

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Стриганова М.Ю., к.т.н.

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: mail@kii.gov.by

При чрезвычайных ситуациях на водных объектах напорного фронта особенностью разрушения гидротехнических сооружений является образование волны прорыва. В результате гидродинамического моделирования неустойчивого движения потока при разрушении плотины и образовании волны прорыва и экспериментальных исследований в лабораторном призматическом лотке разработана методика прогнозного расчета динамики параметров волны прорыва, позволяющая построить график прохождения волны прорыва по водотоку и определить зоны затопления, что позволяет повысить эффективность мероприятий по защите населения и объектов при гидродинамических авариях.

In emergency situations on the water bodies waterfront feature of the destruction of hydraulic structures is the formation of waves breaking. As a result, simulation of unsteady flow in the destruction of the dam and the formation of waves breaking and experimental studies in laboratory prismatic tray developed a method of forecasting the dynamics parameters of the wave break, which allows to plot the passage of waves breaking on the watercourse and to determine the flood zone, thus enhancing the effectiveness of measures to protect people and objects in the hydrodynamic accidents.

(Поступила в редакцию 17 января 2012 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Конец XX и начало XXI века характеризуется в истории развития человеческого общества опасным ростом количества и масштабов различных аварий и катастроф. Наиболее опасными являются аварии на крупных экологически уязвимых объектах, к которым относятся многие водохозяйственные сооружения (плотины, водохранилища, дамбы).

На территории Республики Беларусь подпорными сооружениями на водохранилищах являются грунтовые плотины или дамбы. При авариях, катастрофах, антропогенных причинах разрушение грунтовых плотин происходит очень динамично за короткий промежуток времени. Особенностью разрушения таких гидротехнических сооружений является образование волны прорыва, которая образуется при наложении двух процессов: падения вод водохранилища из верхнего в нижний бьеф и резкое увеличение объема воды в месте падения. Следствием гидродинамических аварий являются катастрофическое затопление местности и таранное воздействие волны прорыва на людей и сооружения.

Основой формирования защиты населения является зонирование территории по видам и степени возможной опасности при катастрофическом затоплении волной прорыва. Для прогнозирования инженерной обстановки при прохождении волны прорыва необходим расчет ее основных параметров, к которым относятся: максимальная высота волны прорыва; максимальная скорость тела волны; скорость фронта волны прорыва; скорость хвоста волны прорыва; время добегающих характерных точек волны прорыва (фронта, гребня, хвоста) до расчетных створов.

Для эффективной защиты населения, объектов и территорий необходимы методика и программа расчета параметров волны прорыва и зон затопления, применительно к гидроморфометрическим условиям Республики Беларусь.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Теоретическая база основана на исследовании движения волны прорыва при гидродинамической аварии на гидротехнических сооружениях напорного фронта. Рассмотрено медленно изменяющееся неустановившееся движение потока жидкости на участке dl некоторого русла с площадью живого сечения в начале потока S . Расчетная схема движения волны прорыва представлена на рис. 1.

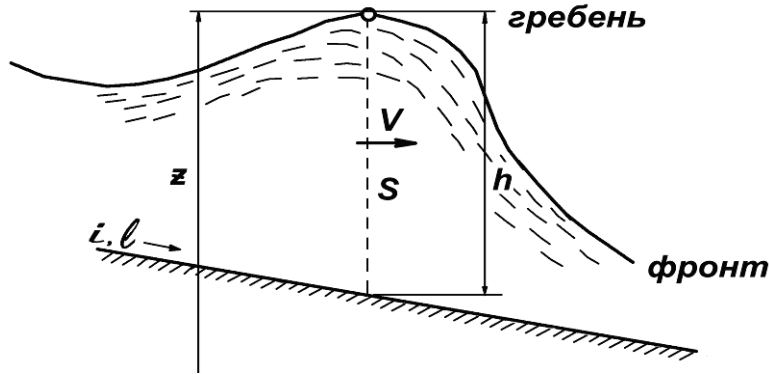


Рисунок 1 – Расчетная схема движения волны прорыва

Координата свободной поверхности потока в начальном сечении обозначена через z , а средняя скорость в этом сечении – через v . На расстоянии dl координата z и скоростной напор $\alpha v^2 / 2g$ получают следующие приращения: dz и $d(\alpha v^2 / 2g)$ соответственно (α – коэффициент Кориолиса) [1, 2].

