

УДК: 627.8.034

DOI: 10.53816/23061456\_2022\_3-4\_160

**РЕЖИМЫ РАЗМЫВА ПЛОТИНЫ ИЗ МЕСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ПЕРЕЛИВЕ ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЕЁ ГРЕБЕНЬ**

**MODES OF EROSION OF THE DAM FROM LOCAL MATERIALS  
WHEN THE FLOW OVERFLOWS OVER ITS CREST**

*Д.А. Колпаков, д-р техн. наук А.Л. Розов, канд. тех. наук Н.Ю. Русина,  
канд. тех. наук С.И. Косяков*

*D.A. Kolpakov, D.Sc. A.L. Rozov, Ph.D. N.Yu. Rusina, Ph.D. S.I. Kosyakov*

*12 ЦНИИ МО РФ*

Приведены результаты физического моделирования аварии или террористического акта, сопровождающегося переливом воды через гребень плотины из местных материалов. Моделирование осуществлялось на волновом гидравлическом лотке. В ходе опытов оценивались уровень перелива воды через гребень и время размыва модели плотины. Исследовались условия реализации двух различных режимов размыва тела плотины из местных материалов: плоскопараллельного режима размыва плотины, когда смыв грунта происходит равномерно по всей длине напорного фронта, и пространственного режима размыва плотины с образованием прорана. Получен критерий смены режимов размыва для исследованного масштаба модели плотины. Режим равномерного размыва, вероятно, реализуется на нижестоящей плотине в каскаде гидроузлов при аварии или террористическом акте на вышестоящей плотине.

**Ключевые слова:** волновой гидравлический лоток, модель, плотина, проран, размыв.

The results of physical modeling of an accident or terrorist act accompanied by the overflow of water over the crest of the dam from local materials are presented. The simulation was carried out on a wave hydraulic tray. During the experiments, the level of water overflow over the ridge and the time of erosion of the dam model were estimated. The conditions for the implementation of two different modes of erosion of the dam body made of local materials were studied: the plane-parallel mode of erosion of the dam, when the soil is washed away evenly along the entire length of the pressure front, and the spatial mode of erosion of the dam with the formation of a hole. A criterion for changing the erosion modes for the studied scale of the dam model is obtained. The regime of uniform erosion is probably implemented at the lower dams in the cascade of hydroelectric facilities in the event of an accident or a terrorist act at the higher dam.

**Keywords:** wave hydraulic chute, model, dam, proran, washout.

Плотины являются важными объектами инфраструктуры. В настоящее время основной особенностью строительства плотин является их каскадное расположение. Каскад может состоять как из бетонных плотин, так и из плотин, в

конструкции которых используются местные материалы, [1, 2]. Характерной особенностью таких плотин является значительное превышение длины тела плотины, выполненного из местных материалов, над длиной тела плотины из бетона

(рис. 1). Местными материалами выступают песок, гравий, галька, глина, каменная наброска [1].

Плотины удерживают большие объёмы воды (рис. 1) и являются потенциально опасными объектами. Ежегодно в мире аварии происходят на 15 % от числа всех плотин [2]. Примерно 70...75 % аварий происходят на плотинах из местных материалов, а около 25 % аварий происходит по причине перелива паводковой воды через гребень плотины [2]. Аварии подобного рода считаются наиболее опасными. Ещё более опасным следует считать террористический акт с разрушением вышестоящей плотины в каскаде гидроузлов. Это может привести к последовательному переливу воды через гребни нижестоящих плотин, а если это плотины из местных материалов или смешанного типа — к их размыву с катастрофическими последствиями для регионов страны. Указанные обстоятельства определяют важность и актуальность исследований размыва плотины из местных материалов при переливе воды через её гребень.

Для описания террористического акта с разрушением вышестоящей плотины в каскаде гидроузлов подходит задача о взрыве сосредоточенного заряда взрывчатого вещества (ВВ) на её гребне [3, 4]. Возникающий при этом начальный проран расширяется при изливе воды из водохранилища, а создающаяся волна прорыва распространяется вниз по течению и переполняет нижележащие водохранилища. Указанные процессы довольно подробно рассмотрены в [4–6].

