

**Ю. М. Косиченко, Д. В. Бакланова** (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОГО РИСКА АВАРИИ КРУПНОГО КАНАЛА ВСЛЕДСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

В статье предложена методика оценки риска разрушения дамбы крупного канала в насыпи вследствие фильтрационных процессов. Приведен пример определения вероятного риска аварии. Полученные результаты показали, что риск разрушения дамбы канала вследствие фильтрационных процессов по средним градиентам не превышает допустимый. Вместе с тем, не выполняется условие местной фильтрационной прочности грунта при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию, что свидетельствует о возможности локальных разрушений грунта основания за дамбой под действием фильтрационного потока.

Ключевые слова: канал, дамба, риск, авария, фильтрация, градиент напора.

**Yu. M. Kosichenko, D. V. Baklanova** (FSBSE “RSRILIP”)

## **DETERMINATION OF THE PROBABLE EMERGENCY RISK OF LARGE-SCALE CANAL DUE TO THE SEEPAGE DEFORMATIONS**

The methods for risk evaluation of dam destruction of large-scale embanked canal are proposed in paper. Example of the probable emergency risk determination is made. The obtained results have shown that the risk of canal dam destruction as a result of seepage processes at average gradients doesn't exceed the allowable value. Simultaneously the condition of local filtrating soil strength at the seepage outlet to the territory around the canal doesn't fulfill that indicates the possibility of local destructions of the foundation soil behind the dam due to the deep seepage.

Keywords: canal, dam, risk, emergency, filtration, head gradient.

Значительная фильтрация из канала характеризуется появлением ключей, грифонов, выноса грунта из тела дамбы, а также оказывает влияние на режим грунтовых вод, вызывая подтопление, засоление и заболачивание приканальной территории. Отмеченные негативные процессы в дальнейшем могут сказаться на безопасности эксплуатации канала и вызывают образование сосредоточенных ходов фильтрации в теле и основании дамбы с последующим частичным или полным ее разрушением.

Крупные каналы в земляных руслах являются наиболее опасными объектами, так как большие потери на фильтрацию приводят к подъему уровня грунтовых вод в приканальной зоне. По существу такие каналы являются источником питания грунтовых вод. К их числу относится ряд

крупных каналов на Юге России: Донской магистральный, Невинномысский, Большой Ставропольский (I очередь), Право-Егорлыкский, Терско-Кумский и Кумо-Манычский.

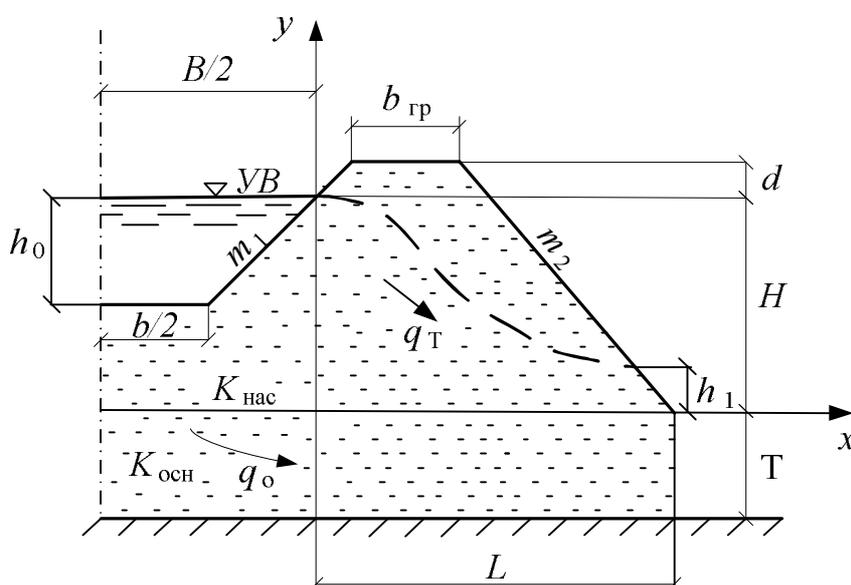
В опубликованных работах по исследованиям крупных каналов В. С. Алтунина [1], Ц. Е. Мирцхулавы [2], Ю. М. Косиченко [3], М. Н. Терлецкой [4], Э. В. Запорожченко [5] отмечается существенное влияние фильтрации из каналов на надежность их дамб и русел. При этом в ряде случаев деформации каналов вследствие фильтрации оказывались настолько значительными, что приводили к прорыву дамб, образованию суффозионных и карстовых воронок в руслах, создающих аварийные ситуации.

