

УДК 627.8.034

## **ЖЕР ТОГООНДУН ЖУУП КЕТҮҮСҮН ЭСЕПТӨӨ**

### **РАСЧЕТ РАЗМЫВА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

#### **CALCULATION OF THE EROSION OF GROUNDWATER DAMS**

***М. Дж. Джаманбаев, А. Х. Тологонова, Д. Т. Болотбеков***

***M. Dz. Jamanbayev, A. Kh. Tologonova, D. T. Bolotbekov***

Суу сактагычтагы суу ашып ташып кеткен учурдагы тогоондун талкалануу, агызып кетуу процессинин математикалык моделине эсептөө программасы иштелип чыккан жана программанын тууралыгы көрсөтүлгөн иштеги белгилүү тогоондун суу ташкынынан кыйралыш процессин эсептөө менен текшерилген. Алынган жыйынтык көрсөтүлгөн жумуштагы жыйынтыктар менен дал келгендиги иштелип чыккан программанын тууралыгын далилдейт. Бул программа менен Кумтор алтын кен фабрикасынын калдык сактоочу жайдын тогоондун суу ташкындын негизинде талкалануу процесси жогорудагы айтылган математикалык моделдин негизинде эсептелип чыккан. Эсептөөнүн негизинде тогоондун кыйралуу (талкалануу) процессинин убактысы, тогоондун жырылуу өлчөмүнүн чондугу, ташкындоодон ашып чыккан суунун көлөмү эсептелип чыккан. Алынган жыйынтыктар жакындаштырылган жыйынтыктар болот жана суунун ташкындоосунун негизинде тогоондун кыйралыш процессин сан түрү жактан да, сапаттык жактан да мүнөздөйт.

На основе математической модели размыва грунтовых плотин при переливе воды через гребень, рассмотренной в работах, разработана программа расчета и ее отладка на примере проран грунтовой плотины. В математической модели содержатся различные параметры, которые определяются эмпирически для конкретной плотины. С помощью разработанной программы проведены расчеты размыва грунтовой плотины хвостохранилища золоторудной фабрики Кумтора. Значения отдельных параметров для данной плотины учтены идентично плотины, рассмотренные в вышеприведенной работе. Численно определены время размыва плотины, размер ширины прорана и гидрограф расхода воды за это время. Полученные результаты являются приближенными и количественно и качественно характеризуют процес разрушения грунтовой плотины.

*On the basis of a mathematical model of erosion of groundwater dams during water overflow over the ridge, considered in a calculation program and its debugging have been developed using the example of a soil dam. With the help of the developed program, calculations of the erosion of the soil dam of the tailings dam of one of the gold ore factories of Kyrgyzstan were carried out. The time of erosion of the dam, the size of the opening width and the hydrographic flow of water during this time are numerically determined.*

**Түйүн сөздөр:** тогоондун тар аралыгы; ашып кетүү; кырка; агым; жууп кетүү; жууп кетүү толкуну; агымдын гидрографы; математикалык модель; тогоондун тар аралыгынын туурасы.

**Ключевые слова:** проран; перелив; гребень; расход; размыв; волна прорыва; гидрограф расхода; математическая модель; ширина прорана.

**Keywords:** prorum; overflow; ridge; flow; erosion; breakthrough wave; flow hydrograph; mathematical model; width of the prorum.

**Введение.** Многие случаи разрушения и размыва грунтовых плотин происходят при переливе воды через гребень. Особенно важное значение имеют исследования процесса разрушения грунтовой плотины хвостохранилищ, которые расположены на высокогорьях в условиях вечной мерзлоты. Разрушение и размыв грунтовых плотин при переливе воды через гребень приводят к тяжелым экономическим и социальным последствиям. В действительности размыв плотины происходит не мгновенно, а в течение определенного времени. За это время изменяются геометрические размеры ширины прорана и соответственно гидрограф расхода, которые влияют на динамику и кинематику волны прорыва. Поэтому определение времени размыва и изменение ширины прорана и величины расхода представляется важной задачей. Такая задача решалась согласно математической модели, рассмотренной в работе [1]. Нами составлена программа для численной реализации математической модели, произведена отладка программы и апробирована на одной из плотин хвостохранилища Кыргызстана.

