

УДК 626.823.914

А. Ю. Гарбуз

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННОГО РАСХОДА ЧЕРЕЗ ТРЕЩИНЫ БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК ОРОСИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Цель исследований – получить расчетную зависимость для определения фильтрационного расхода через малые повреждения бетона в виде волосяных трещин, используя теорию планирования эксперимента (греко-латинский квадрат). К причинам образования малых повреждений бетона относятся старение и разрушение бетонных облицовок, динамические нагрузки, возникающие при эксплуатации сооружений, воздействие водного потока, а также перепад температур. Все эти явления приводят к образованию волосяных трещин, которые в зимний период времени расширяются от воды при отрицательных температурах. Трещины, постепенно расширяясь, увеличиваются по высоте, распространяясь вглубь, и в последующем становятся сквозными, поэтому важная задача – не допустить образование сквозных трещин, способствующих разрушению конструкции в целом. Выполненные исследования основаны на применении теории планирования эксперимента, учитывалось 10 независимых факторов, оказывающих наибольшее влияние на фильтрационный расход через трещину. По результатам исследований получена многофакторная полуэмпирическая зависимость, которая позволяет с приемлемой для предварительных оценок точностью определять фильтрационный расход через малые закольматированные повреждения (волосяные трещины). Адекватность проведенных теоретических исследований подтверждается выполненной автором проверкой исходных факторов по F -критерию Фишера, а значимость – по t -критерию Стьюдента. Обработка данных выполнялась с помощью метода наименьших квадратов с применением рекомендаций и методики Л. З. Румшинского. Полученные в работе графики фильтрационных расходов отображают результаты эксперимента, а предварительные расчеты по полученной полуэмпирической зависимости показали, что фильтрационный расход через трещины бетонных облицовок составляет 0,189 квадратных метров в сутки, расчет дает результат, близкий к полученному по формуле Ю. М. Косиченко.

Ключевые слова: планирование эксперимента, греко-латинский квадрат, бетонная облицовка, фильтрационный расход, трещина, фильтрация.

A. Ju. Garbuz

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

AN APPROXIMATE ESTIMATE OF SEEPAGE DISCHARGE THROUGH THE CRACKS IN CONCRETE LININGS OF IRRIGATION CANALS

The aim of research is to obtain a calculated dependence for determination of the filtration flow through small damages of concrete in the form of hair cracks, using the experiment planning theory (Greek-Latin square). The reasons for their formation are the aging and destruction of concrete lining, dynamic loads that arise during the operation of structures, the impact of water flow, as well as the temperature drop. All these phenomena lead to the for-

mation of hair cracks which expand from water at negative temperatures in winter season. The gradually expanding cracks increase in height spreading inward and subsequently become through, so an important task is to prevent the formation of through cracks that contribute to the structure destruction as a whole. The studies performed are based on the application of the experiment design theory which took into account 10 independent factors that exert the greatest influence on the filtration flow through the crack. According to the results of the research, a multifactorial semiempirical dependence is obtained, which allows to determine the flow through small, crooked damages (hair cracks), with an acceptable accuracy for preliminary estimates. The adequacy of the theoretical studies carried out is confirmed by the author's verification of the initial factors according to the F -criterion of Fisher, and the significance by the Student's t -criterion. Data processing was performed by the least-squares method using the recommendations and methodology of L. Z. Rumshinsky. The graphs of filtration expenditures obtained in the work show the results of the experiment, and preliminary calculations based on the semiempirical dependence obtained show that the filtration flow through the cracks of the concrete linings is 0.189 square meters per day; the calculations give the result close to that obtained by Yu. M. Kosichenko.

Keywords: experiment planning, Greek-Latin square, the concrete lining, the filtration flow rate, crack, filtration.

Введение. С течением времени эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС), в том числе оросительных каналов, выполненных с жесткими бетонными покрытиями, происходит постепенное старение и износ облицовочного материала (бетона). Конечный результат этого явления – разрушение покрытия из железобетонных или бетонных плит и, как следствие, образование ряда негативных явлений, таких как размывы откосов, деформации русел каналов, значительная фильтрация. Возможно также возникновение аварийных ситуаций (прорывы дамб или образование проранов) [1].

Основными причинами старения и разрушения бетонных облицовок являются динамические нагрузки, возникающие при эксплуатации сооружений, воздействие водного потока, а также перепад температур. Все эти явления приводят к образованию различных повреждений, в том числе малых волосяных трещин. В процессе эксплуатации каналов гидромелиоративных систем вода заполняет трещины бетонных облицовок, оставаясь в них и после опорожнения, а при воздействии отрицательных температур в зимний период вода, превращаясь в лед, постепенно расширяет трещину. При этом трещины увеличиваются по высоте, распространяясь вглубь, и в последующем становятся сквозными, поэтому важная задача – не допу-

стить образование сквозных трещин, способствующих разрушению конструкции в целом. Известно, что в процессе эксплуатации каналов, выполненных с бетонными (железобетонными и бетоноплочными) покрытиями, образование волосяных трещин по всей поверхности плиты выражено именно по урезу воды.

Под волосяными закольматированными трещинами следует понимать малые поверхностные трещины, искусственно или естественно закольматированные в процессе механического осаждения частиц наносов, с размером трещины 0,0001–0,0005 м [2].

Взаимно расположенными трещинами являются соседние трещины, которые при близком расстоянии оказывают влияние на эксплуатационные показатели бетона.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям водопроницаемости бетонных (бетоноплочных) облицовок оросительных каналов посвящены работы А. Г. Алимова, Р. М. Горбачева, Ю. М. Косиченко, А. В. Ищенко, С. Н. Полубедова, а исследованиями фильтрации через малые повреждения в полимерных экранах из геосинтетических материалов (геомембран и геокомпозитов) занимались М. А. Чернов, О. А. Баев, О. Ю. Лупачев и другие.