В работе В. С. Алтунина [1] приведены исследования процессов деформации русел земляных каналов, рассмотрены факторы, влияющие на фильтрационную устойчивость каналов. Ю. М. Косиченко [3] обобщил опыт применения каналов и рассмотрел вопросы фильтрации из каналов при их эксплуатации. М. Н. Терлецкая в своей работе [4] изучила случаи разрушения дамб каналов Самгорской и Тези-Октамской оросительных систем в Грузии вследствие образования карстово-суффозионных процессов. В работе Э. В. Запорожченко [5] рассмотрены случаи опасных фильтрационных деформаций при строительстве и эксплуатации первой очереди Большого Ставропольского канала (БСК). Автор указывает на наличие интенсивной механической суффозии (выноса грунта) еще на начальной стадии замочки канала, неоднократно возникающую угрозу прорыва дамб, вызванную карстово-суффозионными процессами.

В связи с этим расчет фильтрации через дамбу канала и оценка риска аварии вследствие фильтрационных деформаций представляет важную задачу при проектировании и эксплуатации каналов.

Для определения вероятного риска аварии крупного канала рассмотрим расчетную схему для наиболее опасного участка в насыпи (рисунок 1).

Ввиду симметричности фильтрации из канала в расчетах учтем половину области фильтрации. При этом всю область фильтрации разделим на область фильтрации через тело дамбы канала с удельным фильтрационным расходом  $q_T$  и область фильтрации через дно и основание дамбы с удельным расходом  $q_o$ . Для решения данной задачи воспользуемся известными решениями для однородных грунтовых плотин через тело и основание [6, 7]. При этом учтем, что расчетная схема на рисунке 1 отличается от аналогичной схемы плотины.



$b_{гр}$  – ширина дамбы канала по гребню;  $d$  – превышение гребня дамбы над уровнем воды в канале;  $H$  – действующий напор;  $m_1$  – коэффициент заложения верхового откоса;  $m_2$  – коэффициент заложения низового откоса;  $B$  – ширина канала по урезу воды;  $b$  – ширина канала по дну;  $h_0$  – глубина воды в канале;  $L$  – длина участка дамбы от уреза воды до сопряжения низового откоса с нижерасположенной территорией;  $q_T$  – удельный расход фильтрационного потока через тело дамбы;  $q_o$  – удельный фильтрационный расход в основании дамбы канала;  $K_{нас}$  – коэффициент фильтрации грунта насыпи канала;  $K_{осн}$  – коэффициент фильтрации грунта основания дамбы канала;  $h_1$  – высота выхода депрессионной кривой на низовой откос;  $T$  – толщина водопроницаемого основания

**Рисунок 1 – Расчетная схема крупного канала в насыпи**

Высота выхода депрессионной кривой на низовой откос определяется по формуле:

$$h_1 = \frac{L_p}{m_2} - \sqrt{\left(\frac{L_p}{m_2}\right)^2 - H^2},$$

$$L_p = \beta \cdot h_0 + L; L = m_1 \cdot d + b_{гр} + m_2(H + d); \beta = \frac{m_1}{2m_1 + 1},$$

где  $L_p$  – ширина эквивалентного профиля дамбы канала по основанию, м;

$m_1, m_2$  – коэффициенты заложения верхового и низового откосов;

$H$  – действующий напор, м;

$\beta$  – коэффициент, зависящий от величины коэффициента заложения верхового откоса;

$h_0$  – глубина воды в канале, м;

