

Ю.М. КОСИЧЕНКО, А.Ю. ГАРБУЗ

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

## ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОННОЙ ОБЛИЦОВКИ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАНАЛА

*Предложены гидравлическая модель и методика расчета водопроницаемости бетонной облицовки, которая включает расчетные схемы водопроницаемости через полностью и частично разрушенные швы, трещины и бетон облицовки ненарушенной структуры. Используются расчетные формулы Г.М. Ломизе для удельных расходов через швы и трещины с гладкими и шероховатыми стенками при ламинарном и турбулентном режиме с учетом пьезометрического напора по подошве облицовки, определяемого по формуле авторов статьи методом последовательного приближения. Рассмотрена фильтрационная модель водопроницаемости, через швы и трещины бетонной облицовки в грунт основания. Приведены примеры расчетов и построены номограммы для определения удельных гидравлических расходов при различных напорах, параметрах трещин и швов.*

*Гидравлическая модель, методика расчета, водопроницаемость облицовки, гладкие и шероховатые трещины, разрушенные швы, удельные гидравлические расходы.*

**Введение.** Вследствие длительной эксплуатации канала, из-за старения материалов, как правило, через 20-25 лет в бетонной облицовке интенсивно наблюдается образование сквозных трещин (особенно, средних, мелких и волосяных) и разрушение заделки цементных швов и разгерметизация битумно-полимерных швов [1]. Отсюда особенно водопроницаемости облицовки канала является то, что фильтрация через нее проходит не сплошным фронтом, а локально, в местах разрушений швов и дефектов [2-3].

**Материалы и методы.** Под действием напора на облицовку  $H = h_0 + \delta_0$  (где  $h_0$  – нормальная глубина в канале;  $\delta_0$  – толщина облицовки) через трещины и разрушенные швы происходят фильтрационные потери с растеканием потока под облицовкой и образованием контура промачивания. При этом через трещины и разрушенные швы, в основном, имеет место ламинарный режим течения, который подчиняется закону Дарси. Этот режим характеризуется числом Рейнольдса, не превышающим критическое значение  $Re < Re_{кр}$  (где  $Re_{кр} = 600$ ) [4]. Однако в некоторых случаях возможен и турбулентный режим течения при  $Re > 600$ . Наряду с этим происходит фильтрация и через сам бетон облицовки, величиной которой после расчетной оценки основных составляющих водопроницаемости можно пренебречь.

Ввиду того, что коэффициент фильтрации бетонной облицовки  $k_{обл}$  во много раз меньше коэффициента фильтрации грунта

основания  $k_{гр}$  ( $k_{обл} \ll k_{гр}$ ), часто его влиянием пренебрегают. Влияние грунтового основания учитывают через остаточный напор по подошве облицовки  $h_1$ , поэтому в случаях, когда в облицовке имеются значительные разрушения и дефекты, при которых водопроницаемость облицовки приближается к грунту основания, целесообразно учитывать параметр  $h_1$  [5].

Модель водопроницаемости бетонной облицовки включает в себя принятые допущения методики, расчетные схемы, которые представлены на рисунках 1 и 2, и пример расчета.

Принятые допущения:

- движение гидравлического потока через разрушения и дефекты облицовки считается установившимся;
- грунт основания принимают однородным и изотропным с постоянным коэффициентом фильтрации  $k_{гр}$  во всех направлениях;
- фильтрация через разрушения и дефекты облицовки носит локальный характер в местах трещин и разрушенных швов;
- режим движения фильтрационного потока через трещины и швы облицовки при числе Рейнольдса  $Re < Re_{кр}$  является ламинарным, а при  $Re > Re_{кр}$  – турбулентным;
- предполагается, что гидравлический поток, дойдя до грунтового основания облицовки, растекается горизонтально в стороны по неплотностям примыкания облицовки к грунту основания и инфильтрует вертикально вниз, образуя контур промачивания.

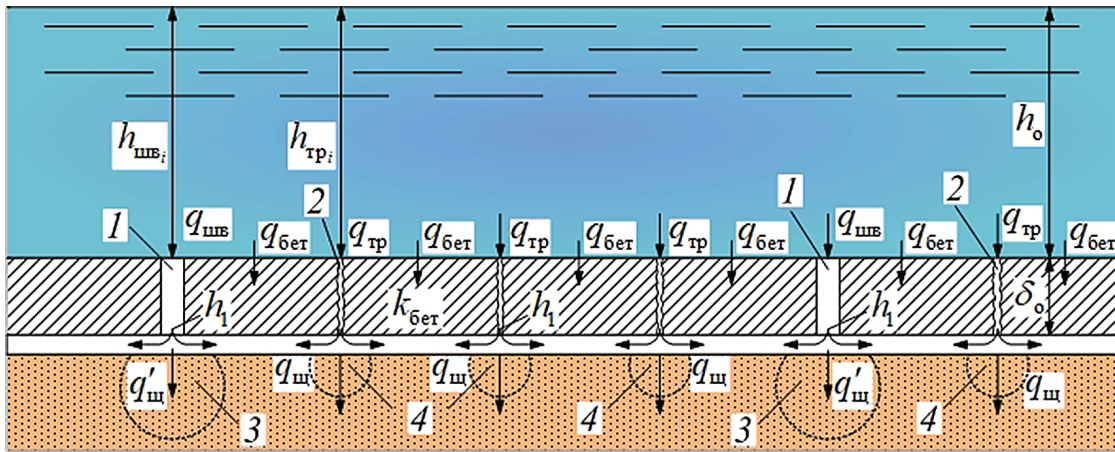


Рис. 1. Расчетная схема водопроницаемости бетонной облицовки на дне канала при длительной его эксплуатации:  
 1 – разрушенные швы; 2 – сквозные трещины;  
 3 – контур промачивания грунта основания под швами;  
 4 – контур промачивания грунта под трещинами

