

## References

1. Voropaev G.V., Ismaiyllov G.H., Fedorov V.M. Problemy upravleniya vodnymi resursami Aralo – Kaspijskogo regiona. / Otv. red. V.G. Pryazhenskaya. M.: Nauka, 203.427 s.
2. Teoriya prognozirovaniya i prinyatiya reshenij. M.: Vysshaya shkola 1977. 351 s.
3. Ismajylov G.H., Vaganov G.A. Otsenka pritoka vody k hydrouzlam Kamskogo kaskada vodohranilishch. //Prirodoobustrojstvo. 2014. № 5. S. 66-70

The material was received at the editorial office  
21.03.2017

## Information about the authors

**Ismajylov Gabil Khudush ogly**, doctor of technical sciences, professor, Chief researcher, Institute of water problems of the Russian academy of sciences; 119333, Moscow, ul. Gubkina, d.3; e-mail: gabil-1937@mail.ru; тел. 8(963)633-2329.

**Vaganov Georgij Andreevich**, engineer-designer of the 1<sup>st</sup> category, Information-analytical center of register and cadastre; FSBEI HE RGAU-MAA named after C.A. Timiryazev, 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova, d.19; e-mail: gavaganov@yandex.ru; тел. 8(916)654-64-79.

УДК 502/504:626.823.91:532.5

**Ю.М. КОСИЧЕНКО, А.Ю. ГАРБУЗ**

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ», г. Новочеркасск, Российская Федерация)

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ТРЕЩИН БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК КАНАЛОВ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

*Целью исследований является получение расчетных зависимостей для определения водопроницаемости облицовки при наличии трещин, с использованием гидравлических методов. Рассмотрены две схемы движения воды через трещину: истечение в атмосферу и грунт основания при ламинарном режиме. Приведены выводы теоретических формул для расчета водопроницаемости трещин бетонных облицовок с использованием гидравлических методов. Используя уравнение Бернулли, получены расчетные зависимости удельного расхода через трещины при истечении в атмосферу и в грунт основания. На основе методов теории фильтрации даны расчетные формулы удельного расхода через закольматированные трещины при истечении в грунт основания. Найденные расчетные формулы сопоставлены с известными зависимостями Г.М. Ломизе для гладких и шероховатых трещин, а также А.Д. Альтицуля при истечении через прямоугольное отверстие. Проведенными расчетами установлено, что при кольматации трещин облицовок каналов удельный расход через трещины существенно снижается до 8 и более раз. В связи с этим самокольматацию трещин можно рассматривать как естественное противofiltrационное мероприятие.*

*Уравнение Бернулли, бетонная облицовка, водопроницаемость облицовки, гладкие и шероховатые трещины, кольматация, удельный фильтрационный расход.*

**Введение.** Бетонные облицовки каналов и лотки оросительных систем, находящиеся в эксплуатации более 30 лет, имеют значительные повреждения вследствие воздействия на бетон атмосферных факторов, перехода температуры через 0°C, когда многократно наблюдаются циклы замораживания-оттаивания, а также происходит неравномерная просадка основания. Это часто приводит к образованию и раскрытию трещин в облицовке. Длина и ширина значительных трещин, возникших в ходе строи-

тельства, после 100 циклов замораживания и оттаивания возрастает соответственно в 2-5 и 10-30 раз[1]. При этом наиболее уязвимым элементом облицовки являются швы, которые часто разрушаются через 10-15 лет.

Особенно подвержены нарушению стыковых соединений лотковые конструкции – акведуки, консольные водосбросы (их концевая часть), лотковые оросительные каналы. В лотке в результате воздействия солнца, воды и ветра образуются волосяные трещины, которые с течением времени расширяются.

В осенний период эти трещины заполняются дождевой водой, а с наступлением морозов она превращается в лед, стремящийся расширить трещину. В дальнейшем трещины расширяются до такой степени, что становятся сквозными, и вода из них начинает просачиваться, продолжая разрушать целостность периметра

сечения лотка, а также бетонной облицовки распределительного канала (рис. 1).

Аналогичный процесс происходит на лотках, акведуках и консольных перепадах, где днище состоит из железобетонных плит, уложенных на опорные балки, которые, в свою очередь, лежат на опорных рамах.



Рис. 1. Состояние бетонных облицовок оросительных каналов после их длительной эксплуатации:

а) распределительного канала; б) лоткового канала

Для выработки решений по прогнозированию образования и развития трещин необходимо изучение самого механизма образования трещин и оценка их водопроницаемости с гидравлической точки зрения.

Исследованиями водопроницаемости бетонных облицовок каналов и лотков занимались: Г.В. Абелишвили, М.Р. Разумовская [2], В.М. Рубин, А.Г. Шлаен [1], А.Г. Алимов [3], Ю.М. Косиченко [4], С.М. Полубедов [5]. Классические исследования через трещины в бетоне выполнены Г.М. Ломизе [6].

**Материалы и методы.** Целью настоящих исследований является получение расчетных зависимостей для определения водопроницаемости облицовки при нали-

чии трещин, с использованием гидравлических методов. Рассмотрим вначале определение удельного расхода через сквозную трещину с использованием уравнения Бернулли [7].

Для этого рассмотрим две схемы движения воды через трещину: истечение в атмосферу и грунт основания. В качестве расчетных схем возьмем случай истечения в атмосферу и в грунт основания.