В выполненных О. А. Баевым, А. В. Ищенко, Ю. М. Косиченко, С. Н. Полубедовым [1–5] исследованиях рассматриваются вопросы фильтрации через единичные малые повреждения в виде проколов (круглой формы), а вопросы водопроницаемости взаимно расположенных закольматированных волосяных трещин до настоящего времени не изучались. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования водопроницаемости закольматированных трещин бетонных облицовок каналов, в том числе на основе применения теории планирования эксперимента.

Цель исследований – получить расчетную зависимость для определения фильтрационного расхода через малые повреждения бетона в виде

волосяных трещин, используя теорию планирования эксперимента (греко-латинский квадрат).

Материалы и методы. В статье определены факторы, влияющие на фильтрационный расход через трещины бетонных облицовок, на основе применения теории планирования эксперимента (используя греко-латинский квадрат) выполнены расчеты и получена полуэмпирическая зависимость, которая позволяет с приемлемой для предварительных оценок точностью определять фильтрационный расход через малые повреждения бетонных облицовок в виде волосяных трещин. Материалами являются обобщенные опытные данные лабораторных и натурных исследований различных авторов.

Обработка данных выполнялась с помощью метода наименьших квадратов с применением рекомендаций и методики Л. З. Румшинского [6]. Проверка значимости используемых факторов и адекватности полученных полуэмпирических зависимостей проводится на основе критериев Фишера и Стьюдента.

Результаты и обсуждение. Определим факторы, влияющие на фильтрационный расход через трещины бетонных облицовок, и составим функциональную зависимость следующего вида:

$$q_{\phi} = \varphi(P_{\text{атм}}, h_o, t_{\text{кр}}, a_{\text{тр}}, g, \gamma_o, \gamma_{\text{гр}}, G_o, \nu, \nu_{\text{гр}}), \quad (1)$$

где q_{ϕ} – удельный фильтрационный расход, см²/с;

$P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, кН/см²;

h_o – толщина слоя воды над облицовкой, см;

$t_{\text{кр}}$ – толщина крепления (облицовки), см;

$a_{\text{тр}}$ – ширина раскрытия трещины, см;

g – ускорение сил тяжести, см/с²;

γ_o – удельный вес воды, кН/м³;

$\gamma_{\text{гр}}$ – удельный вес грунта наносов, кН/м³;

G_o – вес отсека воды над трещиной, кН;

ν – кинематическая вязкость воды при температуре 10 °С, см²/с;

$u_{пр}$ – придонная скорость движения воды над трещиной, см/с.

Таким образом, полученная многофакторная зависимость (1) включает в себя 10 факторов, которые оказывают то или иное влияние на расход воды через трещины. Выполнив ранжирование, сократим малозначимые факторы, включив в зависимость (1) коэффициент грунта во взвешенном состоянии:

$$K_{гр} = \frac{\gamma_{гр} - \gamma_o}{\gamma_o},$$

где $\gamma_{гр}$ – удельный вес грунта наносов, кН/м³;

γ_o – удельный вес воды, кН/м³.

В результате этого получим многофакторную зависимость вида:

$$q_{ф} = K_{гр} \cdot \Phi(P_{атм}, h_o, t_{кр}, a_{тр}, g, G_o, \nu, u_{пр}). \quad (2)$$

Далее выразим зависимость (2) через безразмерные соотношения, применив теории подобия и размерностей [7–10], при этом факторам правой части зависимости (2) присвоим показатели степени:

$$q_{ф} = K_{гр} \cdot \Phi(P_{атм}^a, h_o^b, t_{кр}^c, a_{тр}^d, g^e, G_o^f, \nu^k, u_{пр}^l). \quad (3)$$

В размерных единицах равенство (3) примет следующий вид:

$$\frac{L^2}{T} = \left[\frac{F}{L^2} \right]^a \cdot [L]^b \cdot [L]^c \cdot [L]^d \cdot \left[\frac{L}{T^2} \right]^e \cdot [F]^f \cdot \left[\frac{L^2}{T} \right]^k \cdot \left[\frac{L}{T} \right]^l, \quad (4)$$

где L – длина (расстояние), м;

T – время, с;

F – сила, кН.

Из равенства (4), используя основные размерности, найдем показатели степени:

- для L : $2 = -2a + b + c + d + e + 2k + l$;

- для T : $-1 = -2e - k - l$;

- для $F: 0 = a + f$.

В полученной системе уравнений исключаем показатели степеней a , b и l , выразив их через остальные показатели: $a = -f$; $b = 1 - 2f - c - d + e - k$; $l = 1 - 2e - k$.

Подставляем эти значения показателей в уравнение (3):

$$q_{\phi} = K_{\text{гр}} \cdot \varphi(P_{\text{атм}}^{-f}, h_0^{1-2f-c-d+e-k}, t_{\text{кр}}^c, a_{\text{тр}}^d, g^e, G_0^f, v^k, v_{\text{пр}}^{1-2e-k}).$$

Объединив переменные с одинаковыми показателями, окончательно получим следующую зависимость:

$$\frac{q_{\phi}}{h_0 \cdot v_{\text{пр}}} = K_{\text{гр}} \cdot \varphi \left[\left(\frac{G_0}{P_{\text{атм}} \cdot h_0^2} \right)^f \cdot \left(\frac{t_{\text{кр}}}{h_0} \right)^c \cdot \left(\frac{a_{\text{тр}}}{h_0} \right)^d \cdot \left(\frac{g \cdot h_0}{v_{\text{пр}}^2} \right)^e \cdot \left(\frac{v}{v_{\text{пр}} \cdot h_0} \right)^k \right]. \quad (5)$$

Используя основные размерности, автору удалось представить функциональную зависимость (3) в критериальном виде, содержащем в правой части пять безразмерных параметров, т. е. число факторов, влияющих на фильтрационный расход, сократилось (однако равенство (5) осталось еще многофакторным). Для того чтобы выполнить эксперимент с каждым безразмерным параметром (варьируя его в определенных пределах), следует проделать значительное количество опытов, которые, в свою очередь, можно свести к минимуму, применив теорию планирования эксперимента или полуреплику [7].

