

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

*О. В. Немеровец, ассистент*

*В. А. Евдокимов, старший преподаватель*

*В. В. Ивашечкин, доктор технических наук*

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

### Аннотация

Разрушения грунтовых плотин, в результате которых происходит прорывной паводок, относятся к опасным гидрологическим явлениям, влекущим за собой материальный ущерб и человеческие жертвы. Ввиду внезапности и быстротечности процесса разрушения плотин данные об этих явлениях обрывочны и малочисленны, поэтому при изучении размыва грунтовых насыпей необходимо использовать методы физического и математического моделирования. В данной статье рассмотрен процесс разрушения грунтовой плотины, причиной образования которого является перелив воды через гребень в результате переполнения водохранилища. Новизна проведенного исследования заключается в том, что на основе исследований была подтверждена методика, предложенная ранее для определения параметров волны прорыва и построения гидрографа сбросных расходов.

**Ключевые слова:** *расход, водохранилище, напор, уравнение баланса воды, гидрограф расхода, размыв, авария.*

### Abstract

*O. V. Nemerovets, V. A. Evdokimov, V. V. Ivashchkin*  
**STUDY OF THE PROCESS OF THE DESTRUCTION  
OF EARTH DAMS USING PHYSICAL MODELS**

The destruction of groundwater dams, as a result of which a breakthrough flood occurs, refers to dangerous hydrological phenomena as material damage and human casualties. Due to the suddenness and transience of the dam destruction process, data on these phenomena are fragmentary and few in number, therefore it is necessary during of their study to use methods of physical and mathematical modeling. In this article, the process of destruction of an underground dam is considered, the cause of which is the overflow of water over the ridge, as a result of overflow of the reservoir. The originality of research lies in the fact that, based on the research, the methodology proposed for determining the parameters of the breakthrough wave, as well as constructing a hydrograph of discharge costs, was confirmed.

**Keywords:** *discharge, water reservoir, pressure, water balance equation, flow hydrograph, washout, accident.*

### Введение

Во всем мире вопросам надежности гидроузлов придается большое значение потому, что аварии на гидроузлах, особенно на плотинных, приводят к серьезнейшим последствиям. Главной проблемой в вопросах надежности гидроузлов – например, в период паводка – являются природные факторы, прежде всего гидрологические. Современные подходы к оценке феномена паводка и, соответственно, обеспечение главных водосбросных сооружений подчас могут расходиться с условиями реального паводка; даже один конкретный паводок может разрушить плотину. Риск перелива существует всегда, и вся-

кий плотинный гидроузел представляет собой потенциальную опасность. Чем ниже класс сооружений гидроузла, тем больше возможность превышения расчетного паводкового расхода и, следовательно, больше риск перелива, поэтому на небольших гидроузлах он происходит чаще, чем на крупных.

При разработке проектной документации как для новостроящихся плотин, так и для подлежащих реконструкции проводят прогнозные расчеты параметров волны прорыва и зон вероятного затопления, а также оценку воздействия на окружающую среду для объектов, к которым относятся искусственные

водоемы с площадью водной поверхности более 50 гектаров, плотины высотой 2 метра и более<sup>1</sup>. Прогнозирование развития и масштабов возможных гидродинамических аварий на водоподпорных гидротехнических сооружениях (ГТС) включает в себя расчет степени их разрушения, параметров волны прорыва, поставарийного состояния русла и поймы в возможной зоне затопления, а также последствий аварий для населения и территорий<sup>2</sup>. Точность прогнозных расчетов зависит от математических моделей размыва плотины и модели движения волны прорыва.

Цель данной статьи – подтвердить существующий метод расчета характеристик про-

### Основная часть

Для разработки методики определения сбросных расходов в створе размываемого сооружения использовался метод физического моделирования, которой позволяет более полно и детально описать процесс разрушения грунтовых плотин, выявить факторы, влияющие на него в естественных условиях, получить необходимые параметры для математической модели. В связи с этим были проведены натурные физические эксперименты по размыву грунтовой плотины.

Цель экспериментов заключалась в описании процесса разрушения грунтовой плотины, получении результатов для математического моделирования. Эксперименты по разрушению плотины проведены на территории 27-й лаборатории Белорусского национального технического университета.

