

УДК 626.823

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-1-76-88

А. Ю. Гарбуз

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ БЕТОННЫХ ОБЛИЦОВОК КАНАЛОВ

Цель: экспериментальные исследования фильтрации через малые повреждения в виде трещин бетонных облицовок оросительных каналов гидромелиоративных систем. Актуальность и целесообразность исследования обусловлена необходимостью оценки водопроницаемости бетонных противофильтрационных покрытий и устройств на их основе. **Материалы и методы:** объектом исследований является противофильтрационное бетонное покрытие, устраиваемое по дну и на откосах оросительных каналов, предназначенное для защиты от потерь воды на фильтрацию, а также исключения размывов и деформаций русел. Испытываемая модель бетонной облицовки изготавливалась с заранее выполненным повреждением в виде продольной шероховатой трещины при условии подобия модели натуре в масштабе 1:1. Определение расхода фильтрации через трещину в образце проводилось объемным методом при помощи мерного сосуда для различных значений напора и ширины трещины. **Результаты:** по результатам исследований получены новые эмпирические зависимости фильтрационного расхода от напора и ширины раскрытия трещины в противофильтрационной бетонной облицовке. Лабораторные исследования фильтрации через трещины бетонных облицовок каналов проводились на опытной установке, результаты позволили получить эмпирические зависимости удельного фильтрационного расхода от напора. Для проведения исследований были подготовлены пять опытных образцов с заранее созданными в них трещинами. Для того чтобы избежать контактной фильтрации в местах примыкания бетонной облицовки к внутренним стенкам установки, проводилось заполнение (инъектирование) по контуру бетонного образца жидким водонепроницаемым герметиком. **Выводы:** полученные эмпирические расчетные зависимости имеют достаточно высокое значение достоверности аппроксимации для сквозных трещин, что позволяет рекомендовать их для практического использования.

Ключевые слова: фильтрационная колонка; трещины; водопроницаемость; бетонная облицовка; фильтрация; эксперимент.

A. Yu. Garbuz

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

EXPERIMENTAL RESEARCH OF WATER PERMEABILITY OF LOCAL DAMAGE OF CANAL CONCRETE LINING

Purpose: is the experimental studies of filtration through minor damages in the form of cracks in concrete linings of irrigation canals of hydro-reclamation systems. The relevance and feasibility of the study is due to the need to assess the permeability of impervious lining



and devices based on them. **Materials and Methods:** the object of research is concrete impervious lining arranged along the bottom and on the slopes of irrigation canals, designed to protect from water loss by filtration, as well as to eliminate erosion and deformation of canals. The tested model of concrete lining was made with preplanned damage in the form of a longitudinal rough crack, provided that the model was similar to nature model in a 1:1 scale. The seepage flow through the crack in the sample was determined volumetrically using a graduated vessel for various values of pressure and width of crack. **Results:** according to the research results, new empirical dependencies of the seepage flow discharge on the pressure and crack width in the concrete impervious lining are obtained. Laboratory studies of filtration through concrete canal coating cracks were carried out in a pilot installation; the results made it possible to obtain empirical dependences of the special seepage flow discharge on pressure. Five prototypes with preplanned cracks were prepared for research. To avoid contact filtration at the places where the concrete lining adjoins the internal walls of the installation, filling (injection) along the contour of the concrete sample with a liquid impervious sealant was carried out. **Conclusions:** the obtained empirical calculated dependences have a rather high value of the approximation reliability for the through cracks, which allows recommending them for practical use.

Key words: filter column; cracks; water permeability; concrete lining; filtration; experiment.

Введение. В последние годы многие гидротехнические сооружения, выполненные с использованием бетонных материалов покрытий, нуждаются в проведении их реконструкции [1]. С целью оценки водопроницаемости бетонных противофильтрационных облицовок необходимо проведение экспериментальных исследований и испытаний [2]. Последующий ремонт повреждений на бетонных облицовках возможен с применением современных строительных жидких и листовых материалов, последние из которых уже находят применение на каналах, водоемах и накопителях отходов [3–5]. Использование жидких полимерных композиций для ремонта малых повреждений (трещин и швов) является перспективным и не требует значительных трудозатрат [6].

Лабораторные исследования фильтрации через трещины облицовки из бетона проводились на фильтрационной установке. Данная установка (рисунок 1) включает цилиндрический корпус из трех секций: первая – для воды, вторая – для исследуемого образца бетона с трещиной, третья – для грунтового основания.