Воспользовавшись равенством (5), применим эту теорию в сочетании с теориями размерности и подобия [7]. Для этого обозначим безразмерные комплексы в обеих частях равенства (5) следующим образом:

$$R = \frac{q_{\phi}}{h_0 \cdot v_{\text{пр}}}, X = \left(\frac{G_0}{P_{\text{атм}} \cdot h_0^2} \right)^f, Y = \left(\frac{g \cdot h_0}{v_{\text{пр}}^2} \right)^e, Z = \left(\frac{v}{h_0 \cdot v_{\text{пр}}} \right)^k, Q = \left(\frac{t_{\text{кр}}}{h_0} \right)^c, \quad (6)$$

где $H = \left(\frac{a_{\text{тр}}}{h_0} \right)^d$, $K_{\text{гр}} = \frac{\gamma_{\text{гр}} - \gamma_0}{\gamma_0} = \text{const}$ (принимаям грунт однородным).

Таким образом, выражение (6) представляет собой произведение отдельных функций независимых переменных. Оно относится к общему со-

отношению второго класса [8], допускающему применение факторных экспериментов:

$$R = K_{гр} \cdot \varphi_1(X) \cdot \varphi_2(Y) \cdot \varphi_3(Z) \cdot \varphi_4(Q) \cdot \varphi_5(H). \quad (7)$$

Руководствуясь рассуждениями, приведенными в исследованиях Ю. М. Косиченко [2], получаем следующие функции:

$$R_X = k f_1(X), R_Y = k' f_2(Y), R_Z = k'' f_3(Z), R_Q = k''' f_4(Q), R_H = k'''' f_5(H), \quad (8)$$

где R_X – антилогарифм $\frac{\sum \lg R_X}{n}$;

k – постоянная, которая оставлена из значений Y, Z, Q и H , исключаемых при использовании греко-латинского квадрата;

$f_1(X)$ – функция переменной X .

Решив уравнения (8) относительно $f_1(X), f_2(Y), f_3(Z), f_4(Q), f_5(H)$ и подставив их в формулу (7), получим:

$$R = K(R_X) \cdot (R_Y) \cdot (R_Z) \cdot (R_Q) \cdot (R_H), \quad (9)$$

где $K = (k \cdot k' \cdot k'' \cdot k''' \cdot k'''')^{-1}$.

При сбалансированном эксперименте пять независимых переменных в факторном плане берутся на четырех уровнях, и греко-латинский квадрат имеет вид следующей матрицы (таблица 1).

Таблица 1 – Общий вид полученного греко-латинского квадрата

Фактор	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	$Z_1 Q_4 H_2$	$Z_2 Q_3 H_3$	$Z_3 Q_2 H_4$	$Z_4 Q_1 H_1$
X_2	$Z_2 Q_3 H_3$	$Z_1 Q_4 H_2$	$Z_4 Q_1 H_1$	$Z_3 Q_2 H_4$
X_3	$Z_3 Q_2 H_4$	$Z_4 Q_1 H_1$	$Z_1 Q_4 H_2$	$Z_2 Q_3 H_3$
X_4	$Z_4 Q_1 H_1$	$Z_3 Q_2 H_4$	$Z_2 Q_3 H_3$	$Z_1 Q_4 H_2$

В этом случае предусмотренная модель приобрела вид следующей функции:

$$R = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 Q + b_5 H + b_6 XY + b_7 XZ + b_8 XQ + b_9 XH + b_{10} YZ + b_{11} YQ + b_{12} YH + b_{13} ZQ + b_{14} ZH + b_{15} QH + b_{16} XYZQH.$$

Параметры X, Y, Z, Q, H данной функции, а также коэффициенты

b_0, \dots, b_{16} были определены экспериментальным путем [9].

Факторы, входящие в зависимость (2), при проведении расчетов изменялись в следующих пределах: $P_{\text{атм}} = 0,0098 \dots 0,0490$ МПа = $= 0,0010 \dots 0,0049$ кН/см²; $h_0 = 100 \dots 500$ см; $t_{\text{кр}} = 10 \dots 20$ см; $a_{\text{тр}} = 0,1 \dots 0,5$ см; $G_0 = 0,00026 \dots 0,01300$ кН; $v = 0,0131$ см²/с (при $t^\circ = 10$ °С); $g = 981$ см/с²; $v_{\text{пр}} = 4 \dots 8$ см/с; $K_{\text{гр}} = 1,6$.

Для проведения экспериментов был выбран план с квадратом 4×4 , отсюда безразмерные параметры правой части функции (7) получили следующие значения:

$$X = \frac{G_0}{P_{\text{атм}} \cdot h_0^2} = 0,0026 - 0,0053, \quad Y = \frac{g \cdot h_0}{v_{\text{пр}}^2} = 6131 - 7664,$$

$$Z = \frac{v}{h_0 \cdot v_{\text{пр}}} = \frac{0,0131}{100 \cdot 4} - \frac{0,0131}{500 \cdot 8} = 0,000033 - 0,0000033,$$

$$Q = \frac{t_{\text{кр}}}{h_0} = \frac{10}{100} - \frac{20}{500} = 0,1 - 0,04, \quad H = \frac{a_{\text{тр}}}{h_0} = \frac{0,1}{500} - \frac{0,5}{100} = 0,0002 - 0,005.$$

Представим план эксперимента на четырех уровнях варьирования (таблица 2).