Конструкция для проведения физического моделирования представляет собой рамное основание, выполненное из металлического профиля, покрашенного краской. На рамном основании смонтирована гидравлическая си-

стема, состоящая из гидравлического лотка и вспомогательных элементов. Гидравлический лоток выполнен из металла и стекла. В стенде используются трубопроводы, подключенные к системе водоснабжения и водоотведения лаборатории.

В рамках данной цели определены следующие задачи:

- рассчитать морфометрические характеристики прорыва и максимальные расходы прорывной волны по методике, предложенной в [1];
- сравнить экспериментальные и теоретические данные по разрушению грунтовой плотины в результате перелива через гребень;
- описать физические принципы процесса размыва;
- получить гидрограф сбросных расходов в створе размываемого сооружения.

Для изучения процесса размыва грунтовых плотин при переливе воды были проведены опыты 1 и 2 на моделях в лотке шириной 0,32 м (рис. 1); высота моделей составляла 0,4 м. На стенку лотка нанесена координатная сетка с шагом 5 см. Для мониторинга уровней и скоростей в лотке при прохождении волны использовался многоканальный измерительный комплекс (рис. 2).

Многоканальный измерительный комплекс состоит из кондуктометрических уровнемеров (рис. 3), расположенных в верхнем и нижнем бьефах, а также измерительных игл, персонального компьютера, программного обеспечения, средства для передачи сигналов от измерительной аппаратуры на компьютер.

<sup>1</sup> О государственной экологической экспертизе, стратегической экологической оценке и оценке воздействия на окружающую среду [Электронный ресурс]: Закон Респ. Беларусь от 8 июля 2016 г. № 399-3. Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=H11600399> (дата обращения: 01.08.2024); Пособие по проведению оценки воздействия на окружающую среду водохранилищных ГЭС. Минск, 2005. 68 с.

<sup>2</sup> 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. Электронный Фонд нормативно-технической и нормативно-прав. информ. консорциума «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/> (дата обращения 12.07.2024).