Разрушение плотин из местных материалов при переливе воды через гребень также довольно подробно экспериментально и теоретически

исследовано в [7–12]. Обнаружено два принципиально отличных режима размыва плотин — с формированием прорана [7, 8], и плоскопараллельный режим размыва [9–12]. Исследования показывали, что при втором режиме смыв грунта происходит равномерно по всей длине напорного фронта, что приводит к размыву практически всей плотины [9–11]. Вместе с тем при натуральных авариях плотин, сопровождающихся переливом воды через гребень, наблюдается лишь образование промоины (прорана), способной увеличиться до довольно больших размеров.

Авторы настоящей статьи исследуют причины этого противоречия. Ранее в опытах на модели плотины высотой  $H_{\text{п}} = 0,2$  м, уклоном откоса  $1/3$  и шириной гребня  $0,2$  м Розовым А.Л. были получены оба качественно различных режима размыва плотины в зависимости от параметров подходящей волны прорыва. Обнаружено изменение режима размыва с прорана на плоскопараллельный режим при уровне перелива воды над гребнем плотины  $\Delta H \approx 1,7$  см. В настоящей статье представлены результаты продолжающихся опытных исследований по выявлению критериев смены режимов размыва.

Физическое моделирование аварии или террористического акта осуществлялось в волновом гидротоме длиной  $54$  м, шириной  $1,5$  м и высотой  $1,2$  м. Использовалась модель плотины высотой  $H_{\text{п}} = 0,4$  м, уклоном откоса  $1/3$  и шириной гребня  $0,2$  м (рис. 2). При поднятом гидрозатворе гидротом заполнялся водой до уровня  $H_0 = 0,38$  м — на  $2$  см ниже гребня модели плотины. После этого гидрозатвор опускался и уровень воды перед ним повышался до величи-



Рис. 1. Плотины, имеющие тело из местных материалов

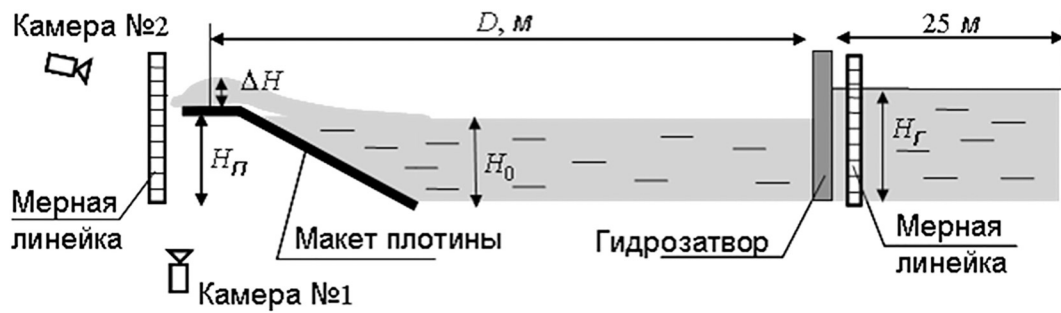


Рис. 2. Схема проведения экспериментов

ны  $H_G$ . Затем гидрозатвор скачком поднимался на высоту, превышающую  $H_G$ . Процесс перелива образовавшейся волны через гребень модели плотины регистрировался видеокамерами № 1 и № 2 (рис. 2). Уровни воды  $H_0$ ,  $H_G$  и  $\Delta H$  измерялись мерными линейками с ценой деления 0,5 см, размещавшимися по центру гребня плотины и перед гидрозатвором. Обработка опытных данных производилась покадровым просмотром видеозаписей видеокамер № 1 и № 2 (рис. 3, 5 и 7).

