

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292-296>

УДК 627.8.034

## Расчетная модель размыва грунтовых плотин при переливе

Канд. техн. наук, доц. П. М. Богославчик<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2018  
Belarusian National Technical University, 2018

**Реферат.** Перелив воды через гребень грунтовой плотины приводит к ее быстрому разрушению. Образующаяся в нижнем бьефе волна прорыва ведет к тяжелым экономическим и социальным последствиям. Точность расчета параметров волны прорыва зависит от точности построения гидрографа расхода в створе размываемой плотины. На основании экспериментальных данных разработана расчетная схема размыва грунтовой плотины при переливе. В соответствии с этой схемой размыв разделен на две стадии. На первой стадии происходит размыв нижней упорной призмы. Отметка гребня со стороны верховой бровки остается постоянной. На второй стадии наблюдается интенсивное снижение гребня. При этом размываемый массив имеет форму водослива практического профиля. На основании этой схемы разработана математическая модель, в соответствии с которой рассматриваются совместно уравнения деформации и движения потока. Данная модель хорошо согласуется с физической картиной размыва при быстром нарастании паводка и известной ширине размыва, например при расчете размываемых вставок резервных водосбросов. В общем случае и при отсутствии ограничений по ширине (пространственная задача) в расчетных формулах появляется еще одна неизвестная величина – ширина потока в створе размыва. Описаны особенности физической картины размыва для такого случая, приведен и проанализирован ряд известных формул по определению ширины размыва. Выбрано уравнение, которое хорошо вписывается в предложенную математическую модель, что дает возможность адаптировать ее для пространственных условий размыва. Расчеты по данной методике позволяют построить гидрограф расхода в створе размываемой плотины.

**Ключевые слова:** перелив через гребень, волна прорыва, гидрограф расхода, уравнения деформации, уравнения движения потока, ширина размыва

**Для цитирования:** 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>

## Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow

P. M. Bohaslauchyk<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** Water flow over soil dam crest causes its fast failure. Break-through wave being formed in dam ebb side leads to drastic economic and social consequences. Accuracy in calculation of the break-through wave parameters depends on the accuracy of discharge hydrograph construction in the dam erosion site. A calculation scheme for soil dam wash-away due to overflow has been devised on the basis of the experimental data. Wash-away process is divided in two stages in accordance with the devised scheme. Wash-away of the downstream toe occurs at the first stage. The crest level from the side of upstream edge remains constant. Intensive crest lowering is observed at the second stage. The eroding body is considered to have a shape of a round-crested weir. In such a case the washed-away massif has a form of nappe-shaped crest profile. A mathematical model has been developed on the basis of this scheme and according to this model equations of deformation and flow motion are considered simultaneously. The model is consistent in a good way with physical erosion pattern during fast flood rise and when the erosion width is known; the model is recommended for calculation of breaching sections in reserve water outlets. In general case and when the width is unlimited (three-dimensional problem) calculation formulae have one more unknown variable that is flow width within the erosion site. The paper describes peculiar features in physical erosion pattern for such case and a number of the known formulae for determination of the erosion have been given and

### Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220014, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 267-98-08  
fes@bntu.by

### Address for correspondence

Bohaslauchyk Petr M.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220014, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 267-98-08  
fes@bntu.by

analyzed in the paper. The equation which fits in a good way in the proposed mathematical model has been chosen, and it provides the possibility to adapt the model for three-dimensional erosion conditions. Calculations made in accordance with the proposed methodology make it possible to construct discharge hydrograph in the dam erosion site.

**Keywords:** water flow over crest, break-through wave, discharge hydrograph, deformation equations, flow equations, erosion width

**For citation:** Bohaslauchyk P. M. (2018). Calculation Model of Soil Dam Wash-Away Due to Overflow. *Science and Technique*. 17 (4), 292–296. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-4-292–296> (in Russian)

## Введение

Перелив воды через гребень грунтовой плотины приводит к ее безусловному и быстрому разрушению. По этой причине происходит до 33 % аварий на грунтовых гидросооружениях [1, с. 139]. Аварии подобного рода на гидротехнических сооружениях можно отнести к наиболее опасным, так как образующаяся в нижнем бьефе волна прорыва приводит к тяжелым экономическим и социальным последствиям. Расчет параметров волны прорыва в настоящее время выполняется в предположении мгновенного разрушения плотины по всей высоте и ширине. Это предположение носит весьма приблизительный характер. На самом деле процесс размыва происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени, и в процессе размыва изменяются геометрические параметры образовавшегося прорана и соответственно расход воды через него. Таким образом, точность расчета параметров волны прорыва при размыве грунтовой плотины переливом зависит от точности построения гидрографа расхода в створе размываемой плотины. Поэтому исследование процесса размыва грунтовой плотины при переливе воды через гребень – задача важная и актуальная.