Рис. 1. Лоток с размещенной моделью плотины

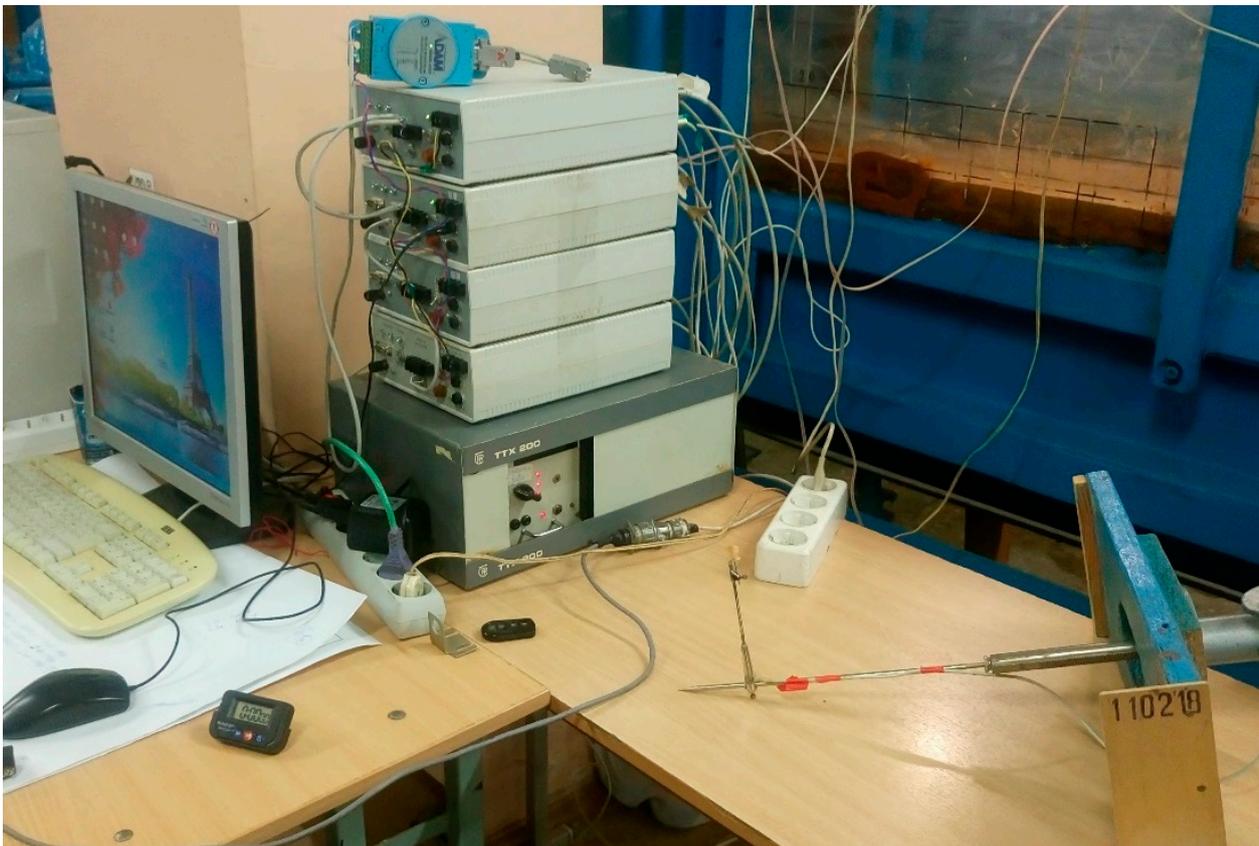


Рис. 2. Многоканальный измерительный комплекс для измерения уровней и скоростей в лотке при прохождении волны



Рис. 3. Кондуктометрический уровнемер

Опыты проводились на песчаных моделях из среднезернистых песков со следующими размерами: высота – 0,4 м, ширина по гребню – 0,3 м, заложение верхового и низового откосов – 1 : 2,0. Расход воды, поступающей в верхний бьеф (приточность), составлял в опыте 1 – 8,6 л/с, в опыте 2 – 12,0 л/с. Вода поступала в лоток из прямоугольного питательного бака, на входе в него размещался мерный водослив Томпсона, по которому контролировался расход воды  $Q_0$ , подаваемой центробежным насосом из водооборотного бассейна.

При исследовании процесса размыва главную роль играют силы тяжести, поэтому главным критерием при моделировании является критерий Фруда  $Fr$  [8–10]. Должно соблюдаться следующее условие:

$$Fr_m = Fr_n = v^2 / gh = idem,$$

где  $Fr_m$  – критерий Фруда модели;  $Fr_n$  – критерий Фруда натурального объекта;  $v$  – скорость течения (или скорость движущегося тела);  $g$  – ускорение силы тяжести,  $h$  – характерный размер потока или тела.

Модели были отсыпаны из грунта со следующими физико-механическими характеристиками: диаметр частиц  $d = 0,05–0,50$  мм; сред-

ний диаметр  $d_{50} = 0,25$  мм; средневзвешенная гидравлическая крупность  $w = 0,041$  м/с; плотность  $\rho_0 = 1,69$  г/см<sup>3</sup>; коэффициент неоднородности  $d_{60}/d_{10} = 1,6$ .

Определение гранулометрического состава производилось путем рассева песка на наборе сит<sup>1</sup>.

Из песка, прошедшего через сито с отверстиями диаметром 5 мм, отбиралась навеска 1000 г. Эта масса песка просеивалась через набор сит с различными диаметрами отверстий. Остатки на каждом сите и поддоне взвешивают и вычисляют:

а) частный остаток  $a_i$ , % на каждом сите и поддоне:

$$= \frac{m_i}{m} \cdot 100,$$

где  $m_i$  – масса остатка на данном сите, г;

$m$  – масса пробы песка, г;

б) полный остаток на каждом сите ( $A_i$ ) в процентах:

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots + a_i,$$

где  $a_{2,5}$ ,  $a_{1,25}$  – частные остатки на ситах с большим диаметром отверстий (вышележащих);  $a_i$  – частный остаток на данном сите;

<sup>1</sup> Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. ГОСТ 12536-79. Москва: Стандартинформ, 2015. 22 с.

в) модуль крупности песка ( $M_k$ )

$$M_k = \frac{A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14}}{100}$$

где  $A_{2,5} + A_{1,25} + A_{0,63} + A_{0,315} + A_{0,14}$  – полные остатки на ситах.

По результатам зернового состава грунта построена кривая его гранулометрического состава (рис. 4) и определены все физико-механические характеристики.