а) Случай истечения в атмосферу (рис. 2). Истечение в атмосферу возможно для бетонных лотковых каналов, которые установлены на стойках, а также для бетонных облицовок каналов, когда под облицовкой произошла просадка основания.

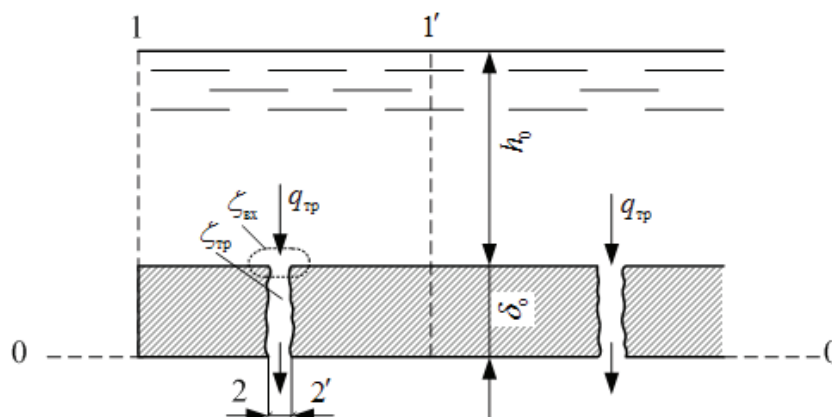


Рис. 2. Расчетная схема водопроницаемости трещин облицовки

Рассмотрим вывод расчетных формул водопроницаемости [4, 5] единичной трещины шириной  $\delta_{тр}$  для выделенного фрагмента 1-1'-2-2'.

Основные допущения:

- движение потока в трещине принимается установившимся и равномерным;
- стенки трещины параллельны между собой, а длина трещины считается бесконечной;
- истечение из трещины является свободным без учета влияния грунта основания, как при истечении в атмосферу;
- режим движения в трещине соответствует ламинарному режиму, при  $Re < Re_{кр}$ .

Используя известное в гидравлике уравнение Бернулли [7], запишем его с учетом рассматриваемой расчетной схемы на рисунке 2 применительно к сечению 1-1' и 2-2' относительно плоскости сравнения 0-0:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{av_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{av_2^2}{2g} + h_w, \quad (1)$$

где  $Z_1, Z_2$  – геометрический напор;  $P_1, P_2$  – гидродинамическое давление;  $\frac{av_1^2}{2g}, \frac{av_2^2}{2g}$  – скоростной напор;  $h_w$  – потери напора на преодоление сопротивления.

Принимая в уравнение (1) согласно расчетной схеме на рис. 2:  $Z_1 = \delta_0, \frac{P_1}{\rho g} = h_0, Z_2 = 0, \frac{P_2}{\rho g} = 0, v_1 = v_2,$

после проведенных сокращений получим

$$\delta_0 + h_0 = h_w, \quad (2)$$

где  $\delta_0$  – толщина облицовки;  $h_0$  – глубина воды;  $h_w$  – общие потери напора, которые определяются по формуле:

$$h_w = h_m + h_{тр} = h_{вх} + h_{тр} + h_{вых} = \zeta_{вх} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_{тр} \cdot \frac{v_1^2}{2g} + \zeta_{вых} \cdot \frac{v_2^2}{2g}. \quad (3)$$

где  $h_m$  – местные потери напора, включающие потери на вход и выход;  $h_{вх}$  – потери на входе;  $h_{вых}$  – потери на выходе;  $h_{тр}$  – потери напора на трение по длине.

Запишем согласно [7]:

$$h_{тр} = \lambda \cdot \frac{\delta_0}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g} = \zeta_{тр} \frac{v^2}{2g}, \quad \zeta_{тр} = \lambda \frac{\delta_0}{4R} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – гидравлический коэффициент трения;  $R$  – гидравлический радиус;  $\zeta_{вх}$  – коэффициент сопротивления входа;  $\zeta_{тр}$  – коэффициент сопротивления трения;  $\zeta_{вых}$  – коэффициент сопротивления выхода;

Подставляя (3) и (4) в уравнение (2) и принимая по [8]  $\zeta_{вх} = 0,5, \zeta_{вых} = 0,$  получим:

$$H_1 = h_0 + \delta_0 = \zeta_{вх} \cdot \frac{v^2}{2g} + \lambda \cdot \frac{\delta_0}{4R} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (5)$$

где  $H_1$  – пьезометрический напор на облицовке.

Гидравлический радиус найдем, как:

$$R = \omega / \chi = \delta_{тр} / 2 = 0,5 \cdot \delta_{тр},$$

где  $\omega$  – живое сечение трещины на 1,0 м длины;  $\chi$  – смоченный периметр.

Тогда уравнение (5) запишем следующим образом:

$$H_1 = h_0 + \delta_0 = \left( \zeta_{вх} + \lambda \cdot \frac{\delta_0}{0,5 \cdot \delta_{тр}} \right) \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (6)$$

Из последнего выражения найдем среднюю скорость в трещине.

$$v = \sqrt{\frac{2g \cdot (h_0 + \delta_0)}{\zeta_{вх} + \lambda \cdot (\delta_0 / 0,5 \cdot \delta_{тр})}}, \quad (6')$$

Коэффициент сопротивления в неограниченной по ширине трещине принимаем для условий ламинарного режима с гладкими стенками по Г.М. Ломизе [6]:

$$\lambda = \frac{6}{Re}, \quad (7)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса;  $Re = \frac{v \cdot \delta_{тр}}{2\nu}, Re < 600$  – для ламинарного движения [6].