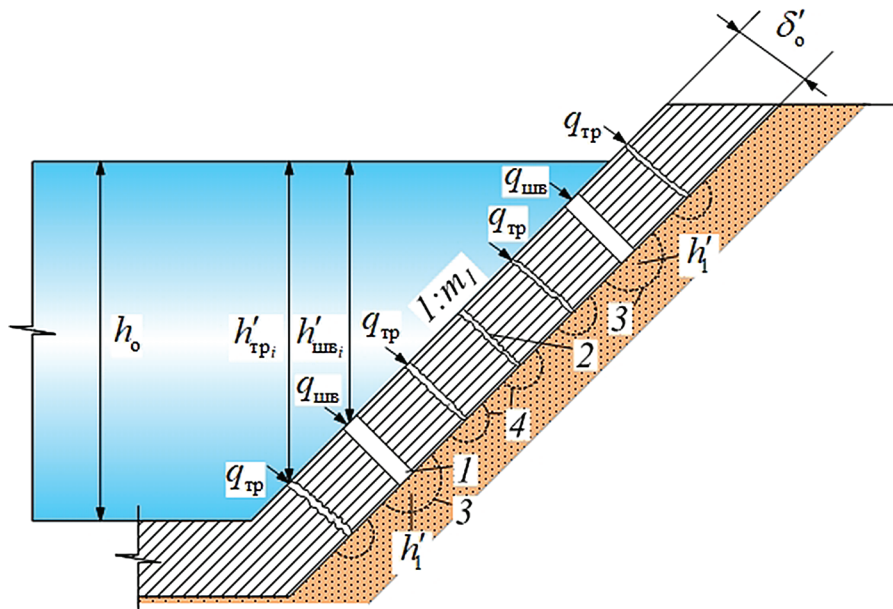


Рис. 2. Расчетная схема водопроницаемости бетонной облицовки на откосе канала при длительной его эксплуатации:  
 1 – разрушенные швы; 2 – сквозные трещины;  
 3 – контур промачивания грунта основания под швами;  
 4 – контур промачивания грунта под трещинами

С целью более точной оценки потерь на фильтрацию через облицовку канала в модели предлагается учесть водопроницаемость облицовки на откосах, где глубины изменяются от нуля до нормальной –  $h_0$ .

Общий расход водопроницаемости через бетонную облицовку, аналогичен [6] для бетонопленочной. Определим сумму локальных расходов через сквозные трещины в облицовке по дну и на откосах

канала, разрушенные швы и через бетон самой облицовки соответственно по дну и на откосах:

$$Q_{\text{обл}} = \sum_{i=1}^{n_1} q_{\text{тр}_i} + \sum_{i=1}^{n'_1} q'_{\text{тр}_i} + \sum_{i=1}^{n_2} q_{\text{шв}_i} + \sum_{i=1}^{n'_2} q'_{\text{шв}_i} + \sum_{i=1}^{n_3} q_{\text{бет}_i} \cdot f_{\text{обл}_i} + \sum_{i=1}^{n'_3} q'_{\text{бет}_i} \cdot f'_{\text{обл}_i}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{обл}}$  – общий расход водопроницаемости бетонной облицовки на площади  $F_{\text{обл}}$ ;  $q_{\text{тр}_i}$ ,  $q'_{\text{тр}_i}$  – единич-

ные расходы через отдельные трещины в облицовке по дну и на откосах канала;  $q_{шв}$ ,  $q'_{шв}$  – единичные расходы через швы облицовки соответственно по дну и на откосах;  $q_{бет}$ ,  $q'_{бет}$  – единичные расходы через отдельные элементы бетона облицовки соответственно по дну и на откосах;  $f_{обл}$ ,  $f'_{обл}$  – площади отдельных элементов бетона облицовки соответственно по дну и на откосах;  $n_1$ ,  $n'_1$ ,  $n_2$ ,  $n'_2$ ,  $n_3$ ,  $n'_3$  – соответственно общее число трещин, швов и бетона по дну и на откосах облицовки.

Приведем расчетные зависимости для определения единичных расходов через трещины в соответствии с общим уравнением (1), полученным Г.М. Ломизе [4]:

- для ламинарного режима в трещинах с гладкими стенками (при  $Re < 600$ ):

$$q_{тр} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{тр}^3 \cdot I_o \cdot l_{тр}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2)$$

- для ламинарного режима в трещинах с шероховатыми стенками (при  $Re < 600$ ):

$$q_{тр} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{тр}^3 \cdot I_o \cdot \frac{l_{тр}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{тр}}\right)^{1,5}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (3)$$

- для турбулентного режима в трещинах с шероховатыми стенками (при  $Re > 600$ )

$$q_{тр} = \delta_{тр} \cdot l_{тр} \cdot \sqrt{g \cdot \delta_{тр} \cdot I_o} \cdot \left(2,6 + 5,1 \cdot \lg \frac{\delta_{тр}}{2 \cdot e}\right), \text{ м}^3/\text{с} \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $\delta_{тр}$ ,  $l_{тр}$  – ширина и длина раскрытия трещины;  $I_o$  – гидравлический градиент в трещинах, соответственно, с гладкими и шероховатыми стенками;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $e$  – высота выступа шероховатости стенок трещины;

Гидравлический градиент в трещинах с гладкими стенками определяют по следующей формуле:

$$I_o = \frac{h + \delta_o}{\delta_o}, \quad (5)$$

С учетом влияния напора по подошве облицовки гидравлический градиент находим по следующей зависимости:

$$I_o = \frac{h + \delta_o - h_1}{\delta_o}, \quad (6)$$

где  $h$  – расчетная глубина, принимаемая для каналов равной нормальной глубине до дна  $h_o$ , а для откосов  $h'_{тр}$  – с учетом заглубления трещины относительного расчетного уровня воды (рис. 2);  $h_1$  – пьезометрический напор по подошве облицовки вблизи трещины.

Параметр  $h_1$  вычисляется методом последовательных приближений по следующей зависимости:

$$h_1 = \frac{q_{тр} \cdot 12 \cdot \mu \cdot \delta_o}{\rho \cdot \delta_{тр}^3 \cdot l_{тр} \cdot (h_o + \delta_o)}, \text{ м} \quad (7)$$

Принимаем в первом приближении  $h_1 = 0,95 \cdot (h_o + \delta_o)$ .

Гидравлический градиент в трещинах с шероховатыми стенками определяют по формуле [4]:

$$I = I_o \frac{1}{1 + \varphi_1 \left(\frac{e}{\delta_{тр}}\right)}, \text{ м} \quad (8)$$

где  $\varphi_1(e/\delta_{тр})$  – параметр удлинения траектории движения струек.

Динамическую вязкость воды вычисляем по зависимости [4]:

$$\mu = \frac{0,178 \cdot \rho}{1 + 0,0337 \cdot t + 0,000221 \cdot t^2}, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $t$  – температура в  $^{\circ}\text{C}$ .