$L$  – длина участка дамбы от уреза воды до сопряжения низового откоса с нижерасположенной территорией, м;

$d$  – превышение гребня дамбы над уровнем воды в канале, м;

$b_{гр}$  – ширина дамбы по гребню, м;

Расчетные ординаты кривой депрессии вычисляются по уравнению:

$$h_x = \sqrt{H^2 - \frac{2q_T}{K_{нас}} \cdot x_i};$$

$$q_T = K_{нас} \frac{H^2 - h_1^2}{2(L_p - m_2 h_1) + \Delta L_K}; \quad (1)$$

$$\Delta L_K = (H - h_0) \cdot \Phi_1;$$

$$\Phi_1 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{4(H - h_0)}{\pi \cdot \nu / 2} \text{ при } \frac{\nu}{2(H - h_0)} < 0,5,$$

где  $q_T$  – удельный расход фильтрационного потока через тело дамбы канала, м<sup>2</sup>/сут.;

$K_{нас}$  – коэффициент фильтрации грунта насыпи канала, м/сут.;

$x_i$  – абсциссы кривой депрессии, м;

$\Delta L_K$  – фильтрационное сопротивление dna канала, м;

$\Phi_1$  – фильтрационное сопротивление в безразмерной форме;

$b$  – ширина канала по дну, м.

Условие образования общих фильтрационных деформаций грунта тела дамбы канала (например, в виде сосредоточенных фильтрационных ходов) согласно СНиП 2.06.05-84 [8] и СНиП 2.02.02.-85 [9] запишем следующим образом:

$$J_{est,m} > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m},$$

где  $J_{est,m}$  – действующий средний градиент напора;

$J_{cr,m}$  – критический средний градиент напора;

$\gamma_n = 1,10$  – коэффициент надежности, принимаемый по классу гидротехнического сооружения.

При этом действующий средний градиент напора по Р. Р. Чугаеву будет равен:

$$J_{est,m} = \frac{H}{L + 0,4H}. \quad (2)$$

Критический средний градиент напора  $J_{cr,m}$  принимается для песчаных грунтов равным 0,75-1, для супесей и суглинков – 1-4.

Критический средний градиент напора также можно вычислить по формуле:

$$J_{cr} = \frac{\rho_{гр}}{\rho_в} - (1 - n),$$

где  $\rho_{гр}$  – плотность грунта в сухом состоянии, г/см<sup>3</sup>;

$\rho_в$  – плотность воды, г/см<sup>3</sup>;

$n$  – относительная пористость грунта.

Скорость фильтрации при выходе фильтрационного потока на низовой откос:

$$v_{вых} = K_{нас} \cdot J_{est},$$

где  $J_{est}$  – градиент напора при выходе потока на низовой откос.

$$J_{est} = \frac{h_{X_9} - h_{X_{10}}}{X_{10} - X_9}, \quad X_i = \Delta L + i \cdot \Delta X,$$

$$\Delta X = \frac{X_n - \Delta L}{10}, \quad X_n = L_p - m_2 \cdot h_1.$$

Удельный фильтрационный расход в основании дамбы канала может быть определен по формуле:

$$q_o = K_{осн} \cdot T \frac{H}{(H - h_0) \cdot \Phi_1 + 0,88T + L_o}, \quad (3)$$

$$L_o = b_{гр} + (H + d) \cdot (m_1 + m_2),$$

где  $K_{осн}$  – коэффициент фильтрации грунта основания дамбы канала, м/сут.;

$T$  – толщина водопроницаемого основания, м;

$L_o$  – условная ширина дамбы по основанию, м;

Общий удельный фильтрационный расход из канала в насыпи составит:

$$q = (q_T + q_o) \cdot 2. \quad (4)$$

Условие образования местных фильтрационных деформаций грунта тела дамбы при выходе потока на низовой откос (например, в виде суффозии и выпора) запишем как [8]:

$$J_{est} > \frac{J_{cr}}{\gamma_n}. \quad (5)$$

Значения местного критического градиента напора для песчаных грунтов 0,30, для глинистых грунтов – 1,0.