Для рек Республики Беларусь продольный уклон для русел относительно мал, поэтому для потока волны прорыва ускорение, равное $\frac{\alpha_0 \partial v}{\partial t}$ (с учетом неравномерности распределения скоростей в сечении), действует вдоль оси l (α_0 – коэффициент Буссинеска; t – время движения потока, с).

В соответствии с рис. 1 с учетом работы силы инерции, отнесенной к единице веса жидкости, на участке dl уравнение сохранения полной удельной энергии для сечения с координатой z и сечения на приращении dl при неустановившемся движении тела волны прорыва имеет вид

$$z + \frac{\alpha v^2}{2g} = z + dz + \frac{\alpha v^2}{2g} + d\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right) + i_{TP} dl + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} dl \quad (1)$$

или

$$d\left(z + \frac{\alpha v^2}{2g}\right) = -i_{TP} \cdot dl - \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} dl, \quad (2)$$

где i_{TP} – уклон трения:

$$i_{TP} = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (3)$$

где Q – расход в сечении, м³/с;

K – расходная характеристика, м³/с, $K = SC\sqrt{R}$;

R – гидравлический радиус, м;

S – площадь живого сечения потока, м²;

C – коэффициент Шези, м^{0,5}/с, $C = \frac{1}{n}R^y$;

n – коэффициент шероховатости водотока, с/м^{0,25}.

Для расчета открытых русел Н.Н. Павловский рекомендует значения $y = 0,2 \dots 0,25$. Для расчетов в работе приняли $y = 0,25$.

Разделив обе части уравнения (2) на dl с учетом уклона трения, получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial z}{\partial l} + \frac{\alpha v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{Q^2}{K^2} = 0, \quad (4)$$

где $\frac{dz}{dl} = I = i - \frac{\partial h}{\partial l}$ – уклон свободной поверхности;

i – уклон дна водотока;

h – глубина потока, м.

Уравнение такого типа получило название динамического уравнения неустановившегося движения [6].

После преобразований уравнение (4) принимает вид уравнения Сен-Венана [6]:

$$i - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{\alpha v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{Q^2}{K^2} \quad (5)$$

или

$$i - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{\alpha v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v^2}{C^2 R}. \quad (6)$$

С учетом вышеизложенного уравнение (6) приобретает вид

$$i - \frac{\partial h}{\partial l} = \frac{\alpha v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial l} + \frac{\alpha_0}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{n^2 v^2}{h\sqrt{h}}, \quad (7)$$

а так как

$$\frac{\partial h}{\partial l} = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial S}{\partial l}, \quad (8)$$

получим

$$\left(i - \frac{n^2 v^2}{h\sqrt{h}} \right) g = \frac{g}{b} \cdot \frac{\partial S}{\partial l} + \alpha v \frac{\partial v}{\partial l} + \alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (9)$$

В рассмотренном случае отток или приток жидкости по нормали к оси потока отсутствует. Это вызывает изменение расхода на участке dl на величину dQ , поэтому количество движения Δq , отнесенное к единице веса жидкости, в волне прорыва получает приращение:

$$\Delta q = \frac{\alpha_0 v dQ}{g S dl}. \quad (10)$$

Учитывая, что

$$dQ = d(vS) = Sdv + v dS, \quad (11)$$

выражение (10) в частных производных можно записать в следующем виде:

$$\Delta q = \frac{\alpha_0 v^2}{g S} \cdot \frac{\partial S}{\partial l} + \frac{\alpha_0 v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial l}. \quad (12)$$

С учетом выражения (12) уравнение движения волны прорыва (9), записанное для тела волны, примет вид

$$\left(i - \frac{n^2 v^2}{h \sqrt{h}} \right) g = \frac{g}{b} \cdot \frac{\partial S}{\partial l} + \alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \alpha v \frac{\partial v}{\partial l} + \alpha_0 \frac{v^2}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial l} + \alpha_0 v \cdot \frac{\partial v}{\partial l} \quad (13)$$

или

$$\left(i - \frac{n^2 v^2}{h \sqrt{h}} \right) g = \left(\frac{g}{b} + \alpha_0 \frac{v^2}{S} \right) \cdot \frac{\partial S}{\partial l} + (\alpha + \alpha_0) \cdot v \frac{\partial v}{\partial l} + \alpha_0 \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (14)$$

Последнее уравнение представляет собой динамическое уравнение пространственно изменяющегося неустановившегося движения волны прорыва.