## Основная часть

Ранее на основании экспериментальных данных при исследовании резервного водосброса с размываемой грунтовой вставкой [2–4] была разработана расчетная схема размыва грунтовой вставки при переливе. В соответствии с этой схемой (рис. 1) размыв вставки из песчаных грунтов разделен на две стадии. На первой происходит размыв низовой упорной призмы  $ABCD$  (рис. 1a) параллельными слоями. Отметка гребня со стороны верховой бровки остается в данном случае постоянной. На второй стадии (рис. 1b) гребень интенсивно сни-

жается. При этом размываемый массив приобретает форму водослива практического профиля, которую имеет до полного размыва.

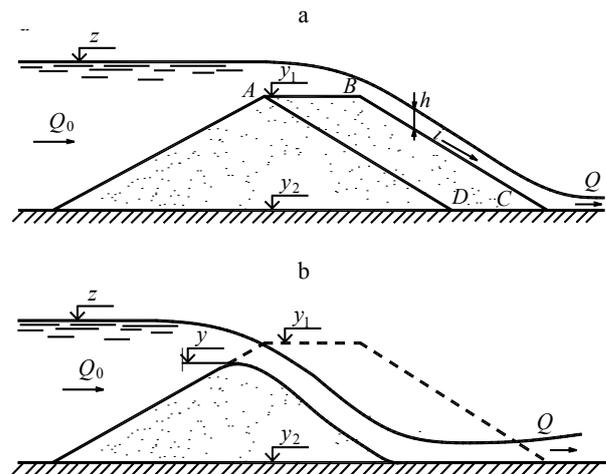


Рис. 1. Расчетная схема размыва грунтовой плотины при переливе: а – первая стадия; б – вторая стадия

Fig. 1. Calculation model of soil dam erosion during overflow: a – first stage; b – second stage

На основании этой схемы была разработана математическая модель, в соответствии с которой рассматриваются совместно уравнения деформации и движения потока. Уравнение деформации для первой стадии размыва имеет следующий вид:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{Ai^{1,2}(2g)^{0,8}}{2,4} m^{1,6}(z-y)^{2,4}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса размываемого грунта низовой упорной призмы  $ABCD$ , кг;  $t$  – время, с;  $A$  – параметр, принимаемый для песчаных грунтов 0,153;  $i$  – уклон дна по низовому откосу;  $m$  – коэффициент расхода;  $z$  – уровень верхнего бьефа;  $y$  – отметка гребня размываемой плотины (для первой стадии  $y = \text{const}$ ).

Уравнение деформации для второй стадии

$$\frac{dy}{dt} = -\sigma \frac{Bm^{0,43}\varepsilon_1}{\rho_0} (z-y)^{0,6}, \quad (2)$$

где

$$B = 6,77(1 + \varphi)dg^{2,17} \left( \frac{5,64n\sqrt{2g}}{\varphi w} \right)^{3,33}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1 - 1,26m^{2/3}}{\beta} 2g; \quad (4)$$

$\sigma$  – коэффициент подтопления;  $\rho_0$  – плотность грунта тела плотины, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – средний диаметр частиц размываемого грунта, м;  $\varphi$  – параметр турбулентности (отношение расчетной скорости падения частицы в воде к ее действительной гидравлической крупности);  $\beta$  – коэффициент, принимаемый для песчаных грунтов 1,5–2,0.

Уравнение движения потока

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - Q}{F}, \quad (5)$$

где  $Q_0$ ,  $Q$  – расход воды в верхнем бьефе и через размываемый проран, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь зеркала воды в верхнем бьефе, м<sup>2</sup>.

Расход воды через размываемый проран определяется для любой стадии по формуле поверхностного водослива

$$Q = \sigma m B \sqrt{2g} (z - y)^{1,5}, \quad (6)$$

где  $B$  – ширина переливающегося потока, м.

Коэффициент расхода  $m$  определяется на первой стадии как для водослива с широким порогом, на второй – как для водослива практического профиля.

