

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567>

УДК 627.8.034

Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины

В. В. Веремениук¹⁾, В. В. Ивашечкин¹⁾, О. В. Немеровец¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. В Республике Беларусь создано 153 водохранилища. В период прохождения по реке катастрофических паводков и половодий возникает риск переполнения водохранилищ, перелива этих масс через гребень земляной плотины и затопления значительных территорий. Разрушение плотины сопровождается образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Волна прорыва и катастрофическое затопление местности являются основными разрушающими факторами гидродинамических аварий. Расчеты по определению параметров волны 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. Необходимо оценить зону затопления и гидродинамические параметры потока: максимальные значения глубины и скорости потока в зоне катастрофического затопления, время от начала аварии до прихода в данную точку местности прорывной волны, продолжительность затопления, границы зоны катастрофического затопления, гидрограф расхода в створе размываемой плотины и график падения уровня верхнего бьефа. Степень достоверности прогнозных расчетов определяется точностью двух применяемых математических моделей: 1) размыва плотины; 2) движения волны прорыва. Анализ показывает, что для расчета движения волны прорыва во всех случаях применяются гидродинамические модели, основанные на одно- и двумерных уравнениях Буссинеска – Сен-Венана. Параметры волны – ее высота и скорость распространения – полностью зависят от гидрографа расхода в створе размываемой плотины, который, в свою очередь, определяется динамикой ее размыва. Цель исследования – разработка методики расчета затопления нижнего бьефа в результате разрушения грунтовой плотины.

Ключевые слова: расход, паводок, водохранилище, плотина, размыв, проран, перелив, затопление, гидродинамическая авария, волна прорыва, гидрограф расхода

Для цитирования: Веремениук, В. В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В. В. Веремениук, 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>

Адрес для переписки

Ивашечкин Владимир Васильевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Address for correspondence

Ivashchkin Vladimir V.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-30-13
fes@bntu.by

Simulation of Unsteady Movement in the Downstream of a Hydroelectric Complex During the Destruction of a Soil Dam

V. V. Veremenyuk¹⁾, V. V. Ivashechkin¹⁾, O. V. Nemeravets¹⁾

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

Abstract. 153 reservoirs have been created in the Republic of Belarus. During the period of passing catastrophic floods and high waters along the river, there is a risk of overflowing reservoirs, overflow of water masses through the crest of an earthen dam and flooding of significantly large areas. The destruction of the dam is accompanied by the formation of a breach and the outflow through it of an unsteady flow of water in the form of a breakthrough wave into the downstream. A breakthrough wave and catastrophic flooding of the area are the main destructive factors of hydrodynamic accidents. Calculations to determine parameters of the wave and to assess the possible consequences of flooding are necessary when drawing up operational-and-tactical plans for the prevention and elimination of emergencies in case of accidents at retaining structures, determining the probable damage from flooding of the territory in the downstream of a hydraulic structure as a result of the passage of a breakthrough wave. It is necessary to assess the flooding zone and the hydrodynamic parameters of the flow, viz. the maximum values of the depth and velocity of the flow in the zone of catastrophic flooding, the time from the beginning of the accident to the arrival of a breakthrough wave at the particular point of the terrain, the duration of flooding, the boundaries of the zone of catastrophic flooding, the hydrographic flow rate in the section of the eroded dam and the graph of the fall headwater level. The degree of reliability of predictive calculations is determined by the accuracy of the two applied mathematical models, viz.: 1) erosion of the dam; 2) the movement of the breakout wave. The analysis of the applied mathematical models shows that in all cases the hydrodynamic models based on the one- and two-dimensional equations of Boussinesq – Saint-Venant are used to calculate the movement of the breakthrough wave. Wave parameters, i. e. wave height and speed of its propagation, completely depend on the hydrograph of the discharge in the section of the eroded dam, which, in its turn, is determined by the dynamics of its erosion. The aim of the work is to develop a methodology for calculating the flooding of the downstream as a result of the destruction of a soil dam.

Keywords: discharge, flood, water reservoir, dam, erosion, breach, overflow, flooding, hydrodynamic accident, breakthrough wave, hydrograph of the discharge

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (6), 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567> (in Russian)

Введение

В Республике Беларусь создано 153 водохранилища с общей площадью зеркала 822 км². Полезный объем водохранилищ 1,20 км³, полный объем 2,95 км³. Недавно построены три новых водохранилища (Гродненская, Витебская и Полоцкая ГЭС). При эксплуатации водохранилища возникает ряд проблем, связанных с процессами водообмена [1] и абразией берегов [2], но самую серьезную опасность несет риск переполнения водохранилищ, перелива водных масс через гребень земляной плотины и затопле-

ния значительных территорий при прохождении по реке катастрофических паводков и половодий. Разрушение плотины сопровождается образованием прорана и истечением через него в нижний бьеф неустановившегося потока воды в виде волны прорыва. Волна прорыва и катастрофическое затопление местности – основные разрушающие факторы гидродинамических аварий.