1 – первая секция (для заполнения водой); 2 – входной патрубок для нагнетания давления на бетонный образец; 3 – место подачи воды; 4 – манометр; 5 – вторая секция (для установки испытываемого образца); 6 – третья секция (для подготовленного грунтового основания); 7 – патрубок для отвода профильтровавшейся воды; 8 – мерный сосуд; 9 – насос

Рисунок 1 – Общий вид фильтрационной колонки для лабораторных испытаний (автор фото А. Ю. Гарбуз)

Вода подается по трубопроводу 1 через входной патрубок 3. В нижней части второй секции помещается образец из бетона с трещиной, имеющей шероховатую поверхность. Профильтровавшийся поток проходит в третью секцию 6, где помещается песок в виде подстилающего основания, затем вода отводится в измерительный сосуд. Давление в колонке замерялось манометром 4. В результате проведенных опытов изучалось движение напорного потока через трещины бетонной облицовки в лабораторной установке [7–9].

Материалы и методы. Испытываемая модель бетонной облицовки изготовлена с заранее выполненным повреждением в виде продольной шероховатой трещины при условии подобия модели натуре в масштабе 1:1. Процесс изготовления модели представлен на рисунках 2–4.



**Рисунок 2 – Наполнение цементно-песчаным раствором формы испытываемого образца бетона для облицовки
(автор фото А. Ю. Гарбуз)**



**Рисунок 3 – Затвердевший образец с искусственно созданным повреждением в виде продольной трещины
(автор фото А. Ю. Гарбуз)**



**Рисунок 4 – Готовая модель бетонной облицовки с повреждением в виде сквозной шероховатой трещины
(автор фото А. Ю. Гарбуз)**

Для опытной модели использовалась круглая металлическая форма диаметром $d = 60$ см, толщиной $\delta = 10$ см. При ее заполнении применялся цементно-песчаный раствор из цемента марки М500 и средnezернистого песка в соотношении пропорций 1:3 (рисунок 2). В подготовленную модель из несхватившегося бетона заранее вставлялась шероховатая пластина, которая имитирует повреждение в виде трещины.

По истечении 10 дней затвердевания и набора прочности образцом (см. рисунок 3) круглая форма снималась путем откручивания крепления в виде болтов с гайками, после чего вынималась шероховатая пластина. В основании модели использовался однородный мелкозернистый песок.

Целью лабораторных опытов с моделью облицовки с трещиной являются исследования фильтрации через сквозные повреждения (вертикальные трещины) различной ширины их раскрытия.

Опыты проводились на установке при масштабе моделирования 1:1. Размеры образца бетонной облицовки и трещин составляли: $\delta_0 = 0,10$ м; $\delta_{тр} = 0,001; 0,0025; 0,0050; 0,0075; 0,01$ м (где δ_0 – толщина бетонной облицовки, м; $\delta_{тр}$ – ширина раскрытия трещины, м).

Для выполнения поставленной задачи по определению водопроницаемости бетонной облицовки с повреждением в виде трещины были подготовлены пять образцов бетонной облицовки с созданными в них трещинами. Для того чтобы избежать контактной фильтрации в местах примыкания облицовки к внутренним стенкам установки, проводилось заполнение по контуру бетонного образца жидким водонепроницаемым герметиком (рисунок 5).

Результаты и обсуждение. На опытной модели наблюдалось установившееся напорное движение. При помощи насоса создавался напор (h_0 , м), который во время проведения исследований поддерживался постоянным.



**Рисунок 5 – Установка испытываемого образца
(автор фото А. Ю. Гарбуз)**

Определение расхода фильтрации через трещину в образце проводилось объемным методом (V , м³) при помощи мерного сосуда для различных значений напора (h_0) и ширины раскрытия трещины ($\delta_{тр}$). По результатам лабораторных исследований устанавливался удельный фильтрационный расход при различных значениях ширины повреждения (трещины). Результаты опытов приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Результаты определения удельного расхода через трещину в бетонной облицовке при $\delta_{тр} = 0,001$ м, $V = 0,0005$ м³

Номер опыта	h_0 , м	Единичный замер	t , с	$t_{ср}$, сут	$q_{тр.экс}$, м ² /сут
1	2	3	4	5	6
1-я серия опытов, исходные данные: $\delta_{тр} = 0,001$ м, $l_{тр} = 0,15$ м ($l_{тр}$ – длина трещины, м)					
1	1,0	1-й замер	327	0,00376	0,885
		2-й замер	325		
		3-й замер	324		
2	2,0	1-й замер	322	0,00370	0,899
		2-й замер	320		
		3-й замер	319		
3	3,0	1-й замер	317	0,00365	0,912
		2-й замер	316		
		3-й замер	314		
4	4,0	1-й замер	312	0,00359	0,928
		2-й замер	310		
		3-й замер	309		
5	5,0	1-й замер	307	0,00353	0,943
		2-й замер	305		
		3-й замер	304		