Удельный расход через трещину на 1 м ее длины получаем, как:

$$q = v \cdot \omega = \delta_{тр} \sqrt{\frac{2g \cdot (h_0 + \delta_0)}{\zeta_{вх} + \lambda \cdot (\delta_0 / 0,5 \cdot \delta_{тр})}}, \quad (8)$$

где  $\omega = \delta_{тр} \times 1$  м – площадь сечения трещины.

б) Случай истечения в грунт основания при ламинарном режиме (рис. 3). Истечение в грунт основания будет наблюдаться, когда облицовка непосредственно опирается на грунт основания.

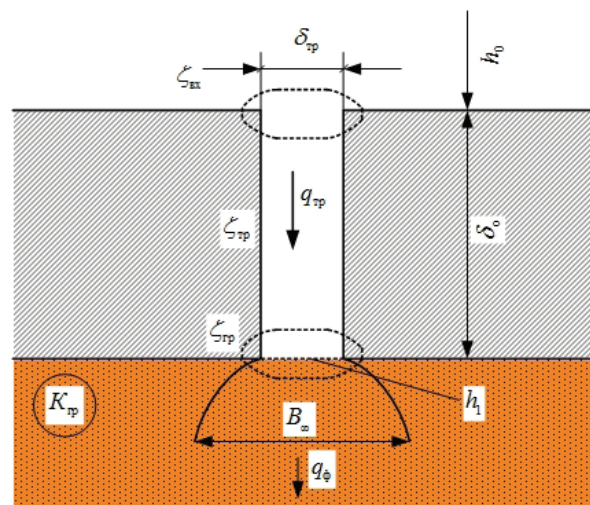


Рис. 3. Расчетная схема водопроницаемости трещин облицовки в грунт основания

Удельный расход через трещину с учетом напора по границе трещины и основания  $h_1$  найдем по формуле:

$$q_{\text{тр}} = \delta_{\text{тр}} \sqrt{\frac{2g(H-h_1)}{\zeta_{\text{вх}} + \lambda(\delta_0/0,5 \cdot \delta_{\text{тр}})}}, \quad (9)$$

где  $H = h_0 + \delta_0$ ,  $h_1$  – пьезометрический напор на границе трещины и грунта основания

Ширина растекания потока под облицовкой согласно [4] определяется по выражению:

$$B_{\infty} = \frac{\pi(h_1 + H_{\text{к}})}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})},$$

где  $H_{\text{к}}$  – высота капиллярного вакуума грунта,  $H_{\text{к}} = (0,3-0,6)h_{\text{к}}$ ,  $h_{\text{к}}$  – высота капиллярного поднятия в грунте основания.

Ширину растекания фильтрационного потока под облицовкой приближенно можно принять равной:

$$B_{\infty} = \beta_0(h_1 + H_{\text{к}}),$$

где  $\beta_0 = 0,5-1,0$  – коэффициент растекания потока под облицовкой.

С другой стороны, удельный фильтрационный расход через трещину найдем по формуле [4]:

$$q_{\text{ф}} \cong \frac{\pi k_{\text{тр}}(h_1 + H_{\text{к}})}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})}, \quad (10)$$

Найдем неизвестный параметр  $\alpha$  из уравнения:

$$\frac{\delta_{\text{тр}}}{h_1 + H_{\text{к}}} = F_1(\alpha)$$

откуда  $F_1(\alpha)$  определяем по следующей формуле:

$$F_1(\alpha) = \frac{2}{\text{arsh}(1/\sqrt{\alpha})} \cdot \left[ \arccos \frac{1}{\sqrt{\alpha}} - \frac{2}{\sqrt{\alpha}} \int \arcsin \frac{S}{\sqrt{\alpha}} \cdot \frac{dS}{S} \right]$$

Уравнение для определения параметра  $\alpha$ :  $F_1(\alpha) = \delta_{\text{тр}}/(h_1 - H_{\text{к}})$ . Приравняв выражения для  $q_{\text{тр}}$  по выражению (9) и  $q_{\text{ф}}$  по (10), найдем неизвестный параметр  $h_1$ , который представляет остаточный напор по границе трещины и грунтового основания:

$$\delta_{\text{тр}} \sqrt{\frac{2g(H-h_1)}{\zeta_{\text{вх}} + \lambda(\delta_0/0,5 \cdot \delta_{\text{тр}})}} = \frac{\pi k_{\text{тр}}(h_1 + H_{\text{к}})}{\text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})}$$

Отсюда найдем  $h_1$ :

$$\frac{2g(H-h_1)}{\zeta_{\text{вх}} + \lambda(\delta_0/0,5 \cdot \delta_{\text{тр}})} = \left[ \frac{\pi k_{\text{тр}}}{\delta_{\text{тр}} \cdot \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})} \right]^2 \cdot (h_1 + H_{\text{к}})^2$$

или

$$2gH(\delta_{\text{тр}} \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}))^2 = 2gh_1(\delta_{\text{тр}} \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}))^2 + (\pi k_{\text{тр}})^2 \cdot (h_1 + H_{\text{к}})^2 \cdot [\zeta_{\text{вх}} + \lambda(\delta_0/0,5 \delta_{\text{тр}})]$$

После преобразований параметр  $h_1$  находим из уравнения вида:

$$F(h_1) = 2gH \cdot A^2 - (\pi k_{\text{тр}})^2 H_{\text{к}}^2 \cdot B, \quad (11)$$

где  $F(h_1) = 2ggh_1A^2 - (\pi k_{\text{тр}})^2 h_1^2 \cdot B + (\pi k_{\text{тр}})^2 2h_1H_{\text{к}}B$ ;  
 $H = h_0 + \delta_0$ ;  $A = \delta_{\text{тр}} \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})$ ;  $B = \zeta_{\text{вх}} + \lambda(\delta_0/0,5 \delta_{\text{тр}})$ .