В Республике Беларусь прогнозные расчеты параметров волны прорыва и зон вероятного затопления при разрушении плотин производятся при разработке проектной документации для вновь строящихся и реконструируемых плотин и водохранилищ [3]. Также прогнозные расчеты применяются при разработке оценки воздействия на окружающую среду для объектов, к которым относятся искусственные водоемы с площадью водной поверхности более 50 га, плотины высотой 2 м и более [4, 5].

Прогнозирование развития и масштабов возможных гидродинамических аварий на водоподпорных гидротехнических сооружениях (ГТС) включает в себя 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 [6]. 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, установлении вероятного ущерба от затопления территории в нижнем бьефе гидротехнического сооружения в результате прохождения волны прорыва [7–9]. Во всех перечисленных случаях нужно оценить зону затопления и гидродинамические параметры потока: максимальные значения глубины и скорости потока в зоне катастрофического затопления, время от начала аварии до прихода в данную точку местности прорывной волны, продолжительность затопления, границы зоны катастрофического затопления, гидрограф расхода в створе размываемой плотины и график падения уровня верхнего бьефа.

Степень достоверности прогнозных расчетов определяется точностью двух применяемых математических моделей: 1) размыва плотины; 2) движения волны прорыва. Анализ показывает, что для расчета движения волны прорыва во всех случаях используются гидродинамические модели, основанные на одно- и двумерных уравнениях Буссинеска – Сен-Венана [7–9]. В рамках поставленных задач они дают правдоподобные результаты, поэтому более точное решение с помощью 3D гидродинамических моделей, основанных на полной системе уравнений Навье – Стокса, здесь не требуется [10–11]. Параметры волны – высота и скорость распространения – полностью зависят от гидрографа расхода в створе размываемой плотины, который, в свою очередь, определяется динамикой размыва плотины. В то же время 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 [7–9].

Цель исследований – разработка методики моделирования процесса затопления нижнего бьефа.

Моделирование течения в нижнем бьефе

Решение поставленной задачи заключается в моделировании потока в нижнем бьефе с помощью уравнений Сен-Венана. Для этого необходимо знать граничные (на границе прорана и нижнего бьефа) и начальные условия для скорости и глубины потока. Граничные условия можно получить только в результате решения задачи о разрушении грунтовой плотины [12].

Система уравнений Сен-Венана для течения воды в открытом русле произвольного профиля имеет вид [13–15]:

$$\begin{cases} \alpha \left[\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{W} \right) \right] + gW \left(\frac{\partial h}{\partial x} + i_f - i_p \right) = 0; \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где α – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение скоростей по живому сечению потока; t – время, с; x – протяженность по водотоку, м; $Q(x, t)$ – расход воды, м³/с; $W(x, t)$ – площадь живого сечения потока, находящегося на расстоянии x от начала потока в момент времени t , м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h(x, t)$ – глубина, м; $i_f(x, t)$ – уклон трения потока; i_p – уклон дна реки в нижнем бьефе.

В [13] отмечается, что имеется достаточно удовлетворительная связь α с коэффициентом шероховатости по Маннингу: $\alpha = 14,8n + 0,884$, причем если в результате расчета по этой формуле $\alpha > 2$, рекомендуется принимать $\alpha = 2$.

Скорость потока находим по формуле

$$v(x, t) = \frac{Q(x, t)}{W(x, t)}. \quad (2)$$

Уклон трения потока i_f определим из формулы Шези

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

где C – скоростной коэффициент Шези, вычисленный по формуле Маннинга $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, м^{0,5}/с; $R = \frac{W(x, h)}{P(x, h)}$ – гидравлический радиус живого сече-

ния потока, находящегося на расстоянии x от начала потока и имеющего глубину h , м; $P(x, h)$ – смоченный периметр сечения, м; n – коэффициент шероховатости дна русла [16], $\text{с/м}^{1/3}$.

С учетом (2) и (3) система (1) преобразуется к виду:

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

Дальнейшие исследования будем проводить с учетом системы (4).

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 [17], сделаем определенные предположения о поверхности в нижнем бьефе.