**Математическое моделирование процесса разрушения плотины.** Моделирование процесса разрушения плотины

производилась согласно работе [1]. До разрушения плотина имела трапециадальный вид. Математическая модель разрушения плотины состоит из трех этапов. На первом этапе происходит размыв низового откоса, и к концу первого этапа плотина принимает форму, близкую к треугольной. Причем отметка гребня со стороны верхового откоса остается постоянной. Математически она моделируется уравнениями

$$\frac{db}{dt} = -0,55 \frac{i^{1,275} (\sigma_n m_1)^{1,45} (2g)^{0,725}}{n_1^{2,55} \rho Y_{cp}} (z - Y_{cp})^{2,175}, \quad (1)$$

где  $b(t)$  – ширина части гребня плотины, оставшейся не размывтой к моменту времени  $t$ , м;  $i$  – уклон дна на быстротоке,  $i = \sin \alpha_1$ ;  $\alpha_1$  – угол наклона низового откоса к горизонту;  $\sigma_n$  – коэффициент подтопления ( $\sigma_n = 1$ , если подтопления нет,  $\sigma_n < 1$  в противном случае),  $m_1$  – коэффициент расхода водослива;  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ );  $n_1$  – коэффициент шероховатости поверхности низового откоса, определяемый как  $n_1 = 0.0324d^{\frac{1}{8}}$  при  $h/r$  от 1000;  $h$  – глубина потока, м;  $r$  – радиус частиц размываемого грунта, м (формула Гончарова);  $z$  – отметка уровня верхнего бьефа, м;  $Y_{cp}$  – отметка гребня плотины, м;  $\rho$  – плотность грунта плотины,  $\text{кг/м}^3$ .

Уравнение для изменения ширины прорана во времени имеет вид:

$$\frac{dB}{dt} = 0.035 \frac{\sqrt{g}(z-y)^{4.5}}{[b_{rp} + \bar{m}' (Y_{rp}-y)^2] (Y_{rp}-y)^2}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина прорана, м.

Замечаем, что  $h(t)$  – разность уровней воды между верхним бьефом и дном прорана (действующий напор на проране), м;  $h(t) = z - y$ , где  $y$  – отметка гребня водослива в пределах прорана (дна прорана), м; площадь сечения  $W_{уд} = [b_{cp} + \bar{m}' (Y_{cp} - y)](Y_{cp} - y)$ , где  $m'$  – среднее заложение откосов плотины;  $\bar{m}' = (m_1' h_1 + m_2' h_2) / (h_1 + h_2)$ , где  $m_1$ ,  $h_1$ ,  $m_2$ ,  $h_2$  – заложения и высоты соответственно верхового и низового откосов.

Уравнение для отметки  $y(t)$  гребня водослива в пределах прорана описывается уравнением:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{B \cdot \varepsilon}{\rho g} (\sigma_n m_2)^{0,407} (z - y)^{0,61}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = 2g((1-1,26\sqrt[3]{m_2^2})/\beta)$ ;  $m_2$  – коэффициент расхода водослива (как правило, отличается от  $m_1$ );  $\beta$  – постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта; параметр  $B$  находят по формуле:

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

где  $\varphi$  – параметр турбулентности;  $d$  – размерность мелкозернистых грунтов,  $n_2$  – коэффициент шероховатости поверхности прорана;  $w$  – гидравлическая крупность частиц размываемого грунта, м/с;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса.

Уравнение для отметки  $z(t)$  верхнего бьефа водохранилища

$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_0 - Q - Q_c - Q_E}{F(z)}, \quad (4)$$

где  $Q_0$  – расход воды, поступающей в верхний бьеф (приточность), м<sup>3</sup>/с;  $Q$  – то же через проран;  $Q_c$  – то же в створах водосбросных сооружений;  $Q_E$  – то же, используемый для энергетики;  $F(z)$  – площадь водной поверхности водохранилища при отметке  $z$  верхнего бьефа, м<sup>2</sup>, которую определяют методом наименьших квадратов по опытным данным для каждого конкретного водохранилища.