К полученному уравнению добавим известное уравнение неразрывности [6], которое для неустановившегося движения и прямоугольного или достаточно широкого русла имеет вид

$$\frac{\partial(bh)}{\partial t} + \frac{\partial(bhv)}{\partial l} = 0. \quad (15)$$

Разработанная математическая модель гидродинамической аварии при внезапном исчезновении преграды, а такой вариант наиболее опасен, предполагает разрушение грунтовой плотины или быстротечный ее размыв с образованием прерывной волны. Вследствие того, что при удалении от гидросооружения волна приобретает пологий характер и движение волны будет плавно изменяющимся, можно считать разработанную математическую модель приемлемой для расчетов максимальных параметров волны прорыва.

Анализ физической сути задачи позволил сделать вывод, что систему уравнений (14) и (15) необходимо решать при следующих начальных и граничных условиях:

$$\begin{aligned} h(l; 0) &= \begin{cases} 0,6H; & l=0 \\ 0; & l \rightarrow \infty \end{cases}; & h(0; t) &= 0,6H; \\ v(l; 0) &= 0; & v(0; t) &= \sqrt{2gH}, \end{aligned} \quad (16)$$

где H – напор на сооружении.

Решение задачи (14)–(15) в области $l \in (0; \infty)$ и $t \in (0; \infty)$ осуществлялось путем численного интегрирования методом сеток в относительных величинах, предложенных Б.Л. Историком и В.М. Лятхером [7]. В качестве продольной координаты принято расстоя-

ние l от плотины до искомого створа. Интегрирование проводилось при различных значениях напора H и уклона i . Относительная безразмерная максимальная скорость определялась по зависимости

$$v'_{\max} = \frac{v_{\max}}{\sqrt{\frac{gH}{\Psi}}}, \quad (17)$$

где v_{\max} – максимальная скорость волны прорыва, м/с;
 Ψ – параметр, характеризующий русло

$$\Psi = \frac{\lambda\theta}{2i}, \quad (18)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения.

Коэффициент гидравлического трения был рассчитан по формуле [7]:

$$\lambda = 2gn^2R^{-1/3}. \quad (19)$$

Параметр θ характеризует форму русла (для условий Республики Беларусь форма русла принималась прямоугольной и широкой, $\theta = 1$) [4]. Гидравлический радиус принимался равным $R = H/\theta$ [4].

Относительная максимальная глубина волны принималась равной

$$h'_{\max} = \frac{h_{\max}}{H}, \quad (20)$$

где h_{\max} – максимальная высота волны прорыва, м.

Интегрирование проводилось в диапазоне расстояний $10^3 \dots 10^5$ м и диапазоне уклонов $i = 0,01 \dots 0,005$ для различных значений напора H .

Результаты численного интегрирования при $i = 0,01$ представлены на рис. 2.

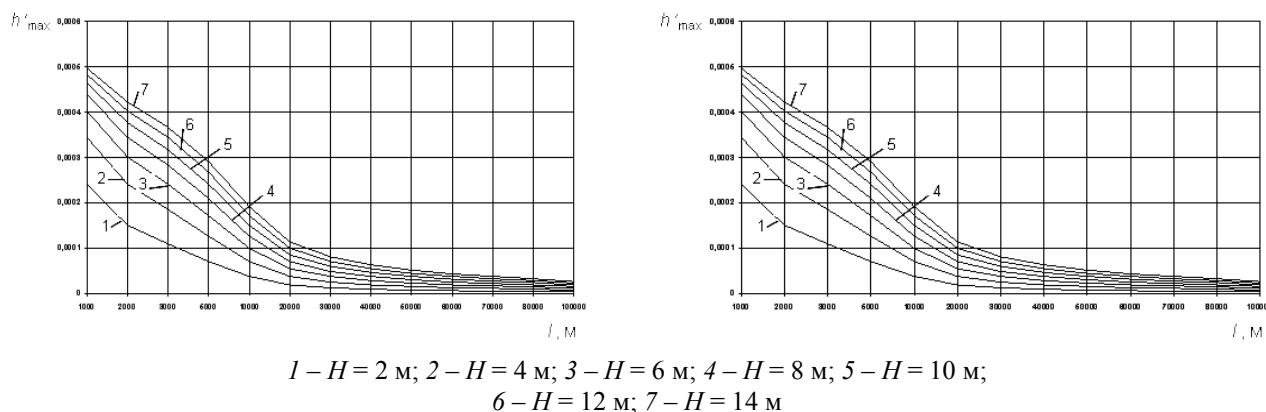


Рисунок 2 – Результаты численного интегрирования уравнения движения волны прорыва при $i = 0,01$