Таблица 2 – План эксперимента на четырех уровнях варьирования переменных к формуле (7)

Относительная бурность потока $Y = F_r^{-1}$	6131	6642	7153	7664
Критерий Ньютона $X = Ne$	Режим движения потока $Z \cdot Q \cdot H = Re^{-1}$			
0,0053	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$20,00 \cdot 10^{-10}$
0,0044	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$60,00 \cdot 10^{-10}$
0,0035	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$30,00 \cdot 10^{-10}$
0,0026	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$5,94 \cdot 10^{-10}$

После проведения эксперимента при указанных 16 комбинациях условий по опытным данным (таблица 3) был составлен квадрат, содержащий значения зависимой переменной, которой является удельный фильтрационный расход $R = q_{\text{ф}} / v_{\text{пр}} \cdot h_0$ (таблица 4).

Таблица 3 – Значения безразмерных комплексов к формуле (7) по экспериментальным данным

№ комбинаций условий	$X = \frac{G_o}{P_{атм} \cdot h_o^2}$	$Y = \frac{g \cdot h_o}{v_{пр}^2}$	$Z \cdot Q \cdot H = \frac{t_{кр} \cdot a_{пр} \cdot v}{v_{пр} \cdot h^3}$	$R = q_{ф}/v_{пр} \cdot h_o$
1	0,0053	0,0000033	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$23,04 \cdot 10^{-9}$
2	0,0053	0,0000132	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$24,71 \cdot 10^{-9}$
3	0,0053	0,0000231	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$26,38 \cdot 10^{-9}$
4	0,0053	0,0000330	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$28,00 \cdot 10^{-9}$
5	0,0044	0,0000033	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$16,36 \cdot 10^{-9}$
6	0,0044	0,0000132	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$18,03 \cdot 10^{-9}$
7	0,0044	0,0000231	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$19,70 \cdot 10^{-9}$
8	0,0044	0,0000330	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$21,37 \cdot 10^{-9}$
9	0,0035	0,0000033	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$9,68 \cdot 10^{-9}$
10	0,0035	0,0000132	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$11,35 \cdot 10^{-9}$
11	0,0035	0,0000231	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$13,02 \cdot 10^{-9}$
12	0,0035	0,0000330	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$14,69 \cdot 10^{-9}$
13	0,0026	0,0000033	$60,00 \cdot 10^{-10}$	$3,00 \cdot 10^{-9}$
14	0,0026	0,0000132	$30,00 \cdot 10^{-10}$	$4,67 \cdot 10^{-9}$
15	0,0026	0,0000231	$20,00 \cdot 10^{-10}$	$6,34 \cdot 10^{-9}$
16	0,0026	0,0000330	$5,94 \cdot 10^{-10}$	$8,01 \cdot 10^{-9}$

Таблица 4 – Квадрат зависимой переменной $R = q_{ф}/v_{пр} \cdot h_o$

$23,04 \cdot 10^{-9}$	$24,71 \cdot 10^{-9}$	$26,38 \cdot 10^{-9}$	$28,00 \cdot 10^{-9}$
$16,36 \cdot 10^{-9}$	$18,03 \cdot 10^{-9}$	$19,70 \cdot 10^{-9}$	$21,37 \cdot 10^{-9}$
$9,68 \cdot 10^{-9}$	$11,35 \cdot 10^{-9}$	$13,02 \cdot 10^{-9}$	$14,69 \cdot 10^{-9}$
$3,00 \cdot 10^{-9}$	$4,67 \cdot 10^{-9}$	$6,34 \cdot 10^{-9}$	$8,01 \cdot 10^{-9}$

Для нахождения относительных расходов в зависимости от удельных, учитывая факторы, вошедшие в формулу (7), по данным полученного квадрата $R = q_{ф}/v_{пр} \cdot h_o$ вычислим средний логарифм, а затем определим антилогарифм (рисунок 1).

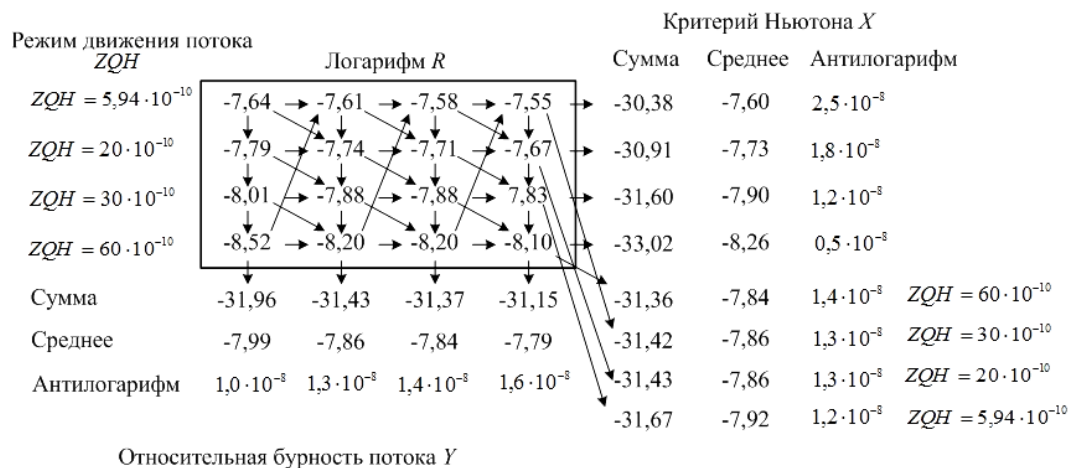


Рисунок 1 – Схема вычисления R в функции от X, Y, ZQH формулы (7)

По данным этих вычислений построим графики, изображающие результат эксперимента (рисунок 2).