Физическое моделирование осуществлялось в 2 этапа. Цель первого этапа состояла в оценке условий экспериментов, при которых достигается тот или иной уровень перелива  $\Delta H$  воды через гребень модели плотины. Предполагалось, что интенсивность (объем) перелива коррелирует с уровнем перелива  $\Delta H$ . В опытах использовалась деревянная (неразмываемая) модель, размещавшаяся на расстояниях  $D = 2,25; 4,5; 9$  и

18,5 м от гидрозатвора (рис. 2). Полученные в результате обработки видеок кадров (рис. 3) значения  $\Delta H$  в зависимости от удаления  $D$  и уровнем воды перед гидрозатвором  $H_G = 43, 45$  и 50 см представлены на рис. 4.

Эти экспериментальные данные свидетельствуют, что высота перелива  $\Delta H$  (а следовательно, и интенсивность перелива) воды через гребень модели плотины главным образом зависит от высоты воды перед гидрозатвором  $H_G$  в гидротолчке и практически не зависит от удалённости  $D$  модели плотины от гидрозатвора. Зависимость величины от уровня для условий опытов можно аппроксимировать функцией

$$\Delta H = 0,741 \cdot H_G - 27,194 \text{ см.} \quad (1)$$

На втором этапе физического моделирования осуществлялись исследования разрушения

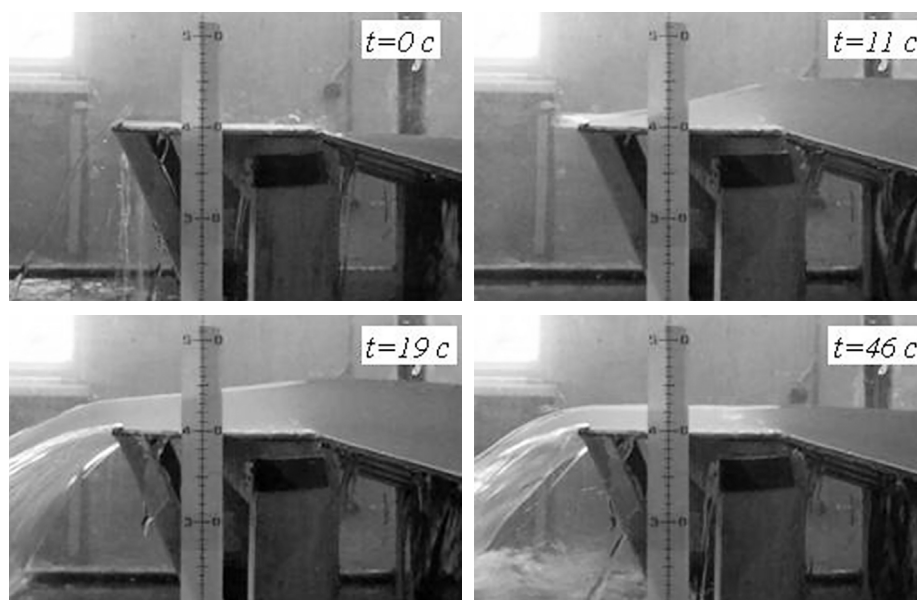


Рис. 3. Перелив воды через гребень модели плотины

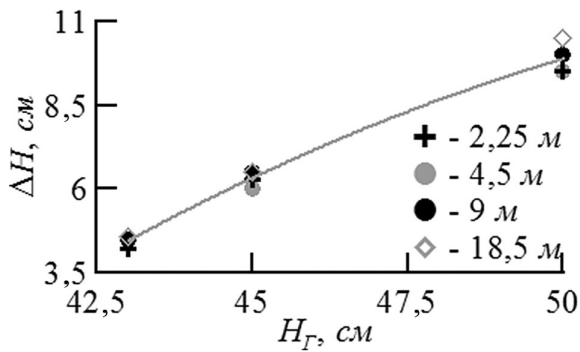


Рис. 4. Уровень воды при переливе через гребень модели плотины

тела модели плотины при переливе воды через её гребень. Схема экспериментов соответствовала рис. 2. Было проведено пять опытов, в которых модель плотины размещалась на удалении  $D=9$  м от гидрозатвора. Сама модель плотины выполнялась из песка, который уплотнялся до  $1,65 \text{ кг/м}^3$ . Во время налива воды в гидрлоток

