4) была замкнутой, необходимо знать зависимости площади живого сечения $W(x, h)$ и смоченного периметра $P(x, h)$ от глубины h и расстояния x от прорана. Это предполагает знание геометрии поверхности в нижнем бьефе. Ниже приведена методика описания этой поверхности, которую несложно применить на практике и которая позволяет достаточно легко получить нужные зависимости для W и P . Следуя работе [15], сделаем определенные предположения об этой поверхности.

1. Можно выделить какое-то прямоугольное русло предполагаемого потока, т. е. указать средние значения его ширины B_p , высоты берега h_b , уклона дна i_p , шероховатости n (здесь отличие от [15], так как там речь идет о пойме конкретной реки, т. е. все эти параметры известны); это русло должно начинаться в районе предполагаемого прорана. Выбрать его можно как окрестность линии, состоящей из точек с самыми маленькими геодезическими отметками.

2. Поверхность долины вне этого русла является кусочно-линейной. Это означает, что на каждой стороне долины (левой и правой) относительно выбранного русла можно выде-

лечь n линий $L_0^{(n)}, \dots, L_n^{(n)}$ (индекс вверх указывает на сторону – левую или правую), образованных точками с равными отметками высот $h_B = h_0 < h_1 < \dots < h_n$ относительно дна предполагаемого русла (это – линии уровня, каждая линия $L_k^{(n)}$ соответствует высоте h_k , а линии $L_0^{(n)}$ – линии берега); на каждом из участков между соседними линиями $L_k^{(n)}$ и $L_{k+1}^{(n)}$ берег является кусочно-линейной поверхностью, направляющими линиями которой служат ограничивающие этот участок линии уровня, а образующие – это прямые, соединяющие точки линий уровня, которые лежат в плоскости $S = S_0$ (эта плоскость перпендикулярна руслу и находится на расстоянии x_0 от плотины). Вышесказанное предположение поясняется ниже на рис. 3.

На (рис. 3а) показан план участка, где плоскость $S = S_0$ пересекает линии уровня L_1^n и L_2^n , соответствующие высотам h_1 и h_2 в точках A и B соответственно. Следовательно, отрезок AB считается образующей береговой поверхности на этом участке (между линиям уровня L_1^n и L_2^n). На рис. 3б показано, как выглядит сечение береговой поверхности плоскостью $S = S_0$. Здесь $h_1 < h_2 < h_3 < h_4$ – высоты относительно дна русла точек A, B, C и D соответственно, а $w_A^n < w_B^n < w_C^n < w_D^n$ – расстояния от этих точек до берега русла.

Такое предположение не противоречит обычному устройству речных долин в республике, хотя и вносит определенные погрешности в вычисления. При этом эта погрешность

будет уменьшаться при увеличении числа линий уровня и более точного задания этих линий.

Задавать линии уровня можно таблично [15]. Каждая строка таблицы содержит числа x_k , $w_{k,1}^{(n)} < w_{k,2}^{(n)} < \dots < w_{k,n}^{(n)}$, где x_k – протяженность по водотоку от плотины; $w_{k,m}^{(n)}$ – то же от берега русла до точки пересечения m -й линии уровня, соответствующей глубине h_m , с плоскостью $S = S_k$ (рис. 1б). Значения $w_{k,0}^{(n)} = 0$ для любого k .

Полное решение системы (9) представлено в статьях автора [15–16].

Пример расчета. Рассмотрим пример расчета водохранилища ГЭС «Яново», которое расположено у д. Изабелино Островецкого района на р. Лоша.

Значения основных параметров водохранилища следующие: $\nabla\Lambda = 150,3$ м; $b = 6$ м; $m = 0,37$; $\nabla\text{УМО} = 153,5$ м; $\nabla\text{НПУ} = 153,8$ м; $\nabla\text{ГП} = 155$ м. В нижнем бьефе водохранилища: $i = 0,00176$; $n = 0,03$; ширина трапециoidalного русла $b = 15$ м; угол наклона берега α , $\text{ctg}\alpha = 3$.