1. Можно выделить некое прямоугольное русло предполагаемого потока, т. е. указать средние значения его ширины B_p , высоты берега h_6 , уклона дна i_p , шероховатости n (в [17], в отличие от нашего случая, речь идет о пойме конкретной реки и все эти параметры известны). 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 русла является кусочно-линейной. Это означает, что на каждой стороне долины (левой и правой) относительно выбранного русла можно выделить n линий уровня $L_0^{n(n)}, \dots, L_n^{n(n)}$ (где нижний индекс – номер линии уровня, верхний – левая или правая сторона), образованных точками с равными отметками высот $h_6 = h_0 < h_1 < \dots < h_n$ относительно дна предполагаемого русла (каждая линия $L_k^{n(n)}$ соответствует высоте h_k , а $L_0^{n(n)}$ – линии берега); на каждом из участков между соседними линиями $L_k^{n(n)}$ и $L_{k+1}^{n(n)}$ берег является кусочно-линейной поверхностью, направляющими линиями которой служат ограничивающие этот участок линии уровня, а образующими – прямые, соединяющие точки линий уровня, которые лежат в плоскости $s = s_0$, где s – расстояние вдоль русла потока до плотины (плоскость перпендикулярна руслу и находится на расстоянии s_0 от плотины). Высказанное предположение поясняет рис. 1.

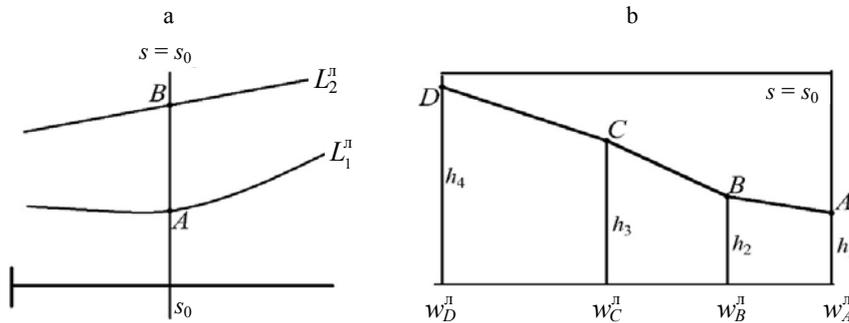


Рис. 1. Схема участка (левого) долины: а – план; б – поперечный разрез
Fig. 1. Diagram of the (left) valley section: a – schedule; b – cross section

На рис. 1а представлен план участка, где плоскость $s = s_0$ пересекает линии уровней L_1^n и L_2^n , соответствующие высотам h_1 и h_2 , в точках A и B . Следовательно, отрезок AB считается образующей береговой поверхности на этом участке (между линиями уровней L_1^n и L_2^n). На рис. 1б показано сечение береговой поверхности плоскостью $s = s_0$, где $h_1 < h_2 < h_3 < h_4$ – высоты относительно дна русла точек A , B , C и D соответственно, $w_A^n < w_B^n < w_C^n < w_D^n$ – 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 погрешность будет уменьшаться с увеличением числа линий уровня и более точным заданием этих линий.

Задавать линии уровня можно таблично [17]. Каждая строка таблицы содержит числа $s_k, w_{k,1}^{n(n)} < w_{k,2}^{n(n)} < \dots < w_{k,m}^{n(n)}$ (где s_k – расстояние по руслу от плотины; $w_{k,m}^{n(n)}$ – расстояние от берега русла до точки пересечения m -й линии уровня, соответствующей глубине h_m , с плоскостью $s = s_k$ (рис. 1б)). Значение $w_{k,0}^{n(n)} = 0$ для любого k . Сказанное иллюстрирует рис. 2, где приведены пять линий уровня для обоих берегов ниже створа плотины водохранилища Клястицы на р. Ница (Россонский район Витебской области).

Рассмотрим процедуру определения площади живого сечения $W(x, h)$, а также смоченного периметра $P(x, h)$ на расстоянии x от плотины при глубине потока h при сделанных предположениях о структуре береговой поверхности (считаем, что линии уровня заданы таблично). Приведем только конечные результаты, опуская несложные промежуточные выкладки.

Итак, заданы расстояние x по руслу от плотины и глубина потока h .

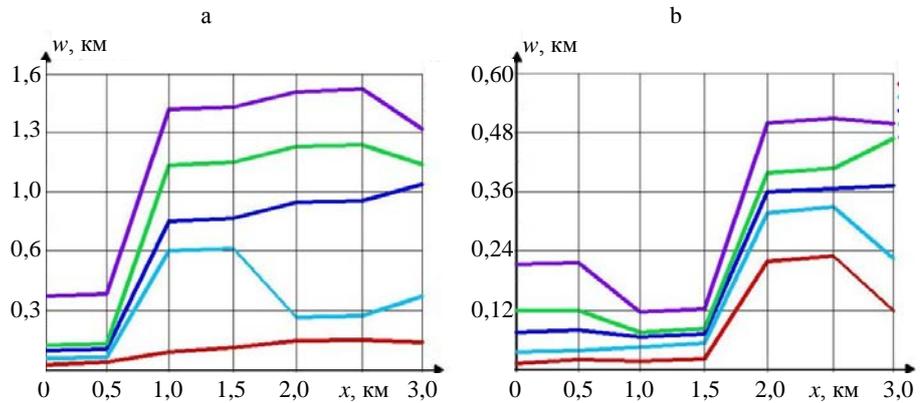


Рис. 2. Линии уровня, заданные таблично через 500 м, для береговой поверхности за плотиной водохранилища Клястицы на реке Ница: а – левый берег; б – правый берег; — $h = 2,5$ м; — $h = 5,0$ м; — $h = 7,5$ м; — $h = 10,0$ м; — $h = 15,0$ м