Уравнение для расхода воды через проран рассматривается как через водослив (рис. 1)

$$Q = mB\sqrt{2g}(z - y)^{1,5}, \quad (5)$$

где  $m$  – коэффициент водослива,  $B$  – ширина прорана;  $h(t)$  – разность уровней воды между верхним бьефом и дном прорана (действующий напор на проране), м;  $h(t) = z - y$ ;  $y$  – отметка гребня

водослива в пределах прорана (дна прорана), м. Значения параметров, входящих в дифференциальные уравнения (1), (2) – (4), определяют для каждого изучаемого объекта отдельно. Как упомянуто выше, весь процесс условно разбивают на три этапа.

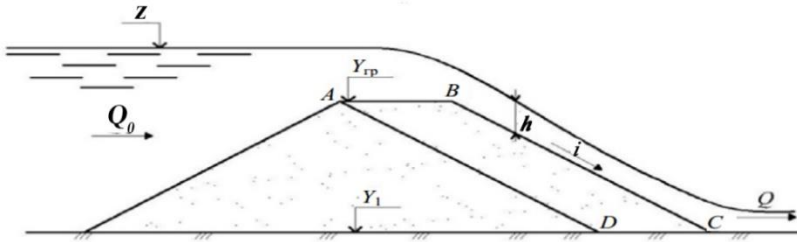


Рисунок 1 – Схема размытия грунтовой плотины при переливе (первый этап)

Первый этап – процесс размытия гребня плотины с его начальной шириной  $b$  гр. Для его моделирования используем уравнения (1), (4), (5) с начальными условиями  $z(0) = Y_{гр}$ ,  $b(0) = b_{гр}$  и коэффициентом расхода  $m = m_1$ . На всем этапе принимается  $y(t) \equiv Y_{гр}$  и  $B(t) \equiv B_0$  (для дальнейших вычислений начальная ширина прорана  $B_0$  оказывается несущественной при определении его конечной ширины, поэтому имеет смысл брать ее значение, равное ширине предполагаемого русла в нижнем бьефе. Вычисления производятся на первом этапе на промежутке времени  $(0; T_1)$ , где  $T_1$  определяется из условия  $b(T_1) = 0,01b_{гр}$ .

Второй этап (рис. 2) – процесс интенсивного расширения прорана и размытия его гребня до дна плотины. Здесь используются уравнения (2) – (4). Для (3) начальное условие  $y(T_1) = Y_{гр}$ . Коэффициент расхода в (5)  $m = m_2$ . Вычисления на втором этапе производятся на промежутке времени  $(T_1; T_2)$ , где  $T_2$  определяется из условия  $y(T_2) = 0,01Y_{гр}$ . Для времени  $t > T_1$  уравнение (1) не используется.

Третий этап – процесс расширения прорана и слив большей части объема водохранилища. Здесь используются уравнения (2), (4), (5). Вычисления на третьем этапе производится на промежут-

ке времени ( $T_2$ ;  $T_3$ ), где  $T_3$  определяется из условия  $z(T_3) < z_{\text{крит}}$ ; где  $z_{\text{крит}}$  – заданная величина.

Отладка программы расчета разрушения плотины проведена на примере Клястицкого водохранилища на р. Нища (Россонский район Витебской области). Плотина насыпная однородная из мелких песков, общая длина 164 м (рис. 3).

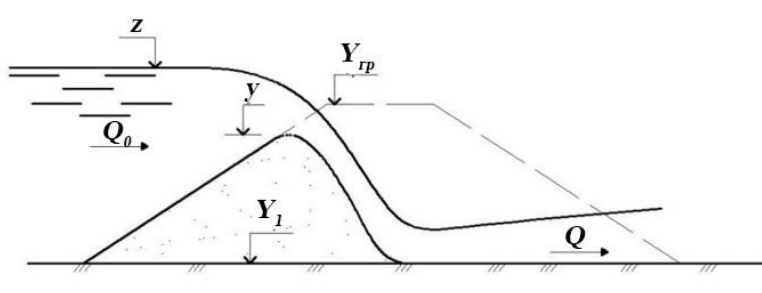


Рисунок 2 – Схема размыва грунтовой плотины при переливе(второй этап)