Условие образования общих фильтрационных деформаций основания представим [8]:

$$J_{est,m} > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m}, \quad (6)$$

где  $J_{est,m}$  – действующий средний градиент напора в основании.

Действующий средний градиент напора в основании находим по формуле:

$$J_{est,m} = \frac{H}{(H - h_0) \cdot \Phi_1 + 0,88T + L_0}. \quad (7)$$

Значения критического среднего градиента напора определяется по СНиП 2.02.02.-85 [9].

Условие образования местных фильтрационных деформаций при выходе потока за дамбу на приканальную территорию представим в виде отношения:

$$J_{est} > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr}, \quad (8)$$

где  $J_{est}$  – максимальный местный градиент напора.

$$J_{est} = \frac{H}{\pi \sqrt{x_1^2 - l^2}} = \frac{H}{0,05\pi L_0}, \quad (9)$$

$$x_1 = 1,005l; \quad l = L_0 / 2; \quad L_0 = b_{гр} + (H + d)(m_1 + m_2).$$

Значения осредненного критического градиента напора для песчаных грунтов 0,30, для глинистых грунтов – 1,0.

Оценка риска разрушения дамбы канала вследствие фильтрационных процессов определяется по формуле [6]:

$$\lambda_T = \frac{\gamma_n}{K_{H_{J_{est,m}}}^{гар}} \cdot \lambda_n, \quad (10)$$

где  $\gamma_n = 1,10-1,25$  – коэффициент надежности;

$\lambda_n$  – нормативный риск, определяемый в зависимости от класса сооружения для основного вида нагрузок.

Риск разрушения дамбы канала вследствие фильтрационных процессов можно установить через гарантированный коэффициент надежности, который определяется по формуле:

$$K_{H_{est,m}}^{rap} = \frac{J_{cr,m}^T - m_{J_{cr,m}^T}}{J_{est,m}^T + m_{J_{est,m}^T}},$$

$$m_{J_{cr,m}} = \sigma_{J_{cr,m}} \cdot t_{\alpha}, \quad m_{J_{est,m}} = \sigma_{J_{est,m}} \cdot t_{\alpha};$$

где  $J_{cr,m}^T$  – действующий средний градиент напора в теле дамбы канала;

$J_{est,m}^T$  – критический средний градиент напора в теле дамбы канала;

$\sigma_{J_{cr,m}}$ ,  $\sigma_{J_{est,m}}$  – среднеквадратическое отклонение соответственно критического и среднего градиентов;

$t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента;

Оценка риска разрушения основания дамбы канала вследствие обших фильтрационных деформаций определяется по формулам:

$$\lambda_o = \frac{\gamma_n}{K_{H_{est,m}}^{rap}} \lambda_n, \quad (11)$$

$$K_{H_{est,m}}^o = \frac{J_{cr,m}^o - m_{J_{cr,m}^o}}{J_{est,m}^o + m_{J_{est,m}^o}},$$

где  $J_{cr,m}^o$  – действующий средний градиент напора в основании дамбы канала;

$J_{est,m}^o$  – критический средний градиент напора в основании дамбы канала.

Общий риск разрушения дамбы канала составит сумму рисков разрушения тела и основания:

$$\lambda = \lambda_T + \lambda_o.$$

Приведем пример расчета риска разрушения дамбы канала, проложенного в насыпи, по предложенной выше методике.

Исходные данные к расчету:  $H = 20$  м,  $m_1 = 3$ ,  $m_2 = 2$ ,  $d = 1$  м,  $b_{гр} = 8$  м,  $B = 6$  м,  $T = 10$  м,  $K_{нас} = 1$  м/сут.,  $K_{осн} = 0,3$  м/сут., грунт тела дамбы – супесь, грунт основания – суглинок, соответственно  $J_{cr,m}^T = 1,0$ ,

$J_{cr,m}^o = 0,8$ , критический градиент напора при выходе потока на приканальную территорию примем равным 1,0,  $\lambda_n = 5 \cdot 10^{-3}$  1/год.

