

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА, РАЗМЫВА ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ И РАЗВИТИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА

Немеровец О.В.

Цель. Разработка и реализация комплексного подхода для моделирования процессов переполнения водохранилища, размыва грунтовой плотины и развития чрезвычайной ситуации в нижнем бьефе гидроузла.

Методы. Моделирование процессов с учетом методов расчета, включающих уравнение баланса воды для оценки переполнения водохранилища, двухстадийный процесс размыва грунтовой плотины с учетом изменения формы ее профиля, а также уравнения Сен-Венана для моделирования движения воды в нижнем бьефе.

Результаты. Разработан комплексный подход моделирования развития чрезвычайной ситуации на гидротехническом объекте вследствие переполнения водохранилища, перелива воды через гребень и размыва грунтового сооружения. На основании полученного гидрографа размываемых расходов в створе грунтовой плотины определены параметры волны прорыва, зоны и уровни затопления в нижнем бьефе гидроузла. Выполнена апробация разработанного комплексного подхода при разработке проектной документации на реконструкцию гидроузла в городе Ошмяны, с моделированием процессов переполнения водохранилища и определением границ затопления территорий нижнего бьефа в зависимости от различной пропускной способности водосбросного сооружения.

Область применения исследований. Область применения результатов исследования охватывает несколько ключевых направлений, связанных с обеспечением безопасности гидротехнических сооружений и прогнозированием возможных аварийных ситуаций. В частности, проектирование и эксплуатация гидротехнических объектов, оценка устойчивости старых гидросооружений, предупреждение и предотвращение чрезвычайных ситуаций. Применение результатов моделирования для оценки потенциального ущерба экосистемам и населенным пунктам, расположенным в зонах риска. Результаты могут быть использованы для разработки нормативных правовых актов, стандартов и рекомендаций по безопасности гидротехнических объектов и зонированию территорий, подверженных угрозе затоплений.

Ключевые слова: расход, паводок, водохранилище, напор, уравнение баланса воды, гидрограф паводка, прогноз, авария, гидротехническое сооружение, грунтовая плотина.

(Поступила в редакцию 23 июня 2025 г.)

Введение

В 1928 г. была создана Международная комиссия по крупным плотинам (МКБП). Одной из важнейших публикаций МКБП, отражающих ее миссию по обмену информацией об авариях, является доклад «Уроки, извлеченные из аварий на плотинах» (1973). С тех пор было подготовлено множество других материалов, в том числе бюллетень № 99 МКБП «Прорыв плотины – статистический анализ». Этот бюллетень классифицирует аварии по типам, возрасту плотин и причинам их возникновения. Он способствует повышению осведомленности проектировщиков о непредвиденных факторах риска, вероятности их возникновения и последовательности событий, которые могут привести к катастрофе. Наиболее распространенными причинами аварий на плотинах являются:

- переливы: часто служат предвестником разрушения. Они могут возникать из-за неправильных расчетов водосбросов, засорения водосбросных сооружений мусором или осадки гребня;
- осадки и неустойчивость откосов;

– внутренняя эрозия: движение грунта внутри конструкции из-за просачивания воды вокруг труб (контактной фильтрации), водосливов, через норы животных или корни растений, трещины в дамбах или фундаменте. Это одна из основных причин разрушения;

– повреждение строительных материалов: разрушение конструктивных элементов вследствие износа или несоблюдения требований технического обслуживания.

Эти факторы требуют постоянного мониторинга и своевременного вмешательства для предотвращения аварийных ситуаций. Также одним из факторов разрушения грунтовых плотин является превышение уровней воды в верхнем бьефе как в результате неудовлетворительного технического состояния затворов или подъемного оборудования, так и в результате изменения гидрологического режима рек и, соответственно, гидрографа паводка или половодья. Усложняется процесс эксплуатации гидроузлов, если водохранилища объединены в каскады, где при прохождении паводков необходимо слаженно регулировать уровни воды в верхних и нижних водохранилищах. Если в этот период не открыть своевременно затворы нижележащего водохранилища, там может произойти подъем уровня воды и подтопление водосбросных отверстий вышележащего объекта. Это приведет к затоплению и снижению пропускной способности отверстий, а также к переливу через гребень вышележащей плотины и возможному разрушению конструкции.

Из 300 аварий плотин (сопровождавшихся их прорывом) в различных странах за 175 лет в 35 % случаев причиной аварии было превышение расчетного максимального сбросного расхода и перелив воды через гребень плотины [1]. Случаи повреждения плотин вследствие катастрофических наводнений очень многочисленны. Например, плотина Шакидор (Shakidor Dam) была построена в 2003 г. в провинции Белуджистан (Balochistan) Пакистана для ирригации близлежащих сельскохозяйственных угодий. После проливных дождей в течение двух недель 10 февраля 2005 г. плотина высотой 150 м обвалилась. В результате было затоплено несколько деревень, более 135 человек погибли [2, с. 88–107]. 5 октября 2007 г. на реке Чу (Chu) во вьетнамской провинции Тханьхоа (Thanh Hóa) после резкого подъема уровня воды прорвало плотину строящейся ГЭС Кыадат (Cua Dat). В зоне затопления оказалось около 5 тысяч домов, 35 человек погибли [3]. Еще одним ярким примером разрушения плотин вследствие наводнения является прорыв дамбы Мачу-2 в штате Гуджарат, Индия, 11 августа 1979 г. Эта земляная дамба была построена в 1972 г. для целей орошения. С 1 по 12 августа 1979 г. в районе шли дожди, наиболее интенсивный ливень наблюдался 11 августа (выпало 237 мм, что соответствует 42 % годовой нормы) [4]. Пропускная способность водосброса составляла 5663 м³/с. Фактический наблюдаемый сток после интенсивных дождей достиг 16 307 м³/с, что в три раза больше, чем планировалось для плотины, что привело к ее обрушению. В течение 20 мин были затоплены низменные районы промышленного города Морви, расположенного в 5 км ниже плотины. Оценки числа погибших сильно различаются: от 1800 до 25 000 человек [5, с. 151]. Бетонная арочная плотина Мальпассе (Malpasset) была построена в период с 1952 по 1954 г. на р. Рейран (крайний юго-восток Франции). Она предназначалась для целей ирригации и водоснабжения. В период 19 ноября – 2 декабря 1959 г. в районе Мальпассе шли обильные дожди: выпало 500 мм дождевых осадков (при этом в течение последних суток перед аварией – 130 мм). 2 декабря 1959 г. плотина Мальпассе рухнула, город Фрежюс (Frejus), находившийся в 12 км ниже по течению, подвергся практически полному затоплению. В результате наводнения погиб 421 человек [6]. Дополнительная опасность прорыва возникает при наличии автодороги, проходящей не по гребню плотины, а по насыпи за ней. В такой схеме два последовательно расположенных водопропускных сооружения – одно в плотине, другое – в насыпи – могут привести к подтоплению или переливу при невозможности пропуска всех расходов во время сильного паводка. Аналогичная ситуация имела место на водохранилище Меркуловичи Гомельской области: при дождевом паводке произошел перелив через гребень земляной плотины.