Fig. 2. Level lines, set in a table at intervals of 500 m, for the coastal surface behind the dam of the Klyastitsy reservoir on the Nisha river: а – left bank; б – right bank; — $h = 2.5$ m; — $h = 5.0$ m; — $h = 7.5$ m; — $h = 10.0$ m; — $h = 15.0$ m

Находим целый параметр k из условия: отрезок $[s_k; s_{k+1}]$ содержит точку x . Определяем расстояния $xw_{k,1}^{n(n)} < xw_{k,2}^{n(n)} < \dots < xw_{k,n}^{n(n)}$ до русла для точек пересечения линий уровня с плоскостью $s = x$

$$xw_{k,m}^{n(n)} = w_{k,m}^{n(n)} + \frac{w_{k+1,m}^{n(n)} - w_{k,m}^{n(n)}}{s_{k+1} - s_k} (x - s_k), \quad m = 1, \dots, n.$$

Значения $xw_{k,0}^{n(n)} = 0$ для любого k (это значит, что точки $(x; xw_{k,0}^{n(n)})$ лежат на берегу русла).

Далее находим целый параметр m из условия: отрезок $[h_m; h_{m+1}]$ содержит точку h . Определяем расстояние $w_h^{n(n)}$ до берега выбранного русла от точки, находящейся на берегу на расстоянии x от плотины, на высоте h от дна русла. Если $h \leq h_0$, то $w_h^{n(n)} = 0$. Пусть $h > h_0$. Тогда

$$w_h^{n(n)} = xw_{k,m}^{n(n)} + w_0 = xw_{k,m}^{n(n)} + \frac{h - h_m}{h_{m+1} - h_m} (xw_{k,m+1}^{n(n)} - xw_{k,m}^{n(n)}).$$

Теперь находим площадь живого сечения $W(x, h)$ и смоченный периметр $P(x, h)$. Если $h \leq h_0$, то $W(x, h) = B_p h$ и $P(x, h) = B_p + 2h$.

Пусть $h > h_0$. Тогда:

$$W(x, h) = \left(w_h^n + B_p + w_h^n \right) h - \sum_{i=1}^m \frac{h_i - h_{i-1}}{2} \left(xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n + xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n \right) - \frac{h - h_m}{2} \left(w_h^n - xw_{k,m}^n + w_h^n - xw_{k,m}^n \right); \quad (5)$$

$$P(x, h) = B_p + 2h_6 + \sum_{i=1}^m \sqrt{\Delta h_i^2 + (xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n)^2} + \sqrt{\Delta h_m^2 + (w_h^n - xw_{k,m}^n)^2} + \sum_{i=1}^m \sqrt{\Delta h_i^2 + (xw_{k,i}^n - xw_{k,i-1}^n)^2} + \sqrt{\Delta h_m^2 + (w_h^n - xw_{k,m}^n)^2}. \quad (6)$$

Все приведенные выше вычисления проиллюстрированы на рис. 3.

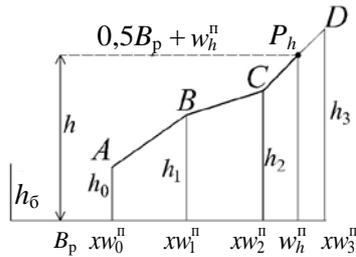


Рис. 3. Сечение правого берега плоскостью $s = x$
Fig. 3. Section of the right bank by schedule $s = x$

При использовании данной методики следует выбирать максимальную высоту h_n для последней линии уровня так, чтобы она была больше предполагаемой максимальной глубины затопления.

Граничные и начальные условия для системы (4). Решение задачи моделирования разрушения плотины на каждом из этапов позволяет определить расход $Q(t)$ на границе нижнего бьефа, что, в свою очередь, дает возможность найти функции скорости $v_0(t)$ и глубины $h_0(t)$ потока, возникающего на границе $x = 0$ в нижнем бьефе. Для этого используем формулы Шези, (2), (5) и (6) и решаем систему уравнений:

$$\begin{cases} Q(t) = v_0(t)W(0, h_0(t)); \\ Q(t) = W(0, h_0(t))C\sqrt{Ri_p}, \end{cases} \quad (7)$$

где R – гидравлический радиус начального сечения, м; i_p – уклон дна реки в нижнем бьефе; C – коэффициент Шези, $m^{0.5}/c$.