После аппроксимации результатов численного интегрирования с использованием многомерного метода наименьших квадратов были получены зависимости для определения максимальных значений скорости и высоты волны прорыва соответственно [6–8]:

$$v_{\max} = \frac{\beta_{\max} \sqrt{H^{1,33} i}}{n \left(\frac{li}{H} \right)^{0,37}}, \quad (21)$$

где $\beta_{\max} = 0,6$ – размерный коэффициент, $m^{0,085}$.

$$h_{\max} = \frac{2H^2}{li + 3,3H}. \quad (22)$$

При переливе через гребень плотины размыв происходит по всему фронту. Если это разрушение местного характера, то в земляной плотине оно распространяется по длине плотины также очень быстро. Поэтому при разработке методики расчета времени опорожнения водохранилища принят самый неблагоприятный случай – перелив начинается по всему фронту плотины с учетом того, что тело плотины в динамике размыва будет уменьшаться по высоте и длине.

По фронту плотина делится на три участка по высоте, форма которых принимается прямоугольной. Форма зеркала водохранилища может быть произвольной, но пропорциональной площади при последовательном опорожнении.

В основу определения времени опорожнения водохранилища положена известная формула для опорожнения резервуаров при переменном напоре и переменной площади горизонтального сечения резервуара [8, 9]. В рассматриваемом случае эта формула будет иметь вид:

$$t = \int_0^H \frac{\Omega dz}{m_{\text{пр}} \omega_{\text{пр}} \sqrt{2gz}}, \quad (23)$$

где Ω – площадь горизонтального сечения, m^2 ;

z – высота размываемой плотины (текущая координата), m ;

$m_{\text{пр}}$ – коэффициент расхода водослива (прорана) (водослив принимается трапецеидального профиля по сечению плотины);

$\omega_{\text{пр}}$ – текущая площадь живого сечения прорана, m^2 , $\omega_{\text{пр}} = h_i b_i$; $h_i = H / 3$ – высота участка интегрирования;

b_i – промежуточная ширина плотины в каждом из трех участков по высоте, на которые разбита плотина по фронтальному сечению, m ;

H – начальный напор на водохранилище, m .

Интегрирование проводилось по трем участкам, отличающимся коэффициентом расхода. Многочисленными экспериментами [6, 8, 9] установлено, что при размыве плотины низовой откос деформируется и приобретает вид конфигурации водослива практического профиля, очерченного по координатам Кригера-Офицера, и повторяет форму струи потока.

Суммарное время опорожнения водохранилища определяется по формуле

$$T_0 = \frac{4,5 \Omega_{\text{зерк}}}{B \sqrt{2gH}}, \quad (24)$$

где $\Omega_{\text{зерк}}$ – площадь зеркала водохранилища до опорожнения, m^2 ;

B – ширина плотины по фронту, m .

Расчет времени опорожнения водохранилища необходим при определении времени добегающих характерных точек волны прорыва до расчетных створов.

При распространении волны прорыва по водотоку на изменение ее параметров влияет зарегулированность реки, то есть наличие нижележащих водохранилищ и озер по ходу движения

волны прорыва. Наличие их может как ослабить, так и увеличить поражающее действие волны. В настоящий момент не существует каких-либо рекомендаций по учету зарегулированности реки. При расчете волны прорыва на зарегулированном водотоке предложены следующие подходы.

1. Скорость распространения волны прорыва по нижележащему водохранилищу с учетом растекания тела волны по водохранилищу при подходе к нижележащему гидроузлу определяется по формуле

$$v_0 = \frac{\beta_k \cdot \sqrt{\left(\frac{B_{\text{ниж}}}{b_c} H\right)^{1,33}} \cdot i}{n \left(\frac{li}{H}\right)^{0,37}}, \quad (25)$$

где $B_{\text{ниж}}$ – максимальная ширина нижележащего водохранилища, м;

b_c – средняя ширина нижележащего водохранилища, м;

$\beta_k = 0,6$ – размерный коэффициент, м^{0,085}.

2. Высота волны прорыва при подходе к плотине нижележащего гидроузла определяется по формуле

$$h_{\text{max}}^{\text{каск}} = \frac{\Phi_{\text{каск}} H^2}{li + \Psi_{\text{каск}} H}, \quad (26)$$

где $h_{\text{max}}^{\text{каск}}$ – максимальная высота волны прорыва при подходе к нижележащему гидроузлу при каскадном расположении водохранилищ;

$\Phi_{\text{каск}}$ – отношение максимальной ширины водохранилища к его средней ширине ($\Phi_{\text{каск}} = 1,2 \dots 1,3$).