В соответствии с расчетными формулами, приведенными выше, найдем:

а) удельный фильтрационный расход через тело дамбы канала по формуле (1):

$$q_T = 1 \cdot \frac{20^2 - 8,59^2}{2(55,14 - 2 \cdot 8,59) + 17,69} = 3,48 \text{ м}^2/\text{сут.};$$

где  $\Delta L_K = (20 - 5) \cdot 1,18 = 17,69$  м,  $\Phi_1 = \frac{2}{3,14} \ln \frac{4(20 - 5)}{3,14 \cdot 3} = 1,18$ ;

$$h_1 = \frac{55,14}{2} - \sqrt{\left(\frac{55,14}{2}\right)^2 - 20^2} = 8,59 \text{ м};$$

где  $L_p = 2,14 + 53 = 55,14$  м,  $L = 3 + 8 + 2(20 + 1) = 53$  м,  $\Delta L = 0,429 \cdot 5 = 2,14$  м;

$$\beta = \frac{3}{2 \cdot 3 + 1} = 0,429;$$

б) фильтрационный расход через основание по формуле (3):

$$q_o = 0,3 \cdot 10 \frac{20}{(20 - 5) \cdot 1,18 + 0,88 \cdot 10 + 113} = 0,430 \text{ м}^2/\text{сут.};$$

где  $L_o = 8 + (20 + 1) \cdot (3 + 2) = 113$  м;

в) общий удельный фильтрационный расход по формуле (4) составит:

$$q_p = (3,48 + 0,43) \cdot 2 = 7,82 \text{ м}^2/\text{сут.};$$

г) действующий средний градиент напора в теле дамбы канала, рассчитанный по формуле (2), будет равен:

$$J_{est,m} = \frac{20}{53 + 0,4 \cdot 20} = 0,328,$$

где  $L = 3 \cdot 1 + 8 + 2(20 + 1) = 53$  м.

В соответствии с условием (5)  $J_{est,m} = 0,328 < \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m} = \frac{1,0}{1,1}$  можно заключить, что нет опасности разрушения тела дамбы канала вследствие нарушения фильтрационной прочности грунта;

д) действующий средний градиент напора в основании дамбы канала находим по формуле (7):

$$J_{est,m} = \frac{20}{(20 - 5) \cdot 1,18 + 0,88 \cdot 10 + 113} = 0,143,$$

где  $L_0 = 8 + (20 + 1) \cdot (3 + 2) = 113$  м.

В соответствии с условием (6)  $J_{est,m} = 0,143 < \frac{1}{\gamma_n} J_{cr,m} = \frac{0,8}{1,1}$ , что свидетельствует об отсутствии опасности разрушения основания дамбы канала;

е) максимальный местный градиент напора при выходе потока на приканальную территорию будет равен по формуле (9):

$$J_{est} = \frac{20}{3,14 \sqrt{56,783^2 - 56,5^2}} = 1,126,$$

где  $l = \frac{113}{2} = 56,5$  м;  $x_1 = 1,005 \cdot 56,5 = 56,783$  м.

Согласно условию (8)  $J_{est} = 1,126 > \frac{1}{\gamma_n} J_{cr} = \frac{1,0}{1,1}$  возникает опасность разрушения дамбы канала при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию;

ж) риск разрушения тела дамбы канала по формуле (10) составил:

$$\lambda_T = \frac{1,1}{2,95} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1,866 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год,}$$

где  $K_{HJ_{est,m}}^{гар} = \frac{1,0 - 0,017}{0,328 + 5,58 \cdot 10^{-3}} = 2,95$ ;  $m_{cr,T} = 0,017 \cdot J_{cr,m}^T = 0,017 \cdot 1,0 = 0,017$ ;

$m_{est,T} = 0,017 \cdot J_{est,m}^T = 0,017 \cdot 0,328 = 5,58 \cdot 10^{-3}$ ;