На рис. 5 представлен процесс размыва в виде мгновенных профилей при расходе  $Q_0 = 8,6$  л/с.

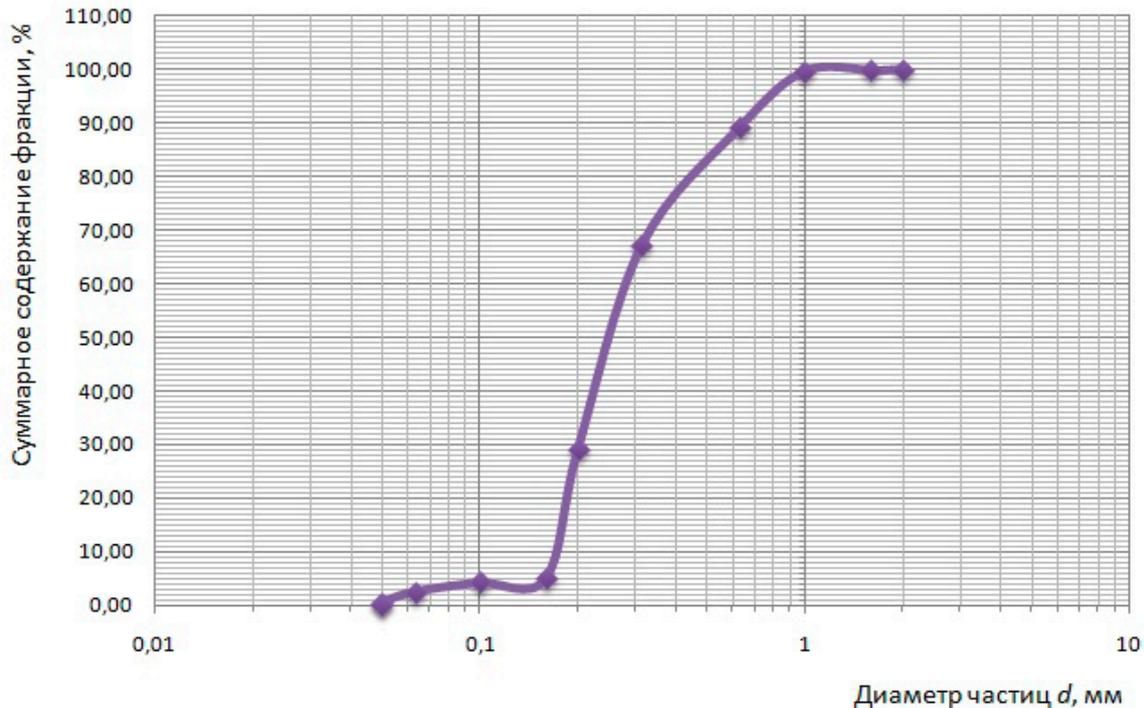


Рис. 4. Кривая гранулометрического состава грунта

Для сопоставления опытных и теоретических данных необходимо построить графики изменения расхода воды в створе размываемой модели. Расход воды  $Q$  через модель плотины при ее размыве определяли опытным путем по изменению объема воды в верхнем бьефе:

$$\frac{\Delta W}{\Delta t} = Q,$$

где  $\Delta W$  – изменение объема воды в верхнем бьефе модели плотины;  $\Delta t$  – промежуток времени;  $Q$  – расход воды через размываемую плотину.

Изменение объема  $\Delta W$  определяли по формуле

$$\Delta W = \Delta h \cdot \Omega,$$

где  $\Delta h$  – изменение уровня воды в верхнем бьефе модели плотины за промежуток времени  $\Delta t$ ;  $\Omega$  – площадь зеркала воды верхнего бьефа модели плотины.