модель плотины защищалась от фильтрации полиэтиленовой пленкой, которая затем убиралась. Момент перелива волны через гребень плотины принимался за нулевой. В ходе опытов изменялся уровень воды  $H_r$  перед гидрозатвором (рис. 2) и оценивалось время размыва плотины  $t_{пр}$ . Размыв контролировался посредством видеокамер № 1 и № 2 (рис. 2), а также датчиками размыва. Примеры видеокадров приведены на рис. 5 и 7. Режим размыва плотины с образованием прорана был получен при уровне воды перед гидрозатвором  $H_r = 41,5$  и  $42$  см. Согласно формуле (1) при таких уровнях  $H_r$  высота перелива воды через гребень модели плотины составила  $\Delta H \approx 3,6$  и  $3,9$  см. В обоих случаях проран возникал на стыке модели плотины и стенки волнового гидрлотка, а также в месте установки датчиков размыва (рис. 5). Оба этих места характеризовались повышенной фильтрацией песка ввиду недостаточной его уплотнённости. Время развития

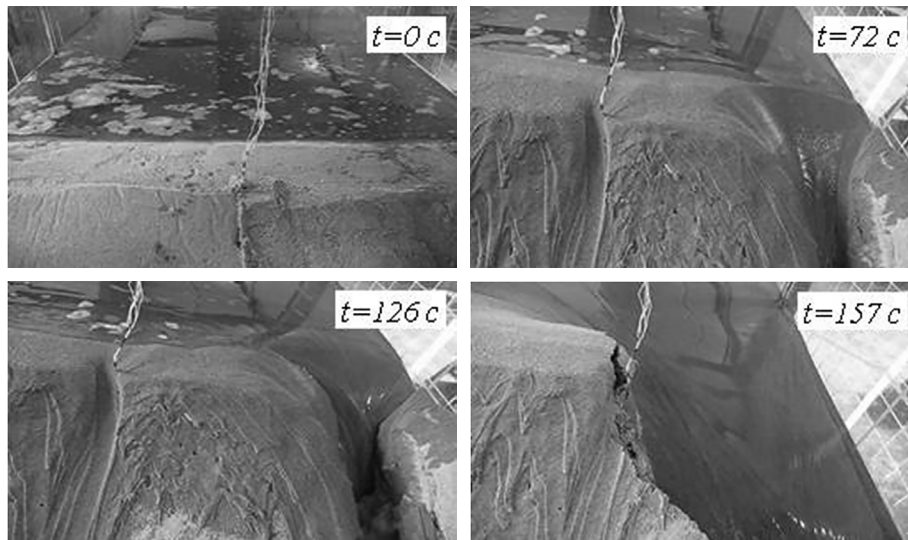


Рис. 5. Формирование прорана в теле макета плотины

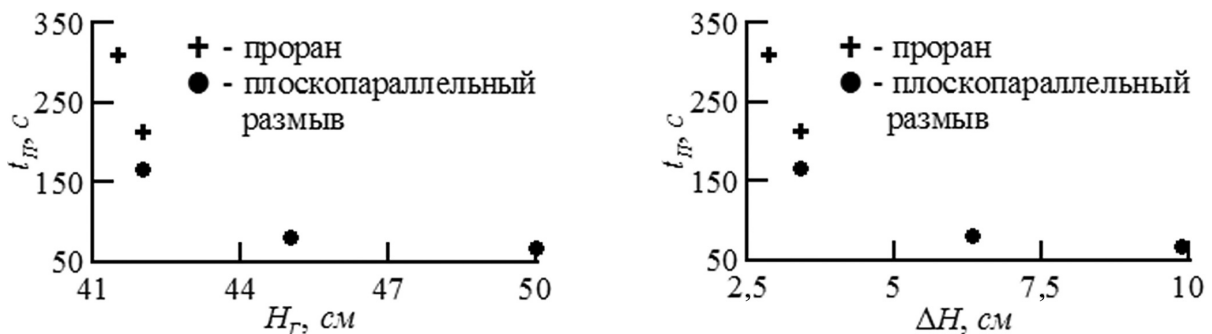


Рис. 6. Время размыва макета плотины



прорана составило, соответственно,  $t_{\Pi} = 311$  и  $213$  с. Эти результаты представлены на рис. 6.