Расчеты по уравнениям (1)–(6) позволяют определить  $z$ ,  $y$ ,  $Q$  в любой момент времени и построить гидрограф расхода в створе размываемой плотины. Данная методика хорошо согласуется с результатами исследований других авторов [1, с. 330–332]. Нужно, однако, отметить, что наши исследования проводились применительно к размываемым вставкам резервных водосбросов. Особенностью их работы является ограничение размыва по ширине. Это означает, что ширина  $B$  в формуле (6) – величина известная в любой момент размыва. Вторая особенность: предполагается быстрое нарастание паводка, что означает быстрое повышение уровня верхнего бьефа, размыв при этом происходит одновременно по всей ширине размываемой вставки. Данное допущение впол-

не обосновано для расчета водосбросов, так как подобный случай наиболее опасный с точки зрения надежности гидроузла в условиях паводка.

Если же рассматривать грунтовую плотину достаточно большой ширины, то опыты показывают другую картину размыва, а именно: размыв начинается не по всей ширине, а в некоторой точке при  $B = 0$ . Образуется проран, который со временем увеличивается. Если за основу принять предложенную выше расчетную схему, то в расчетных формулах появляется еще одна неизвестная величина – ширина потока в створе размыва  $B$  (ширина переливающегося потока), которая в процессе размыва изменяется от  $B = 0$  до  $B = B_{\max}$ .

Существует ряд предложений по определению ширины прорана в процессе размыва. А. А. Каниболоцким [5] была предложена следующая формула:

$$B_t = E \left( \frac{u_n (z_t^{n-0,25} - z_0^{n-0,25})}{n - 0,25} - \frac{0,4\sqrt{2g} (z_t^{n+0,25} - z_0^{n+0,25})}{n + 0,25} \right); \quad (7)$$

где

$$E = \frac{3an}{\rho\sqrt{g}d^{0,85}h_n \left[ b + \frac{u}{g}(m_1 + m_2)h_n \right]}; \quad (8)$$

$u_n$  – неразмывающая скорость потока;  $z_0$ ,  $z_t$  – превышение горизонта воды над плоскостью предельного размыва в начальный момент времени и в момент времени  $t$ ;  $n$ ,  $a$  – постоянные, зависящие от топографических характеристик потока (см. ниже);  $\rho$  – плотность грунта тела плотины;  $h_n$  – наибольшая глубина прорана, т. е. глубина прорана по его оси;  $d$  – средний диаметр частиц грунта тела плотины;  $u$  – средняя скорость потока в проране;  $m_1$ ,  $m_2$  – коэффициент заложения верхового и низового откосов плотины.

Поперечное сечение прорана описывается выражением

$$-\frac{h_x}{h_n} = \left( \frac{2x}{B} \right)^4 - 1, \quad (9)$$

где  $h_x$  – глубина прорана на расстоянии  $x$  от его оси.

В работе И. И. Херхеулидзе с соавторами [6] приведены результаты исследований размыва завальных плотин на горных реках и предложены следующие зависимости:

$$\frac{dy}{dt} = 0,47 \frac{h^{1/2}}{d^{1/6}}; \quad (10)$$

$$\frac{dB}{dt} = 0,0115 \frac{h^{0,47}}{d}, \quad (11)$$

где  $y$  – отметка гребня плотины;  $t$  – время в минутах;  $B$  – ширина прорана;  $h$  – глубина потока над гребнем;  $d$  – средний диаметр частиц размываемого грунта.

В [7] С. Г. Косаревым предложена следующая модель размыва. Первоначальная ширина размыва в проране при переливе через гребень принимается  $B_1 = 1,0$  м. Ширина прорана в любой момент времени определяется по формуле

$$B_{i+1} = B_i + \frac{\Delta W_i}{\Omega_{пл}}, \quad (12)$$

где  $\Delta W_i$  – объем грунта, вынесенного из тела плотины за период времени  $t_i$ ;  $\Omega_{пл}$  – площадь сечения плотины в месте размыва.

При этом сечение прорана принимается прямоугольным на участке развития от гребня до основания плотины.

Математическая модель, предложенная в [8] А. М. Прудовским, основана на анализе систематического экспериментального исследования. Эмпирическая зависимость, полученная при относительно небольшом диапазоне изменения величины, имеет следующий вид:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{A\sqrt{g}}{w_{уд}} h_t^{5/3}, \quad (13)$$

где  $t$  – текущее время формирования прорана, с;  $A = 0,02$ ;  $w_{уд}$  – площадь поперечного сечения дамбы между ее гребнем и дном прорана, м<sup>2</sup>;  $h_t$  – разность между уровнем воды в верхнем бьефе и отметкой дна прорана, м.

Тот факт, что данная зависимость получена для весьма ограниченного диапазона изменения факторов, требует ее уточнения.