По данным экспериментальных исследований и результатов программных комплек-

сов были построены графики для определения расходов в створе размываемой модели от времени размыва. В их основе – следующие уравнения, приведенные в [1]:

1) уравнение для отметки  $y(t)$  гребня водослива в пределах прорана:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{B \cdot \varepsilon}{\rho g} \cdot (\sigma_r \cdot m)^{0,407} \cdot (z - y)^{0,61}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon = 2g \cdot \frac{1 - 1,26\sqrt{m^2}}{\beta}$ ;  $m$  – коэффициент расхода водослива;  $\beta$  – постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта; параметр  $B$  находится по формуле:

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

где  $n_2$  – коэффициент шероховатости поверхности прорана;  $\alpha$  – коэффициент Кориолиса;  $\varphi$  – параметр турбулентности;  $w$  – гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с;

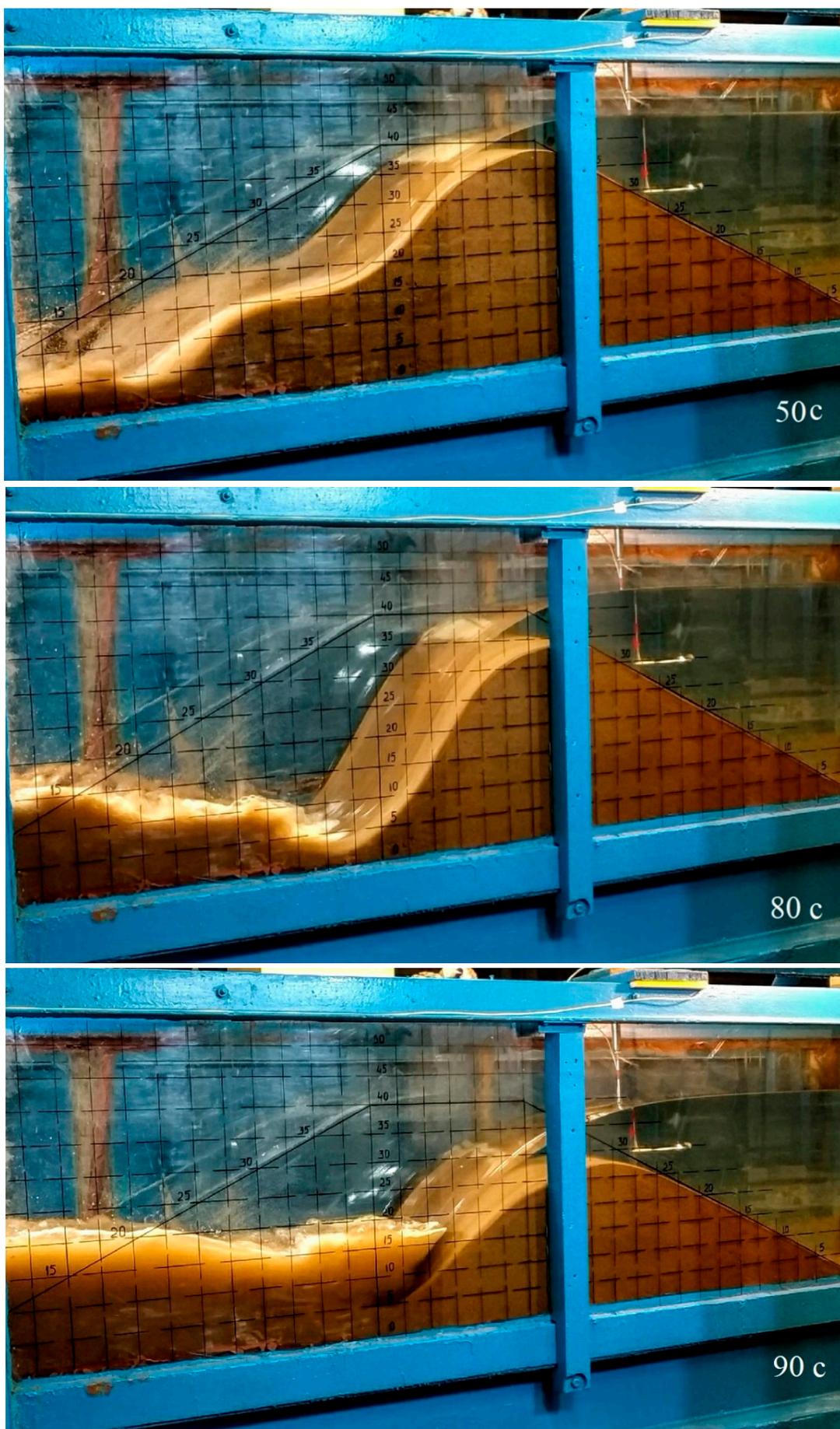


Рис. 5. Физическая картина размыва модели плотины при расходе  $Q_0 = 8,6 \text{ л/с}$



В опытах для различных моментов времени определяли коэффициент расхода через размываемый водослив  $m$ . Его величина достигает наибольшего значения в начале интенсивного снижения гребня и затем несколько уменьшается. Его численные значения указывают на то, что гидравлическую картину в данном случае действительно можно классифицировать как истечение через водослив практического профиля.