з) риск разрушения основания дамбы канала по формуле (11) составит:

$$\lambda_o = \frac{1,1}{5,40} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1,019 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год};$$

$$\text{где } K_{H_{J_{est,m}}}^{\text{гар}} = \frac{0,8 - 0,014}{0,143 + 2,50 \cdot 10^{-3}} = 5,40, \quad m_{cr,o} = 0,017 \cdot J_{cr,m}^o = 0,017 \cdot 0,8 = 0,014,$$

$$m_{est,o} = 0,017 \cdot J_{est,m}^o = 0,017 \cdot 0,143 = 2,50 \cdot 10^{-3}.$$

Общий риск разрушения дамбы канала вследствие фильтрационных процессов составит сумму рисков разрушения тела и основания составит:

$$\lambda = 1,866 \cdot 10^{-3} + 1,019 \cdot 10^{-3} = 2,885 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год}.$$

Полученные расчеты показали, что риск разрушения дамбы канала вследствие фильтрационных процессов по средним градиентам составляет  $2,885 \cdot 10^{-3}$  1/год и не превышает допускаемый, принятый  $5 \cdot 10^{-3}$  1/год для сооружения IV класса [6]. Вместе с тем, не выполняется условие местной фильтрационной прочности грунта при выходе фильтрационного потока на приканальную территорию, что свидетельствует о возможности локальных разрушений грунта основания за дамбой под действием фильтрационного потока.

В заключение отметим, что предложенная методика позволяет оценить риск разрушения дамбы крупного канала в насыпи вследствие фильтрационных процессов в зависимости от действующего среднего градиента напора, а также местного выходного градиента напора на низовом откосе.

На основании проведенных расчетов могут быть заблаговременно разработаны предупредительные мероприятия по исключению вероятности аварии крупного канала.

#### **Список использованных источников**

1 Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

2 Мирцхулава, Ц. Е. О надежности крупных каналов / Ц. Е. Мирцху-

лава. – М.: Колос, 1981. – 318 с.

3 Косиченко, Ю. М. Каналы переброски стока России / Ю. М. Косиченко. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 470 с.

4 Терлецкая, М. Н. Каналы в водонеустойчивых грунтах аридной зоны / М. Н. Терлецкая. – М.: Колос, 1983. – 96 с.

5 Запорожченко, Э. В. Инженерно-геологический опыт проектирования, строительства и эксплуатации первой очереди Большого Ставропольского канала / Э. В. Запорожченко. – Ставрополь: Ставропольское книжное издательство, 1974. – 78 с.

6 Безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин [и др.], под ред. В. Н. Щедрина. – М.: Росинформагротех, 2011. – 268 с.

7 Гидротехнические сооружения – справочник проектировщика / В. Н. Недрига [и др.]; под ред. В. Н. Недрига. – М.: Стройиздат, 1983. – 253 с.

8 СНиП 2.06.05-84. Плотины из грунтовых материалов – Введ. 01.07.85. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 32 с.

9 СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений. – Введ. 01.01.87. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. – 84 с.

---

**Косиченко Юрий Михайлович** – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», заместитель директора по науке. Контактный телефон: 8 (8635) 26-51-11. E-mail: [rosniipm@novoch.ru](mailto:rosniipm@novoch.ru)

**Kosichenko Yuriy Mikhailovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems”, Deputy Director for Science. Contact telephone number: 8 (8635) 26-51-11. E-mail: [rosniipm@novoch.ru](mailto:rosniipm@novoch.ru)

**Бакланова Дарья Викторовна** – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации», младший научный сотрудник. Контактный телефон: 8-950-853-22-62. E-mail: [x-dashulya@rambler.ru](mailto:x-dashulya@rambler.ru)

**Baklanova Darya Viktorovna** – Federal state budget scientific establishment “The Russian scientific research institute of land improvement problems”, Junior Researcher. Contact telephone number: 8-950-853-22-62. E-mail: [x-dashulya@rambler.ru](mailto:x-dashulya@rambler.ru)