Расчеты по методике [10] показали, что в (5) для паводка следует взять $a = 1,246$ и с 1%-м уровнем вероятности превышения $Q_{\max} = 119,5$ м³/с, условная продолжительность подъема половодья $t_n = 14,06$ дня, общая продолжительность паводка $T_{\text{пав}} = 39,4$ дня.

Начальный напор в водохранилище принят $H_0 = 3,2$ м $\approx \nabla\text{УМО} - \nabla\Lambda$, начальный расход $Q_0 = 1,5$ м³/с.

Расчет данных с использованием вышепредставленных методик показан в виде графиков на рис. 4–6.

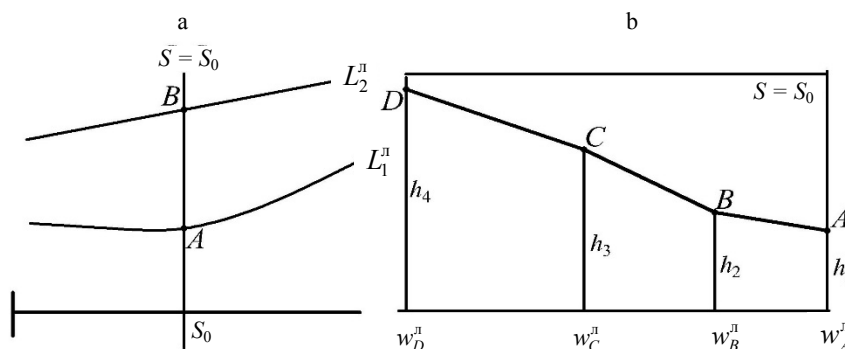


Рис. 3. Схема участка (левого) долины: а – план; б – поперечный разрез

Fig. 3. Diagram of the (left) valley section: а – plan; б – cross section

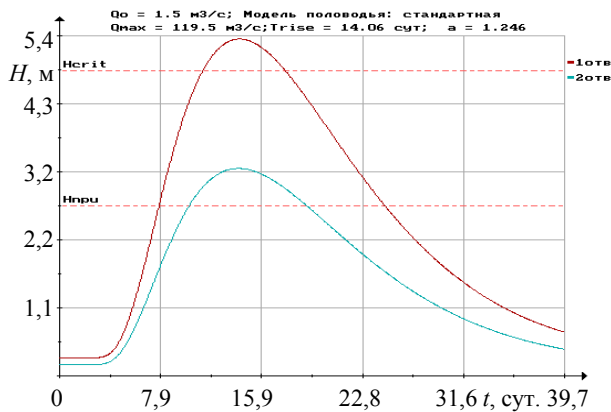


Рис. 4. Напоры в водохранилищах при одном и двух открытых водосливных отверстиях на водосбросе

Fig. 4. Heads in reservoirs with one and two open spillway outlets

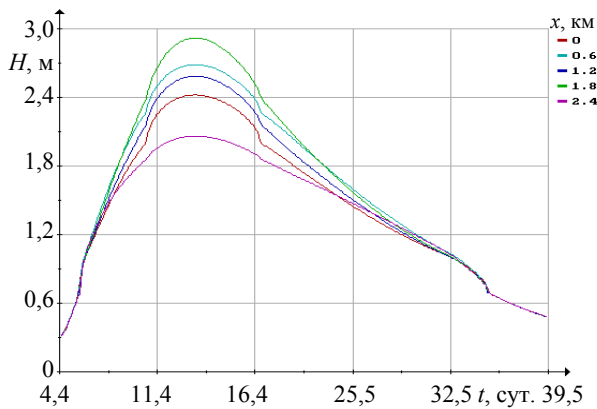


Рис. 5. Глубина воды в нижнем бьефе в зависимости от времени прохождения паводка при максимальном расходе $Q_{\max} = 119,5 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 5. Water depth in the lower pool depending on the flood time at maximum flow rate $Q_{\max} = 119.5 \text{ m}^3/\text{s}$