$\Psi_{\text{каск}}$ – отношение длины береговой линии к длине водохранилища ($\Psi_{\text{каск}} = 3 \dots 4$).

Напор для последующего расчета H_i следует рассчитывать как сумму высоты волны прорыва при подходе к гидроузлу и напора на гидроузле нижележащего водохранилища [10]:

$$H_i = h_{\text{maxводх}}^{\text{каск}} + H, \quad (27)$$

где $H_{\text{водх}}$ – напор на нижележащем гидроузле.

3. Начальную скорость (скорость фронта новой волны прорыва второго гидроузла) считать по формуле Егиазарова [8] с учетом H_i , т. е.

$$c_i^{\text{фр}} = v_{06} + \sqrt{gh} \left(1 + \frac{3}{4} \cdot \frac{H_i}{h_6} \right), \quad (28)$$

где h_6 – глубина реки в нижнем бьефе, м.

Причем отсчет расстояния для расчета параметров новой волны прорыва берутся от второго гидроузла.

Следует отметить, что указанные рекомендации дают максимальное (наихудший вариант) значение волны прорыва при прохождении по нижележащему водохранилищу. Высота волны может быстро уменьшиться при прохождении водохранилища вследствие растекания по его зеркалу. С другой стороны резкое падение в близкорасположенное нижележащее водохранилище волны прорыва может вызвать «волну вытеснения», которая может превысить высоту пришедшей волны прорыва.

Выход волны прорыва на пойменные участки будет оказывать влияние на параметры волны прорыва [11–13]. Часть расхода будет распространяться по пойме, и высота волны будет уменьшаться. Уменьшение высоты волны предлагается учитывать соответствующими коэффициентами.

Высота волны при этом, исходя из формулы (22), будет равна

$$h_{\max}^n = \frac{\varphi_n H^2}{li\Psi_n}, \quad (29)$$

где φ_n и Ψ_n – коэффициенты, учитывающие заболоченность и залесенность поймы, при этом

$$\varphi_n = \frac{1}{\delta_6^2} \text{ и } \Psi_n = \frac{1}{\delta_n^2},$$

где δ_6 – коэффициент заболоченности;

δ_n – коэффициент залесенности (существующие справочные данные принимаются по специальным атласам Республики Беларусь, которые имеются в корпоративной ГИС МЧС).

Тогда глубина потока в расчетных створах в пределах пойменных участков составит:

$$H_i^n = h_{\max}^n + h, \quad (30)$$

где $h_{\max i}^n$ – высота волны прорыва в расчетном створе на пойменном участке.

Максимальная скорость тела волны (гребня) незначительна, поскольку волна прорыва будет двигаться вдоль русла по тракту с минимальным гидравлическим сопротивлением. Скорость волны на пойменных участках равна

$$v_n = \frac{\beta_n \sqrt{(0,8H)^{1,33} \cdot i}}{n \left(\frac{li}{H} \right)^{0,37}}, \quad (31)$$

где $\beta_n = 0,77$ – размерный коэффициент, $m^{0,085}$.

Тогда скорость течения в расчетном створе на пойменном участке равна:

$$v_i^n = v_{0n} + v. \quad (32)$$

Средняя скорость движения гребня волны прорыва на пойменном участке определяется по формуле

$$v_{\text{ср}i}^{\text{гп}} = \frac{\beta_n \sqrt{(0,8H)^{1,33} \cdot i}}{n \left(\frac{li}{3,5H} \right)^{0,37}}. \quad (33)$$

Следует отметить, что, несмотря на относительно большие размеры поймы по сравнению с руслом, влияние ее будет незначительно сказываться на высоте волны, и в зависимости от залесенности и заболоченности будет составлять уменьшение скорости порядка 20–30 %. Основная масса расхода волны прорыва будет продолжать движение вдоль призматиче-

ческих русел (которые характерны для рек территории Республики Беларусь), где гидродинамическое сопротивление минимально.

Результаты экспериментальных исследований в гидравлическом лотке с прозрачными стенками позволили установить взаимосвязь изменения высоты волны прорыва во времени в различных створах и уточнить теоретические зависимости высоты и скорости волны от параметров русла (размеры, шероховатость, средний уклон), напора и удаления расчетного створа от подпорного сооружения. Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных данных и результатов расчета по разработанной математической модели.