Данное уравнение решается методом подбора (итераций), задаваясь различными значениями  $h_1$  до тех пор, пока правая часть уравнения (11) будет равна левой части (постоянной).

В случае закольматированной трещины или шва облицовки авторами [9] была получена точная формула удельного расхода фильтрации с использованием метода теории фильтрации (метода конформных отображений) в следующем виде:

$$q_{\text{тр}} = 2k_{\text{кол}}(h_0 + \delta_0) \frac{K(k_2)}{K(k_2')}, \quad (12)$$

где  $k_2 = k_1 \text{sn}(K(k_1), k_1)$ ;  $k_{\text{кол}}$  – коэффициент фильтрации закольматированного слоя трещины;  $K(k_2)$ ,  $K(k_2')$  – полные эмпирические интегралы 1-го рода при модуле  $k_2$  и  $k_2' = \sqrt{1-k_2^2}$ ;  $\text{sn}(K(k_1), k_1)$  – эллиптический синус.

Для определения  $k_1$  получено уравнение вида:

$$\frac{K(k_1)}{K(k_1')} = \frac{\delta_{\text{тр}}}{2\delta_0}, \quad (13)$$

где  $K(k_1)$ ,  $K(k_1')$  – полные эллиптические интегралы 1-го рода при модуле  $k_1$  и  $k_1' = \sqrt{1-k_1^2}$

При малом значении ширины трещины  $\delta_{\text{тр}} \rightarrow 0$ , получена приближенная формула из точного решения (1) при  $K(k_2) = \frac{\pi}{2}$ ;  $K(k_2') \approx \ln(4/k_2)$ ;  $K(k_1) = \frac{\pi}{2}$ :

$$q_{\text{тр}} = \frac{\pi k_{\text{кол}}(h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(4/k_2)}, \quad (14)$$

где  $k_2 = k_1 K(k_1) = k_1 \sin \frac{\pi}{2} = k_1$

Согласно [9] пьезометрический напор между закольматированным слоем в трещине и основанием будет:

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_0)\beta - \pi\sigma H_{\text{к}}}{\beta + \pi\sigma}, \quad (15)$$

где  $\beta = 2 \frac{K(k_1)}{K(k_1')} \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1})$ ;  $\sigma = k_{\text{тр}}/k_{\text{кол}}$ ;  $\alpha$  – расчетный параметр, определяемый по таблицам функции



$F_1(\alpha)$  [11, 12];  $H_k$  – капиллярный вакуум грунта основания, принимаемый равным  $H_k = (0,3 - 0,5)h_k$ , где  $h_k$  – высота капиллярного поднятия воды в грунте основания.

При  $\delta_{тр} \rightarrow 0$  в формуле (15) выражение для параметра  $\beta$  с учетом отношения (13) принимает вид:

$$\beta = 2 \frac{K(k_1)}{K(k'_1)} \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}) \approx \frac{\delta_{тр}}{\delta_o} \text{Arsh}(1/\sqrt{\alpha-1}), \quad (16)$$

Для упрощения расчетов удельного расхода закольматированной трещины с учетом пьезометрического напора  $h_1$  по формулам (12) и (15) составлена номограмма при  $k_{тр} = 1,0$  м/сут =  $1,16 \cdot 10^{-5}$  м/с и  $k_{кол} = 0,3$  м/сут =  $3,47 \cdot 10^{-6}$  м/с;  $k_{тр}/k_{кол} = 3,33 < 10$ , которая представлена на рис. 4.

Более сложные схемы водопроницаемости противофильтрационных облицовок с использованием геомембран при наличии в них малых отверстий рассмотрены в работах [10, 11].

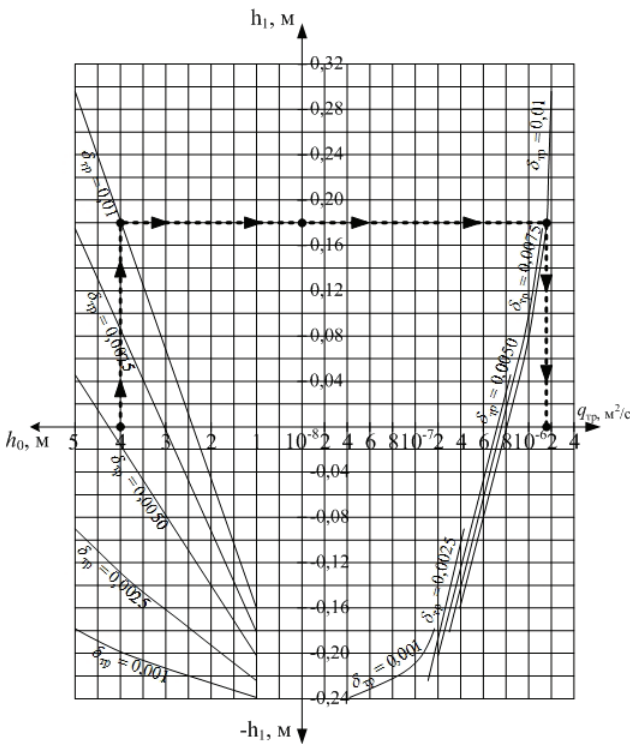


Рис. 4. Номограмма для расчета водопроницаемости закольматированной трещины при  $k_{тр} / k_{кол} = 3,33$