В последующих экспериментах в местах возникновения промоин песок уплотнялся более тщательно. В результате, при неизменном уровне  $H_{\Gamma} = 42$  см воды перед гидрозатвором ( $\Delta H \approx 3,9$  см), режим размыва модели плотины изменился — начался равномерный размыв песка по всей длине напорного фронта (рис. 7). При последующем увеличении уровня воды перед гидрозатвором до  $H_{\Gamma} = 45$  и  $50$  см (высота перелива воды  $\Delta H \approx 6,2$  и  $9,9$  см), т.е. с увеличением интенсивности перелива, также наблюдался равномерный размыв песка по всей длине напорного фронта. Время размыва модели плотины уменьшилось в  $\approx 1,3 \dots 1,9$  раза и составило  $t_{\Pi} = 166, 81$  и  $68$  с соответственно. Эти результаты также представлены на рис. 6.

Физическая картина размыва модели плотины на рис. 7 хорошо согласуется с результатами экспериментов других авторов. Ранее в работах [10–12] плоскопараллельный размыв был разделён на две стадии (рис. 8). На первой стадии происходит смыв параллельными слоями нижней упорной призмы ABCD. Высота гребня  $H_{\Pi}$  со стороны верховой бровки остается постоянной. На второй стадии наблюдается интенсивное снижение  $H_{\Pi}$  гребня. При этом размываемый массив ADE приобретает форму водослива практического профиля, которую сохраняет до полного размыва.

Таким образом, в ходе представленного физического моделирования были получены как плоскопараллельный, так и пространственный режимы размыва плотины. В этом состоит уникальность описанных опытов. Их основной на-

