

УДК 556.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОРЫВА ОЗЕРА В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗВИТИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО КАНАЛА

Г. В. Пряхина, В. А. Распутина, С. С. Свирепов

*Санкт-Петербургский государственный университет, 199034
Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, Россия, g65@mail.ru*

В статье предложен алгоритм расчета гидрографа прорывного паводка, описывающий развитие фильтрационного канала в теле моренной плотины и последующее образование перелива воды при обрушении грунта, находящегося над каналом. Был проведен расчет гидрографа прорыва озера Башкара в Приэльбрусье, которое произошло 1 сентября 2017 г. Показано, что результаты моделирования количественно сопоставимы с оценками, полученными по натурным данным.

Ключевые слова: математическое моделирование; прорывы грунтовых плотин; опасные гидрологические явления; фильтрационный канал.

MODELLING OF A LAKE OUTBURST AS A RESULT OF DEVELOPMENT OF PIPING

G. V. Pryakhina, V. A. Rasputina, S. S. Svirepov

*St. Petersburg State University, 199034, Universitetskaya nab., 7-9
St. Petersburg, Russia, g65@mail.ru*

An algorithm for calculating the breakthrough flood hydrograph, describing the development of a filtration channel in the body of a moraine dam and the subsequent formation of water overflow when the soil above the channel collapses, is proposed in the paper. Using the proposed methodology, the calculation of the hydrograph of the breakthrough of Lake Bashkara in the Elbrus region, which occurred on September 1, 2017. It is shown that the simulation results are quantitatively comparable with the estimates obtained from field data.

Keywords: mathematical modeling; ground dam breakthroughs; dangerous hydrological phenomena; filtration, piping.

Введение. Отступление горных ледников, наблюдающееся в настоящее время в результате глобального изменения климата, приводит к увеличению площади горных озер и росту опасности прорыва моренных дамб, которыми они подпружены [1,2]. Одним из возможных механизмов прорыва моренных дамб наряду с переливом через гребень является образование фильтрационного канала (piping). В ряде случаев это явление служит дополнительным триггером прорыва плотины. Таким образом, фор-

мирование фильтрационного канала может являться причиной разрушения дамб, после которого происходит перелив воды. Этот процесс требует пристального изучения — как на основе натурных данных, так и по результатам моделирования. Отметим работы [3,4,5], в которых приводятся результаты исследования формирования фильтрационного канала на основе физического (эксперименты по расширению канала в теле малых грунтовых плотин) и математического моделирования (на основе расчета скорости эрозии). В отечественной научной литературе вопрос разрушения подпруживающих моренных плотин в результате развития сосредоточенной фильтрации, насколько известно авторам, в последние годы не рассматривался. В этой связи, целью данной работы стала адаптация имеющихся алгоритмов расчета формирования фильтрационного канала в теле дамбы и их апробация.

Материалы и методы. Настоящая методика основывается на следующих представлениях о расширении канала в теле грунтовой плотины: в плотине уже имеется начальный канал малого размера, образованный в результате обратной эрозии или усиленной фильтрации. Вода, проходя по каналу, создает напряжение сдвига. Если величина напряжения сдвига больше критической, то канал расширяется, если меньше, то эрозия не происходит. Далее выполняется расчет скорости эрозии. Полученное приращение прибавляется к диаметру канала. Процесс размыва фильтрационного канала прекращается, когда диаметр канала достигнет $1/5$ от высоты плотины, так как образованная арка не может выдержать верхний свод грунта [6]. Далее происходит перелив воды через образовавшийся проран. В отдельных случаях, когда грунт переувлажнён и имеет большой удельный вес, процесс обрушения не происходит. Вода двигается по каналу до полного опустошения водоёма.

Расход воды Q в фильтрационном канале рассчитывается по формуле:

$$Q(t) = \omega(t) \sqrt{\frac{2gH(t)}{h_f(t)}},$$

где g — ускорение свободного падения, равное 9.81 м/с^2 ; $\omega(t)$ — площадь поперечного сечения канала рассчитывается как $\frac{\pi D(t)^2}{4}$; где $D(t)$ — диаметр канала. Напор воды $H(t)$ — это разность отметки воды в потоке $z(t)$ и предполагаемой высоты центра канала z_{pip} ; h_f — потери напора по длине канала, которые рассчитываются как

$$h_f = \sqrt{1 + \frac{fL}{4R}},$$

где L – длина канала; R – гидравлический радиус канала; f – параметр, зависящий от трения, который рассчитывается как $f = 0.2162 \times \left(\frac{D_{50}}{D(t)}\right)^{1/6}$, где D_{50} – средний диаметр частиц грунта. Приращение диаметра канала $\Delta l(t)$ определяется скоростью эрозии $E(t)$:

$$E(t) = k_{er}[\tau(t) - \tau_{кр}]$$

Вода, двигаясь по каналу, создаёт некоторое напряжение сдвига τ . При превышении критического значения τ_c начинается процесс эрозии. Так как шаг по времени равен 1 с, то приращение канала $\Delta l(t)$ равно скорости эрозии $E(t)$:

$$\Delta l(t) = E(t) = k_{er}[\tau(t) - \tau_{кр}]\Delta t$$

где k_{er} – коэффициент эрозии, который определяется по формуле:

$$k_{er} = \frac{10 \times \rho_w}{\rho_s} \times \exp \left\{ -0.121 \times \aleph^{0.406} \times \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right)^{3.1} \right\},$$