Таким образом, задаем условия для системы (4) на границе $x = 0$:

$$\begin{cases} v(0, t) = v_0(t); \\ h(0, t) = h_0(t). \end{cases} \quad (8)$$

Как показали вычисления, проведенные по методике, описанной в [12], для грунтовой плотины водохранилища Клястицы на первом этапе моделирования разрушения плотины (размыв гребня плотины) поступающий расход в нижний бьеф, как правило, вначале мал (менее $2 \text{ м}^3/\text{с}$) и медленно меняется, а время этапа достаточно продолжительное. Поэтому предполагаем, что на данном этапе происходит равномерное движение потока по выбранному руслу в нижнем бьефе. Тогда в качестве начальных условий полагаем:

$$\begin{cases} v(x, t_0) \equiv v_n; \\ h(x, t_0) \equiv h_n, \end{cases} \quad (9)$$

где t_0 – наименьший момент времени на первом этапе, для которого $Q(t_0) > 1$; h_n, v_n – определяются из системы (7) по расходу $Q(t_0)$.

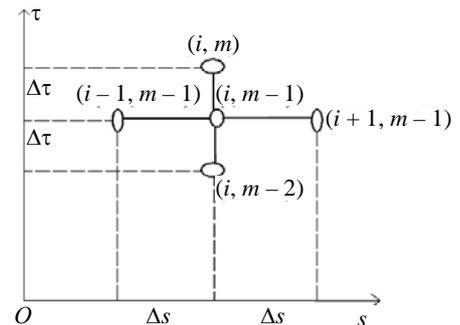
Приближенное решение системы (4). Уравнения (4) являются нелинейными с переменными коэффициентами, так что отыскание их интегралов представляет большие математические трудности [18]. Решение (4), (8), (9) ищем численными методами, а именно методом сеток, используя рекомендации, изложенные в [13, 18, 19].

Поскольку (5), (8), (9) требуется решать для достаточно больших отрезков как по переменной t (несколько суток), так и по переменной x (несколько километров), для более эффективного применения численных методов в системе (1) имеет смысл сделать замену времени и пространственной переменной [19]: $\tau = \frac{t}{M}, s = \frac{x}{Z}, h_1(s, \tau) = h(x, t), v_1(s, \tau) = v(x, t), W_1(s, \tau) = W(x, t)$, где M, Z – достаточно большие числа (например, $Z = 10 \cdot 1000$ – количество метров в 10 км; $M = 120 \cdot 3600$ – количество секунд в пяти сутках).

В качестве разностной схемы, аппроксимирующей дифференциальные уравнения (4), используем явную разностную схему. Во многих источниках (например, в [13]) указывается, что для уравнений Сен-Венана более рационально использовать неявную схему, но для ее применения требуется знание граничных условий, кроме участка границы $x = 0$, как минимум еще и на конечном участке $x = x_{\max}$ изучаемого течения, что для рассматриваемой задачи, очевидно, невозможно.

Разностная схема строится с использованием шаблона, приведенного на рис. 4.

Рис. 4. Шаблон для разностной схемы:
($i\Delta s, m\Delta\tau$) – координаты узлов сетки,
где $i = 0, 1, 2, \dots; m = 0, 1, 2, \dots; \Delta s$ – шаг сетки
по оси Os ; $\Delta\tau$ – шаг сетки по оси $O\tau$
Fig. 4. Template for the difference scheme:
($i\Delta s, m\Delta\tau$) – coordinates of grid nodes,
here $i = 0, 1, 2, \dots; m = 0, 1, 2, \dots; \Delta s$ – grid step
along the axis Os ; $\Delta\tau$ – grid step along the axis $O\tau$



Для произвольной функции $f(s, \tau)$ обозначим $f_i^m = f(i\Delta s, m\Delta\tau)$ – ее значения в узлах сетки и аппроксимируем производные в узлах ($i\Delta s, m\Delta\tau$) соотношениями:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial \tau} \right|_{(i\Delta s, m\Delta \tau)} \rightarrow \frac{(1+d)f_i^m - (1+2d)f_i^{m-1} + df_i^{m-2}}{\Delta \tau}, \quad m > 1; \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial f}{\partial s} \right|_{(i\Delta s, m\Delta \tau)} \rightarrow \frac{f_{i+1}^{m-1} - f_{i-1}^{m-1}}{2\Delta s}, \quad i \geq 1,$$

где $d \in [0; 1]$ – некоторый задаваемый параметр (имеет смысл брать $d = 0,5$, поскольку в этом случае приближение для $\frac{\partial f}{\partial \tau}$ имеет второй порядок точности по $\Delta \tau$; в итоге оба используемых приближения будут иметь второй порядок точности по соответствующим приращениям переменных). В [13] рекомендуется использовать второе из соотношений (10).