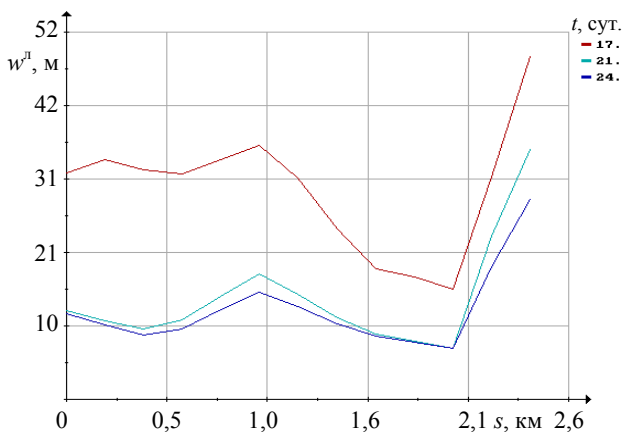


Рис. 6. Ширина затопления левой поймы $w^л$ в различные интервалы времени на расстоянии s от створа плотины

Fig. 6. Width of the floodplain left $w^л$ at different time intervals at a distance s from the dam site

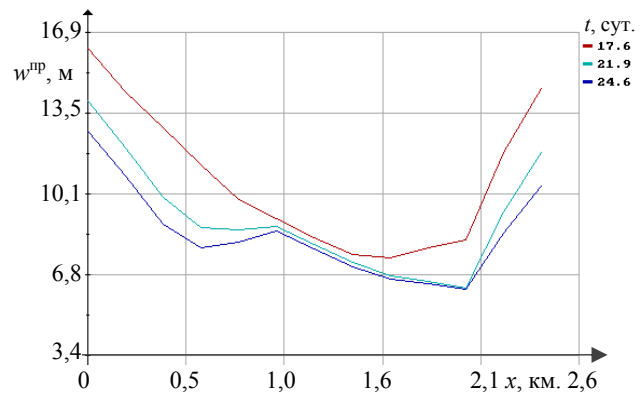


Рис. 7. Ширина затопления правой поймы $w^п$ в различные интервалы времени на расстоянии s от створа плотины

Fig. 7. Width of the right floodplain $w^п$ at different time intervals at a distance s from the dam site

Анализируя графики, представленные на рис. 4–7, можно наблюдать границы затопления территории в нижнем бьефе гидроузла в результате пропуска расхода величиной $119,5 \text{ м}^3/\text{с}$. При анализе графика на рис. 4 видно, что при работе только одного водосливного отверстия на бетонной плотине будет обеспечен перелив воды через гребень грунтовой плотины и переполнение водохранилища. Данные графики позволяют отследить прохождение паводка через весь гидроузел, начиная от входного створа и формирования гидрографа паводка до прохождения волны в нижнем бьефе и определения границ затопления.

Создание и использование математических моделей для описания гидродинамических процессов, возникающих при переполнении водохранилищ и развитии аварийных ситуаций, являются ключевыми инструментами в обеспечении безопасности гидротехнических сооружений и снижении последствий чрезвычайных происшествий. Применение как упрощенных, так и детализированных моделей дает возможность заблаговременно оценить вероятные сценарии развития событий, выявить критические параметры и принять меры для предотвращения или смягчения негативных последствий.

Особое значение имеет учет индивидуальных особенностей каждого гидросооружения, условий его эксплуатации и географических характеристик территории. Модели, основанные на уравнениях гидродинамики и балансовых соотношениях водных масс, позволяют

повысить точность прогнозов и обеспечить качественную информационную поддержку при принятии инженерных и организационных решений. Внедрение таких подходов в системы мониторинга и управления способствует повышению надежности гидротехнических объектов, защите населения и сохранению природной среды.

ВЫВОДЫ

1. Предложен математический метод моделирования прохождения паводка на реконструируемом гидроузле, основанный на совместном решении дифференциального уравнения баланса воды в водохранилище без учета неустановившегося движения по их длине. На входе в водохранилище изменение расхода во времени соответствует гидрографу паводка. Методика расчета позволяет: подобрать графики управления затворами водосбросов, не допускающими перелива через грунтовую плотину; сопоставить $Q_{\max}$ и уровни с проектной пропускной способностью водосбросов и отметками НПУ и ФПУ; определить, какие элементы гидроузла окажутся перегружены.