В работах К. Р. Пономарчук [9, 10] по итогам гидравлического моделирования были построены графики изменения во времени ширины прорана  $B = B(t)$ , на основании которых выведена эмпирическая формула развития ширины прорана  $B$  от времени  $t$

$$\frac{dB}{dt} = 0,035 \frac{g^{1/2} h_t^{9/2}}{W_{уд}^2}, \quad (14)$$

где  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $W_{уд}$  – площадь поперечного сечения плотины между ее гребнем и дном прорана;  $h_t$  – разность уровней воды между верхним бьефом и дном прорана.

Сравнительный анализ показал преимущество формулы (14) по отношению к другим. Она проста, удобна и хорошо согласуется с предлагаемой выше математической моделью размыва. Может настораживать отсутствие в ней характеристик размываемого грунта. Обратимся, однако, к физической картине рассматриваемого явления. Особенность его – это то, что размыв по ширине происходит не только путем перехода частиц грунта во влекомое и взвешенное состояние, но и путем обрушения откосов прорана и выноса обрушивающихся масс грунта в нижний бьеф [4]. Поэтому практически невозможно получить расчетные зависимости  $B = f(t)$  на основе теории размыва, как это было при решении плоской задачи. Кроме того, как было замечено в [2], при скоростях потока, значительно превышающих неразмывающие, характеристики размываемого грунта мало влияют на процесс размыва. В связи с этим нецелесообразно усложнять зависимости, описывающие подобного рода явления, так как это не дает повышения точности расчетов.

Преобразуем (13) к более удобному виду. Приняв  $h_t = (z - y)$  и  $W_{уд} = B(y_1 - y)$ , получаем

$$\frac{dB}{dt} = 0,035 \frac{g^{0,5} (z - y)^{4,5}}{B^2 (y_1 - y)^2}, \quad (15)$$

где  $y_1$  – отметка гребня плотины.

Таким образом, совместное рассмотрение уравнений (1), (2), (5), (6), (15) дает полную картину размыва грунтовой плотины при переливе воды через гребень. Их решение позволяет получить гидрограф расхода в створе размываемой плотины.