При решении систем разностных уравнений следует использовать тот факт, что функция $W = W(x, h)$ при любом x монотонно возрастает по h , потому уравнение однозначно разрешимо относительно h , т. е. по значению W всегда можно однозначно определить величину $h = W^{-1}(x, W)$ и по этому значению, используя (6), найти гидравлический радиус $R = R(x, W)$.

Пример расчета. С использованием методики, описанной в [12], приведем результаты моделирования затопления территории нижнего бьефа при образовании волны прорыва вследствие разрушения однородной земляной плотины на водохранилище Клястицы на р. Нища.

Исходные данные:

- для плотины: отметка гребня плотины $Y_{гр} = 5,5$ относительно отметки гребня водосброса; ширина гребня плотины $b_{гр} = 6$ м; диаметр частиц грунта тела плотины $d = 0,5$ мм; среднее заложение откосов плотины $\bar{m}' = 2,75$; плотность грунта тела плотины $\rho = 1600$ кг/м³; гидравлическая крупность $w = 0,05$ м/с; постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта, $\beta = 2$; коэффициент расхода для первого этапа $m_1 = 0,35$; коэффициент расхода для второго и третьего этапов $m_2 = 0,5$; приточность $Q_0 = 174$ м³/с; параметр турбулентности $\varphi = 1$; коэффициент подтопления $\sigma_{п} = 0,6$; коэффициент Кориолиса $\alpha = 1,4$; начальная ширина прорана $B_{пр} = 10$ м;

- для русла за плотинной (средние значения): ширина русла $B_p = 15$ м; высота берега $h_6 = 1,2$ м; коэффициент шероховатости русла $n = 0,03$; средний уклон русла $i_p = 0,0004$. Линии уровня береговой поверхности заданы таблично и проиллюстрированы на рис. 2;

- вычисленные показатели: коэффициент шероховатости поверхности низового откоса, найденный по формуле Гончарова, $n_1 = 0,0125$; коэффициент α [13] в системе (4): $\alpha = 14,8n + 0,884 = 1,328$.

Результаты расчета параметров волны в нижнем бьефе представлены в виде кривых изменения во времени высоты волны $h = h(t)$ относительно дна выбранного русла, скорости волны $v = v(t)$, ширины затопления поймы

левого $w^л = f_л(t)$ и правого $w^п = f_п(t)$ берегов в разных створах русла (рис. 5), находящихся на расстоянии s от плотины.

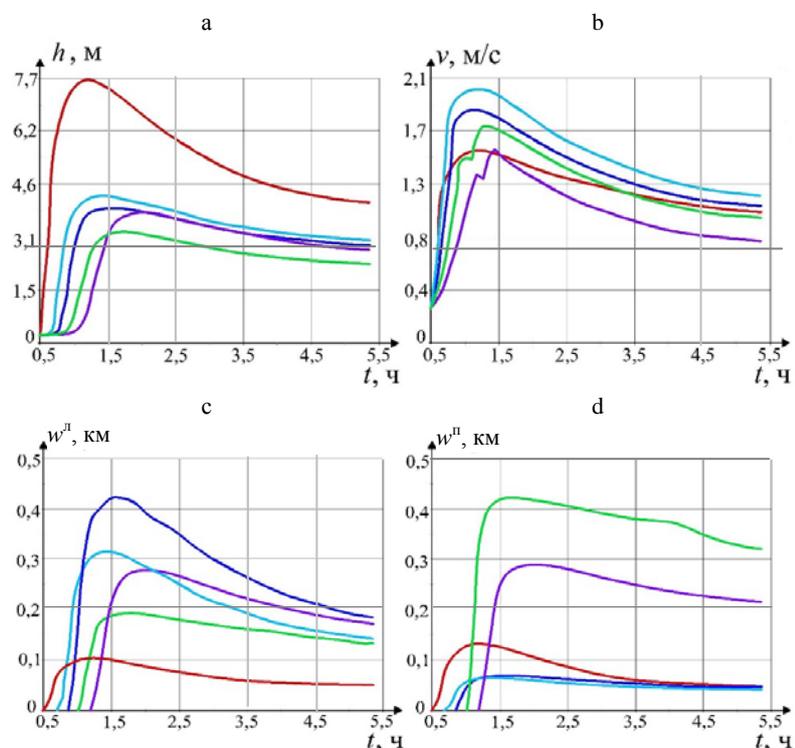


Рис. 5. Результаты моделирования течения в нижнем бьефе: а – высота волны; б – скорость волны; с, d – ширина затопления левой и правой пойм; — $s = 0$; — $s = 0,8$ км; — $s = 1,4$ км; — $s = 2,2$ км; — $s = 3,0$ км

Fig. 5. Downstream flow simulation results: а – wave height, m; б – wave speed, m/s; с, d – flood width of the left and right floodplains; — $s = 0$; — $s = 0.8$ km; — $s = 1.4$ km; — $s = 2.2$ km; — $s = 3.0$ km

Обработав полученные результаты и нанеся их на спутниковые карты (в пиковый момент времени $t = 1,5$ ч), можно оценить границы затопления, а также отследить объекты, попадающие в эту зону. Расчетные границы зоны затопления нижнего бьефа Клястицкого гидроузла показаны на рис. 6.