2. Математическое моделирование предоставляет возможность сформировать графики глубин затопления, скорости потока и времени стояния воды на пойме. Полученные значения необходимы для оценки масштабов ущерба: площади подтопления, числа затронутых населенных пунктов и объектов инфраструктуры (дороги, промышленность и т. д.), ориентировочную численность населения, подлежащую эвакуации, и предварительную материальную оценку ущерба. Практические результаты моделирования могут быть использованы для корректировки планов эвакуации, выбора приоритетных точек защиты (укрепление склонов, временные барьеры), улучшения работы системы оповещения и обоснования инженерных мер (расширение пропускной способности водосбросов).

3. Разработанный метод апробирован при подготовке проектной документации на реконструкцию гидроузла ГЭС «Яново». Проведено моделирование процессов переполнения водохранилища и определены возможные границы затопления территорий нижнего бьефа в зави-

симости от пропускной способности водосбросного сооружения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малик, Л. К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений. Проблемы безопасности / Л. К. Малик. Минск: Наука, 2005. 354 с.
2. Обеспечение безопасности и надежности низконапорных гидротехнических сооружений / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова [и др.]. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. 283 с.
3. Говорушко, С. М. Влияние природных процессов на гидротехнические сооружения (сообщение 2) / С. М. Говорушко // Астраханский вестник экологического образования. 2019. № 2 (50). С. 75–87.
4. Калинин, М. Ю. Водохранилища Беларуси: справ. / М. Ю. Калинин, В. Н. Счисленок, П. П. Рутковский [и др.]. Минск: Полиграфкомбинат, 2005. 183 с.
5. Совершенствование управления каскадом волжских водохранилищ на основе гидродинамических моделей и ГИС-технологий / А. О. Щербаков, А. А. Талызов, И. С. Румянцев [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство. 2002. № 2. С. 8–12.
6. Беднарук, С. Е. О планировании мероприятий по снижению риска ущербов от наводнений / С. Е. Беднарук // Безопасность энергетических сооружений: сб. М., 2003. Вып. 11. С. 407–414.
7. Беднарук, С. Е. Опыт управления Волжско-Камским каскадом водохранилищ с использованием имитационных математических моделей в период весеннего половодья / С. Е. Беднарук, С. Ю. Мотовилов // Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях: сб. ст. Междунар. конф., М., 2008.
8. Гидрология и гидротехнические сооружения / Г. Н. Смирнов, Е. В. Курлович, И. А. Витрешко, И. А. Мальгина. М.: Высш. шк., 1988. 472 с.
9. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселев, А. Д. Альтшуль, Н. В. Данильченко [и др.]; под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1972. 312 с.
10. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок расчета: ТКП 45-3.04-168-2010 (02250). Введ. 30.12.2009. Минск: Минстройархитектуры, 2010. 55 с.
11. Ресурсы поверхностных вод СССР: в 20 т. / под ред. В. В. Куприянова. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Т. 5: Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Ч. 1, 2: Основные гидрологические характеристики. 720 с.
12. Прогноз уровней в Вилейском водохранилище при пропуске расходов половодья / В. В. Ивашечкин, В. В. Верременюк, Г. Г. Круглов [и др.] // Вестник БрГТУ. Сер. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2017. № 2. С. 57–61.
13. Грушевский, М. С. Волны пусков и паводков в реках / М. С. Грушевский. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 336 с.
14. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 224 с.

15. Приближенная методика расчета затопления поймы реки при экстремальных попусках из водохранилища в период половодья / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, Я. А. Семенова, О. В. Немеровец // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2, № 1. С. 67–74.
16. Верemenюк, В. В. Моделирование неустойчивого движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, О. В. Немеровец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 6. С. 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567>.