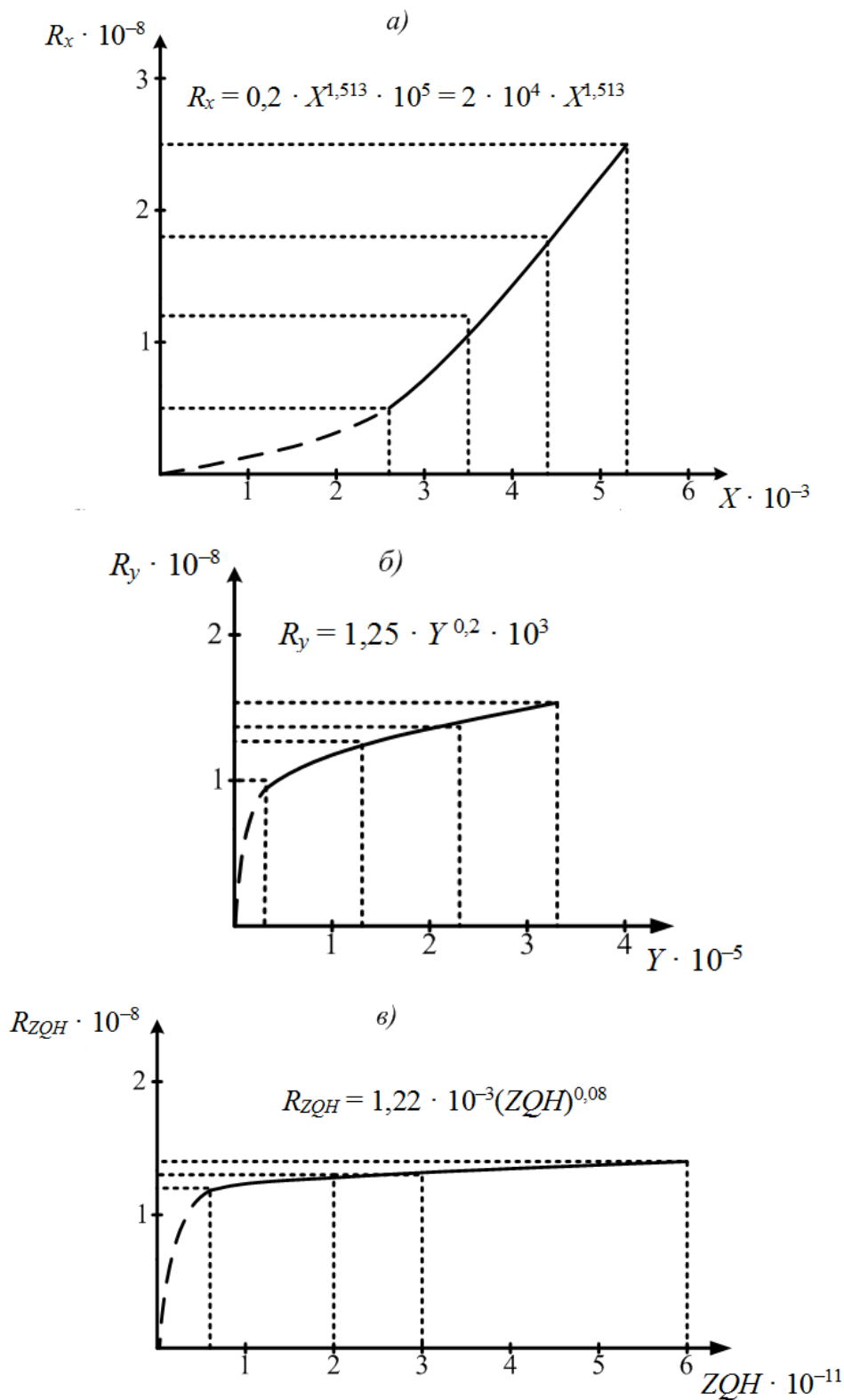


Рисунок 2 – Графики зависимости относительных фильтрационных расходов

Используя формулу (9), определим коэффициенты K для всех 16 комбинаций, вычисления которых приведены ниже по следующей зависимости:

$$K = \frac{R_i}{X \cdot Y \cdot (ZQH)},$$

где R_i – значения безразмерных комплексов по экспериментальным данным (таблица 4);

$X \cdot Y \cdot (ZQH)$ – антилогарифм из рисунка 2.

Определяем среднее значение расхождения:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{16} K_i}{16} = 5,94 \cdot 10^{17}.$$

Незначительные расхождения значений K свидетельствуют о том, что полученные данные несколько отличаются от теоретического результата, определяемого зависимостью (7). Эти отклонения характеризуются тем, что значения переменных не фиксировались точно на заданных уровнях или точность измерения была недостаточна [10].

Неопределенность результата составила плюс 10,77 %, минус 10,98 %, что приемлемо для данных исследований.

Используя безразмерные параметры таблицы 4, вычислили коэффициенты корреляции к формуле (9) и определили их значимости (таблица 5).

Далее произведем вычисление средних квадратических отклонений:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum R_x^2 - (\bar{R}_x)^2 \cdot n}{n-1}} = \sqrt{\frac{(63,2 \cdot 10^{-3})^2 - (3,95 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 16}{15}} = 0,0158,$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum R_y^2 - (\bar{R}_y)^2 \cdot n}{n-1}} = \sqrt{\frac{(29,04 \cdot 10^{-5})^2 - (1,815 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 16}{15}} = 0,000073,$$

$$S_{ZQH} = \sqrt{\frac{\sum R_{ZQH}^2 - (\bar{R}_{ZQH})^2 \cdot n}{n-1}} = \sqrt{\frac{(46376 \cdot 10^{-10})^2 - (28,98 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 16}{15}} = 1,16 \cdot 10^{-8},$$

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum R_i^2 - (\bar{R})^2 \cdot n}{n-1}} = \sqrt{\frac{(248,35 \cdot 10^{-9})^2 - (15,52 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 16}{15}} = 6,21 \cdot 10^{-8}.$$

Таблица 5 – Вычисление коэффициентов корреляции к формуле (9) и определение их значимости