**Результаты и обсуждения.** Рассмотрим теперь пример расчета для случая истечения в атмосферу при следующих исходных данных:

$$h_0 = 1,0 \text{ м}; \delta_o = 0,10 \text{ м}; \delta_{тр} = 0,01 \text{ и } \delta_{тр} = 0,005 \text{ м.}$$

Удельный расход через трещину будет равен:

$$q = v \cdot \delta_{тр} = 7,43 \cdot 0,01 = 0,0744 \text{ м}^3/\text{с на 1 п.м.}$$

1) Задаемся  $Re = 200$ ,  $h_0 = 1,0$  м;  $\delta_{тр} = 0,01$  м;  $\delta_o = 0,10$  м.

$$\lambda = \frac{6}{Re} = \frac{6}{200} = 0,03;$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81(1+0,1)}{0,5 + 0,03(0,1/0,5 - 0,01)}} = \sqrt{19,62} = 4,43 \text{ м/с};$$

$$q = v \cdot \delta_{тр} = 7,43 \cdot 0,01 = 0,0744 \text{ м}^3/\text{с на 1 п.м.}$$

2) Задаемся  $Re = 200$ ,  $h_0 = 1,0$  м;  $\delta_{тр} = 0,005$  м;  $\lambda = 0,03$ .

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81(1+0,1)}{0,5 + 0,03(0,1/0,5 - 0,005)}} = \sqrt{12,68} = 3,56 \text{ м/с};$$

$$q = v \cdot \delta_{тр} = 3,56 \cdot 0,005 = 0,0178 \text{ м}^3/\text{с на 1 п.м.}$$

Сравним полученные результаты по формуле авторов (8) с расчетами по формуле Г.М. Ломизе [6].

3) По формуле Г.М. Ломизе (для гладкой трещины)

Исходные данные:  $h_0 = 1,0$  м;  $\delta_o = 0,10$  м;  $\delta_{тр} = 0,01$  м;  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>;  $\mu = 0,134 \cdot 10^{-7}$  кг·с/см<sup>2</sup>

$$q = \frac{\gamma}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{тр}^3 \cdot I$$

$$I = \frac{h_0 + \delta_o}{\delta_o} = \frac{1,0 + 0,10}{0,10} = 11,1$$

$$q = \frac{\gamma}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{тр}^3 \cdot I = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,134 \cdot 10^{-7}} \cdot 1,0^3 \cdot 11,1 = 0,069 \text{ м}^3/\text{с на 1 п.м.}$$

4) По формуле Г.М. Ломизе (для шероховатой трещины)

Исходные данные:  $h_0 = 1,0$  м;  $\delta_o = 0,10$  м;  $\delta_{тр} = 0,01$  м;  $e = 0,002$  м;  $\gamma = 1 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>;  $\mu = 0,134 \cdot 10^{-7}$  кг·с/см<sup>2</sup>.

$$q = \frac{\gamma}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{тр}^3 I \frac{1}{1 + 6 \left( \frac{e}{\delta_{тр}} \right)^{1,5}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,134 \cdot 10^{-7}} \times 1,0^3 \cdot 11,1 \frac{1}{1 + 6 \left( \frac{0,002}{0,01} \right)^{1,5}} = 0,0450 \text{ м}^3/\text{с на 1 п.м.}$$

5) Также сравним результаты расчета с гидравлической формулой для малого прямоугольного отверстия [8]:

$$q_0 = \mu_0 \cdot \omega \sqrt{2gH} \quad (15)$$

где  $\mu_0$  – коэффициент расхода малого отверстия по формуле А.Д. Альтшуля [8].

$$\mu_0 = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{Re_H}} = 0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{46400}} = 0,619$$

где  $Re_H = 46400$

$$\omega = l_{тр} \cdot \delta_{тр} = 1,0 \cdot 0,01 = 0,01 \text{ м}^2$$

$q_{тр} = 0,619 \cdot 0,01 \sqrt{19,62(1+0,1)} = 0,0287 \text{ м}^3/\text{с}$   
на 1 п.м.

Найдем расхождение с расчетом по формуле авторов (8) и Г.М. Ломизе для шероховатых трещин:

$$\varepsilon_{\%} = \frac{q_{тр,Ломизе} - q_{тр,авт.}}{q_{тр,Ломизе}} \cdot 100\% = \frac{0,0450 - 0,0443}{0,0450} \cdot 100 = 1,5\%$$

В случае истечения через трещину в грунт основания при  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ,  $\delta_0 = 0,10 \text{ м}$ ,  $\delta_{тр} = 0,01 \text{ м}$  расход через трещину определим по формуле (10) с учетом  $k_{гр} = 1,0 \text{ м/сут} = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ ,  $h_1 = 0,90 \text{ м}$ ,  $H_k = 0,30 \text{ м}$ ,  $\alpha = 1,00005$ :

$$q_{\phi} = \frac{\pi k_{гр} (h_1 + H_k)}{Arsh\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha-1}}\right)} = \frac{3,14 \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} (0,90 + 0,30)}{Arsh\left(\frac{1}{\sqrt{1,00005-1}}\right)} = 0,774 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$$