Для определения удельного расхода через швы облицовки используем следующие зависимости:

а) случай при полностью разрушенных швах:

- для ламинарного режима в швах с гладкими стенками (при  $Re < 600$ )

$$q_{шв} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{шв}^3 \cdot I_o \cdot l_{шв},$$

- для ламинарного режима в швах с шероховатыми стенками (при  $Re < 600$ )

$$q_{шв} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{шв}^3 \cdot I_o \cdot \frac{l_{шв}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{шв}}\right)^{1,5}},$$

- для турбулентного режима в швах с шероховатыми стенками (при  $Re > 600$ )

$$q_{шв} = \delta_{шв} \cdot l_{шв} \cdot \sqrt{g \cdot \delta_{шв} \cdot I_o} \cdot \left(2,6 + 5,1 \cdot \lg \frac{\delta_{шв}}{2 \cdot e}\right),$$

где  $I_o = \frac{h_o + \delta_o}{\delta_o}$ ;  $I = I_o \cdot \frac{1}{1 + \varphi_1 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{шв}}\right)}$ ;

б) случай при частично разрушенных швах (рис. 3):

- для ламинарного режима в частично разрушенном шве с шероховатыми стенками (при  $Re < 600$ )

$$q_{швн} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{швн}^3 \cdot I \cdot \frac{l_{швн}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{швн}}\right)^{1,5}},$$

- для турбулентного режима в частично разрушенном шве с шероховатыми стенками (при  $Re > 600$ )

$$q_{швн} = \delta_{швн} \cdot l_{швн} \cdot \sqrt{g \cdot \delta_{швн} \cdot I} \cdot \left(2,6 + 5,1 \cdot \lg \frac{\delta_{швн}}{2 \cdot e}\right),$$

где  $\delta_{швн}$ ,  $l_{швн}$  – ширина раскрытия и длина не полностью разрушенного шва;  $\delta_{швн} = k_p \cdot \delta_{шв}$ ,  $k_p$  – коэффициент разрушения шва (принимается по натурным данным);

$$I = I_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi \cdot \left(\frac{e}{\delta_{швн}}\right)}; I_0 = \frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}$$

Удельный расход через единичный элемент бетонной облицовки площадью  $1 \text{ м}^2$  вычисляется по следующей формуле:

$$q_{бет} = k_{бет} \cdot \left(\frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}\right) \cdot f_{обл}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (10)$$

где  $k_{бет}$  – коэффициент водопроницаемости бетона облицовки без учета трещин, принимается по справочным данным в зависимости от марки бетона.

При расчете параметра  $h'_1$  на откосах канала в формуле (6) необходимо вместо глубины  $h_0$  учитывать среднюю глубину  $h_{cp}$ :

$$h'_1 = \frac{q_{тр} \cdot \mu \cdot \delta_0}{\rho \cdot \delta_{тр}^3 \cdot l_{тр} \cdot (h_{cp} + \delta'_0)}, \text{ м} \quad (11)$$

где  $h_{cp} = h_0/2$  – средняя глубина на откосах;  $\delta'_0$  – толщина облицовки на откосах.

Здесь глубину  $h'_1$  принимаем равной –  $h'_1 = 0,1 \cdot (h_{cp} + \delta'_0)$ .

Так как после достижения гидравлическим потоком грунтового основания его инфильтрация происходит вертикально вниз, будем считать, что поток становится фильтрационным, и поэтому для его оценки необходимо использовать имеющиеся зависимости фильтрационного расхода через грунт в пределах растекания [9].

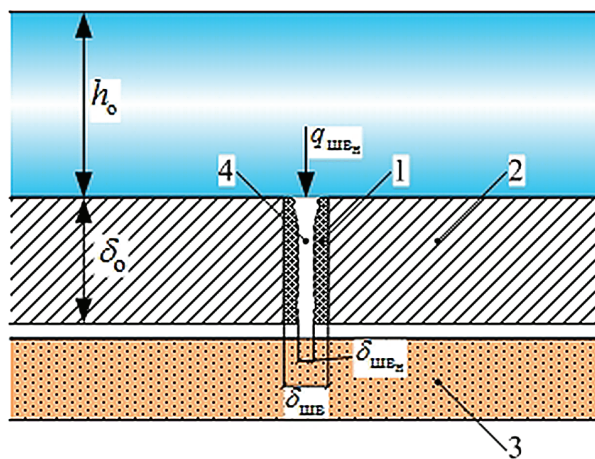


Рис. 3. Схема водопроницаемости частично разрушенного шва:  
1 – неразрушенные элементы шва;  
2 – бетонные плиты;  
3 – грунтовое основание;  
4 – трещина в частично разрушенном шве

В результате вышперечисленного, следует произвести расчет фильтрационных расходов через трещины и швы бетонной облицовки. Схема модели растекания фильтрационного потока через единичную трещину облицовки представлена на рисунке 4.

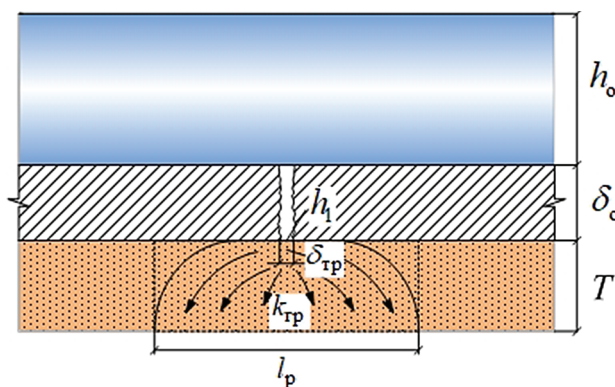


Рис. 4. Схема фильтрации через единичную трещину в грунт основания

С учетом принятой на рисунке 4 схемы фильтрации из трещины в грунт основания принимаем, что ширина зоны растекания под облицовкой на глубине  $T$  составляет  $l_p$ . Внизу трещины остаточный напор  $h_1$  будет практически составлять величину полного напора  $h_1 \approx h_0 + \delta_0$ . Ширину растекания принимаем равной [10]  $l_p = \beta \cdot (h_0 + \delta_0)$ , где  $\beta$  – коэффициент растекания потока под облицовкой, принимаем в диапазоне  $\beta = 0,1 \div 1,5$ .

Для расчета фильтрационного расхода через трещину бетонной облицовки используем ранее полученную зависимость Ю.М. Косиченко и Г.А. Золотарева [11]:

$$q_{\text{тр}\phi} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_o + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arch} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \sin \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2 \cdot l_p} \right)}, \text{ м} \quad (12)$$

где  $k_{\text{тр}}$  – коэффициент грунта основания;  $T$  – толщина расчетного слоя грунта под облицовкой.