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6
6	6,0	1-й замер	302	0,00348	0,957
		2-й замер	301		
		3-й замер	300		
7	7,0	1-й замер	298	0,00343	0,971
		2-й замер	296		
		3-й замер	296		
8	8,0	1-й замер	296	0,00338	0,986
		2-й замер	292		
		3-й замер	291		
9	9,0	1-й замер	289	0,00333	1,001
		2-й замер	287		
		3-й замер	287		
10	10,0	1-й замер	284	0,00327	1,020
		2-й замер	282		
		3-й замер	281		

Таблица 2 – Результаты определения удельного расхода через трещину в бетонной облицовке при $\delta_{тр} = 0,0025$ м, $V = 0,0005$ м³

Номер опыта	h_0 , м	Единичный замер	t , с	t_{cp} , сут	$q_{тр.экс}$, м ² /сут
1	2	3	4	5	6
2-я серия опытов, исходные данные: $\delta_{тр} = 0,0025$ м, $l_{тр} = 0,15$ м ($l_{тр}$ – длина трещины, м)					
1	1,0	1-й замер	213	0,00244	1,363
		2-й замер	211		
		3-й замер	210		
2	2,0	1-й замер	208	0,00239	1,389
		2-й замер	207		
		3-й замер	207		
3	3,0	1-й замер	204	0,00235	1,418
		2-й замер	202		
		3-й замер	203		
4	4,0	1-й замер	200	0,00230	1,445
		2-й замер	199		
		3-й замер	199		
5	5,0	1-й замер	195	0,00223	1,489
		2-й замер	193		
		3-й замер	192		
6	6,0	1-й замер	189	0,00217	1,532
		2-й замер	188		
		3-й замер	187		
7	7,0	1-й замер	184	0,00212	1,571
		2-й замер	183		
		3-й замер	183		
8	8,0	1-й замер	177	0,00203	1,642
		2-й замер	175		
		3-й замер	174		

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
9	9,0	1-й замер	169	0,00194	1,714
		2-й замер	168		
		3-й замер	167		
10	10,0	1-й замер	164	0,00187	1,774
		2-й замер	162		
		3-й замер	161		

Таблица 3 – Результаты определения удельного расхода через трещину в бетонной облицовке при $\delta_{тр} = 0,005$ м, $V = 0,0005$ м³

Номер опыта	h_0 , м	Единичный замер	t , с	$t_{ср}$, сут	$q_{тр.экс}$, м ² /сут
3-я серия опытов, исходные данные: $\delta_{тр} = 0,005$ м, $l_{тр} = 0,15$ м ($l_{тр}$ – длина трещины, м)					
1	1,0	1-й замер	160	0,00183	1,819
		2-й замер	158		
		3-й замер	157		
2	2,0	1-й замер	155	0,00179	1,862
		2-й замер	154		
		3-й замер	155		
3	3,0	1-й замер	151	0,00173	1,924
		2-й замер	149		
		3-й замер	149		
4	4,0	1-й замер	146	0,00168	1,981
		2-й замер	145		
		3-й замер	145		
5	5,0	1-й замер	142	0,00162	2,052
		2-й замер	140		
		3-й замер	139		
6	6,0	1-й замер	137	0,00157	2,123
		2-й замер	135		
		3-й замер	135		
7	7,0	1-й замер	133	0,00153	2,182
		2-й замер	132		
		3-й замер	131		
8	8,0	1-й замер	128	0,00146	2,279
		2-й замер	126		
		3-й замер	125		
9	9,0	1-й замер	123	0,00140	2,373
		2-й замер	121		
		3-й замер	120		
10	10,0	1-й замер	119	0,00136	2,441
		2-й замер	118		
		3-й замер	117		

Аналогичные табличные данные получены и для ширины раскрытия трещины $\delta_{тр} = 0,0075$, $\delta_{тр} = 0,01$ м, по результатам анализа которых были построены графики зависимости удельного расхода повреждения бетонной облицовки от напора.

Удельный расход через трещину ($q_{тр.экс.}$) определялся по формуле, м²/с:

$$q_{тр.экс.} = \frac{V}{t_{ср} \cdot l_{тр}},$$

где V – объем воды, прошедший через трещину (шов) за время t , м³;

$t_{ср}$ – среднее значение времени по данным трех повторяющихся опытов, сут;

$l_{тр}$ – длина трещины, м.