## ВЫВОД

Разработанная на основе экспериментальных исследований математическая модель размыва грунтовых плотин при переливе дополнена формулой по определению ширины прорана во времени. Полученная модель позволяет построить гидрограф расхода в створе размываемой плотины, что повышает точность расчета параметров волны прорыва в нижнем бьефе, образующейся при аварии в случае размыва грунтовой плотины переливом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер, А. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А. Б. Векслер, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин СПб.: Изд-во «ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева», 2002. 591 с.
2. Богославчик, П. М. Гидравлический расчет резервного водосброса с размываемой вставкой / П. М. Богославчик // Водное хозяйство и гидротехническое строительство: Республиканский межведомственный сборник. Минск: Вышэйш. шк., 1990. Вып. 19. С. 24–30.
3. Богославчик, П. М. К расчету размыва однородной плотины из песчаных грунтов при переливе через гребень / П. М. Богославчик, И. В. Филиппович // Известия вузов СССР. Энергетика. 1983. № 2. С. 100–105.
4. Филиппович, И. В. Исследование размыва резервного водосброса на крупномасштабных моделях / И. В. Филиппович, П. М. Богославчик // Водное хозяйство и гидротехническое строительство Республиканский межведомственный сборник. Минск: Вышэйш. шк., 1986. Вып. 15. С. 68–73.
5. Каниболоцкий, А. А. Динамика размыва плотины хвостохранилища переливающимся потоком воды / А. А. Каниболоцкий // Осушение месторождений, рудничная гидрогеология, специальные горные работы, гидротехника: темат. сб. науч. тр. Белгород: ВИОГЕМ, 1980. С. 93–98.
6. Херхеулидзе, И. И. Эмпирические зависимости для расчета элементов прорыва завальных плотин / И. И. Херхеулидзе, В. И. Виноградова, Н. В. Рухадзе // Гидрологические и гидротехнические основы проектирования противоселевых сооружений: тр. Закавказ. науч.-исслед. гидрометеор. ин-та. Ленинград: Лениздат, 1972. Вып. 46 (40). С. 181–206.
7. Косарев, С. Г. Методика расчета развития прорана в теле однородных земляных намывных плотин влестствие возникновения аварийных ситуаций / С. Г. Косарев // Гидротехническое строительство. 2012. № 4. С. 17–20.
8. Прудовский, А. М. Образование прорана при прорыве земляной плотины / А. М. Прудовский // Безопасность энергетических сооружений: науч.-техн. и производ. сб. М.: АО «НИИЭС», 1998. Вып. 2–3. С. 67–79.
9. Пономарчук, К. Р. Оценка влияния раскрытия прорана в грунтовой плотине на гидравлический режим нижнего бьефа / К. Р. Пономарчук // Роль природообустройства сельских территорий в обеспечении устойчивого развития АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. М.: МГУП, 2007. Ч. I. С. 273.
10. Пономарчук, К. Р. Оценка параметров развития прорана при разрушении грунтовой плотины / К. Р. Пономарчук // Природообустройство. 2011. № 3. С. 77–82.
2. Bogoslavchik P. M. (1990) Hydraulic Calculation of Reserve Water Discharge with Breaching Section. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo. Respublikanskii Mezhhvedomstvennyi Sbornik* [Water Industry and Hydrotechnical Construction. Republican Interagency Compilation]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ., 19, 24–30 (in Russian).
3. Bogoslavchik P. M., Filippovich I. V. (1983) For Wash-Away Calculation of Uniform Sand-Soil Dam in Case of Crest Overflow. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii SSSR. Energetika* [Proceedings of USSR Higher Education Institutions. Energetika], (2), 100–105 (in Russian).
4. Filippovich I. V., Bogoslavchik P. M. (1986) Investigation of Wash-Away in Reserve Water Discharge while Using Large-Scale Models. *Vodnoye Khozyaistvo i Gidrotekhnicheskoye Stroitelstvo. Respublikanskii Mezhhvedomstvennyi Sbornik* [Water Industry and Hydrotechnical Construction. Republican Interagency Compilation]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ., 15, 68–73 (in Russian).
5. Kanibolotsky A. A. (1980) Dynamics in Wash-Away of Tailings Dam Due to Super-Fluent Water Flows. *Osushenie Mestorozhdenii, Rudnichnaya Gidrogeologiya, Spetsial'nye Gornye Raboty, Gidrotekhnika: Temat. Sb. Nauch. Tr.* [Drainage of Deposits, Mining Hydrogeology, Special Mining Works, Hydraulic Engineering. Thematic Collection of Scientific Works]. Belgorod, VIOGEM, 93–98 (in Russian).
6. Kherkheulidze I. I., Vinogradova V. I., Rukhadze N. V. (1972) Empirical Dependences used to Calculate Elements for Break of Landslide Dam. *Gidrologicheskie i Gidrotekhnicheskie Osnovy Proektirovaniya Protivoselevykh Sooruzhenii: Trudy Zakavkazskogo Nauch.-Issled. Gidrometeor. In-ta* [Hydrological and Hydro-Technical Fundamentals for Designing of Mudflow Protection Structures: Proceedings of Transcaucasian Regional Scientific Research Institute]. Leningrad, Lenizdat Publ., 46 (40), 181–206 (in Russian).
7. Kosarev S. G. (2012) Procedure for Analysis of Break-Out Channels Within Bodies of Homogeneous Hydraulic-Fill Dams in Emergency Situations. *Power Technology and Engineering*, 46 (3), 205–209. <https://doi.org/10.1007/s10749-012-0333-x>.
8. Prudovsky A. M. (1998) Passage Formation Due to Break of Earth-Fill Dam. *Bezopasnost' Energeticheskikh Sooruzhenii: Nauch.-Tekhn. i Proizvod. Sbornik* [Safety of Power Engineering Installations: Scientific-and-Technological and Production Collection]. Moscow, Scientific-Research Institute of Power Engineering Installations, 2–3, 67–79 (in Russian).
9. Ponomarchuk K. R. (2007) Evaluation of Impact of Passage Opening in Soil Dam on Hydraulic Regime of Downstream. *Rol' Prirodoobustroystva Sel'skikh Territorii v Obespechenii Ustoichivogo Razvitiya APK: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. Ch. I* [Role of Environmental Engineering for Agricultural Areas to Provide Sustainable Development for Agroindustrial Complex: Proceedings of Scientific and Practical Conference. Part. 1]. Moscow, Moscow State University of Environmental Engineering, 273.
10. Ponomarchuk K. R. (2011) Evaluation of Parameters for Passage Development while Breaking Soil Dam. *Prirodoobustroystvo*, (3), 77–82 (in Russian).

Поступила 14.02.2018

Подписана в печать 19.04.2018

Опубликована онлайн 27.07.2018

## REFERENCES

1. Veksler A. B., Ivashintsov D. A., Stefanishin D. V. (2002) *Reliability, Social and Environmental Safety of Hydraulic Structures: Risk Assessment and Decision Making*. Saint-Petersburg, ALL-Russian Research Institute of Hydro-technical Engineering named after B. E. Vedenev. 591 (in Russian).

Received: 14.02.2018

Accepted: 19.04.2018

Published online: 27.07.2018