В случае истечения через заcolmатированную трещину в грунт основания при  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ,  $\delta_0 = 0,10 \text{ м}$ ,  $\delta_{тр} = 0,01 \text{ м}$ ,  $k_{гр} = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ ,  $k_{кол} = 3,47 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$  получим по формуле (14) с учетом зависимостей для  $h_1$  (15) и для  $\beta$  (16):

$$q_{тр} = \frac{\pi k_{кол} (h_0 + \delta_0 - h_1)}{\ln(4/k_2)} = \frac{3,14 \cdot 3,47 \cdot 10^{-6} (1,0 + 0,1 - 0,228)}{\ln(4/0,000001)} = 0,952 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

где

$$h_1 = \frac{(h_0 + \delta_0)\beta - \pi\sigma H_k}{\beta + \pi\sigma} = \frac{(1,0 + 0,1)0,564 - 3,14 \cdot 3,34 \cdot 0,3}{0,564 + 3,14 \cdot 3,34} = -0,228 \text{ м};$$

$$\beta = \frac{\delta_{тр}}{\delta_0} Arsh\left(\frac{1}{\sqrt{\alpha-1}}\right) = \frac{0,01}{0,10} Arsh\left(\frac{1}{\sqrt{1,00005-1}}\right) = 0,564;$$

$$k_2 = k_1 = 0,000001; \alpha = 1,00005;$$

$$H_k = 0,3 \cdot h_k = 0,3 \cdot 1,0 = 0,3 \text{ м}.$$

При использовании номограммы на рисунке. 4 при больших глубинах в канале ( $h_0 > 1,0 \text{ м}$ ) найдем удельный расход через заcolmатированную трещину таких же размеров при  $h_0 = 4,0 - q_{тр} = 1,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , где  $h_1 = 0,18 \text{ м}$ , что будет больше в 1,84 раза, чем при  $h_1 = 1,0 \text{ м}$ .

Результаты расчетов удельных расходов истечения через трещины бетонной облицовки для различных случаев: истечения в атмосферу, истечения в грунт основания и истечения через заcolmатированную трещину по полученным формулам авторов, а также по формулам Г.М. Ломизе и истечения через малое прямоугольное отверстие по формуле А.Д. Альтшуля приведены в таблице.

Принимая в качестве наиболее точного значения удельного расхода через трещину по формуле Г.М. Ломизе для трещин с шероховатыми стенками, убеждаемся, что практически идентичные результаты с ней дает формула авторов (8) (расхождение  $-1,5\%$ ), формула Г.М. Ломизе через гладкие трещины дает завышенные значения  $q_{тр}$  на  $53,3\%$ , а формула гидравлики при истечении через малое отверстие по формуле А.Д. Альтшуля – значения расхода на  $35,2\%$ . В то же время, удельный расход при истечении через трещины в грунт основания по формуле авторов (9) сильно снижается более чем в  $5,8 \cdot 10^3$  раз по сравнению с истечением в атмосферу. В случае заcolmатированных трещин удельный расход еще больше снижается в  $4,7 \cdot 10^4$  раз по сравнению с истечением в атмосферу, при этом за счет толькоcolmатации трещин происходит снижение расхода более чем в 8 раз.

Таблица

**Результаты расчетов удельных расходов через трещины облицовки (при  $h_0 = 1,0 \text{ м}$ ,  $\delta_0 = 0,10 \text{ м}$ ,  $\delta_{тр} = 0,01 \text{ м}$ ,  $k_{гр} = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ ,  $k_{кол} = 3,47 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ )**

Расчетные данные $q_{тр}, \text{ м}^2/\text{с}/\varepsilon, \%$ или кратность, раз, по формулам					
Авторов (8) при истечении в атмосферу	Г. М. Ломизе для гладких трещин	Г. М. Ломизе для шероховатых трещин	При истечении через прямоугольное отверстие по А.Д. Альтшулю	Авторов (9) при истечении в грунт основания	Авторов (14) при истечении в грунт основания через заcolmатированную трещину
$\frac{0,0443}{1,5\%}$	$\frac{0,0690}{-53,3\%}$	0,0450	$\frac{0,0287}{35,2\%}$	$\frac{0,774 \cdot 10^{-5*}}{5,81 \cdot 10^3 \text{ раз}}$	$\frac{0,952 \cdot 10^{-6**}}{4,73 \cdot 10^4 \text{ раз}}$

**Примечание:** \* – значение удельного расхода при  $k_{гр} = 1,0 \text{ м/сут} = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ ;

\*\* – значение удельного расхода при  $k_{гр} = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$  и  $k_{кол} = 3,47 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ .

### Выводы

1. Используя уравнение Бернулли, получены расчетные формулы для расчета водопроницаемости гладких трещин в бетонной облицовке для случаев истечения в атмосферу и грунт основания.

2. Для случая закольматированной трещины в облицовке канала получена точная формула удельного расхода фильтрации, из которой найдена приближенная расчетная формула при малом значении ширины раскрытия трещины  $\delta_{тр} \rightarrow 0$ . На основе данных формул построена расчетная номограмма, которая позволяет найти  $q_{тр}$  и параметр  $h_1$ .

3. С целью иллюстрации и сравнения результатов проведены расчеты для различных случаев: истечения через трещину в атмосферу, истечения через трещину в грунт основания и истечения через закольматированную трещину в грунт основания, которые свидетельствуют, что наиболее близкие значения с эталонной формулой Г.М. Ломизе дает полученная формула авторов (8).