Исследования режима изменения уровней воды при каскадном расположении водохранилищ посвящены ряду работ российских ученых [7–9], которые разрабатывали режимы работы гидроузлов на основе сценариев боковой приточности воды к каскаду.

Как отмечается в [7–9], для точного моделирования необходима подробная информация о поперечных сечениях водохранилищ, уклонах и коэффициентах шероховатости. Однако такие данные зачастую отсутствуют.

Если поперечные сечения русловых водохранилищ значительно превышают размеры русла реки, то скорости движения воды при заполнении будут сравнительно малы, что позволяет считать течение неравномерным и приближенно – квазистационарным. В связи с этим

автором статьи предложена методика расчета изменения уровней воды в двух каскадных водохранилищах при пропуске паводка. Она основана на совместном решении дифференциальных уравнений баланса воды без учета неустановившегося движения по длине водохранилищ [10].

В свою очередь, прогнозирование развития и масштабов возможных гидродинамических аварий на водоподпорных гидротехнических сооружениях (ГТС) включает прогнозирование степени разрушения ГТС, параметров волны прорыва, поставарийного состояния русла и поймы в возможной зоне затопления и последствий аварий для населения и территорий в зоне возможного затопления. Расчеты по определению параметров волны прорыва и оценке возможных последствий затопления необходимы при составлении оперативно-тактических планов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций при авариях на подпорных сооружениях, определении вероятного ущерба от затопления территории в нижнем бьефе гидротехнического сооружения в результате прохождения волны прорыва.

Цель данной работы – моделирование переполнения водохранилища, размыва грунтовой плотины и развития чрезвычайной ситуации в нижнем бьефе гидроузла. Предлагается использовать комплексный метод расчета на основе составления моделей процессов: переполнения водохранилища на основе уравнений баланса воды, размыва грунтовой плотины на основе двухстадийного процесса размыва с учетом изменения формы профиля (от трапециевидальной до треугольной или водосливной), а также процессов движения волны на базе уравнений Буссинеска – Сен-Венана для расчета динамики прорывной волны по полученному гидрографу расхода.

Основная часть

1. Моделирование переполнения одиночного и каскада водохранилищ. Прогнозирование переполнения водохранилища предполагается осуществлять с использованием уравнения баланса воды в водохранилище, которое для одиночного водохранилища имеет следующий вид:

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

где $Q_{\text{пав}}$ – расчетный расход паводка во входном створе водохранилища, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{вых}}$ – расход в створе водосбросного сооружения, $\text{м}^3/\text{с}$;

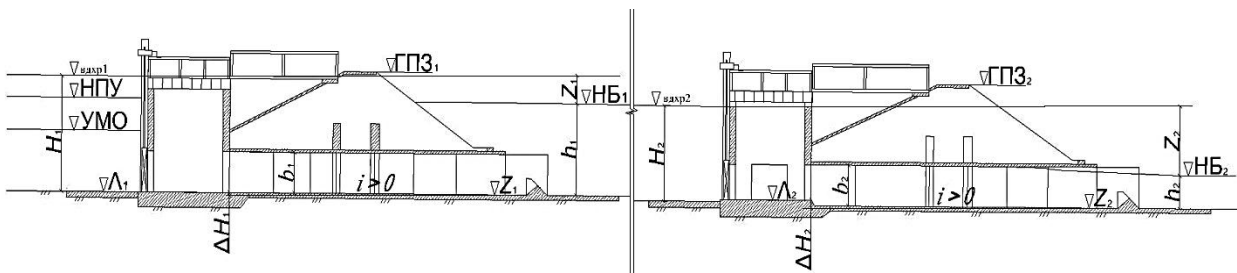
$Q_{\text{и}}$ – расход, используемый для энергетики, $\text{м}^3/\text{с}$;

Ω – площадь водной поверхности водохранилища, м^2 ;

H – напор воды на входе в трубу башенного водосброса, м;

t – время, с.

Рассмотрим каскад водохранилищ, представленный на рисунке 1.



H_k – напор воды на входе в трубы башенных водосбросов в k -м водохранилище (здесь и далее $k = 1, 2$);
 $\nabla_{\text{вдхр } k}$ – отметка уровня воды в верхнем бьефе k -го водохранилища; $\nabla \Lambda_k$ – отметка дна перед башенными водосбросами в k -м водохранилище; $\nabla \text{НПУ}$ – отметка нормального подпорного уровня; $\nabla \text{УМО}$ – отметка уровня мертвого объема; $\nabla \text{ГПЗ}_k$ – отметка гребня k -й грунтовой плотины; $\nabla \text{НБ}_k$ – отметка уровня нижнего бьефа в k -м водохранилище; ∇Z_k – отметка дна на выходе из башенного водосброса в k -м водохранилище;
 b_k – высота трубы k -го башенного водосброса; h_k – глубина воды в нижнем бьефе за k -м водосбросным сооружением; ∇H_k – разница входного и выходного сечения водосбросного тракта в k -м башенном водосбросе; Z_k – разница уровней верхнего и нижнего бьефа в k -м водохранилище;
 $i > 0$ – уклон дна транзитной части башенного водосброса

Рисунок 1. – Схема каскада из двух водохранилищ с земляными плотинами, оборудованными башенными водосбросами

Формула (1) для каскада из двух водохранилищ примет следующий вид:

$$\begin{cases} \Omega_1 dH_1/dt = Q_{\text{пав}}(t) - Q_{\text{вых}_1}(t, H_1, H_2); \\ \Omega_2 dH_1/dt = Q_{\text{вых}_1}(t, H_1, H_2) - Q_{\text{вых}_2}(t, H_1, H_2), \end{cases} \quad (2)$$

где $H_k = H_k(t) = \nabla_{\text{вдхр } k}(t) - \nabla \Lambda_k$ ($k = 1, 2$) – напор воды на входе в трубы башенных водосбросов в k -м водохранилище, м;