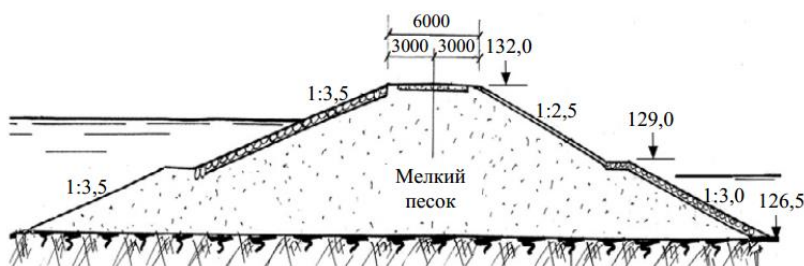


Рисунок 3 – Поперечный профиль однородной грунтовой плотины на реке Нища

По гребню проходит эксплуатационная дорога с гравийным покрытием шириной 4,5 м и обочинами по 0,75 м. Заложение верхового откоса плотины 1:3,5; низового: от гребня плотины до бермы – 1:2,5; от бермы до дна 1:3,0. Отметка гребня  $Y_{\text{гр}} = 5,5$  м относительно гребня водосброса; ширина гребня  $b_{\text{гр}} = 6$  м; диаметр частиц грунта тела плотины  $d = 0,5$  мм; среднее заложение откосов  $m' = 2,75$ ; плотность грунта тела плотины  $\rho = 1600$  кг/м<sup>3</sup>; гидравлическая крупность  $w = 0,05$  м/с; постоянная, зависящая от гранулометрического состава размываемого грунта,  $\beta = 2$ ; коэф-

коэффициенты расхода для первого этапа  $m_1 = 0,35$ , для второго и третьего этапов  $m_2 = 0,5$ ; приточность  $Q_0 = 174 \text{ м}^3/\text{с}$ ; параметр турбулентности  $\varphi = 1$ ; коэффициент подтопления  $\sigma_{\text{п}} = 0,6$ ; коэффициент Кориолиса  $\alpha = 1,4$ ; начальная ширина прорана  $B = 10 \text{ м}$ . Для простоты предполагаем, что расход в створах водосбросных сооружений  $Q_c = 0$ , расход, используемый для энергетики,  $Q_E = 0$ , что не является существенным ограничением.

Вычисленные данные – коэффициенты шероховатости поверхности: низового откоса (по формуле Гончарова)  $n_l = 0,0125$ ; прорана  $n_2 = n_l$ . Площадь водной поверхности Клястицкого водохранилища в зависимости от отметки уровня верхнего бьефа задана в виде таблицы. После обработки табличных данных методом наименьших квадратов получена эмпирическая формула  $F = F(z)$ :

$$F = 1,21 + 0,0007 e^z - 1,5(0,74)(e^z).$$

В статье [1] представлены результаты моделирования процесса разрушения плотины (с момента окончания первого этапа), полученные с помощью компьютерной программы. Они представлены в виде кривых изменения во времени: ширины прорана  $B = B(t)$ , уровня верхнего бьефа  $z = z(t)$ , удельного расхода воды, проходящей через проран,  $Q = Q(t)$  в створе плотины (рис. 4). Согласно изложенному алгоритму расчета размыва грунтовой плотины, нами составлена программа на языке Котлин и произведена отладка программы на этом примере, приведенном в [1]. Наши результаты расчета хорошо согласуются с результатами работы [1]. На рисунке 5 приведены полученные нами результаты расчета. Затем с помощью разработанной программы проведены расчеты размыва грунтовой плотины одного из хвостохранилищ Кыргызстана, расположенного в условиях вечной мерзлоты.