По результатам разработанных математических моделей движения волны прорыва и опорожнения водохранилища разработана методика расчета параметров волны прорыва.

В соответствии с картой местности, по которой возможно прохождение волны прорыва, водоток (река) разбивается на участки расчетными створами. Створы рационально проводить нормально к динамической оси потока, в местах расположения населенных пунктов, ответственных сооружений, промышленных предприятий. Нулевым створом принимается створ разрушенного гидроузла, первый расчетный участок начинается от нулевого створа и оканчивается 1-м створом, второй участок – от нулевого створа до 2-го створа и т. д.

1. Определение высоты волны и глубины потока;
2. Определение скорости движения волны прорыва в расчетных створах и на расчетных участках;
3. Определение времени прохождения волны прорыва через створ разрушенного гидроузла, через расчетные створы и определение времени добегающего до расчетных створов.

Определяем параметры волны в нулевом створе:

1. Высоту волны прорыва в нулевом створе [14];
2. Время прохождения волны через створ разрушенного гидроузла.

Рассчитываем параметры движения, характеризующие волну прорыва на первом участке и в 1-м створе:

1. Максимальную высоту волны в 1-м створе;
2. Для определения степени разрушения зданий и сооружений в зависимости от динамического напора волны прорыва находим максимальную скорость тела волны;
3. Среднюю скорость волны на 1-м участке;
4. Скорость распространения волны на 1-м участке с учетом скорости течения реки;
5. Время добегающего волны до 1-го створа;
6. Скорость фронта волны в первом створе;
7. Время прохождения волны через 1-й створ;
8. Время добегающего хвоста волны до 1-го створа. Это время определяет начало восстановительных работ по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Аналогично рассчитываются параметры движения волны прорыва, характеризующие волну прорыва на втором участке и во 2-м створе и т. д.

Для оперативной оценки последствий аварий на гидротехнических сооружениях напорного фронта разработана программа расчета параметров волны прорыва. Программа предназначена для определения всех необходимых параметров, которые используются при прогнозировании последствий аварий и чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях напорного фронта.

В окне ввода данных пользователь имеет возможность ввода данных с клавиатуры или экспорта данных из базы данных, установленной с программой. Выбор производится по названию водохранилища.

В программе предусмотрен расчет параметров волны прорыва для 14 створов. Также в программе предусмотрено задание расстояния между створами в автоматическом режиме. Расстояние между створами задается с определенным шагом, который указывается в соответствующем поле.

После того как заданы и введены все исходные данные, можно выполнять расчет. Программа производит расчет и выводит данные в таблицу расчетных параметров. Расчетные данные возможно экспортировать в MS Excel для дальнейшей работы.

Для оценки опасности и возможных размеров катастрофических наводнений разработано программное обеспечение для расчета и визуализации на электронной карте зон затопления при прорыве гидротехнических сооружений напорного фронта. Программное обеспечение предназначено для работы в составе корпоративной ГИС МЧС Республики Беларусь.

Программное обеспечение построено по модульному принципу [15, 16] и состоит из совместимых с ГИС MapInfo функциональных модулей, перечень которых с требованиями по выполняемым функциям включает:

- электронную базу данных по гидротехническим сооружениям, которая предназначена для расчета всех параметров волны прорыва;
- программный модуль расчета исходных данных для построения зон затопления;
- программный модуль визуализации зон затопления.

После расчета получаем контурное изображение зон затопления различной глубины. Расчет можно повторить для заданного ряда времен. Наложение друг на друга разновременных зон дает суммарную картину зоны катастрофического затопления при чрезвычайной ситуации.

Точность расчета динамики волны прорыва определяется количеством используемых расчетных створов и масштабом цифровой карты.

Кроме этого программа производит автоматический расчет параметров волны прорыва в любой точке зоны затопления, отмеченной курсором, с выводом данных на экран в этой точке и трансформацию их в *Excel* для составления отчета.

С помощью разработанного программного обеспечения были рассчитаны и смоделированы в ГИС МЧС зоны затопления для наиболее крупных и гидродинамически опасных водохранилищ Республики Беларусь.

Обработаны электронные карты на выбранные объекты (Заславское, Вилейское, Дубровское водохранилища). Построение зон затопления рассчитывалось и проводилось для различного времени после аварии на гидроузле. Были построены зоны чрезвычайно опасного затопления (15 мин после аварии) и опасного затопления (40 и 80 мин после аварии и разрушении сооружения).