$\Omega_k = \Omega_k(H_k)$ – площадь зеркала k -го водохранилища в зависимости от напора в нем, м²;

$Q_{\text{пав}}(t)$ – расчетный расход паводка во входном створе первого водохранилища, м³/с;

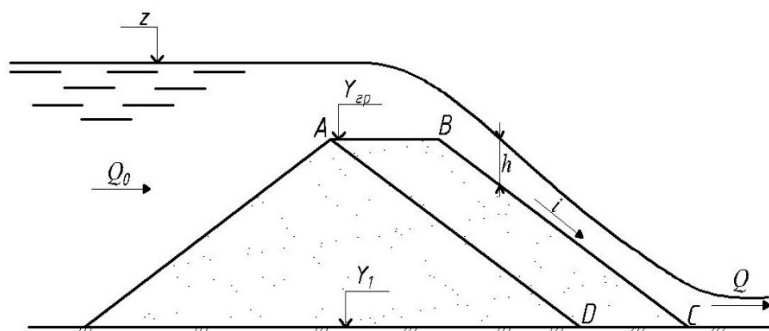
$Q_{\text{вых}_k}(t, H_1, H_2)$ – расход в створе водосбросных сооружений k -го водохранилища, м³/с.

Более подробное описание определения уровней воды в верхнем бьефе при каскадном расположении представлено в работах [11–12].

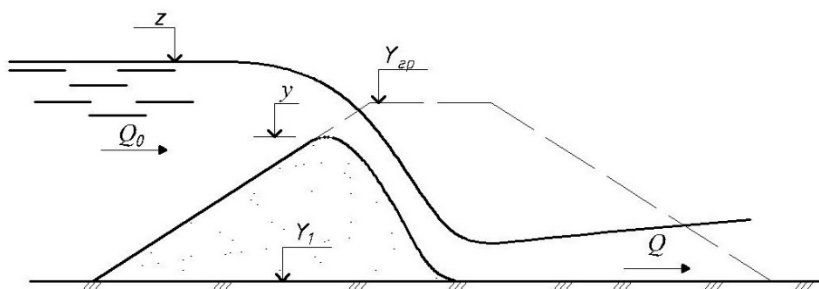
Расчеты с использованием системы уравнений (2) позволяют определить нарастание уровней воды перед плотиной в различные периоды времени и произвести их дальнейшее сравнение с отметкой гребня грунтовой плотины. В случае превышения уровней производится оценка вероятности наступления перелива. В случае наступления такой ситуации выполняется расчет разрушения грунтовой плотины, которое сопровождается образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Анализ используемых математических моделей для расчета динамики размыва плотины (особенно ее первой стадии до расширения прорана) показал, что они недостаточно совершенны и базируются на приближенных зависимостях [13–15].

2. Моделирование размыва грунтовой плотины. Процесс размыва однородных плотин моделируется в соответствии с методикой, разработанной и описанной в работах [16–17]. Этот процесс разбивается на две стадии.

На первой стадии (рис. 2а) размывается низовой откос, по которому вода движется как по быстротоку. Профиль плотины, вначале трапецеидальный, к концу размыва низовой призмы ABCD принимает форму, близкую к треугольной, причем отметка гребня со стороны верхового откоса остается постоянной.



а – первая стадия



б – вторая стадия

Z – отметка уровня воды в верхнем бьефе; $Y_{\text{гр}}$ – отметка гребня грунтовой плотины; y – отметка гребня водослива в пределах прорана (дна прорана); Y_1 – отметка дна реки (лотка); Q_0 – расход, поступающий в верхний бьеф (приточность); Q – расход воды через проран.

Рисунок 2 – Схема размыва грунтовой плотины при переливе

Вторая стадия (рис. 2б) характеризуется интенсивным снижением гребня, плотина быстро приобретает форму водослива практического профиля, которая, трансформируясь во

времени, сохраняется до конца размыва. В это же время происходит интенсивное расширение прорана.

Процесс разрушения грунтовой плотины и возникновение прорана можно описать с помощью системы 4 дифференциальных уравнений:

1) уравнение для описания первой стадии размыва, т.е. уравнение деформации, взято в работе [16] и преобразовано автором:

$$\frac{dM}{dt} = 0,055 \frac{i^{1,275} (\sigma_n \cdot m_1)^{1,45} (2g)^{0,725}}{n_1^{2,55}} \cdot B \cdot (z - Y_{гр})^{2,175}, \quad (3)$$

где $0,055 \text{ кг} \cdot \text{с}^3 / \text{м}^{4,75}$ – размерный коэффициент, полученный на основании эмпирических данных;

M – масса грунта низовой призмы, кг;

$i = \sin \alpha_d$ – уклон дна на быстротоке (α_d – угол наклона низового откоса к горизонту);

σ_n – коэффициент подтопления ($\sigma_n = 1$, если подтопления нет, и $\sigma_n < 1$ в противном случае);

m_1 – коэффициент расхода водослива;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$;

n_1 – коэффициент шероховатости поверхности низового откоса, $\text{с/м}^{1/3}$. $n_1 = 0,0324 \cdot d^{1/8}$ при h/r от 1000 – формула Гончарова [18, с. 132] ($0,0324 \text{ с/м}^{11/24}$ – размерный коэффициент; d – средний диаметр частиц размываемого грунта, м; h – глубина потока, м; r – радиус частиц размываемого грунта, м);

B – ширина прорана (которая предполагается постоянной в течение 1-й стадии размыва плотины, об этом речь идет ниже), м;

z – отметка уровня верхнего бьефа, м;

$Y_{гр}$ – отметка гребня плотины, м;

2) уравнение для изменения ширины прорана B в зависимости от времени. В работе К.Р. Пономарчука [19] по итогам гидравлического моделирования были построены графики изменения во времени ширины прорана $B = B(t)$, на основании которых была выведена эмпирическая формула развития ширины прорана B от времени t :

$$\frac{dB}{dt} = 0,035 \frac{\sqrt{g} h_t^{4,5}}{W_{уд}^2}, \quad (4)$$

где $h_t = z - y$ – разность уровней воды между верхним бьефом и дном прорана (действующий напор на проране), м;

$W_{уд}$ – площадь поперечного сечения плотины между ее гребнем и дном прорана, м^2 ;