Механизм отрыва и перемещения твердых частиц грунта принципиально не отличается от механизма, описанного различными авторами в динамике русловых потоков. Отмечаются лишь следующие особенности: размыв низовой призмы происходит при больших скоростях, в 10–30 раз превосходящих (на моделях) неразмывающие для среднезернистых грунтов. Поэтому размыв идет интенсивно со срывом одновременно нескольких слоев, а транспорт твердого стока происходит исключительно во взвешенном состоянии.

Общая картина размыва моделей плотин следующая. С началом перелива, когда расход через размываемую плотину еще незначителен вследствие малого напора на гребне, уровень воды в верхнем бьефе продолжает подниматься. Момент, при котором достигается равенство расходов через размываемую плотину и приточности в верхнем бьефе  $Q = Q_0$ , соответствует максимально возможному повышению уровня верхнего бьефа. Поскольку плотина, играющая в данном случае роль водослива, размывается под действием переливающегося потока, отметка ее гребня с определенного момента интенсивно снижается, напор на гребне возрастает, что ведет к быстрому увеличению расхода через плотину. При  $Q > Q_0$  уровень верхнего бьефа падает.

Формирование водосливной поверхности размываемой плотины – результат взаимодействия с ней переливающегося потока, в процессе которого одновременно с измене-

нием очертания водослива изменяются и гидромеханические параметры потока.

Приведем последовательность размыва модели.

В первые секунды, когда толщина переливающегося слоя воды на низовом откосе очень мала и к тому же происходит ее интенсивное впитывание в тело плотины, размыв происходит путем постепенного переотложения вымытых частиц грунта по откосу и носит дискретный характер. С увеличением расходов и глубин эта картина быстро меняется. Профиль плотины со стороны низового откоса заметно деформируется, следуя профилю свободной поверхности потока. При этом откос размывается довольно равномерно по всей длине как бы параллельными слоями. Если принять условие предельного насыщения потока наносами в каждом сечении, то это может означать, что транспортирующая способность его вниз по откосу возрастает, достигая наибольшей величины в нижней части, вероятно, в сжатом сечении.

На гребне со стороны верхового откоса в этот период наблюдается лишь передвижение отдельных частиц грунта. Деформаций там практически нет, и отметка гребня на данной стадии постоянна.

После полного размыва низовой призмы на всю ширину гребня начинается его интенсивное снижение. Гидравлическая картина на данном этапе сходна с истечением через водослив практического профиля как по форме кривой свободной поверхности, так и по очертаниям, постоянно трансформирующимся в процессе размыва.

Выполненные исследования являются основой для моделирования потока в нижнем бьефе гидроузла [11–15], так как поток, вытекающий из прорана грунтовой плотины, затапливает прилегающую территорию. Затопление территории в свою очередь может повлечь за собой колоссальный ущерб как для общества, так и для государства в целом.

## Выводы

1. Экспериментальными исследованиями полностью подтверждается методика моделирования разрушения грунтовой плотины, разработанная на основе решения численным методом системы четырех уравнений, описывающих трехэтапный размыв грунтовой

плотины, баланс воды в водохранилище, образование и развитие прорана. Данная методика позволяет получить гидрограф расхода в створе размываемой плотины.

2. Решение задачи моделирования разрушения грунтовой плотины способствует опре-

делению граничных и начальных условий в ее створе для скорости и глубины потока в нижнем бьефе, используемых для выявления границ затопления территории, расположенной ниже створа гидроузла.

3. Незначительные отличия между сбросными расходами в створе размываемого сооружения в результате перелива воды через

гребень связаны с изменчивостью коэффициента расхода, который зависит от величины напора на гребне размываемой плотины. Так как напор был переменный, при вычислении расхода, пропускаемого через размываемое сооружение, коэффициент расхода принят в программном комплексе осредненным из диапазона 0,46–0,52.