На рис. 3 представлен пример зоны чрезвычайно опасного затопления (15 минут после аварии), построенной для Заславского водохранилища.

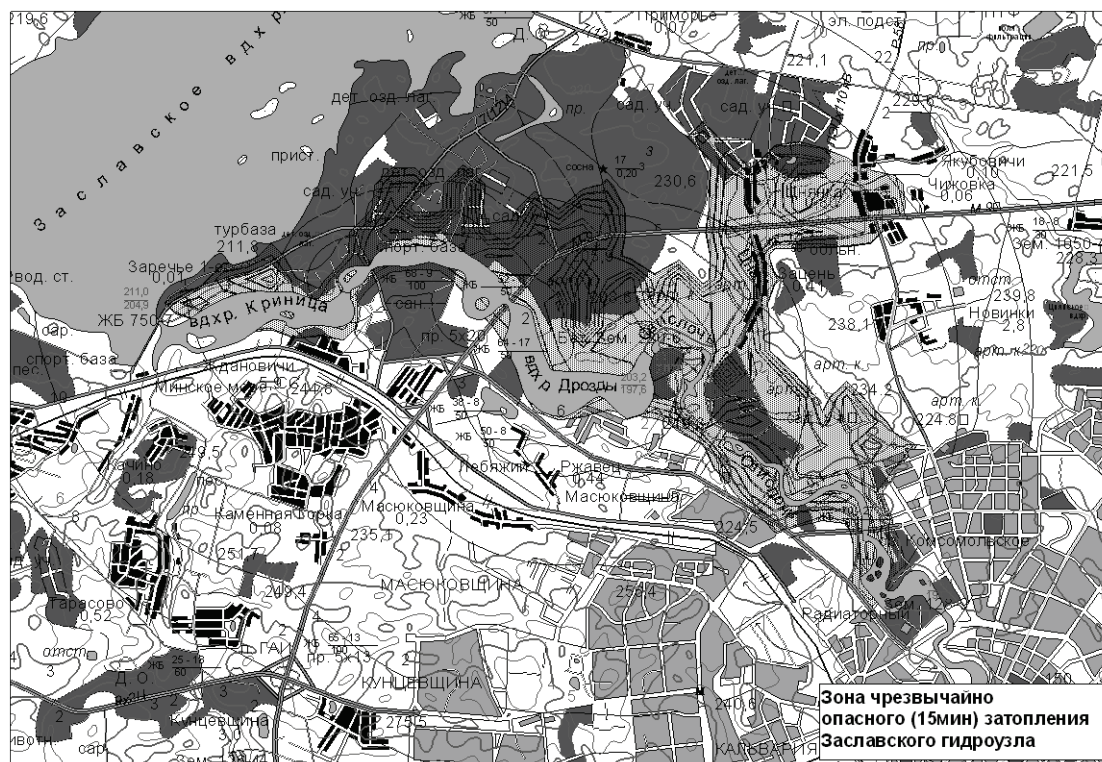


Рисунок 3 – Зона чрезвычайно опасного затопления (15 минут после аварии на Заславском гидроузле)

Выводы

Теоретически исследовано движение волны прорыва при гидродинамической аварии на гидротехнических сооружениях напорного фронта. Разработана математическая модель пространственно изменяющегося неустановившегося движения тела волны прорыва для призматических русел.

На основании разработанной математической модели движения волны прорыва и зависимостей, предложенных Н.Н. Павловским, определены основные оценочные параметры волны прорыва, определяющие ее распространение по водотоку вдоль русла реки. Определены максимальные параметры тела волны.

Получено выражение для определения времени опорожнения водохранилища при разрушении земляной плотины в случае перелива через ее гребень с последующим размывом на базе разработанной математической модели.

Исследовано влияние зарегулированности водотока при каскадном расположении водохранилищ и наличие пойменных участков водотока с учетом их заболоченности и залесенности на параметры волны прорыва. Впервые предложены методы расчета параметров для указанных случаев. На основании чего показано, что высота волны прорыва вследствие растекания потока по нижележащему водохранилищу может уменьшаться на 60–70 %, а с учетом пойменных участков – на 20–30 %.

Разработана методика расчета параметров волны прорыва, позволяющая определять все количественные характеристики (высоту волны, глубину потока, скорости фронта, гребня хвоста волны), а также все необходимые временные характеристики волны прорыва (время опорожнения водохранилища при аварии, время прохождения волны через расчетный створ, времена добегания фронта, гребня и хвоста волны).