3) уравнение для отметки $y(t)$ гребня водослива в пределах прорана (взято из работы [16] и уточнено автором в части определения коэффициентов):

$$\frac{dy}{dt} = - \frac{B \cdot \varepsilon}{\rho} \cdot (\sigma_n m_2)^{0,407} \cdot (z - y)^{0,61}, \quad \varepsilon = 2 \frac{1 - 1,26 \sqrt[3]{m_2^2}}{\beta}, \quad (5)$$

где β – безразмерная постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта;

ρ – плотность грунта плотины, кг/м^3 ;

m_2 – коэффициент расхода водослива (может и, как правило, отличается от m_1);

B ($\text{кг}/(\text{м}^{2,61} \cdot \text{с})$) – размерный параметр, вычисляемый по формуле:

$$B = 2,224 \cdot (1 + \varphi) \cdot d \cdot \left(\frac{5,64 n_2 \sqrt{2g}}{\varphi \cdot w} \right)^{3,33} \cdot g^{2,165} \alpha^{-1,962}, \quad (6)$$

где $2,224 \text{ кг/м}^3$ – размерный коэффициент, полученный на основании эмпирических данных;

φ – параметр турбулентности;

n_2 – коэффициент шероховатости поверхности прорана, $\text{с/м}^{1/3}$;

w – гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с ;

α – коэффициент Кориолиса;

4) уравнение для отметки $z(t)$ верхнего бьефа водохранилища в общем случае имеет вид

$$dz/dt = (Q_0 - Q - Q_C - Q_E)/F(z), \quad (7)$$

где Q_0 – расход, поступающий в верхний бьеф (приточность), м³/с;

Q – расход воды через проран, м³/с;

Q_C – расход в створах водосбросных сооружений, м³/с;

Q_E – расход, используемый для энергетики, м³/с;

$F(z)$ – площадь водной поверхности водохранилища при отметке z верхнего бьефа, которую определяют методом наименьших квадратов по опытным данным для каждого конкретного водохранилища, м².

Расход воды через проран находим как расход воды через водослив:

$$Q = mB\sqrt{2g}(z - y)^{1,5}, \quad (8)$$

где m – коэффициент расхода размываемого водослива, на первой стадии размыва грунтовой плотины определяется как для водослива с широким порогом, на второй – как для водослива практического профиля.

Далее, после определения расхода воды через проран определяются параметры волны прорыва и границы затопления в нижнем бьефе.

3. Развитие чрезвычайной ситуации в нижнем бьефе гидроузла. Решение поставленной задачи заключается в моделировании потока в нижнем бьефе с помощью уравнений Сен-Венана. Для решения уравнений требуется знание граничных (на границе прорана и нижнего бьефа) и начальных условий для скорости и глубины потока. Граничные условия можно получить только в результате решения задачи о разрушении грунтовой плотины [16].

Система уравнений Сен-Венана для течения воды в открытом русле произвольного профиля имеет вид [20, с. 32–33; 21, с. 12; 22]

$$a \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{W} \right) \right] + gW \left(\frac{\partial h}{\partial x} + i_f - i_p \right) = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad (9)$$

где x – протяженность по водотоку, м;

$Q = Q(x, t)$ – расход воды, м³/с;

$W = W(x, t)$ – площадь живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока в момент времени t , м²;

$h = h(x, t)$ – глубина потока, м;

$i_f = i_f(x, t)$ – уклон трения потока;

$i_p = i_p(x)$ – уклон дна реки в нижнем бьефе;

a – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока. Отмечается, что имеется достаточно удовлетворительная связь a с коэффициентом шероховатости по Маннингу n (с/м^{1/3}) [23, с. 35]: $a = 14,8n + 0,884$ (здесь 14,8 м^{1/3}/с – размерный коэффициент), причем, если результат расчета по этой формуле составит значение $a > 2$, рекомендуется принимать $a = 2$.

Скорость потока v находим по формуле

$$v(x, t) = Q(x, t)/W(x, t). \quad (10)$$

Уклон трения i_f потока будем выражать из формулы Шези:

$$i_f = \frac{Q^2}{W^2 C^2 R} = \frac{v^2 n^2}{R^{4/3}}, \quad (11)$$

где $R = W(x, t)/P(x, h)$ – 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, $C = \sqrt[3]{R}/n$, м^{0,5}/с.

С учетом (10) и (11) система (9) преобразуется к виду

$$\alpha \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right] + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \left(\frac{v^2 n^2}{R^{4/3}} - i_p \right) = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial (vW)}{\partial x} = 0. \quad (12)$$

Способ описания поверхности в нижнем бьефе, определение граничных и начальных условий для уравнения (9) подробно представлены в статьях [24–25].

Расчет по моделированию изменения уровня воды в водохранилище и определению границ затопления в нижнем бьефе с определением параметров волны прорыва представлен на примере гидроузла в городе Ошмяны. Для построения графиков (рис. 3, 4) было принято: продолжительность паводка – $T_{\max} = 37,9$ сут; продолжительность нарастания паводка – $t_n = 17,5$ сут; расход для 1 %-й вероятности превышения $Q_{\max 1\%} = 88,2$ м³/с. Отметка нормального подпорного уровня (НПУ) воды в водохранилище – $\nabla_{\text{НПУ}} = 173,35$ м; отметка форсированного подпорного уровня (ФПУ) воды в водохранилище – $\nabla_{\text{ФПУ}} = 131,15$ м; критическая глубина воды в водохранилище установившаяся при отметке ФПУ – $H_{\text{crit}} = \nabla_{\text{ФПУ}} - H_{\Lambda}$; нормальная глубина воды в водохранилище установившаяся при отметке НПУ – $H_{\text{нпу}} = \nabla_{\text{НПУ}} - H_{\Lambda}$. В створе гидроузла в средний по водности год расход реки составляет $Q_0 = 3,5$ м³/с. Отметка уровня дна водохранилища $H_{\Lambda} = 170,64$ м. В водосливной плотине на уровне $H_{\Lambda 1} = 171,77$ м имеются три водосливных отверстия шириной 4 м, а на уровне дна H_{Λ} имеется одно водопропускное отверстие шириной 4 м (водослив с широким порогом).