По результатам проведенных экспериментальных исследований построены графики зависимости удельного расхода от напора при фиксированных значениях ширины раскрытия трещин 1; 2,5; 5; 7,5; 10 мм (рисунок 6).

Анализируя графическое представление полученных данных на рисунке 6 и используя программный комплекс Excel, получили эмпирические функциональные зависимости для определения удельного фильтрационного расхода [10] при различных значениях ширины раскрытия трещин.

Полученные эмпирические зависимости имеют нижеследующий вид:

- при $\delta_{тр} = 0,001$ м: $q_{тр} = 0,0148 \cdot h_0 + 0,8688$ ($R^2 = 0,999$);

- при $\delta_{тр} = 0,0025$ м: $q_{тр} = 0,0455 \cdot h_0 + 1,2835$ ($R^2 = 0,9685$);

- при $\delta_{тр} = 0,005$ м: $q_{тр} = 0,0705 \cdot h_0 + 1,7162$ ($R^2 = 0,9913$);

- при $\delta_{тр} = 0,0075$ м: $q_{тр} = 0,1226 \cdot h_0 + 2,0775$ ($R^2 = 0,988$);

- при $\delta_{тр} = 0,01$ м: $q_{тр} = 0,2395 \cdot h_0 + 2,5643$ ($R^2 = 0,9867$).