Разработаны и внедрены в РЦУРЧС МЧС Республики Беларусь программы расчета параметров волны прорыва и построения на электронных картах зон затопления в корпоративной ГИС МЧС Республики Беларусь.

Программный комплекс, внедренный в Республиканском центре управления и реагирования на чрезвычайные ситуации МЧС Республики Беларусь использован для расчета и построения зон затопления для 97 водохранилищ Республики Беларусь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стриганова, М.Ю. Математическая модель неустановившегося движения волны прорыва и экспериментальные исследования потока в призматическом нижнем бьефе / М.Ю. Стриганова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2010. – № 2 (28). – С. 83–93.
2. Карпенчук, И.В. Математическая модель неустановившегося движения волны прорыва гидротехнических сооружений напорного фронта / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова // Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: матеріали IV Міжнарод. наук.-практ. конф. – Черкаси : АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2010. – С. 57–60.
3. Карпенчук, И.В. Расчет параметров волны прорыва применительно к конкретному случаю / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2005. – № 7 (17). – С. 131–136.
4. Карпенчук, И.В. Определение скорости и глубины потока в расчетном створе при ЧС на искусственных водных объектах напорного фронта / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: тез. докл. II Международной науч.-практ. конф. В 2 ч. Ч. 2 / Ред. кол. : Э.Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2003. – С. 69–70.
5. Карпенчук, И.В. Определение максимальных параметров волны прорыва / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова, А.И. Красовский // Наука – образованию, производству, экономике: рефераты докл. междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Т. 2 / Ред. кол. : Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск, 2003. – С. 46.
6. Богомолов, А.И. Гидравлика / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1972. – 648 с.
7. Гидравлика, гидрология, гидрометрия : учеб. для вузов: В 2 ч. Ч. II. Специальные вопросы / Н.М. Константинов, Н.А. Петров, Л.И. Высоцкий. –М. : Высш. шк., 1987. – 431 с.

8. Караушев, А.В. Речная гидравлика / А.В. Караушев. – Л. : Гидрометеорол. изд-е, 1969. – 416 с.
9. Агроскин, И.И. Гидравлика / И.И. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М. : Госэнергоиздат, 1950. – 430 с.
10. Карпенчук, И.В. Разработка методики и программного средства для прогнозирования воздействия волны прорыва при разрушении гидротехнических сооружений напорного фронта по теме: «Разработка методов расчета определения времени прохождения волны прорыва через створ разрушенного гидроузла Учет зарегулированности водотока при определении параметров волны прорыва» (Отчет о НИР № ГР 2006681) [Электронный ресурс] / И. В. Карпенчук, С. М. Палубец, М. Ю. Стриганова ; НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси. – Минск, 2007. – 44 с. : 1 рис. – Рус. – Деп. в ГУ «БелИСА» 29.01.07 г., № Д20079.
11. Киен, Ле-Ван Об основной специфике пойменного русла и его пропускной способности / Ле-Ван Киен // Тр. МГМИ – 1973. – Т. 33. – С. 77–82. (Вып. «Гидравлика и гидротехнические сооружения»).
12. Букреев, В.П. Выявление характерных мгновенных режимов неустановившегося движения воды по пойме / В.П. Букреев, С.Н. Корюкин, Ю.М. Натальчук // Тр. МГМИ. – 1975. – Т. 43. – С. 99–105.
13. Грушевский, М.С. О влиянии пойм на распластывание волн попусков (по материалам наблюдений ГГИ на р. Тверце) / М.С. Грушевский // Тр. ГГИ. – 1964. – Вып. 117. – С. 56–62.
14. Шойгу, С.К. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций / С.К. Шойгу. – М. : ЗАО «Папирус», 1998. – 404 с.
15. Евграфов, А.В. О расчете неустановившегося движения воды в речной системе (бассейн Нерли Волжской) с применением ГИС / А.В. Евграфов // Природоохранное обустройство территорий : сб. материалов науч.-техн. конф., Москва, 23–25 апреля 2002 г. – М. : МГУП, 2002.
16. Евграфов, А.В. Об использовании специальной ГИС для расчета неустановившегося движения воды в реке // Экологическая устойчивость природных систем и роль природообустройства в ее обеспечении : сб. материалов Всеросс. науч.-техн. конф., 23–25 апреля 2003 г. – М. : МГУП, 2003.