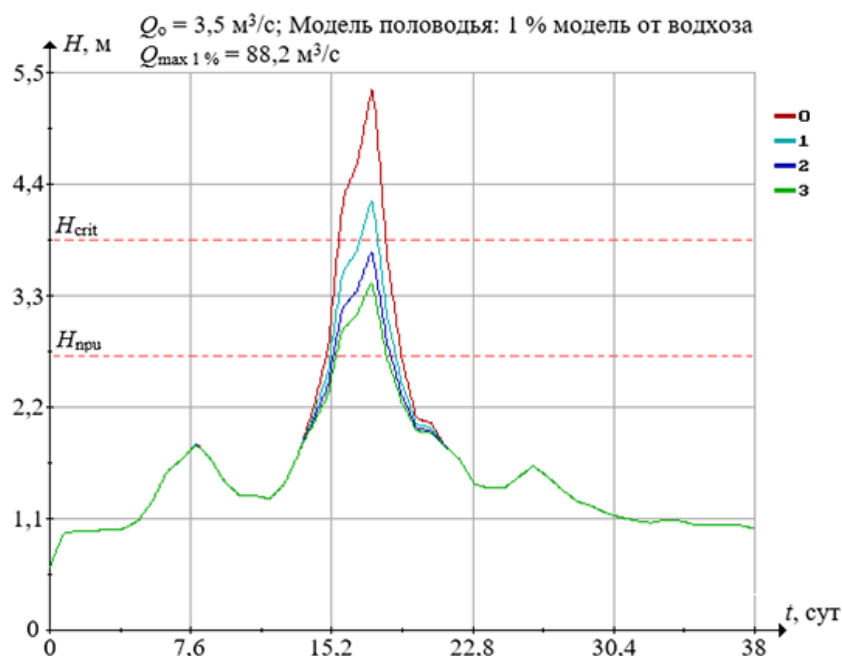


график 0 – работает только водосброс с пониженной отметкой;
 график 1 – работает водосброс на плотине с пониженной отметкой и один основной;
 график 2 – работает водосброс на плотине с пониженной отметкой и два основных;
 график 3 – работает водосброс на плотине с пониженной отметкой и три основных
Рисунок 3. – Изменение напора в водохранилище во времени при пропуске паводка при маневрировании затворами

Из анализа графика на рисунке 3, видно, что при нормальной работе водосбросных отверстий (3 и 2 отверстия) в период пропуска максимального расхода половодья произойдет превышение отметки НПУ, но уровень воды не достигнет отметки гребня грунтовой плотины. В свою очередь, это говорит об отсутствии возникновения аварийной ситуации и достаточной пропускной способности отверстий для пропуска расхода половодья. При моделировании ситуации с учетом работы только одного водосбросного отверстия или полном отсутствии пропускной способности в сооружении возникает чрезвычайная ситуация, характеризующаяся превышением уровня верхнего бьефа над отметкой гребня грунтовой плотины и последующим ее размывом.

Результаты расчета параметров потока в нижнем бьефе представлены в виде кривых изменения ширины затопления поймы правого (рис. 4) и левого (рис. 5) берегов в разных створах русла, которые находятся на расстоянии s от плотины.

Анализируя графики, представленные на рисунках 4 и 5, можно наблюдать границы затопления территории в нижнем бьефе гидроузла в результате разрушения грунтовой плотины с прорывом напорного фронта. Истекающий поток воды через проран образует изменяющийся расход, что описывается гидрографом размываемых расходов. Данный поток растекается по территории в зависимости от высотного положения участков поймы. Поэтому на графиках видны участки с местами максимального сгущения горизонталей, что говорит о наличии на данном участке обрывистого берега и, соответственно, минимальных границ затопления. Данные участки не совпадают на левой и правой пойме из-за процессов меандрирования реки.

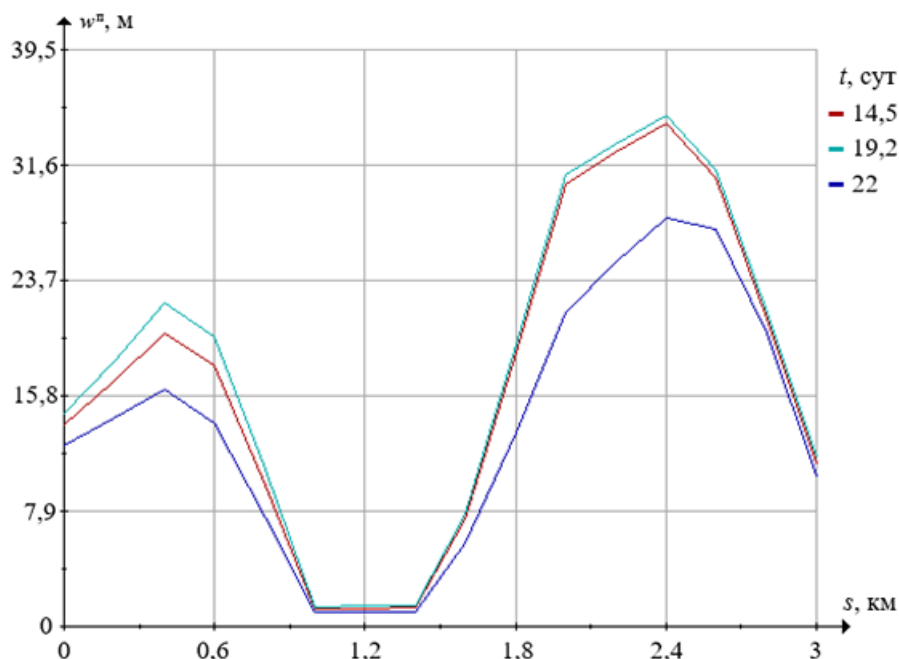


Рисунок 4. – Изменение ширины (зоны) затопления правой поймы $w^п$ в разные моменты времени в разных створах русла при убывании расхода Q_1 %