Результаты расчета показаны на рисунке 6 в виде графика расширения прорана, размыва плотины и гидрографа расхода. Как видно из графика, ширина прорана плотины доходит до 142.47 м за 3.69 ч. Пик расхода воды через проран достигается до

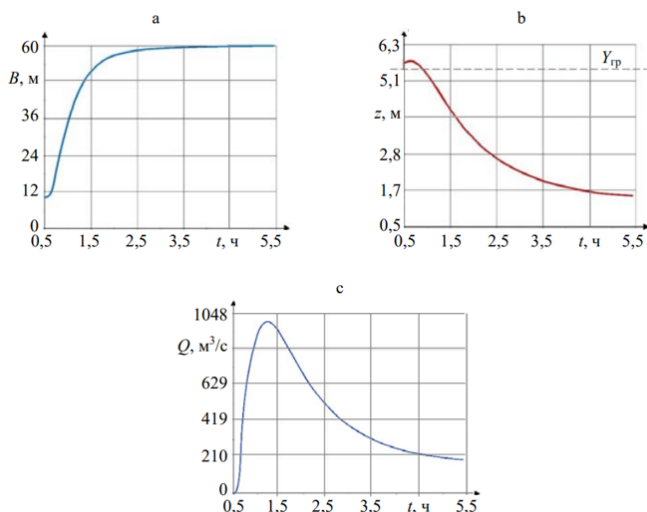


Рисунок 4 – Результаты моделирования разрушения плотины [1]: а – изменение во времени ширины прорана; б – уровня верхнего бьефа; с – расхода воды, проходящей через проран

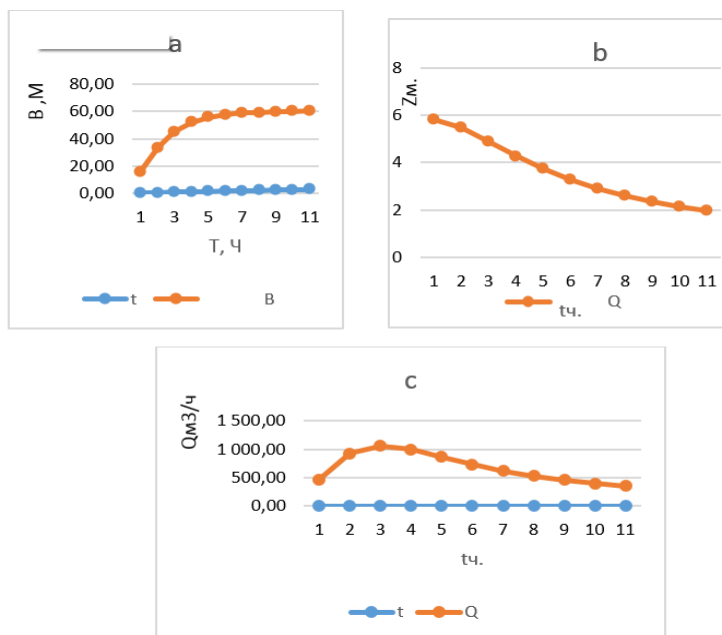
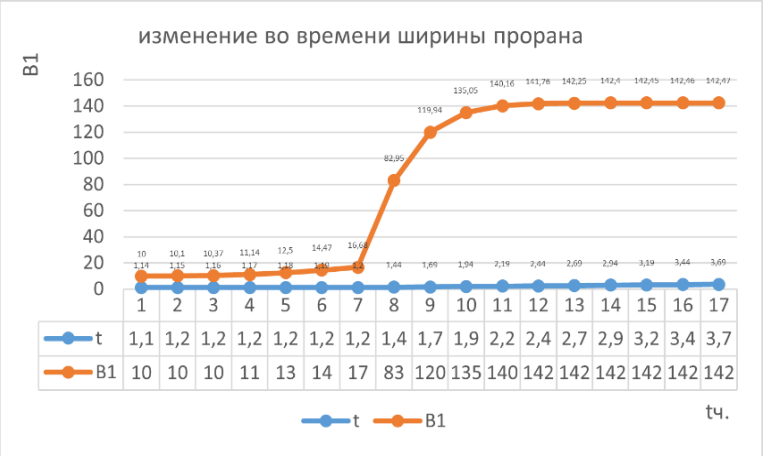
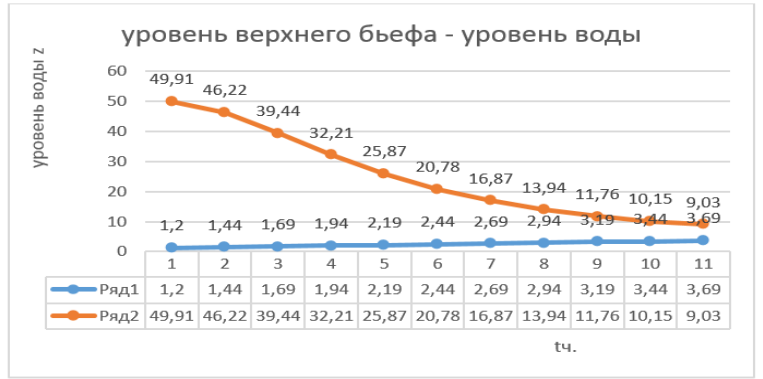