4. Проведенные расчеты показали, что при кольматации трещин облицовки в процессе их эксплуатации только за счет эффекта самокольматации происходит снижение удельного расхода через них до 8 и более раз, что можно рассматривать, как естественное противofильтрационное мероприятие на каналах.

5. Для повышения эффекта самокольматации, как трещин бетонных облицовок, так и их разрушенных швов, могут использоваться глинистые растворы и добавки к ним, в виде водорастворимых полимеров.

### Библиографический список

1. Рубин В.М., Шлаен А.Г. Бетонная облицовка каналов. М.: Агропромиздат, 1987. 184 с.

2. Абелишвили Г.В., Разумовская М.Р., Жордания Т.Г. Роль фильтрации через трещины и пути повышения водопроницаемости бетонных облицовок каналов. / Тр. координац. совещаний по гидротехнике, вып. № 68. Л.: 1971. С. 204-208.

3. Алимов А.Г. Ультразвуковой контроль водонепроницаемости бетона мелиоративных гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации // Гидротехническое строительство. 2009. № 5. С. 18-21.

4. Косиченко Ю.М. Расчет противofильтрационной эффективности облицовок

с пленочными экранами // Гидротехническое строительство. 1983. № 12. С. 33-38.

5. Косиченко Ю.М., Полубедов С.М. Водопроницаемость противofильтрационных облицовок при наличии в них трещин // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 1999. № 4. С. 91-94.

6. Ломизе Г.М. Фильтрация в трещиноватых породах. М.: Госэнергоиздат, 1951. 127 с.

7. Штеренлихт Д.В. Гидравлика. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2004.

8. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1982. 224 с.

9. Косиченко Ю.М., Баев О.А., Гарбуз А.Ю. Оценка водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами при длительной эксплуатации // Вестник МГСУ. 2016. № 7. С. 114-133.

10. Баев О.А. Моделирование процесса водопроницаемости противofильтрационных экранов из геомембран [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона: электрон. науч. журнал / Северо-Кавказский научный центр высшей школы Южного федерального университета. – Электрон. журн. – Ростов н/Д.: Ростовское региональное отделение Российской инженерной академии, 2015. № 1. – Ч. 2. – Режим доступа: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/Baev.pdf\\_8785ee344d.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/Baev.pdf_8785ee344d.pdf).

11. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Теоретическая оценка водопроницаемости противofильтрационных облицовок нарушенной сплошности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2014. № 3. С. 68-74.

Материал поступил в редакцию 05.05.2017 г.

### Сведения об авторах

**Косиченко Юрий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБНУ, «РосНИИПМ», 346400, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, тел.: 8 (8635) 26-51-11, e-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

**Гарбуз Александр Юрьевич**, аспирант, младший научный сотрудник, ФГБНУ, «РосНИИПМ», 346400, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, тел.: 8 (8635) 26-50-68, e-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

**YU.M. KOSICHENKO, A.JU. GARBUZ**

Federal state budgetary scientific institution «Russian Research Institute of Land Improvement Problems» (FSBSI ROSNIIMP), Novocheerkassk, Russian Federation

## **RATED ESTIMATION OF WATER PERMEABILITY OF CRACKED CONCRETE FACING OF CHANNELS BASED ON HYDRAULIC METHODS**

*The purpose of investigations is getting rated dependencies to determine water permeability of the cracked facing using hydraulic methods. There are considered two schemes of water treatment through the crack: flowing into the atmosphere and foundation soil under the laminar regime. There are given conclusions of theoretical formulas for calculation of cracks permeability of concrete wall using hydraulic methods. Using the Bernoulli's equation there are obtained calculated dependencies of the specific consumption through cracks at flowing into the atmosphere and foundation soil. Based on the methods of the filtration theory calculation formula of the specific flow rate through colmated cracks when flowing into the foundation soil. at the end of the ground. The found calculated formulas are compared with the known dependencies of G.M. Lomize for smooth and rough cracks and also A.D. Altshuler at flowing through a rectangular hole. It was established by the conducted calculations that at colmating cracks facing of channels the specific consumption through the cracks significantly decreases by 8 or more times. In this regard, selfcolmating of cracks can be considered antilittering action.*

*Bernoulli's equation, concrete lining, lining permeability, smooth and rough cracks, colmating, specific filtration consumption.*