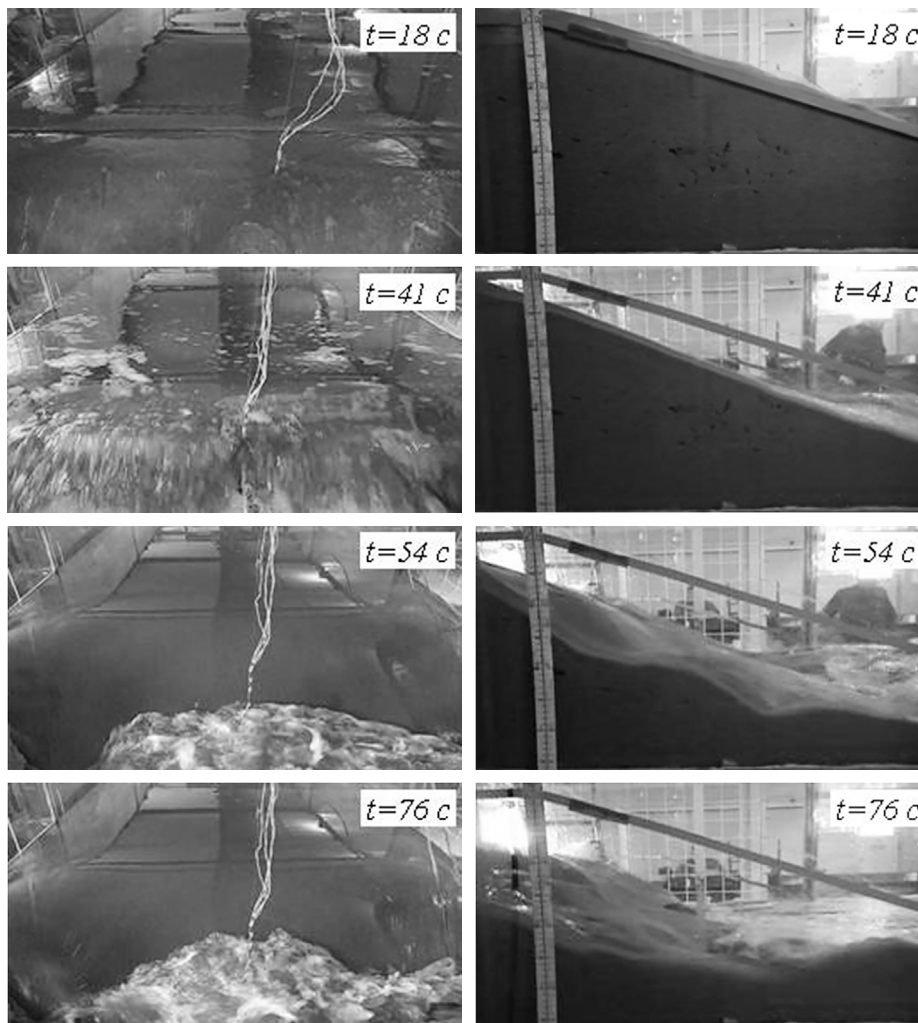


Рис. 7. Равномерный размыв тела макета плотины

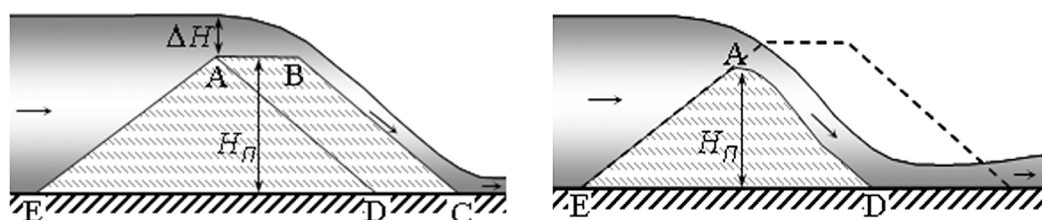


Рис. 8. Схема равномерного размыва грунтовой плотины [10–12]

учный результат состоит в определении критерия перехода одного режима в другой — для условий физического моделирования (когда  $H_{\text{п}} = 0,4$  м) смена режимов происходит при высоте перелива  $\Delta H \approx 3,9$  см. Увеличение уровня перелива с  $\Delta H \approx 1,7$  до  $\approx 3,9$  см при увеличении высоты модели плотины с  $H_{\text{п}} = 0,2$  до  $0,4$  м может свидетельствовать о существовании ранее не выявленного масштабного эффекта увеличения интенсивности потока, требуемой для начала плоскопараллельного размыва, по мере увеличения размеров плотины.

Поскольку режим плоскопараллельного размыва плотины из местных материалов возникает при интенсивном переливе воды через гребень, то такой режим, вероятно, реализуется при аварии или террористическом акте на вышестоящей плотине в каскаде гидроузлов. При этом равномерный размыв нижестоящей плотины происходит за время более короткое, чем развивается проран (рис. 6). Эти обстоятельства обуславливают более катастрофические последствия такого режима размыва для региона или группы регионов страны при аварии или террористическом акте в каскаде гидроузлов. Всё выше перечисленное определяет актуальность дальнейших исследований этого режима размыва плотин из местных материалов.

### Литература

1. Ничипорович А.А. Плотины из местных материалов — М.: Стройиздат. 1973. 320 с.
2. Саямова К.Д., Ахмедов М.А. Статистический анализ повреждений и разрушений грунтовых плотин // Инновационные пути решения актуальных проблем природопользования и защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Алушта, 4–8 июня, 2018 г. /

Белгор. гос. технол. ун-т; отв. ред. И.В. Старостина. — Белгород, 2018. С. 104–113.

3. George A. Afriyie. Effects of explosions on embankment dams. Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada. 2014. 96 p.

4. Физика ядерного взрыва: В 2 т. Том 2. Действие взрыва / Министерство обороны Российской Федерации. Центральный физико-технический институт. — М.: Наука. Физматлит, 1997. 256 с.

5. Розов А.Л. Разрушения плотин и дамб в каскадах ГЭС. Дис. ... докт. тех. наук: 20.02.23. — Ленинград, 1989. 275 с.