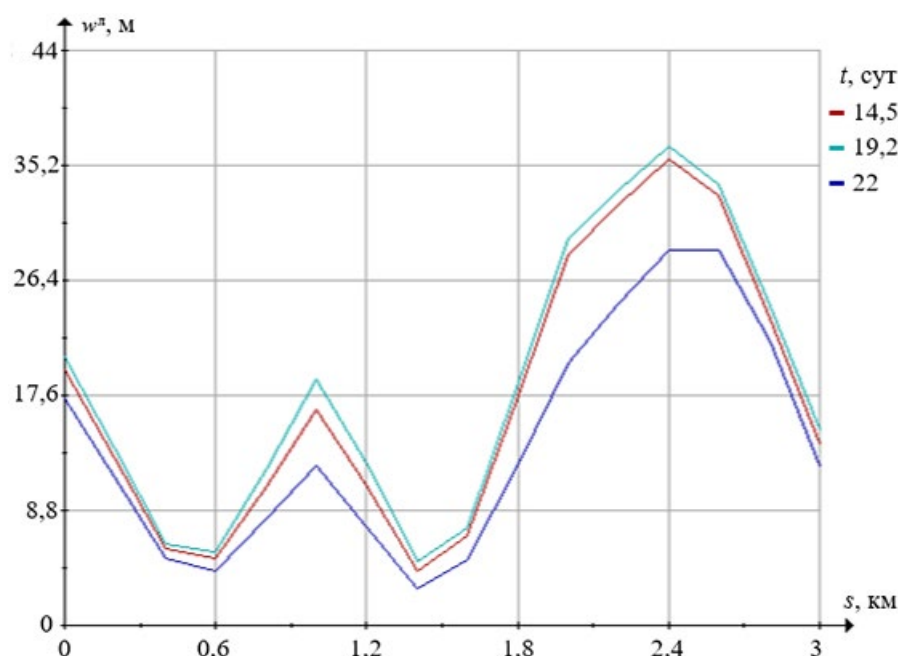


Рисунок 5. – Изменение ширины (зоны) затопления левой поймы $w^л$ в разные моменты времени в разных створах русла при убывании расхода Q_1 %

Разработка и применение математических моделей для моделирования гидродинамических процессов, связанных с переполнением водохранилищ, разрушением плотин и развитием аварийных ситуаций, являются важными инструментами обеспечения безопасности

гидросооружений и минимизации последствий чрезвычайных ситуаций. Использование упрощенных и более сложных моделей позволяет своевременно оценить возможные сценарии развития событий, определить критические параметры и принять меры по предотвращению или смягчению аварийных последствий. Важным аспектом является учет особенностей конкретных гидросооружений, условий эксплуатации и географических характеристик региона. Предложенные методики моделирования, основанные на уравнениях гидродинамики и баланса воды, позволяют повысить точность прогнозов и обеспечить надежную информационную поддержку при принятии решений. В целом внедрение этих подходов в системы мониторинга и управления гидротехническими сооружениями способствует повышению их надежности, безопасности населения и сохранению окружающей среды.

Заключение

1. Разработан комплексный подход моделирования развития чрезвычайной ситуации на гидротехническом объекте вследствие переполнения водохранилища, перелива воды через гребень и размыва грунтового сооружения. На основании полученного гидрографа размываемых расходов в створе грунтовой плотины определены параметры потока и зоны затопления в нижнем бьефе гидроузла.

2. Выполнена апробация разработанного комплексного подхода при разработке проектной документации на реконструкцию гидроузла в городе Ошмяны, с моделированием процессов переполнения водохранилища и определением границ затопления территорий нижнего бьефа в зависимости от различной пропускной способности водосбросного сооружения.

3. Полученные результаты исследований в статье тесно связаны с обеспечением безопасности гидротехнических сооружений и прогнозированием возможных аварийных ситуаций. В частности, проектирование и эксплуатация гидротехнических объектов, оценка устойчивости старых гидросооружений, предупреждение и предотвращение чрезвычайных ситуаций, оценка потенциального ущерба экосистемам и населенным пунктам, расположенным в зонах риска затопления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brown, E.T. Reducing risks in the investigation, design and construction of large concrete dams / E.T. Brown // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2017. – Vol. 9, No. 2. – P. 197–209. – DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.11.002.
2. Малик, Л.К. Факторы риска повреждения гидротехнических сооружений / Л.К. Малик. – М.: Наука, 2005. – 354 с. – EDN: QMISRX.
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. – EDN: OUPGHM.
4. Dhar, O.N. The rainstorm which caused the Morvi dam disaster in August 1979 / O.N. Dhar, P.R. Rakecha, B.N. Mandal, R.B. Sangam // *Hydrological Sciences Bulletin*. – 1981. – Vol. 26, No. 1. – P. 71–81. – DOI: 10.1080/02626668109490862.
5. Викулин, А.В. Цивилизация глазами катастроф: природных и социальных: монография / А.В. Викулин, И.Ф. Вольфсон, М.А. Викулина, А.А. Долгая. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2016. – 236 с.
6. Biscarini C. Di Francesco S., Ridolfi E., Manciola P. On the simulation of floods in a narrow bending valley: the Malpasset dam break case study // *Water*. – 2016. – Vol. 8, No. 11. – Article 545. – 19 p. – DOI: 10.3390/w8110545.
7. Щербаков, О.А. 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. – EDN: YJFXTT.
8. Беднарук, С.Е. О планировании мероприятий по снижению риска ущербов от наводнений / С.Е. Беднарук // *Безопасность энергетических сооружений: научно-технический и производственный сборник*. – М.: Научно-исследовательский институт энергетических сооружений, 2003. – Вып. 11. – С. 407–414.
9. Беднарук, С.Е. Опыт управления каскадом волжскокамских водохранилищ с использованием имитационных математических моделей в период весеннего половодья / С.Е. Беднарук, Ю.Г. Мотовилов // *Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях: сб. статей междунар. конф., Москва, 4–5 июня 2008 г.* – М., 2008. – 1 CD-ROM.