Учитывая малые значения аргумента при синусе, запишем приближенную формулу в виде:

$$q_{\text{тр}\phi} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_o + \delta_o + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arch} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2 \cdot l_p} \right)}, \text{ м} \quad (13)$$

Расчетная формула для разрушенного шва облицовки будет аналогична формуле (13) и будет иметь вид:

$$q_{\text{шв}\phi} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_o + \delta_o + T) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arch} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} / \frac{\pi \cdot \delta_{\text{шв}}}{2 \cdot l_{\text{тр}}} \right)}, \text{ м} \quad (14)$$

**Результаты и обсуждения.** Рассмотрим примеры расчета гидравлических расходов для гладких, а также шероховатых трещин и швов при следующих исходных данных:

Исходные данные:  $\delta_{\text{тр}} = 0,01$  м;  $h_o = 1,0$  м;  $\delta_o = 0,10$  м;  $l_{\text{тр}} = 0,10$  м;  $l = 1,0$  м;  $\delta_{\text{шв}} = 0,05$  м;  $l_{\text{шв}} = 0,10$  м;  $L_{\text{к}} = 10000$  м;  $B_{\text{к}} = 25$  м;  $k_{\text{тр}} = 1,16 \cdot 10^{-5}$  м/с;  $T = 5$  м;  $e = 0,003$  м;  $k_{\text{бет}} = 0,7 \cdot 10^{-10}$  м/с;  $m_1 = 2,0$ ;  $n_1 = 100$ ;  $n'_1 = 250$ ;  $n_2 = 10$ ;  $n'_2 = 5$ ;  $n_3 = 50$ ;  $n'_3 = 200$ ;  $f_{\text{обл}} = 1$  м<sup>2</sup>;  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,00131$  кг/(м · с).

Требуется рассчитать основные параметры водопроницаемости бетонной облицовки канала [5].

1) Определим гидравлический расход через трещины с гладкими и шероховатыми стенками по формулам (2) и (3). Принимаем:  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu = 0,00131$  кг/(м · с) при  $t = 10^\circ\text{C}$  [7].

- для гладкой трещины расход определяем по следующим формулам:

$$h_1 = 0,95 \cdot (h_o + \delta_o) = 0,95 \cdot (1,0 + 0,1) = 1,05 \text{ м}$$

$$I_o = \frac{h_o + \delta_o - h_1}{\delta_o} = \frac{1,0 + 0,1 - 1,05}{0,1} = 0,5$$

$$q_{\text{тр}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I_o \cdot l_{\text{тр}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,01^3 \cdot 0,5 \cdot 0,10 = 0,00318 \text{ м}^3/\text{с}$$

- для шероховатой трещины ( $e = 0,003$  м) определяем расход по нижеследующим зависимостям:

$$I = I_o \cdot \frac{1}{1 + \varphi_1 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{тр}}} \right)} = 0,5 \cdot \frac{1}{1 + 0,2} = 0,42$$

где  $\varphi_1 (e/\delta_{\text{тр}}) = 0,1 \div 0,3 = 0,2$  [8]

$$q_{\text{тр}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I \cdot \frac{l_{\text{тр}}}{1 + 6 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{тр}}} \right)^{1,5}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,01^3 \cdot 0,42 \cdot \frac{0,10}{1 + 6 \cdot \left( \frac{0,003}{0,01} \right)^{1,5}} =$$

$$= 0,00133 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход при шероховатых трещинах по сравнению с гладкими снижается в 2,4 раза, что объясняется увеличением потерь при шероховатых стенках.

2) Определим гидравлический расход через разрушенные швы. Принимаем  $\delta_{\text{шв}} = 0,05$  м,  $l_{\text{шв}} = 0,10$  м.

- для гладкой стенки шва:

$$h_1 = 0,95 \cdot (h_o + \delta_o) = 0,95 \cdot (1,0 + 0,1) = 1,05 \text{ м}$$

$$I_o = \frac{h_o + \delta_o - h_1}{\delta_o} = \frac{1,0 + 0,1 - 1,05}{0,1} = 0,5$$

$$q_{\text{шв}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{шв}}^3 \cdot I_o \cdot l_{\text{шв}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,05^3 \cdot 0,5 \cdot 0,10 = 0,396 \text{ м}^3/\text{с}$$

- при шероховатой стенки шва (принимаем  $e = 0,005$  м) [8]:

$$I = I_o \cdot \frac{1}{1 + \varphi_2 \cdot \left( \frac{e}{\delta_{\text{шв}}} \right)} = 0,5 \cdot \frac{1}{1 + 0,4} = 0,357$$

где  $\varphi_2 (e/\delta_{\text{тр}}) = 0,1 \div 0,4 = 0,4$  [8]

$$q_{\text{шв}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{шв}}^3 \cdot I \cdot \frac{l_{\text{шв}}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{\text{шв}}}\right)^{1,5}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,05^3 \cdot 0,357 \cdot \frac{0,10}{1 + 6 \cdot \left(\frac{0,005}{0,05}\right)^{1,5}} =$$

$$= 0,238 \text{ м}^3/\text{с}$$

Таким образом, в результате расчетов расход для шва с шероховатыми стенками будет меньше, чем для шва с гладкими стенками в 1,49 раз.

3) Определим расход через бетон облицовки (принимаем  $k_{\text{бет}} = 0,7 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$ ,  $f_{\text{обл}} = 1,0 \text{ м}^2$ ):

$$q_{\text{бет}} = k_{\text{бет}} \cdot \left(\frac{h_0 + \delta_0}{\delta_0}\right) \cdot f_{\text{обл}} = 0,7 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{1,0 + 0,1}{0,1}\right) \cdot 1,0 =$$

$$= 0,77 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с на } 1 \text{ м}^2$$

4) Определение расхода через трещины на откосах канала (принимаем  $h'_{\text{тр}} = 0,5 \cdot h_0 = 0,5 \cdot 1,0 = 0,5 \text{ м}$ ):

- для гладкой трещины

$$h_1 = 0,95 \cdot (h'_{\text{тр}} + \delta_0) = 0,95 \cdot (0,5 + 0,1) = 0,57 \text{ м}$$

$$I'_0 = \frac{h'_{\text{тр}} + \delta_0 - h_1}{\delta_0} = \frac{0,5 + 0,1 - 0,57}{0,1} = 0,3$$

$$q'_{\text{тр}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I'_0 \cdot l_{\text{тр}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,01^3 \cdot 0,3 \cdot 0,10 = 0,0019 \text{ м}^3/\text{с}$$

- для шероховатой трещины ( $e = 0,003 \text{ м}$ )

$$I' = I'_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi_1 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{\text{тр}}}\right)} = 0,3 \cdot \frac{1}{1 + 0,2} = 0,25$$

где  $\varphi_1(e/\delta_{\text{тр}}) = 0,1 \div 0,3 = 0,2$

$$q'_{\text{тр}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{тр}}^3 \cdot I' \cdot \frac{l_{\text{тр}}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{\text{тр}}}\right)^{1,5}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,01^3 \cdot 0,25 \cdot \frac{0,10}{1 + 6 \cdot \left(\frac{0,003}{0,01}\right)^{1,5}} =$$

$$= 0,00079 \text{ м}^3/\text{с}$$

5) Определение расхода через швы на откосах канала (принимаем  $h'_{\text{шв}} = 0,5 \cdot h_0 = 0,5 \cdot 1,0 = 0,5 \text{ м}$ )