где ρ_s – плотность материала плотины; ρ_w – плотность воды; $\aleph$ – доля содержания глины в грунте, из которого сложена плотина. Напряжение сдвига $\tau(t)$, инициируемое водным потоком, рассчитывается как:

$$\tau(t) = \gamma_w R(t) S(t),$$

где γ_w – удельный вес воды; R – гидравлический радиус; $S(t)$ – энергетический уклон, выражение для которого имеет следующий вид $S(t) = \bar{v}^2 n^2 [R(t)]^{-4/3}$, в котором $\bar{v}$ – средняя скорость потока воды; n – коэффициент Стиклера, зависящий от крупности частиц грунта, характеризуется значениями в интервале от 0.01 до 0.05 и определяется соотношением $n = \left(\frac{0.15}{\sqrt{g}}\right) k^{1/6}$, где k – диаметр частиц грунта.

Для определения критического сдвигового напряжения воспользуемся формулой:

$$\tau_{кр} = 6.8(\xi)^{1.68} \aleph^{-1.73} \zeta^{-0.97},$$

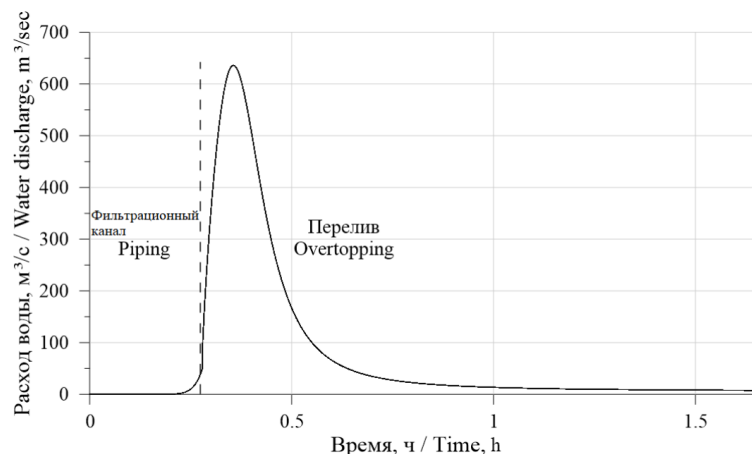
где ξ – индекс пластичности грунта, % (характеристика, отражающая способность грунта удерживать воду, для супесей изменяется в пределах 1-7%,

для суглинков 7-17 %, для глин больше 17 %), из которого сложена плотина, ζ – пористость грунта.

Расчет перелива воды через проран подробно описан в [7].

В качестве объекта для апробации методики было выбрано приледниковое озеро, расположенное у одноименного долинного ледника Башкара (долина реки Адыл-Су, Эльбрусский район, Кабардино-Балкарская республика). Водоем характеризуется динамичностью и нестабильностью, так как неоднократно происходили прорывы озера: в августе 1958 и 1959 гг., в октябре 1960 г. и в сентябре 2017 г.

Согласно полученным результатам (рисунок), сброс воды через фильтрационный канал происходил в течение 16 мин, волна прорывного паводка образовалась при последующем переливе воды. Период, за который прошла волна прорыва, составил около 40 мин. Максимальный расход воды, рассчитанный по предложенной методике, составил 636 м³/с. Расчетная площадь прорана составила 539 м².



Модельный гидрограф прорывного паводка при прорыве озера Башкара

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-27-00171 «Моделирование прорывов водоемов, подпруженных дамбами естественного происхождения».

Библиографические ссылки

1. Begam S., Sen D., Dey S. Moraine dam breach and glacial lake outburst flood generation by physical and numerical models // Journal of Hydrology. 2018. № 1 (563). С. 694-710.
2. Westoby M. J. Glasser N. F., Brasington J, Hambrey M. J., Quincey D. J., Reynolds J. M. Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes // Earth-Science Reviews. 2014. № 2 (134). С. 137-159.
3. Xu T., Zhang L. Simulation of Piping in Earth Dams Due to Concentrated Leak Erosion // Proceedings of Geo-Congress. 2013. P. 1091-1099.

4. *Říha J., Kotaška S., Petrula L.* Dam Break Modeling in a Cascade of Small Earthen Dams: Case Study of the Čížina River in the Czech Republic // *Water*. 2020. Vol. 12, № 8. P. 2309.

5. *Awal R., Nakagawa H., Kawaike K., Baba Y., Zhang H.* Experimental study on piping failure of natural dam // *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*. 2011. V. 67, № 4. P. I_157-I_162.

6. *Протодьяконов М. М.* Давление горных пород и рудничное крепление. Часть 1. Давление горных пород. Москва, Ленинград, Новосибирск: ГИЗ, 1931. – 65 с.

7. *Распутина В. А., Пряхина Г. В., Попов С. В.* Опыт моделирования гидрографа прорывного паводка при разрушении грунтовых плотин в результате перелива // *Успехи современного естествознания*. 2021. № 12. С. 194-204.