Рисунок 5 – Результаты моделирования разрушения плотины: а – изменение во времени ширины прорана; б – уровня верхнего бьефа; с – расхода воды, проходящей через проран

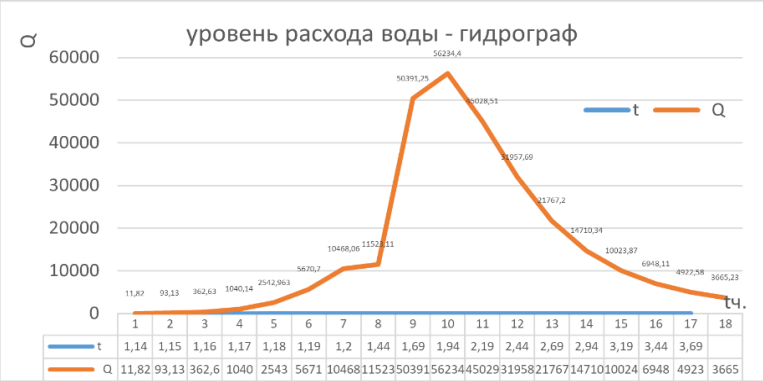




a



b



c

Рисунок 6 – Результаты моделирования разрушения плотины, полученные нами: а – изменение во времени ширины прорана; б – уровня верхнего бьефа; с – расхода воды, проходящей через проран

56234.4 м<sup>3</sup> /с за 1.94 ч, затем начинается уменьшение и доходит до 3665.23 м<sup>3</sup> /с, а уровень воды в хвостохранилище остается на уровне 9.03 м. По нормативу для данной плотины время образования ширины прорана равнялось 3.9 ч.

Полученные результаты являются приближенными так, как отдельные параметры данной плотины для нас были неизвестными и для расчета использовались аналогичные значения из литературы.

### **Выводы**

1. Методика моделирования разрушения грунтовой плотины разработана на основе [1, 2], описывающих трехэтапный размыв грунтовой плотины, баланс воды в водохранилище, образование и развитие прорана, что позволило получить гидрограф расхода в створе размываемой плотины. Разработана компьютерная программа на языке Котлин. Приведен пример расчета размыва плотины на одной из плотин Кыргызстана.

2. Результаты расчетов решения задачи моделирования разрушения грунтовой плотины могут быть использованы как граничные и начальные условия в ее створе для скорости и глубины потока в нижнем бьефе, используемых для определения границ затопления территории, расположенной ниже створа гидроузла.

3. Методика может применяться при: разработке проектной документации на первой стадии проектирования плотин и водохранилищ, определении прогнозных количественных и качественных характеристик водного режима при создании водохранилищ, оценке ущерба от разрушения плотины.

### **Литература**

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

2. Васильева Е.С. Численное моделирование развития проранов в плотинах, сложенных неоднородными грунтами / Е.С.

Васильева, А.И. Алексюк, В.В. Беликов // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием “Научные проблемы оздоровления Российских рек и пути их решения” (8–14 сентября 2019 г., г. Нижний Новгород). – М.: Студия Ф1, 2019. – С. 91–97.