- для гладкой стенки шва

$$q'_{\text{шв}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{шв}}^3 \cdot I'_0 \cdot l_{\text{шв}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,05^3 \cdot 0,3 \cdot 0,10 = 0,237 \text{ м}^3/\text{с}$$

- для шероховатой стенки шва ( $e = 0,005 \text{ м}$ )

$$I' = I'_0 \cdot \frac{1}{1 + \varphi_2 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{\text{шв}}}\right)} = 0,3 \cdot \frac{1}{1 + 0,4} = 0,214$$

где  $\varphi_2(e/\delta_{\text{шв}}) = 0,1 \div 0,4 = 0,4$

$$q'_{\text{шв}} = \frac{\rho}{12 \cdot \mu} \cdot \delta_{\text{шв}}^3 \cdot I' \cdot \frac{l_{\text{шв}}}{1 + 6 \cdot \left(\frac{e}{\delta_{\text{шв}}}\right)^{1,5}} =$$

$$= \frac{1000}{12 \cdot 0,00131} \cdot 0,05^3 \cdot 0,214 \cdot \frac{0,10}{1 + 6 \cdot \left(\frac{0,005}{0,05}\right)^{1,5}} =$$

$$= 0,1430 \text{ м}^3/\text{с}$$

6) Определение расхода через бетон облицовки на откосах канала

$$h' = 0,5 \cdot h_0 = 0,5 \cdot 1,0 = 0,5 \text{ м}$$

$$q'_{\text{бет}} = k_{\text{бет}} \cdot \left(\frac{h' + \delta_0}{\delta_0}\right) \cdot f_{\text{обл}} =$$

$$= 0,7 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{0,5 + 0,1}{0,1}\right) \cdot 1,0 =$$

$$= 0,42 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с на } 1 \text{ м}^2$$

7) Определение общего расхода водопроницаемости облицовки на канале длиной  $L_{\text{к}} = 10000 \text{ м}$

- для гладких трещин и швов

$$Q_{\text{обл}} = n_1 \cdot q_{\text{тр}} + n'_1 \cdot q'_{\text{тр}} + n_2 \cdot q_{\text{шв}} + n'_2 \cdot q'_{\text{шв}} +$$

$$+ n_3 \cdot q_{\text{бет}} + n'_3 \cdot q'_{\text{бет}} = 100 \cdot 0,00318 + 250 \cdot 0,0019 +$$

$$+ 10 \cdot 0,396 + 5 \cdot 0,237 + 50 \cdot 0,77 \cdot 10^{-9} +$$

$$+ 200 \cdot 0,42 \cdot 10^{-9} = 5,296 \text{ м}^3/\text{с}$$

- для шероховатых трещин и швов

$$Q_{\text{обл}} = n_1 \cdot q_{\text{тр}} + n'_1 \cdot q'_{\text{тр}} + n_2 \cdot q_{\text{шв}} + n'_2 \cdot q'_{\text{шв}} + n_3 \cdot q_{\text{бет}} + n'_3 \cdot q'_{\text{бет}} = 100 \cdot 0,00133 + 250 \cdot 0,00079 + 10 \cdot 0,2386 + 5 \cdot 0,1430 + 50 \cdot 0,77 \cdot 10^{-9} + 200 \cdot 0,42 \cdot 10^{-9} = 3,431 \text{ м}^3/\text{с}$$

Как показывают результаты расчета, гидравлические потери через трещины и разрушенные швы могут достигать

значительных расходов: для гладких трещин и швов – 5,296 м<sup>3</sup>/с; для шероховатых – 1,515 м<sup>3</sup>/с. При этом потери через шероховатые трещины и швы снижаются по отношению к гладким в 1,54 раза, а потерями через бетон можно пренебречь ввиду их малости.

В таблице представлены результаты расчетов гидравлических расходов через гладкие, шероховатые трещины и швы по дну и на откосе канала при их различных значениях  $\delta_{\text{тр}}$  и  $\delta_{\text{шв}}$ .

Таблица

**Результаты расчетов гидравлических расходов через гладкие, шероховатые трещины и швы по дну и на откосе канала (при  $\delta_{\text{тр}} = 0,001; 0,0025; 0,005; 0,0075; 0,01$  м,  $\delta_{\text{шв}} = 0,05; 0,10$  м)**