Рис. 6. Расчетные границы зоны затопления территории нижнего бьефа водохранилища Клястицы при разрушении плотины

Fig. 6. Estimated zones of flooding of the territory of the lower pool of the Klyastitsy reservoir during the destruction of the dam

Анализ рис. 6 показал, что в зону затопления попали северная окраина аг. Клястицы и д. Заборье, а также участок шоссе между ними.

ВЫВОДЫ

1. Создана методика расчета зоны затопления территории ниже земляной плотины водохранилища при ее размыве, позволяющая рассчитать скорость и глубину волны прорыва, оценить границы зоны затопления территории нижнего бьефа, глубину и время стояния паводковых вод, а также уровни воды в верхнем бьефе гидроузла во времени и скорость развития прорана. Исходными данными являлись параметры плотины, гидрологические данные, линии уровня речной долины реки.

2. Методика расчета основана на предварительном решении численным методом системы уравнений, описывающих размыв грунтовой плотины [12], что позволяет получить гидрограф расхода в створе размываемой плотины, а также граничные и начальные условия для скорости и глубины потока в этом створе. Решение системы уравнений Сен-Венана дает возможность определить параметры волны прорыва в нижнем бьефе гидроузла. Разработана компьютерная программа. Приведен пример расчета.

3. Предлагаемую методику можно применять для оценки ущерба от затопления территорий, а также при составлении оперативно-тактических планов по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций при авариях на подпорных сооружениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обухов, Е. В. Исследование влияния водности года на внешний водообмен Днепро-дзержинского водохранилища в условиях изменения климата / Е. В. Обухов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 4. С. 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388>.
2. Левкевич, В. Е. Закономерности развития береговых процессов на водохранилищах гидроэлектростанций Беларуси / В. Е. Левкевич // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2018. Т. 61, № 5. С. 463–478. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-463-478>.
3. Правила определения количественных и качественных характеристик водного режима при создании плотин и водохранилищ на реках: ТКП 17.06-06–2012 (02120). Минск: Минприроды, 2012. 40 с.
4. О государственной экологической экспертизе, стратегической экологической оценке и оценке воздействия на окружающую среду: Закон Респ. Беларусь от 18 июля 2016 г. № 399-3 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь, 21.07.2016, 2/2397.
5. Пособие по проведению оценки воздействия на окружающую среду водохранилищных ГЭС / Концерн «Белэнерго». Минск, 2005. 68 с.
6. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования: ГОСТ Р 22.1.11–2002. М.: Изд-во стандартов, 2002. 15 с.
7. Карпенчук, И. В. Определение параметров волны прорыва и оценка возможных последствий затопления / И. В. Карпенчук, М. Ю. Стриганова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Респ. Беларусь. 2008. № 2. С. 41–45.

8. Временная методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения: РД 153-34.2-002-01. М.: М-во энергетики Рос. Федерации, 2001. 59 с.
 9. Методика определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии судоходных гидротехнических сооружений: приказ МЧС и Минтранса Рос. Федерации от 2 октября 2007 г. № 528/143.
 10. Компьютерное моделирование прохождения прорывных и паводковых волн по речной пойме: гидравлические параметры, безопасность, оперативное управление / А. Л. Бубер [и др.] // Актуальные проблемы гражданской защиты: XI Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций: тезисы докладов. М., 2006. С. 57.
 11. Волюнов, М. А. Результаты трехмерного моделирования волны прорыва вблизи прорана / М. А. Волюнов, И. В. Гугушвили // Природообустройство. 2011. № 2. С. 38–42.
 12. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 4. С. 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>.
 13. Грушевский, М. С. Волны попусков и паводков в реках / М. С. Грушевский. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 336 с.
 14. Klohn-Crippen. Red River One-Dimensional Unsteady Flow Model: Final Report Submitted to International Joint Commission. Richmond (British Columbia), 1999. 88 p.
 15. 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: University of Manitoba, 1999. 52 p.
 16. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. М.: Недра, 1970. 216 с.
 17. Приближенная методика расчета затопления поймы реки при экстремальных попусках из водохранилища в период половодья / В. В. Вереме́нюк [и др.] // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2018. Т. 2, № 1. С. 67–74.
 18. Вереме́нюк, В. В. Расчет параметров волны половодья в реке ниже водохранилища / В. В. Вереме́нюк, В. В. Ива́шечкин // Мелиорация. 2016. № 1. С. 26–31.
 19. Турчак, Л. И. Основы численных методов / Л. И. Турчак. М.: Наука, 1987. 320 с.
- Поступила 07.04.2020 Подписана в печать 18.06.2021 Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Obukhov E. V. (2017) A Study of the Influence of the Yearlong Water Content on the External Water Exchange in Dneprodzerzhinsk Reservoir under Conditions of Climate Change. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (4), 380–388. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-380-388> (in Russian).
2. Levkevich V. E. (2018) Regularities of the Development of Coastal Processes on Water Reservoirs of Hydroelectric Power Plants of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 61 (5), 463–478. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-463-478> (in Russian).
3. TCP 17.06-06–2012 (02120). *Rules for Determining the Quantitative and Qualitative Characteristics of the Water Regime when Creating Dams and Reservoirs on Rivers*. Minsk, Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2012. 40 (in Russian).
4. Law of the Republic of Belarus of July 18, 2016 No 399-3 “On State Environmental Expertise, Strategic Environmental Assessment and Environmental Impact Assessment”. *National Legal Portal of the Republic of Belarus*, 21.07.2016, 2/2397 (in Russian).
5. Belenergo Concern (2005) *A Guide for Assessing the Environmental Impact of Reservoir Hydropower Plants*. Minsk. 68 (in Russian).