10. Немеровец, О.В. Моделирование изменения уровней воды в водохранилище при пропуске расходов половодья / О.В. Немеровец, В.В. Ивашечкин // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 29–31 мая 2023 г. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2023. – Вып. 6, ч. 2. – С. 99–106. – EDN: IQKFFM.
11. Веремениук, В.В. Моделирование процесса изменения уровней в каскаде из двух русловых водохранилищ при пропуске половодья / В.В. Веремениук, В.В. Ивашечкин, О.В. Немеровец // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 146–154. – DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-146-154. – EDN: ZYFGLZ.
12. Ивашечкин, В.В. Прогноз уровней в каскаде из двух водохранилищ при пропуске расходов половодья / В.В. Ивашечкин, О.В. Немеровец, В.В. Веремениук // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 29 мая – 1 июня 2019 г. – СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2019. – Вып. 4. – С. 227–237. – EDN: YFOBXW.
13. Карпенчук, И.В. Определение параметров волны прорыва и оценка возможных последствий затопления / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2008. – № 2 (8). – С. 41–45. – EDN: SMTLOZ.
14. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения: РД 153-34.2-002-01. – Введ. 26.04.2001. – М.: Минэнерго России, 2001 – 59 с.
15. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений: утв. приказом МЧС РФ и Минтранса РФ от 2 октября 2007 г. № 528/143 // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 24.05.2025).
16. Богославчик, П.М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П.М. Богославчик // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 4. – С. 292 – 296. – DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296. – EDN: YOLTEL.
17. Ивашечкин, В.В. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В.В. Ивашечкин, П.М. Богославчик, В.В. Веремениук, О.В. Немеровец // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 276–284. – DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284. – EDN: SUFULH.
18. Гончаров, В.Л. Динамика русловых потоков / В.Л. Гончаров. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 373 с.
19. Пономарчук, К.Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины / К.Р. Пономарчук // Природообустройство. – 2011. – № 3. – С. 77–82. – EDN: OFXGYH.
20. Грушевский, М.С. Волны попусков и паводков в реках / М.С. Грушевский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 336 с.
21. Klohn-Crippen. Red River one-dimensional unsteady flow model: final report submitted to International Joint Commission. – Richmond (British Columbia), May 1999. – 88 p.
22. Ahmad, S. Comparison of one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic modeling approaches for Red River basin: final report to International Joint Commission / S. Ahmad, S.P. Simonovic. – Winnipeg (Canada), December 1999. – 52 p.
23. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1970. – 216 с.
24. Веремениук, В.В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В.В. Веремениук, В.В. Ивашечкин, О.В. Немеровец // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64, № 6. – С. 554–567. – DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567. – EDN: EIWVGT.
25. Веремениук, В.В. Приближенная методика расчета затопления поймы реки при экстремальных попусках из водохранилища в период половодья / В.В. Веремениук, В.В. Ивашечкин, Я.А. Семёнова, О.В. Немеровец // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 67–75. – DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.67. – EDN: YSGWVK.

Моделирование процессов переполнения водохранилища, размыва грунтовой плотины и развития чрезвычайной ситуации в нижнем бьефе гидроузла

Modeling of reservoir overflow processes, erosion of an earth dam and development of an emergency situation in the downstream of a hydraulic structure

Немеровец Ольга Владимировна

Белорусский национальный технический университет, кафедра «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», старший преподаватель

Адрес: пр-т Независимости, 65,
220013, г. Минск, Беларусь
Email: olganemerovets@gmail.com
SPIN-код: 5270-7307

Olga V. Nemerovets

Belarusian National Technical University,
Chair «Hydrotechnical and Power Engineering,
Water Transport and Hydraulics»,
Senior Lecturer

Address: Nezavisimosti ave., 65,
220013, Minsk, Belarus
Email: olganemerovets@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5240-3536

MODELING OF RESERVOIR OVERFLOW PROCESSES, EROSION OF AN EARTH DAM AND DEVELOPMENT OF AN EMERGENCY SITUATION IN THE DOWNSTREAM OF A HYDRAULIC STRUCTURE

Nemerovets O.V.

Purpose. Development and implementation of an integrated approach to modeling reservoir overflow processes, earth dam erosion, and emergency development in the downstream of a hydraulic structure.

Methods. Modeling processes using calculation methods including the water balance equation for assessing reservoir overflow, a two-stage process of earth dam erosion taking into account changes in its profile shape, and the Saint-Venant equation for modeling the breakthrough wave motion in the downstream.

Findings. An integrated approach has been developed to model the development of an emergency at a hydraulic structure as a result of reservoir overflow, water overflow over the crest, and earth structure erosion. Based on the obtained hydrograph of eroded discharges in the earth dam section, the parameters of the breakthrough wave, flood zones, and levels in the downstream of the hydraulic structure have been determined. The developed integrated approach was tested in the development of design documentation for the reconstruction of the hydroelectric complex in the city of Oshmyany, with modeling of reservoir overflow processes and determination of the flooding boundaries of the downstream territories depending on the different capacity of the spillway structure.

Application field of research. The scope of the research results covers several key areas related to ensuring the safety of hydraulic structures and forecasting possible emergency situations. In particular: design and operation of hydraulic structures, assessment of the stability of old hydraulic structures, and prevention of emergency situations. Assessment of potential damage to ecosystems and settlements located in risk zones. The results can also be used to develop regulatory legal acts, standards and recommendations on the safety of hydraulic structures and zoning of territories exposed to the threat of flooding.

Keywords: flow rate, flood, reservoir, pressure, water balance equation, flood hydrograph, forecast, accident, hydraulic structure, earth dam.

(The date of submitting: June 23, 2025)

REFERENCES

1. Brown E.T. Reducing risks in the investigation, design and construction of large concrete dams. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017. Vol. 9, No. 2. Pp. 197–209. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.11.002.
2. Malik L.K. *Faktyory riska povrezhdeniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Risk factors for damage to hydraulic structures]. Moscow: Nauka, 2005. 354 p. (rus). EDN: QMISRX.
3. Govorushko S.M. Vliyanie prirodnnykh protsessov na gidrotekhnicheskie sooruzheniya (soobshchenie 2) [Impact of natural processes on hydro-technical utilities (paper 2)]. *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*, 2019. No. 2 (50). Pp. 75–87. (rus). EDN: OUPGHM.
4. Dhar O.N., Rakhecha P.R., Mandal B.N., Sangam R.B. The rainstorm which caused the Morvi dam disaster in August 1979. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1981. Vol. 26, No. 1. Pp. 71–81. (fra). DOI: 10.1080/02626668109490862.
5. Vikulin A.V., Vol'fon I.F., Vikulina M.A., Dolgaya A.A. *Tsivilizatsiya glazami katastrof: prirodnykh i sotsial'nykh* [Civilization by the eyes of disasters: natural and social]: monograph. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatka State Technical University, 2016. 236 p. (rus)
6. Biscarini C. Di Francesco S., Ridolfi E., Manciola P. On the simulation of floods in a narrow bending valley: the Malpasset dam break case study. *Water*, 2016. Vol. 8, No. 11. Article 545. 19 p. DOI: 10.3390/w8110545.
7. Shcherbakov A.O., Talyzov A.A., Rumyantsev I.S., Pruchkin S.I., Buber A.L. Sovershenstvovanie upravleniya kaskadom volzhskikh vodokhranilishch na osnove gidrodinamicheskikh modeley i GIS-tekhnologiy [Improvement in management of Volga water reservoir cascade on the basis of hydrodynamic models and GIS-technologies]. *Melioration and Water Management*, 2002. No. 2. Pp. 8–12. (rus). EDN: YJFXTT.
8. Bednaruk S.E. O planirovani meropriyatiy po snizheniyu riska ushcherbov ot navodneniy [On planning measures to reduce risk of flood damage]. *Bezopasnost' energeticheskikh sooruzhenii* [Safety of energy facilities]: scientific, technical and industrial collection. Moscow: Research Institute of Energy Facilities, 2003. No. 11. Pp. 407–414. (rus)