Комбинация условия	$R_x \cdot 10^{-3}$	$R_y \cdot 10^{-5}$	$R_{ZQH} \cdot 10^{-10}$	$R \cdot 10^{-9}$	$(R_x - \bar{R}_x) \cdot 10^{-3}$	$(R_y - \bar{R}_y) \cdot 10^{-5}$	$(R_{ZQH} - \bar{R}_{ZQH}) \cdot 10^{-10}$	$(R - \bar{R}) \cdot 10^{-9}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5,30	0,330	5,94	23,04	1,35	-1,485	-23,04	7,52
2	5,30	1,320	20,00	24,71	1,35	-0,495	-8,98	9,19
3	5,30	2,310	30,00	26,38	1,35	0,495	1,01	10,86
4	5,30	3,300	60,00	28,00	1,35	1,485	31,01	12,48
5	4,40	0,330	20,00	16,36	0,45	-1,485	-8,98	0,84
6	4,40	1,320	5,94	18,03	0,45	-0,495	-23,04	2,51
7	4,40	2,310	60,00	19,70	0,45	0,495	31,01	4,18
8	4,40	3,300	30,00	21,37	0,45	1,485	1,01	5,85
9	3,50	0,330	30,00	9,67	-0,45	-1,485	+1,01	-5,85
10	3,50	1,320	60,00	11,34	-0,45	-0,495	31,01	-4,18
11	3,50	2,310	5,94	13,02	-0,45	0,495	-23,04	-2,51
12	3,50	3,300	20,00	14,69	-0,45	1,485	-8,98	-0,84
13	2,60	0,330	60,00	3,00	-1,35	-1,485	31,01	-12,52
14	2,60	1,320	30,00	4,67	-1,35	-0,495	+1,01	-10,85
15	2,60	2,310	20,00	6,34	-1,35	0,495	-8,98	-9,18
16	2,60	3,300	5,94	8,01	-1,35	1,485	-23,04	-7,51
Сумма	63,20	29,040	463,76	248,35	0,00	0,000	0,00	0,00
Среднее	3,95	1,815	28,98	15,52				

Продолжение таблицы 5

$(6) \cdot (9) \cdot 10^{-12}$	$(7) \cdot (9) \cdot 10^{-14}$	$(8) \cdot (9) \cdot 10^{-19}$	$R_x^2 \cdot 10^{-6}$	$R_y^2 \cdot 10^{-10}$	$R_{ZQH}^2 \cdot 10^{-20}$	$R^2 \cdot 10^{-18}$
10	11	12	13	14	15	16
10,15	-11,17	-173,30	28,09	0,109	35,28	530,84
12,41	-4,55	-82,53	28,09	1,740	400,00	610,58
14,66	7,26	14,81	28,09	5,340	900,00	695,90
16,85	18,53	387,00	28,09	10,890	3600,00	784,00
0,38	-1,25	-0,82	19,36	0,109	400,00	267,65
1,13	-1,24	-57,83	19,36	1,740	35,28	325,08
1,88	2,07	129,62	19,36	5,340	3600,00	388,09
2,63	8,69	5,91	19,36	10,890	900,00	456,68
+2,63	+8,69	-5,91	12,25	0,109	900,00	93,51
+1,88	2,07	-129,62	12,25	1,740	3600,00	128,60
+1,13	-1,24	57,83	12,25	5,340	35,28	169,52
0,38	-1,25	75,43	12,25	10,890	400,00	215,80
16,85	18,59	-388,20	6,76	0,109	3600,00	9,00
14,66	5,37	-10,96	6,76	1,740	900,00	21,81
12,41	-4,54	82,44	6,76	5,340	400,00	40,20
10,15	-11,15	173,03	6,76	10,890	35,28	64,16
120,18	34,88	119,47	265,84	72316,000	4935,28	4801,42

Определим эмпирические коэффициенты корреляции:

$$r_x = \frac{\sum (R_x - \bar{R}_x) \cdot 10^{-3} \cdot (R - \bar{R}) \cdot 10^{-9}}{S_x \cdot S_R (n-1)} = \frac{120,18 \cdot 10^{-12}}{158 \cdot 10^{-4} \cdot 6,21 \cdot 10^{-8} \cdot 15} = 0,008,$$

$$r_y = \frac{\sum (R_y - \bar{R}_y) \cdot 10^{-3} \cdot (R - \bar{R})}{S_y \cdot S_R (n-1)} = \frac{34,88 \cdot 10^{-14}}{7,3 \cdot 10^{-5} \cdot 6,21 \cdot 10^{-8} \cdot 15} = 0,005,$$

$$r_{ZQH} = \frac{\sum (R_{ZQH} - \bar{R}_{ZQH}) \cdot (R - \bar{R})}{S_{ZQH} \cdot S_R (n-1)} = \frac{119,47 \cdot 10^{-19}}{1,16 \cdot 10^{-8} \cdot 6,21 \cdot 10^{-8} \cdot 15} = 0,001.$$

Произведем проверку значимости и достоверности полученных эмпирических коэффициентов корреляции с их критическими значениями:

$$r_x \sqrt{n-1} = 0,008 \cdot 3,87 = 0,031,$$

$$r_y \sqrt{n-1} = 0,005 \cdot 3,87 = 0,019,$$

$$r_{ZQH} \sqrt{n-1} = 0,001 \cdot 3,87 = 0,00387.$$

При этом $r_{\text{теор}} = 0,0164$ – критическое значение при надежности выводов 0,99; $r_{\text{теор}} = 0,0098$ – критическое значение при надежности выводов 0,90.