### **References**

- Rubin V.M., Shlaen A.G.** Betonная облицовка каналов. М.: Agropromizdat, 1987. 184 с.
- Abelishvili G.V., Razumovskaja M.R., Zhordanija T.G.** Rolj filjtratsii cherez treshhiny i puti povysheniya vodopronicaemosti betonnyh oblicovok kanalov. // Tr. koordinac. soveshhanij po gidrotehnike, vyp. № 68, 1971. S. 204-208.
- Alimov A.G.** Uljtrazvukovoj kontrol vodonepronicaemosti betona meliorativnyh gidro-tehnicheskikh sooruzhenij v protsesse ekspluatatsii // Gidrotehnicheskoe stroiteljstvo. 2009. № 5. S. 18-21.
- Kosichenko Ju.M.** Raschet protivofiljtracionnoj effektivnosti oblitsovok s plenochnymi ekranami // Gidrotehnicheskoe stroiteljstvo. – 1983. № 12. S. 33-38.
- Kosichenko Ju.M., Polubedov S.M.** Vodopronicaemostj protivofiljtratsionnyh oblitsovok pri nalichii v nih treshchin // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 1999. № 4. S. 91-94.
- Lomize G.M.** Filjtracija v treshhinovatyh porodah. М.: Gosjenergoizdat, 1951.
- Shterenliht D.V.** Gidravlika. 3-e izd., pererab. i dop. – М.: Kolos, 2004.
- Aljtshul A.D.** Gidravlicheskie soprotivlenija 2-e izd. pererab. i dop. М.: Nedra, 1982. – 224 s.
- Kosichenko Ju.M., Baev O.A., Garbuz A.Ju.** Otsenka vodopronicaemosti betonoplenochnoj oblitsovki s zakolmatirovannymi shvami pri dlitelnoj ekspluatatsii // Vestnik MGSU. 2016. № 7. S. 114-133.
- Baev O.A.** Modelirovanie protsessa vodopronicaemosti protivofiljtracionnyh ekranov iz geomembran [Elektronnyj resurs] // Inzhenernyj vestnik Dona: elektron. nauch. zhurnal / Severo-Kavkazskij nauchnyj centr vysshej shkoly Juzhnogo federaljnogo universiteta. – Elektron. zhurn. – Rostov n/D.: Rostovskoe regionalnoe otdelenie Rossijskoj Inzhenernoj Akademii, 2015. № 1. – Ch.2. – Rezhim dostupa: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/Baev.pdf\\_8785ee344d.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/Baev.pdf_8785ee344d.pdf).
- Kosichenko Ju.M., Baev O.A.** Teoreticheskaja otsenka vodopronitsaemosti protivofiljtratsionnyh oblitsovok narushennoj sploshnosti // Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 2014. № 3. S. 68-74.

The material was received at the editorial office  
05.05.2017

### **Information about the authors**

**Kosichenko Jurij Mihajlovich**, doctor of technical sciences, professor, chief researcher, Research Institute of Land Improvement Problems (ROSNIIMP), 190 Baklanovskiy, Novocheerkassk, Rostov region, 346400, Rus-



sian Federation;8 (6352) 26-51-11; e-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

**Garbuz Aleksandr Jurjevich** – Postgraduate Student, Junior Researcher, Research In-

stitute of Land Improvement Problems (ROS- NIIPM), 190 Baklanovskiy, Novocherkassk, Rostov region, 346400, Russian Federation;8 (6352) 26-50-68; e-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

УДК 502/504:624.042:626/627

**В.П. ШАРКОВ, Б.М. БАХТИН, П.З. МЕТЕЛЬСКИЙ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Российская Федерация

## **ВЛИЯНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТА-ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ВЕРТИКАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ В ЯЧЕЙКАХ ГИДРОСООРУЖЕНИЙ**

*Целью работы является изучение влияния фактора уплотнения на вертикальное давление грунта в ячейках гидротехнических сооружений, определяющего их несущую способность, а также его расчетные параметры.*

*В работе использован аналитический метод исследований с использованием опытных данных. Основные результаты заключаются в следующем. Выявлено, что при укладке грунтового заполнителя с интенсивным уплотнением возникает эпюра давления, близкая к равномерной с ординатой равной расчетной ординате у стен. Это наблюдается в опытах независимо от плановых размеров ячейки и шероховатости стен. В формуле Янсена, используемой для расчета давлений, это отражается, по сравнению с неуплотненным грунтом, повышением основного параметра в 1,15 и в 1,5 раза, соответственно для условий гладких и шероховатых стен ячеек. Выявлено, что на повышение указанного параметра основное влияние оказывает возрастание входящего в него коэффициента неравномерности давлений, возникающее вследствие трансформации эпюры из криволинейной в равномерную и уменьшения её кривизны. Возрастание этого коэффициента составляет от 0,63-0,70 и от 0,934 до единицы соответственно в условиях шероховатых и гладких стен. Установлено также, что в случае укладки грунта с неинтенсивным уплотнением возникает эпюра давления с меньшей кривизной, чем в случае неуплотненного грунта. При этом также происходит повышение параметра Янсена и коэффициента неравномерности, однако, в меньшей степени, чем при интенсивном уплотнении. Например, для условий шероховатых стен этот параметр повышается в среднем на 13%, а коэффициент неравномерности на 10%.*

*Гидротехнические сооружения, ячейки, грунт – заполнитель, давление, опыты, расчет, уплотнение грунта, форма эпюры, трансформация.*

**Введение.** Устойчивость сдвигу подпорных гидротехнических сооружений обеспечивается в основном их весом. В сооружениях ячеистой конструкции это на 70-80% достигается весом грунта, заполняющего ячейки. При этом для уменьшения объема и габаритов сооружений укладка грунта в ячейки производится с уплотнением

По данным отдельных источников, уплотнение грунта оказывает влияние на вертикальное давление в ячейках на основание, этот основной фактор, обеспечивающий устойчивость подпорных ячеистых сооружений на сдвиг. Так в работе [1] отмечается, что в формуле Янсена, используемой для

определения давления, основной её параметр  $k$  от уплотнения повышается на 10-15%. В работе [2] предлагается для учета фактора уплотнения увеличить этот параметр Янсена на некоторую величину, однако не приводится обоснование последней.

При этом в литературе нет систематизированных данных о влиянии уплотнения на вертикальное давление грунта и его причинах.

Целью работы является исследование влияния фактора уплотнения на вертикальное давление грунта-заполнителя на основание, на его параметры и выявление причин этого явления.