Поступила 20.06.2025

Подписана в печать 22.08.2025

Опубликована онлайн 30.09.2025

REFERENCES

1. Malik L. K. (2005) *Risk Factors for Damage to Hydraulic Structures. Security Issues*. Minsk, Nauka Publ. 354 (in Russian).
2. Shchedrin V. N., Kosichenko Yu. M., Baklanova D. V., Baev O. A., Mikhailov E. D. (2016) *Ensuring the Safety and Reliability of Low-Pressure Hydraulic Structures*. Novocherkassk, Russian Research Institute for Land Reclamation Problems. 283 (in Russian).
3. Govorushko S. M. (2019) The Influence of Natural Processes on Hydraulic Structures (Message 2). *Astrakhan-skiy Vestnik Ekologicheskogo Obrazovaniya = Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, (2), 75–87 (in Russian).
4. Kalinin M. Yu., Schislenok V. N., Rutkovskii P. P., Yurevich R. A., Sirotenko V. I., Frolova O. E. *Reservoirs of Belarus. Handbook*. Minsk, Poligrafkombinat Publ. 183 (in Russian).
5. Shcherbakov A. O., Talyzov A. A., Rumyantsev I. S., Pruchkin S. I., Buber A. L. (2002) Improving the Management of the Volga Reservoir Cascade Based on Hydrodynamic Models and GIS Technologies. *Melioratsiya i Vodnoe Khozyaistvo = Irrigation and Water Management*, (2), 8–12 (in Russian).
6. Bednaruk S. E. (2003) On Planning Measures to Reduce the Risk of Flood Damage. *Bezopasnost Energeticheskikh Sooruzheniy: sb* [Safety of Energy Structures: Collection]. Moscow, Iss. 11, 407–414 (in Russian).
7. Bednaruk S. E., Motovilov S. Yu. (2008) Experience of managing of the Volga-Kama Cascade of Reservoirs Using Simulation Mathematical Models During the Spring Flood Period. *Management of Water Resource Systems in Extreme Conditions: Collection of Articles of International Conference, Moscow, June 4–5, 2008* (in Russian).
8. Smirnov G. N., Kurlovich E. V., Vitreshko I. A., Mal'gina I. A. (1988) *Hydrology and Hydraulic Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 472 (in Russian).
9. Al'tshul' A. D., Danil'chenko N. V., Kasparson A. A., Krivchenko G. I., Pashkov N. N., Slisskii S. M. (1972) *Handbook of Hydraulic Calculations*. Moscow, Energiya Publ. 312 (in Russian).
10. ТКР [Technical Code of Common Practice] 45-3.04-168–2010 (02250). *Estimated Hydrological Characteristics. Calculation Procedure*. Minsk, Publishing House of Ministry of Construction and Architecture of the Republic of Belarus, 2010. 55 (in Russian).
11. Kupriyanov V. V. (ed.) (1966) *Surface Water Resources of the USSR. Vol. 5: Belarus and the Upper Dnieper Region. Parts. 1, 2: Main Hydrological Characteristics*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 720 (in Russian).
12. Ivashechkin V. V., Veremenyuk V. V., Kruglov G. G., Anatsko Ya. Ya., Soldatenko Ya. A. (2017) Forecast of the Vileika Reservoir Levels During the Flood Discharge. *Vestnik BrGTU. Seriya Vodokhozyaistvennoe stroitel'stvo, teploenergetika i geoekologiya = Vestnik of Brest State Technical University. Series: Water Management Construction, Thermal Power Engineering and Geoecology*, (2), 57–61 (in Russian).
13. Grushevsky M. S. (1989) *Waves of Water Releases and Floods in Rivers*. Leningrad, Gidrometeizdat Publ. 336 (in Russian).
14. Altshul A. D. (1982) *Hydraulic Resistance*. 2nd ed. Moscow, Nedra Publ. 224 (in Russian).
15. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Semenova Ya. A., Nemeravets O. V. (2018) An Approximate Method for Calculating the Flooding of a River Floodplain During Extreme Releases from a Reservoir in the Period of the High Water. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoy Zashchity MChS Belarusi = Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus*, 2 (1), 67–74 (in Russian).
16. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Nemeravets O. V. (2021) Simulation of Unsteady Movement in the Downstream of a Hydroelectric Complex During the Destruction of a Soil Dam. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (6), 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567> (in Russian).

Received: 20.06.2025

Accepted: 22.08.2025

Published online: 30.09.2025