Доверительную оценку параметров теоретической кривой регрессии R_x на X с помощью суммы квадратов отклонений измеренных значений X от рассчитанных по уравнению прямой регрессии определяем по формуле:

$$S_I = (n-1) \cdot S_R^2 \cdot (1 - r_x^2) = 15 \cdot (6,21 \cdot 10^{-8})^2 \cdot (1 - 0,008^2) = 5,78 \cdot 10^{-14}.$$

Определяем доверительную оценку параметров теоретической кривой регрессии R_y на Y :

$$S_{II} = (n-1) \cdot S_R^2 \cdot (1 - r_y^2) = 15 \cdot (6,21 \cdot 10^{-8})^2 \cdot (1 - 0,005^2) = 5,784 \cdot 10^{-14}.$$

Вычисляется доверительная оценка параметров теоретической кривой регрессии R_{ZQH} на ZQH :

$$S_{III} = (n-1) \cdot S_R^2 \cdot (1 - r_{ZQH}^2) = 15 \cdot (6,21 \cdot 10^{-8})^2 \cdot (1 - 0,001^2) = 5,785 \cdot 10^{-14}.$$

Методика определения значимости коэффициентов корреляции и до-

верительной оценки параметров теоретической кривой регрессии подробно изложена Л. З. Румшинским [6], А. И. Тищенко [11, 12] и другими учеными.

С учетом вышеизложенного результаты исследований (рисунок 2) получены в виде уравнений регрессии:

$$R_x = 2 \cdot 10^{-4} X^{1,513}, R_y = 1,25 \cdot 10^{-3} Y^{0,2}, R_{ZQH} = 1,22 \cdot 10^{-3} (ZQH)^{0,08}.$$

Коэффициенты a_x , a_y , a_{ZQH} определены с помощью метода наименьших квадратов по методике Л. З. Румшинского. Подставив в равенство (9) значения $K_{тр} \cdot K$, a_x , a_y и a_{ZQH} , окончательно получаем уравнение относительно результата – удельного расхода q_ϕ – в следующем виде:

$$R = 1,6 \cdot 5,94 \cdot 10^{17} \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot X^{1,513} \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot Y^{0,2} \cdot 1,22 \cdot 10^{-3} \cdot (ZQH)^{0,08}.$$

Окончательно полученная зависимость для определения удельного фильтрационного расхода в бетонной облицовке через закольматированную трещину будет иметь следующий вид:

$$q_\phi = 25,57 \cdot 10^7 \cdot h_o \cdot v_{пр} \left(\frac{G_o}{P_{атм} \cdot h_o^2} \right)^{1,513} \cdot \left(\frac{gh_o}{v_{пр}^2} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{t_{кр} \cdot a_{тр} \cdot v}{v_{пр} \cdot h_o^3} \right)^{0,08}. \quad (10)$$

Задаваясь исходными данными [13], при наличии в бетонной облицовке закольматированных взаимосвязанных трещин получили фильтрационный расход, составляющий $q_\phi = 0,189$ м²/сут. В связи с этим зависимость (10) дает результат, близкий к полученному по формуле Ю. М. Косиченко ($q_\phi = 0,243$ м²/сут) [5].

На основе вышеизложенного можно отметить, что полученная зависимость является многофакторной, позволяет определить фильтрационный расход через закольматированные трещины бетонных облицовок, при этом достоверность выполненных исследований подтверждается проверкой по критериям Стьюдента и Фишера. Аналогичные исследования по определению водопроницаемости через малые повреждения в противofильтрационных покрытиях проводились ранее только для экранов из полимерных

геомембран, причем план эксперимента принимали как полуреплику для четырех факторов, оказывающих влияние на фильтрационный расход [14]. При этом полученная многофакторная зависимость значительно отличается от известных, в том числе приведенной (степенной) в работе О. А. Баева [14], ввиду использования 10 безразмерных параметров и применения греко-латинского квадрата.

Выводы

1 Анализ результатов исследований позволяет констатировать, что для изучения расхода на фильтрацию через повреждения бетонных облицовок (в виде малых волосяных трещин) достаточно при проведении исследований учитывать 10 независимых факторов, оказывающих наибольшее влияние на фильтрационный расход.

2 В результате планирования эксперимента получена полуэмпирическая зависимость, которая позволяет с приемлемой для предварительных оценок точностью определять основную характеристику водопроницаемости бетонных облицовок – фильтрационный расход через малые повреждения в виде волосяных трещин.

3 Адекватность проведенных теоретических исследований подтверждается выполненной автором проверкой исходных факторов по F -критерию Фишера, а значимость по t -критерию Стьюдента. Кроме того, получены графики, отображающие результаты эксперимента.

4 Выполненные по полученной полуэмпирической зависимости расчеты позволили определить удельный фильтрационный расход через закольматированные взаимно расположенные трещины в бетонной облицовке, который составил $0,189 \text{ м}^2/\text{сут}$. По результатам расчета можно сделать вывод о том, что полученная зависимость дает близкий результат с теоретическими исследованиями Ю. М. Косиченко по изучению расхода через противофильтрационные бетонные облицовки каналов при наличии в них малых повреждений.

Список использованных источников

1 Полубедов, С. Н. Задача фильтрации бетонной облицовки при наличии в ней одиночной волосяной трещины / С. Н. Полубедов // Актуальные вопросы мелиорации и природопользования: тез. докл. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов, г. Новочеркасск, 27 мая 1997 г. – Новочеркасск: НГМА, 1997. – С. 33–34.

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

3 Косиченко, Ю. М. Математическое и физическое моделирование фильтрации через малые повреждения противofiltrационных устройств из полимерных геомембран / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – Т. 274. – С. 60–74.

4 Косиченко, Ю. М. Методика расчета водопроницаемости бетонных и бетоноплочных защитных покрытий оросительных каналов в условиях их длительной эксплуатации / Ю. М. Косиченко, С. Н. Полубедов. – Новочеркасск: НГМА, 2001. – 22 с.

5 Косиченко, Ю. М. Водопроницаемость противofiltrационных облицовок при наличии в них трещин / Ю. М. Косиченко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 1999. – № 4. – С. 91–94.