| Гидравлические расчеты расходов через трещину и шов в бетонной облицовке по дну канала при толщине облицовки $\delta_0 = 0,10$ м    |  |                               |                              |                               |                             |
|---|--|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|   | При ширине раскрытия трещин $\delta_{\text{тр}}$ , м |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{тр}} = 0,001$                         | $\delta_{\text{тр}} = 0,0025$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,005$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,0075$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,01$ |
| Для гладкой трещины, $q_{\text{тр.гл}}$ , м <sup>3</sup> /с   | $0,35 \cdot 10^{-5}$                                 | $0,547 \cdot 10^{-4}$         | $0,437 \cdot 10^{-3}$        | $0,148 \cdot 10^{-2}$         | $0,35 \cdot 10^{-2}$        |
| Для шероховатой трещины, $q_{\text{тр.шр}}$ , м <sup>3</sup> /с   | $0,906 \cdot 10^{-7}$                                | $0,513 \cdot 10^{-5}$         | $0,962 \cdot 10^{-4}$        | $0,489 \cdot 10^{-3}$         | $0,147 \cdot 10^{-2}$       |
|   | При ширине шва $\delta_{\text{шв}}$ , м              |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{шв}} = 0,05$                          |                               | $\delta_{\text{шв}} = 0,10$  |                               |                             |
| Для гладкой стенки шва, $q_{\text{шв.гл}}$ , м <sup>3</sup> /с  | 0,4373   |                               | 3,499                        |                               |                             |
| Для шероховатой стенки шва, $q_{\text{шв.шр}}$ , м <sup>3</sup> /с  | 0,2625   |                               | 2,342                        |                               |                             |
| Гидравлические расчеты расходов через трещину и шов в бетонной облицовке на откосе канала при толщине облицовки $\delta_0 = 0,10$ м |  |                               |                              |                               |                             |
|   | При ширине раскрытия трещин $\delta_{\text{тр}}$ , м |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{тр}} = 0,001$                         | $\delta_{\text{тр}} = 0,0025$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,005$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,0075$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,01$ |
| Для гладкой трещины, $q_{\text{тр.гл}}$ , м <sup>3</sup> /с   | $0,191 \cdot 10^{-5}$                                | $0,298 \cdot 10^{-4}$         | $0,238 \cdot 10^{-3}$        | $0,805 \cdot 10^{-3}$         | $0,190 \cdot 10^{-2}$       |
| Для шероховатой трещины, $q_{\text{тр.шр}}$ , м <sup>3</sup> /с   | $0,494 \cdot 10^{-7}$                                | $0,280 \cdot 10^{-5}$         | $0,525 \cdot 10^{-4}$        | $0,266 \cdot 10^{-3}$         | $0,801 \cdot 10^{-3}$       |
|   | При ширине шва $\delta_{\text{шв}}$ , м              |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{шв}} = 0,05$                          |                               | $\delta_{\text{шв}} = 0,10$  |                               |                             |
| Для гладкой стенки шва, $q_{\text{шв.гл}}$ , м <sup>3</sup> /с  | 0,2385   |                               | 1,908                        |                               |                             |
| Для шероховатой стенки шва, $q_{\text{шв.шр}}$ , м <sup>3</sup> /с  | 0,1432   |                               | 1,277                        |                               |                             |
| Общий расход водопроницаемости трещин и швов бетонной облицовки на канале, м <sup>3</sup> /с  |  |                               |                              |                               |                             |
|   | При ширине шва $\delta_{\text{шв}} = 0,05$ м         |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{тр}} = 0,001$                         | $\delta_{\text{тр}} = 0,0025$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,005$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,0075$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,01$ |
| Для гладких трещин и швов, $Q_{\text{обл.гл}}$ , м <sup>3</sup> /с  | 5,567  | 5,579                         | 5,670                        | 5,915                         | 6,393                       |
| Для шероховатых трещин и швов, $Q_{\text{обл.шр}}$ , м <sup>3</sup> /с  | 3,342  | 3,343                         | 3,365                        | 3,457                         | 3,689                       |
| Фильтрационные расчеты расходов через трещину и шов в бетонной облицовке в грунт основания, м <sup>3</sup> /с                       |  |                               |                              |                               |                             |
|   | При ширине раскрытия трещин $\delta_{\text{тр}}$ , м |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{тр}} = 0,001$                         | $\delta_{\text{тр}} = 0,0025$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,005$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,0075$ | $\delta_{\text{тр}} = 0,01$ |
| Для трещины $q_{\text{тр}}$ , м <sup>3</sup> /с   | $0,107 \cdot 10^{-5}$                                | $0,112 \cdot 10^{-5}$         | $0,116 \cdot 10^{-5}$        | $0,118 \cdot 10^{-5}$         | $0,120 \cdot 10^{-5}$       |
|   | При ширине шва $\delta_{\text{шв}}$ , м              |                               |                              |                               |                             |
|   | $\delta_{\text{шв}} = 0,05$                          |                               | $\delta_{\text{шв}} = 0,10$  |                               |                             |
| Для шва $q_{\text{шв}}$ , м <sup>3</sup> /с   | $0,131 \cdot 10^{-5}$                                |                               | $0,137 \cdot 10^{-5}$        |                               |                             |

Для упрощения расчетов и определения гидравлического расхода через гладкие, шероховатые трещины и швы с учетом

различного напора  $h_0$ ,  $\delta_{тр}$  и  $\delta_{шв}$  составлены номограммы, которые представлены на рисунке 5.

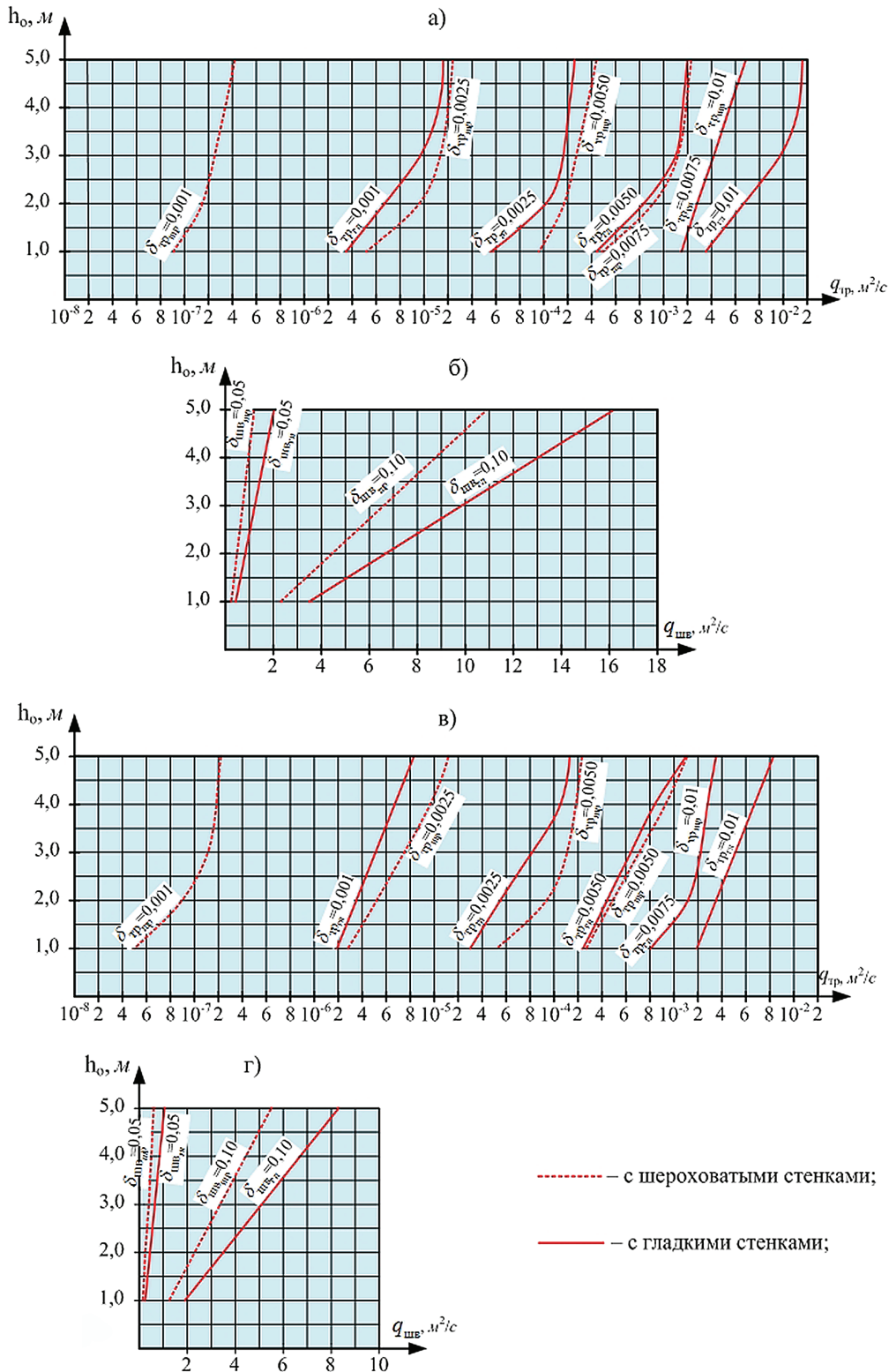


Рис. 5. Номограммы для определения гидравлического расхода через гладкие, шероховатые трещины и швы:

- а) с гладкими и шероховатыми трещинами по дну канала;
- б) с гладкими и шероховатыми швами по дну канала;
- в) с гладкими и шероховатыми трещинами на откосе канала;
- г) с гладкими и шероховатыми швами на откосе канала



Выполним расчет фильтрационного расхода через трещину и шов облицовки в грунт основания с образованием зоны растекания:

- для трещины

$$q_{\text{тр}\phi} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_0 + \delta_0 + T) \cdot l_{\text{тр}}}{\text{Arch} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} \left/ \frac{\pi \cdot \delta_{\text{тр}}}{2 \cdot l_p} \right. \right)} =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 1 \cdot 10^{-5} \cdot (1,0 + 0,1 + 5,0) \cdot 0,1}{\text{Arch} \left( ch \frac{3,14 \cdot 5,0}{1,1} \left/ \frac{3,14 \cdot 0,1}{2 \cdot 1,1} \right. \right)} =$$

$$= 0,000108 \text{ м}^3/\text{с}$$

где  $l_p = \beta \cdot (h_0 + \delta_0) = 1,0 \cdot (1,0 + 0,1) = 1,1 \text{ м}$

- для шва

$$q_{\text{шв}\phi} = \frac{\pi \cdot k_{\text{тр}} \cdot (h_0 + \delta_0 + T) \cdot l_{\text{шв}}}{\text{Arch} \left( ch \frac{\pi \cdot T}{l_p} \left/ \frac{\pi \cdot \delta_{\text{шв}}}{2 \cdot l_p} \right. \right)} =$$

$$= \frac{3,14 \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot (1,0 + 0,1 + 5,0) \cdot 0,1}{\text{Arch} \left( ch \frac{3,14 \cdot 5,0}{1,1} \left/ \frac{3,14 \cdot 0,05}{2 \cdot 1,1} \right. \right)} =$$

$$= 0,000117 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Анализ полученных результатов расчета фильтрационных расходов через трещину в грунт основания по сравнению с гидравлическими расходами для гладкой трещины показывает, что фильтрационные расходы снижаются в зависимости от шероховатости стенок трещины в 12-30 раз, что обусловлено малой проницаемостью грунта основания [5]. По-видимому, в этом случае усиливается боковое растекание потока и соответственно должен увеличиваться фильтрационный расход, что может быть подтверждено экспериментально на физической модели в фильтрационном лотке [12]. Для швов различие в расходах увеличивается еще больше.

### Выводы

1. Разработана гидравлическая модель и методика расчета водопроницаемости бетонной облицовки канала при длительной его эксплуатации, которая включает расчетную схему водопроницаемости по дну и откосам канала через разрушенные швы (полностью или частично), сквозные трещины и через бетон ненарушенной структуры.

2. Предложены расчетные формулы для оценки расхода через единичные тре-

щины, разрушенные швы, бетон ненарушенной структуры с учетом пьезометрического напора по подошве облицовки, определяемого по формулам авторов методом последовательных приближений.

3. Рассмотрена фильтрационная модель водопроницаемости облицовки через трещины и швы с использованием ранее полученных зависимостей удельного фильтрационного расхода через щели пленочного экрана в грунт основания.

4. Приведены примеры расчетов водопроницаемости бетонных облицовок по гидравлической и фильтрационной моделям, анализ полученных результатов которых свидетельствует, что фильтрационные расходы через трещины в грунт основания значительно снижаются, по сравнению с гидравлическими расходами, что обусловлено малой проницаемостью грунта основания.

5. На основании проведенных расчетов водопроницаемости облицовки для различных напоров и параметров трещин и швов построены номограммы, позволяющие определять их удельные гидравлические расходы.

### Библиографический список

1. Рубин В.М., Шлаен А.Г. Бетонная облицовка каналов. – М.: Агропромиздат, – 1987. – 182 с.

2. 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.

3. Косиченко Ю.М., Баев О.А., Гарбуз А.Ю. Особенности расчета водопроницаемости бетонопленочной облицовки с закольматированными швами с учетом проницаемости основания. // Вестник МГСУ. – 2018. – Том 13. – № 5 (116). – С. 633-642.

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

4. Косиченко Ю.М., Гарбуз А.Ю. Расчетная оценка водопроницаемости трещин бетонных облицовок каналов на основе гидравлических методов. // Природообустройство. – 2017. – № 5. – С. 34-42.

5. Ищенко А.В. Гидравлическая модель водопроницаемости и эффективности противофильтрационных облицовок крупных каналов. // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2010. – Т. 258. – С. 51-64.

6. **Киселев П.Г., Альтшуль А.Д., Данильченко Н.В.** Справочник по гидравлическим расчетам. / под ред. П.Г. Киселева. Изд. 4-е, переработ. и доп. – М.: Энергия, – 1972. – 312 с.

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

8. **Косиченко Ю.М., Баев О.А., Ищенко А.В.** Современные методы борьбы с фильтрацией на оросительных системах. // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3. – 12 с. – Режим доступа: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_91\\_kosichenko.pdf\\_55f9154bc5.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_kosichenko.pdf_55f9154bc5.pdf).

9. **Косиченко Ю.М., Бородин В.А., Ищенко А.В.** Инструкция по расчету водопроницаемости и эффективности противofiltrационных облицовок каналов. – М.: Союзгипроводхоз, ЮжНИИГиМ, – 1984. – С. 26-72.

10. **Косиченко Ю.М., Золотарев Г.А., Евстратов Н.А.** Технические указания по применению противofiltrационных экранов из рулонных полимерных материалов на прудах-накопителях сточных вод животноводческих комплексов. – Новочеркасск: ЮжНИИГиМ, – 1984. – С. 5-8.

11. **Баев О.А.** Применение планирования эксперимента для изучения водопроницаемости экрана из геомембраны. // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 46-51.

Материал поступил в редакцию 26.02.2018 г.