### Библиографический список

1. Теоретические основы расчета размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень / В. В. Ивашечкин, П. М. Богославчик, В. В. Веремеенюк, О. В. Немеровец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. – 2022. – № 65 (3). – С. 276–284. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-3-276-284>

2. Мосейко, Д. В. Методика лабораторных исследований по разрушению грунтовой однородной плотины / Д. В. Мосейко, В. А. Пришивалко // Современные направления в проектировании, строительстве и эксплуатации водохозяйственных и энергетических объектов [Электронный ресурс] : материалы студенческой науч.-техн. конф. в рамках 19-й Междунар. науч.-практ. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», Минск, 13–14 дек. 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т, редкол.: В. В. Ивашечкин [и др.] ; сост.: И. В. Качанов, В. В. Власов. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 98–104.

3. Богославчик, П. М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе / П. М. Богославчик // Наука и техника. – 2018. – № 4. – С. 292–296.

4. Богославчик, П. М. Некоторые аспекты надежности гидроузлов / П. М. Богославчик, Ю. О. Метельская // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2015. – Т. 1. – С. 132.

5. Богославчик, П. М. Механизм размыва грунтовой плотины при переливе / П. М. Богославчик // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск : БНТУ, 2018. – Т. 1. – С. 156.

6. Богославчик, П. М. Условия разрушения крепления низового откоса грунтовой плотины при переливе воды через гребень / П. М. Богославчик, В. А. Евдокимов, О. В. Немеровец // Вода. Газ. Тепло 2020 : материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию Белорус. нац. техн. ун-та, 100-летию кафедры «Гидротехническое и энергетическое строительство, водный транспорт и гидравлика», 90-летию кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Минск, 8–10 окт. 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. ; редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 257–260.

7. Пономарчук, К. Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины / К. Р. Пономарчук // Природообустройство. – 2011. – № 3. – С. 77–82.

8. Тищенко, А. И. Результаты исследований транспортирующей способности потока при размыве песчаной вставки резервного водосброса / А. И. Тищенко, Е. Д. Михайлов // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2016. – Вып. № 2 (62). – С. 140–149.

9. Леви, И. И. Моделирование гидравлических явлений / И. И. Леви. – Ленинград : Энергия, 1967. – 254 с.

10. Овчаренко, И. Х. Моделирование гидравлических явлений на гидротехнических сооружениях : учеб. пособие / И. Х. Овчаренко, А. И. Тищенко. – Новочеркасск : Новочеркасский инженер.-мелиорат. ин-т, 1982. – 111 с.

11. Немеровец, О. В. Определение границ затопления нижнего бьефа гидроузла при пропуске расходов половодья / О. В. Немеровец, В. В. Ивашечкин, В. В. Веремеенюк // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте [Электронный ресурс] :

материалы Республ. науч.-техн. конф., Минск, 20–21 мая 2021 г. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 154–158.

12. Немеровец, О. В. Расчет затопления поймы реки Виля при пропуске паводков и половодий / О. В. Немеровец, В. В. Ивашечкин, В. В. Верременюк // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения : материалы Междунар. конф., посвящ. 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февр. 2019 г. : в 2 ч. – Минск : БГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 305–308.

13. Немеровец, О. В. Математическое моделирование затопления территории нижнего бьефа гидроузла в результате прохождения волны прорыва / О. В. Немеровец, В. В. Ивашечкин, В. В. Верременюк // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф., С.-Петербург, 2–5 июня 2021 г. / Гос ун-т морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова ; под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. – С.-Петербург, 2021. – Вып. 5, ч. 2. – С. 39–46.

14. Верременюк, В. В. Моделирование неустановившегося движения в нижнем бьефе гидроузла при разрушении грунтовой плотины / В. В. Верременюк, В. В. Ивашечкин, О. В. Немеровец // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2021. – Т. 64, № 6. – С. 554–567. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-6-554-567>

15. Немеровец, О. В. Определение границ затопления в нижнем бьефе гидроузла при разрушении земляной плотины / О. В. Немеровец // Актуальные проблемы недропользования : тез. докл. XVIII Междунар. форума-конкурса студентов и молодых ученых, С.-Петербург, 15–20 мая 2022 г. – С.-Петербург : С.-Петерб. горн. ун-т, 2022. – Т. 2. – С. 155–157.

Поступила 28 октября 2024 г.