9. Bednaruk S.E., Motovilov Yu.G. Opyt upravleniya kaskadom volzhskokamskikh vodokhranilishch s ispol'zovaniem imitatsionnykh matematicheskikh modeley v period vesennego polovod'ya [Experience in management of the Volga-Kama water reservoir cascade while using imitation mathematical models during spring flood]. *Proc. of Intern. conf. «Upravlenie vodno-resursnymi sistemami v ekstremal'nykh usloviyakh»*, Moscow, June 4–5, 2008. Moscow, 2008. 1 CD-ROM. (rus)
10. Nemerovets O.V., Ivashechkin V.V. Modelirovanie izmeneniya urovney vody v vodokhranilishche pri propuske raskhodov polovod'ya [Simulation of changes in water levels in a reservoir when the flood flow is over]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Vodnye puti i ruslovy protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey»*, Saint Petersburg, May 29–31, 2023. Saint Petersburg: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2023. Iss. 6, part 2. Pp. 99–106. (rus). EDN: IQKFFM.
11. Veremenyuk V.V., Ivashechkin V.V., Nemerovets O.V. Modelirovanie protsessa izmeneniya urovney v kaskade iz dvukh ruslovykh vodokhranilishch pri propuske polovod'ya [Modeling of process for level changes in cascade of two channel water reservoirs in case of flooding]. *Science & Technique*, 2019. Vol. 18, No. 2. Pp. 146–154. (rus). DOI: 10.21122/2227-1031-2019-18-2-146-154. EDN: ZYFGLZ.
12. Ivashechkin V.V., Nemerovets O.V., Veremenyuk V.V. Prognoz urovney v kaskade iz dvukh vodokhranilishch pri propuske raskhodov polovod'ya [Forecast of levels in a cascade of two reservoirs when passing flood discharges]. *Proc. of Intern. scientific-practical conf. «Vodnye puti i ruslovy protsessy. Gidrotekhnicheskie sooruzheniya vodnykh putey»*, Saint Petersburg, May 29 – June 1, 2019. Saint Petersburg: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 2019. Iss. 4. Pp. 227–237. (rus). EDN: YFOBWX.
13. Karpenchuk I.V., Striganova M.Yu. Opredelenie parametrov volny proryva i otsenka vozmozhnykh posledstviy zatopleniya [Determination of breakthrough wave parameters and assessment of possible consequences of flooding]. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*, 2008. No. 2 (8). Pp. 41–45. (rus). EDN: SMTLOZ.
14. *Vremennaya metodika otsenki ushcherba, vozmozhnogo vsledstvie avarii gidrotekhnicheskogo sooruzheniya: RD 153-34.2-002-01* [Temporary methodology for assessing the damage possible as a result of a breakdown of a hydraulic structure: Guidance Document 153-34.2-002-01]. Affirmed April 26, 2001. Moscow: Ministry of Energy of the Russian Federation, 2001. 59 p. (rus)
15. *Metodika opredeleniya razmera vreda, kotoryy mozhet byt' prichinen zhizni, zdorov'yu fizicheskikh lits, imushchestvu fizicheskikh i yuridicheskikh lits v rezul'tate avarii sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Methodology for determining the amount of damage that may be caused to the life, health of individuals, property of individuals and legal entities as a result of an accident at shipping hydraulic structures]: approved by order of the EMERCOM of Russia and the Ministry of Transport of the Russian Federation dated October 2, 2007 No. 528/143. Konsul'tantPlyus. Russia: reference legal system (accessed: May 24, 2025). (rus)
16. Bogoslavchik P.M. Raschetnaya model' razmyva gruntovykh plotin pri perelive [Calculation model of soil dam wash-away due to overflow]. *Science & Technique*, 2018. Vol. 17, No. 4. Pp. 292–296. (rus). DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296. EDN: YOLTEL.
17. Ivashechkin V.V., Bohaslauchyk P.M., Veremenyuk V.V., Nemeravets O.V. Teoreticheskie osnovy rascheta razmyva gruntovykh plotin pri perelive vody cherez greben' [Theoretical foundations for calculating the erosion of soil dams during overflow of water over the ridge]. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2022. Vol. 65, No. 3. Pp. 276–284. (rus). DOI: 10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284. EDN: SUFULH.
18. Goncharov V.L. *Dinamika ruslovykh potokov* [Channel flow dynamics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1962. 373 p. (rus)
19. Ponomarchuk K. R. Otsenka parametrov razvitiya prorana pri razrushenii gruntovoy plotiny [Assessment of parameters of closure channel development at destruction of earth dams]. *Prirodoobustroystvo*, 2011. No. 3. Pp. 77–82. (rus). EDN: OFXGYH.
20. Grushevskiy M.S. *Volny popuskov i pavadkov v rekakh* [Waves of releases and floods in rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 336 p. (rus)
21. Klohn-Crippen. *Red River one-dimensional unsteady flow model*: final report submitted to International Joint Commission. Richmond (British Columbia), May 1999. 88 p.
22. Ahmad S., Simonovic S.P. *Comparison of one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic modeling approaches for Red River basin*: final report to International Joint Commission. Winnipeg (Canada), December 1999. 52 p.
23. Al'tshul' A.D. *Gidravlicheskie soprotivleniya* [Hydraulic resistance]. Moscow: Nedra, 1970. 216 p. (rus)
24. Veremenyuk V.V., Ivashechkin V.V., Nemeravets O.V. Modelirovanie neustanovivshegosya dvizheniya v nizhnem b'efe gidrouzla pri razrushenii gruntovoy plotiny [Simulation of unsteady movement in the

- downstream of a hydroelectric complex during the destruction of a soil dam]. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2021. Vol. 64, No. 6. Pp. 554–567. (rus). DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567. EDN: EIWVGT.
25. Veremenyuk V.V., Ivashechkin V.V., Semenova Ya.A., Nemeravets O.V. Priblizhennaya metodika rascheta zatopleniya poymy reki pri ekstremal'nykh popuskakh iz vodokhranilishcha v period polovod'ya [Approximate method of calculation of inundation of river valley at extreme releases from water reservoir in the period of the high water]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 1. Pp. 67–75. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-1.67. EDN: YSGWVK.

Copyright © 2025 Nemerovets O.V.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.