6 Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

7 Веников, В. А. Теория подобия и моделирования / В. А. Веников, Г. В. Веников. – М.: Высшая школа, 1984. – 438 с.

8 Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учеб. пособие / Н. И. Сидняев. – М.: Юрайт, 2011. – 399 с.

9 Монтомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 383 с.

10 Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 384 с.

11 Тищенко, А. И. Размерностно-регрессивный метод в исследованиях местных деформаций за гидротехническими сооружениями на оросительных каналах / А. И. Тищенко // Гидротехнические сооружения и русловая гидротехника: сборник. – Новочеркасск, 1985. – С. 28–40.

12 Волосухин, В. А. Планирование научного эксперимента: учебник / В. А. Волосухин, А. И. Тищенко. – 2-е изд. – М.: ИЦ «РИОР», НИЦ «Инфра-М», 2014. – 176 с.

13 Косиченко, Ю. М. Оценка водопроницаемости бетоноплочной облицовки с закольматированными швами при длительной эксплуатации каналов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев, А. Ю. Гарбуз // Вестник МГСУ. – 2016. – № 7. – С. 114–133.

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

References

1 Polubedov S.N., 1997. *Zadacha filtratsii betonnoy oblitsovki pri nalichii v ney odinochnoy volosyanoy treshchiny* [The problem of a concrete lining filtration at the presence of a single hair crack in it]. *Aktualnye voprosy melioratsii i prirodopolzovaniya: tezisy dokladov nauchno-tehn. konf. NGMA, NovoCherkassk, 27 May 1997* [Urgent issues of land reclamation and nature management: abstracts of scientific-technical conference of postgraduates and students, NovoCherkassk, May 27, 1997]. NovoCherkassk, pp. 33-34. (In Russian).

2 Ishchenko A.V., 2010. *Gidravlicheskaya model vodopronitsayemosti i effektivnosti protivofiltratsionnykh oblitsovok krupnykh kanalov* [Hydraulic model of water permeability and efficiency of anti-filtration linings of large canals]. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*

[Bulletin of All-Russian Vedenev Hydraulic Engineering Research Institute], vol. 258, pp. 51-64. (In Russian).

3 Kosichenko Ju.M., Baev O.A., 2014. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie filtratsii cherez malye povrezhdeniya protivofiltratsionnykh ustroystv iz polimernykh geomembran* [Mathematical and physical modeling of filtration through small damages of anti-filtration devices from polymeric geomembranes]. *Izvestija VNIIG im. B.E. Vedeneeva* [Bulletin of All-Russian Vedenev Hydraulic Engineering Research Institute], vol. 274, pp. 60-74. (In Russian).

4 Kosichenko Ju.M., Polubedov S.N., 2001. *Metodika rascheta vodopronitsaemosti betonnykh i betonoplenochnykh zashhitnykh pokrytiy orositelnykh kanalov v usloviyakh ikh dlitelnoy ekspluatatsii* [Method for calculating water permeability of concrete and concrete plexiglas protective linings of irrigation canals under conditions of their long-term operation]. Novochoerkassk, NGMA, 22 p. (In Russian).

5 Kosichenko Ju.M., 1999. *Vodopronitsaemost protivofiltratsionnykh oblitsovok pri nalichii v nikh treshchin* [Water permeability of anti-filtration linings with cracks in them]. *Izvestiya Sev. Kav. region. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Institutions. North Caucasus region. Technical sciences], no. 4, pp. 91-94. (In Russian).

6 Rumshinsky L.Z., 1971. *Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta* [Mathematical processing of experimental results]. Moscow, Nauka Publ., 192 p. (In Russian).

7 Venikov V.A., Venikov G.V., 1984. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Theory of similarity and modeling]. Moscow, High School Publ., 438 p. (In Russian).

8 Sidnyaev N.I., 2011. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh: ucheb. posobiye* [Theory of Experiment Planning and Analysis of Statistical Data: textbook]. Moscow, Yurayt Publ., 399 p. (In Russian).

9 Montgomery D.K., 1980. *Planirovaniye eksperimenta i analiz dannykh* [Experiment Planning and Data Analysis]. Leningrad, Shipbuilding Publ., 383 p. (In Russian).

10 Shenk Kh., 1972. *Teoriya inzhenernogo eksperimenta* [Theory of engineering experiment]. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russian).

11 Tishchenko A.I., 1985. *Razmernostno-regressivnyy metod v issledovaniyakh mestnykh deformatsiy za gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami na orositelnykh kanalakh* [The dimensional regressive method in studies of local deformations behind hydraulic structures on irrigation canals]. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya i ruslovaya gidrotekhnika: sbornik* [Hydrotechnical structures and canal hydroengineering: collection]. Novochoerkassk, pp. 28-40. (In Russian).

12 Volosukhin V.A., Tishchenko A.I., 2014. *Planirovanie nauchnogo eksperimenta* [Planning of scientific experiment]. 2nd edition, Moscow, RIOR Publ., Infra-M Publ., 176 p. (In Russian).

13 Kosichenko Ju.M., Baev O.A., Garbuz A.Ju., 2016. *Otsenka vodopronitsaemosti betonoplenochnoy oblitsovki s zakolmatirovannymi shvami pri dlitelnoy ekspluatatsii kanalov* [Water permeability assessment of a concrete-foam lining with colmated seams in case of long-term operation of canals]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], no. 7, pp. 114-133. (In Russian).

14 Baev O.A., 2014. *Primeneniye planirovaniya eksperimenta dlya izucheniya vodopronitsayemosti ekrana iz geomembrany* [Experiment planning application for studying water permeability of geomembrane screen]. *Prirodoobustrojstvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 46-51. (In Russian).

Гарбуз Александр Юрьевич

Должность: младший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru

Garbuz Aleksandr Jur'evich

Position: Junior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: A.Y.Garbuz@mail.ru