6. State Standard R 22.1.11–2002. *Safety in Emergencies. Monitoring the State of Water-Retaining Hydraulic Structures (Dams) and Predicting the Possible Consequences of Hydrodynamic Accidents on Them. General Requirements*. Moscow, Izdatel'stvo Standartov Publ. 2002. 15 (in Russian).
7. Karpenchuk I. V., Striganova M. Yu. (2008) Determining the Parameters of the Breakout Wave and Assessment of the Possible Consequences of Flooding. *Vestnik Komandno-Inzhenerenogo Instituta MChS Respubliki Belarus'* [Vestnik of the Institute for Command Engineers of the MES of the Republic of Belarus], (2), 41–45 (in Russian).
8. Guidance Document 153-34.2-002-01. *Temporary Methodology for Assessing the Damage that is Possible as a Result of a Breakdown of a Hydraulic Structure*. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, 2001. 59 (in Russian).
9. Methodology for Determining the Amount of Harm that Can be Caused to the Life, Health of Individuals, Property of Individuals and Legal Entities as a Result of an Accident of Navigable Hydraulic Structures. Order of the Ministry of Emergency Situations and Ministry of Transport of the Russian Federation of October 2, 2007, No 528/143. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=237379> (in Russian).
10. Buber A. L., Volynov M. A., Gugushvili I. V., Troshina M. V. (2006) Computer Simulation of the Passing of Breakthrough and Flood Waves along the River Floodplain: Hydraulic Parameters, Safety, Operational Control. *Aktual'nye Problemy Grazhdanskoi Zashchity: XI Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. po Problemam Zashchity Naseleniya i Territorii ot Chrezvychainykh Situatsii: Tezisy Dokladov* [Actual Problems of Civil Protection: XI International Scientific and Practical Conference on the Problems of Protecting Population and Territories from Emergency Situations. Abstracts of Papers]. Moscow, 57 (in Russian).
11. Volynov M. A., Gugushvili I. V. (2011) Results of 3D Modeling of the Breakout Wave near the Breach. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], (2), 38–42 (in Russian).
12. Bohaslauchyk P. M. (2018) Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. *Nauka i Tehnika = Science and Technique*, 17 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296> (in Russian).
13. Grushevskii M. S. (1989) *Waves of Releases and Floods in Rivers*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. 336 (in Russian).
14. Klohn-Crippen Consultants Ltd (1999) *Red River One-Dimensional Unsteady Flow Model: Final Report Submitted to International Joint Commission*. Richmond (British Columbia). 88.
15. Ahmad S., Simonovic S. P. (1999) *Comparison of One-Dimensional and Two-Dimensional Hydrodynamic Modeling Approaches for Red River Basin, Final Report to International Joint Commission*. Winnipeg, University of Manitoba. 52.
16. Al'tshul' A. D. (1970) *Hydraulic Resistance*. Moscow, Nedra Publ. 216 (in Russian).
17. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Semenova Ya. A., Nemeravets O. V. (2018) Approximate Method of Calculation of Inundation of River Valley at Extreme Releases from Water Reservoir in the Period of the High Water. *Vestnik Universiteta Grazhdanskoi Zashchity MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*, 2 (1), 67–74 (in Russian).
18. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V. (2016) Calculation of the Flood Wave in the River Below the Reservoir. *Melioratsiya = Land Reclamation*, (1), 26–31 (in Russian).
19. Turchak L. I. (1987) *Fundamentals of Numerical Methods*. Moscow, Nedra Publ. 320 (in Russian).