6. Русина Н.Ю. Методика расчёта разрушения плотин из местных материалов. Дис. ... канд. тех. наук: 20.02.23. — Санкт-Петербург, 2015. 115 с.

7. Пономарчук К.Р. Разработка методики оценки параметров процесса формирования проранов при прорывах грунтовых плотин. Дис. ... канд. тех. наук: 05.23.16. — Москва, 2001. 120 с.

8. Васильева Е.С. Совершенствование методов расчёта развития проранов в грунтовых плотинах. Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 25.00.27. — Москва, 2021. 22 с.

9. Cristina Lechuga, Miguel Ángel Toledo y Eugenio Oñate. Análisis Del Comportamiento De Las Presas De Escollera Ante Un Vertido Por Coronación // XXIII Congreso Latinoamericano De Hidráulica Cartagena De Indias Colombia, Septiembre 2008. 15 p.

10. Hideaki Mizutani, Hajime Nakagawa, Toshiaki Yoden et al. Numerical Modeling of River Embankment Failure Due to Overtopping Flow Considering Infiltration Effects. Kyoto University Research Information Repository, Kyoto University, Yoko-oji, Fushimi-ku, Kyoto 612-8235, Japan. 56 p.

11. Fiori F., Guercio R. Modelling the overtopping of embankment dams // Hydropower & Dams. Issue two. 1996. Pp. 59–63.

12. Богославчик П.М. Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе // Наука и техника. 2018. Т. 17. № 4. С. 292–296.

### References

1. Nichiporovich A.A. Dams from local materials-Moscow: Stroyizdat, 1973. 320 p. (in Russian).

2. Salamova K.D., Akhmedov M.A. Static analysis of damage and damage to a large-sized dam // Innovative ways to solve the current problems of non-use and environmental protection: sat. dokl. Mezhtunar. nauch.- tech. conf., Alushta, June 4-8, 2018 / Belgorsky State Technol. un-t., Belgorod, 2018. Pp. 104–113 (in Russian).

3. George A. Afriyie. Effects of explosions on embankment dams. Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada. 2014. 96 p.

4. Nuclear Explosion Physics: In 2 vols. Volume 2. The effect of the explosion / Ministry of Defense of the Russian Federation. Central Institute of Physics and Technology. — M.: Nauka. Fizmatlit. 1997. 256 p. (in Russian).

5. Rozov A.L. Destruction of dams and dams in HPP cascades. Dissertation of the Doctor of technical sciences: 20.02.23. — Leningrad. 1989. 275 p. (in Russian).

6. Rusina N.Yu. Methodology for calculating the destruction of dams from local materials. Dissertation of the candidate of technical Sciences:

20.02.23. — St. Petersburg. 2015. 115 p. (in Russian).

7. Ponomarchuk K.R. Development of a methodology for assessing the parameters of the process of formation of prorans during the breakthroughs of ground dams. Dissertation of the candidate of technical sciences: 05.23.16. — Moscow. 2001. 120 p. (in Russian).

8. Vasilyeva E.S. Improvement of methods for calculating the development of prorans in ground dams. Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 25.00.27. — Moscow. 2021. 22 p. (in Russian).

9. Cristina Lechuga, Miguel Ángel Toledo y Eugenio Oñate. Análisis Del Comportamiento De Las Presas De Escollera Ante Un Vertido Por Coronación // XXIII Congreso Latinoamericano De Hidráulica Cartagena De Indias Colombia, Septiembre 2008. 15 p.

10. Hideaki Mizutani, Hajime Nakagawa, Toshiaki Yoden et al. Numerical Modeling of River Embankment Failure Due to Overtopping Flow Considering Infiltration Effects. Kyoto University Research Information Repository, Kyoto University, Yoko-oji, Fushimi-ku, Kyoto 612-8235. Japan. 56 p.

11. Fiori F., Guercio R. Modelling the overtopping of embankment dams // Hydropower & Dams. Issue two. 1996. Pp. 59–63.

12. Bohaslauchyuk P.M. Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. Science and Technique. 17 (4). 2018. Pp. 292–296.