#### Сведения об авторах

**Косиченко Юрий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное Государственное бюджетное научное учреждение, Российский научно-исследовательский проблем мелиорации («РосНИИПМ»), 346400, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, тел.: +7(8635)265111, e-mail: Kosichenko-11@mail.ru

**Гарбуз Александр Юрьевич**, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение, Российский научно-исследовательский проблем мелиорации («РосНИИПМ»), 346400, г. Новочеркасск, пр. Баклановский, 190, тел.: +7(8635)265068, e-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

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

Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

## HYDRAULIC MODEL OF WATER PERMEABILITY OF THE CONCRETE LINING DURING A CONTINUOUS OPERATION OF THE CHANNEL

*The hydraulic model and calculation method of water permeability of concrete lining which includes rated schemes of water permeability through completely and partially destroyed seams, cracks and concrete of the undisturbed structure lining are offered. There are used calculation formulas of G.M. Lomize for specific costs through seams and cracks with smooth and rough walls under the laminar and turbulent regime with consideration of the piezometric head on the lining base defined according to the formula of the authors by the method of successive approximation. There is considered a filtration model of water penetration through the seams and cracks of the concrete lining into the base ground. The examples of calculations are given and nomograms for determination of specific hydraulic discharges are constructed at various pressures, parameters of cracks and seams.*

*Hydraulic model, method of calculation, water permeability of the lining, smooth and rough cracks, destroyed seams, specific hydraulic flow.*

#### References

1. **Rubin V.M., Shlaen A.G.** Betonная oblitsovka kanalov. – М.: Agropromizdat, – 1987. – 182 s.

2. **Kosichenko Ju.M., Baev O.A., Garbuz A.Ju.** Otsenka vodopronitsaemosti betonoplenochnoj oblitsovki s zakolmatirovannyimi shvami pri dlitelnoy ekspluatatsii // Vestnik MGSU. – 2016. – № 7. – S. 114-133.

3. **Lomize G.M.** Filtratsiya v treshchinovatykh porodah. – М.: Gosenergoizdat, 1951. – 127 s.

4. **Kosichenko Ju.M., Garbuz A.Ju.** Raschetnaya otsenka vodopronitsaemosti treshchin betonnykh oblitsovk kanalov na osnove gidravlicheskih metodov // Prirodobustroystvo. – 2017. – № 5. – S. 34-42.

5. **Ishchenko A.V.** Gidravlicheskaja model vodopronitsaemosti i effektivnosti protivofiltratsionnykh oblitsovk krupnykh kanalov / A.V. Ishchenko // Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva. – 2010. – T. 258. – S. 51-64.

6. **Kiselev P.G., Altshul A.D., Danilchenko N.V.** Spravochnik po gidravlicheskim raschetam / P.G. Kiselev, A.D. Altshul, N.V. Danilchenko [i dr.]; pod red. P.G. Kiseleva. Izd. 4-e, pererabot. i dop. – M.: Eenergija, – 1972. – 312 s.

7. **Shterenliht D.V.** Gidravlika. 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Kolos, 2004.

8. **Kosichenko Ju.M., Baev O.A., Ishchenko A.V.** Sovremennye metody borby s filtratsiej na orositelnyh sistemah // Inzhenernyj vestnik Dona. – 2014. – № 3. – 12 s. – Rezhim dostupa: [http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_91\\_kosichenko.pdf\\_55f9154bc5.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_91_kosichenko.pdf_55f9154bc5.pdf).

9. **Kosichenko Ju.M., Borodin V.A., Ishchenko A.V.** Instruksija po raschetu vodopronitsaemosti i effektivnosti protivofiltratsionnyh oblitsovok kanalov. – M.: Sojuzgiprovodhoz, JuzhNIIGiM, – 1984. – S. 26-72.

10. **Kosichenko Ju.M., Zolotarev G.A., Evstratov N.A.** Tehnicheskie ukazaniya po primeneniju protivofiltratsionnyh ekranov iz rulonnyh polimernyh materialov na prudah-nakopiteljah stochnyh vod zhivot-

novodcheskih kompleksov. – Novoherkassk: JuzhNIIGiM, – 1984. – S. 5-8.

11. **Baev O.A.** Primenenie planirovaniya eksperimenta dlja izuchenija vodopronitsaemosti ekrana iz geomembra-ny // Prirodoobustrojstvo. – 2014. – № 3. – S. 46-51.

The material was received at the editorial office  
26.02.2018 g.

#### Information about the authors

**Kosichenko Jurij Mihajlovich**, doctor of technical sciences, professor, chief researcher, Research Institute of Land Improvement Problems (ROSNIIPM), 190 Baklanovskiy, Novoherkassk, Rostov region, 346400, Russian Federation; +7(6352)265111; e-mail: Kosichenko-11@mail.ru

Garbuz Aleksandr Jur'evich, Postgraduate Student, Junior Researcher, Research Institute of Land Improvement Problems (ROSNIIPM), 190 Baklanovskiy, Novoherkassk, Rostov region, 346400, Russian Federation; +7(6352)26508; e-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

УДК 502/504: 621.644: 532.54

DOI 10.26897/1997-6011/2018-4-40-47

**О.Н. ЧЕРНЫХ, Н.В. ХАНОВ**

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

**А.В. БУРЛАЧЕНКО**

Акционерное общество «Мерседес-Бенц РУС», г. Москва, Российская Федерация

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЁТА ВОДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ С КРУГЛОЙ ТРУБОЙ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОФРИРОВАННЫХ СТРУКТУР В ЧАСТИЧНО-НАПОРНОМ И НАПОРНОМ РЕЖИМАХ

*Приводятся результаты модельных гидравлических исследований водопропускных сооружений из металлических гофрированных структур. Рассмотрено влияние условий протекания транзитного потока на надёжность работы гофрированных труб с разной формой гофра (нормальной и спиральной) и повышенной абразивной устойчивостью донной части. Даны рекомендации по оценке длины концевого безнапорного участка транзитной части и пропускной способности равнинных гофрированных труб из металла при их работе в частично-напорном и напорном режимах. Отмечается, что при совершенствовании методики гидравлического расчёта закрытых водопропускных сооружений для внесения в расчётные программные комплексы и в разрабатываемые в настоящее время отраслевые методические рекомендации, необходимо учитывать выявленные особенности гидравлической работы круглых водопропускных металлических гофрированных труб, имеющих по дну дополнительное защитное покрытие в виде гладкого бетонного лотка.*

*Металлические гофрированные водопропускные трубы, нормальный и спиральный гофр, модельные исследования, безнапорный, полупонапорный, частично-напорный и напорный режимы, гладкий лоток по дну, длина концевого участка.*