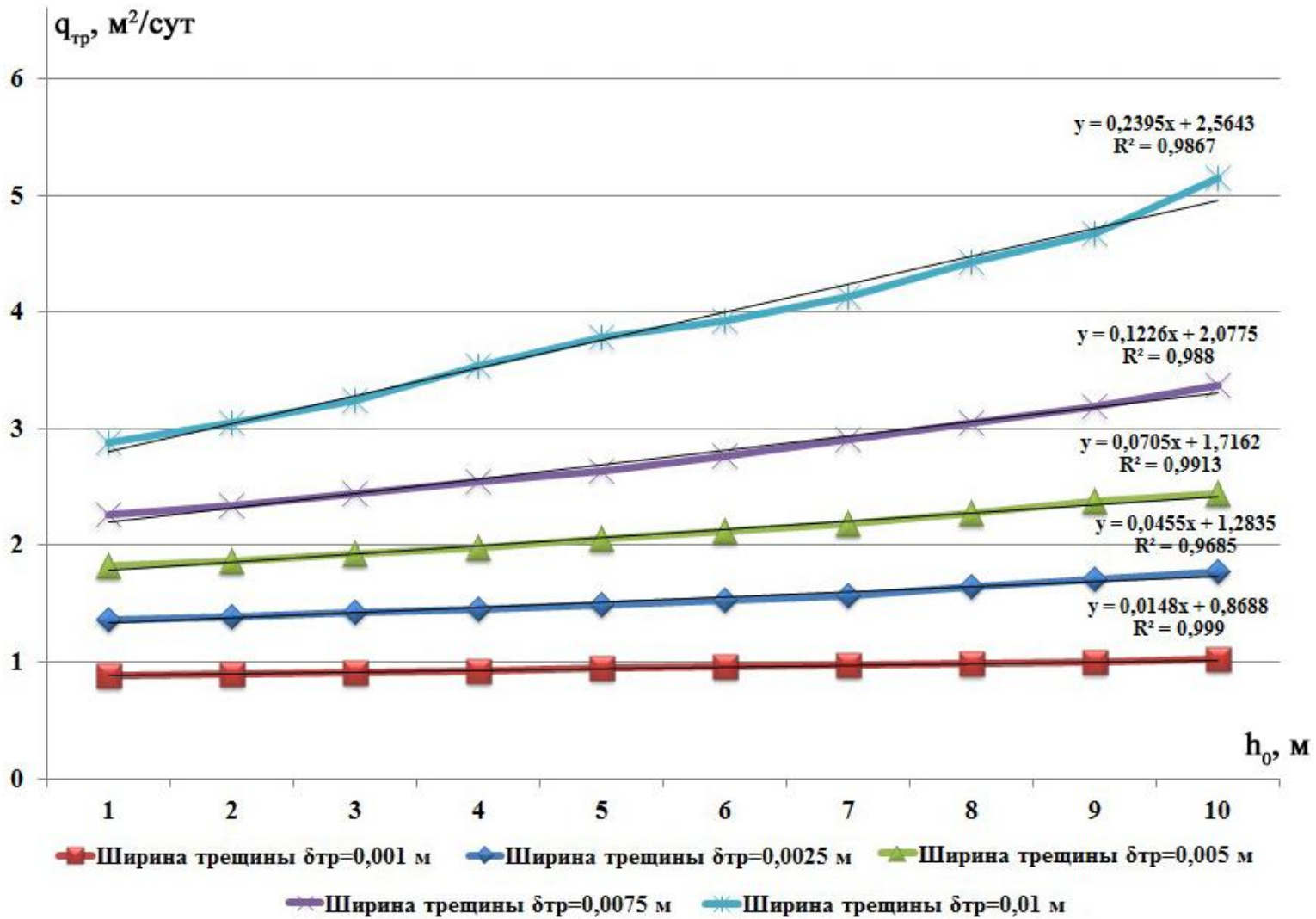


Рисунок 6 – Графики зависимости удельного расхода от напора при различных значениях ширины раскрытия трещины

Выводы

1 Лабораторные исследования фильтрации через трещины бетонных облицовок каналов на опытной установке позволили получить эмпирические зависимости удельного фильтрационного расхода от напора и ширины раскрытия трещины.

2 Получены эмпирические расчетные зависимости, которые имеют достаточно высокое значение достоверности аппроксимации для сквозных трещин $R^2 = 0,96...0,98$, что позволяет рекомендовать их для практического использования.

Список использованных источников

1 Основные принципы и методы эксплуатации магистральных каналов и сооружений на них: монография / В. Н. Щедрин [и др.]; под общ. ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – 361 с.

2 Ищенко, А. В. Теоретическая модель водопроницаемости бетонопленочного противофильтрационного покрытия канала / А. В. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2007. – № 2. – С. 93–97.

3 Баев, О. А. Противофильтрационные покрытия с применением бентонитовых матов для накопителей жидких отходов / О. А. Баев // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2013. – № 3(11). – С. 115–124. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec199-field6.pdf.

4 Косиченко, Ю. М. Классификация геосинтетических материалов и их применение для противофильтрационных устройств / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Актуальные вопросы гидротехники и мелиорации на юге России: сб. ст. / ФГБОУ ВПО «НГМА». – Новочеркасск: Лик, 2013. – С. 108–117.

5 Косиченко, Ю. М. Рекомендации по применению геосинтетических материалов для противофильтрационных экранов каналов, водоемов и накопителей / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев; ФГБНУ «РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2014. – 65 с. – Деп. в ВИНТИ 12.01.15, № 1-B2015.

6 Гарбуз, А. Ю. Ремонт повреждений облицовок длительно работающих каналов с использованием полимерных композиций / А. Ю. Гарбуз // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2015. – № 2(58). – С. 33–39.

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

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

9 Исследования гидродинамического воздействия водного потока на защитное покрытие из геосинтетического материала / К. Д. Козлов, Н. В. Ханов, В. А. Фартуков, Д. В. Козлов // Строительство: наука и образование. – 2018. – Т. 8, № 1(27). – С. 108–117.

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

References

1 Shchedrin V.N. [et al.], 2015. *Osnovnye printsipy i metody ekspluatatsii magistral'nykh kanalov i sooruzheniy na nikh: monografiya* [Basic Principles and Methods of Operation of Main Canals and Facilities on them: monograph]. Novocherkassk, RosNIIPM Publ., 361 p. (In Russian).

2 Ishchenko A.V., 2007. *Teoreticheskaya model' vodopronitsaemosti betonoplenoch-nogo protivofil'tratsionnogo pokrytiya kanala* [Theoretical model of water permeability of concrete-foam impervious lining of the channel]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Engineering Sciences], no. 2, pp. 93-97. (In Russian).

3 Baev O.A., 2013. [Impervious lining with the use of bentonite mats for liquid waste storage]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 3(11), pp. 115-124, available: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec199-field6.pdf. (In Russian).

4 Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2013. *Klassifikatsiya geosinteticheskikh materialov i ikh primenenie dlya protivofil'tratsionnykh ustroystv* [Classification of geosynthetic materials and their use for impervious installations]. *Aktual'nye voprosy gidrotekhniki i melioratsii na yuge Rossii: sb. st. / FGBOU VPO "NGMA"* [Urgent Problems of Hydraulic Engineering and Land Reclamation in the South of Russia: coll. art. FSBEI HPE NGMA]. Novocherkassk, Lik Publ., pp. 108-117. (In Russian).

5 Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Rekomendatsii po primeneniyu geosinteticheskikh materialov dlya protivofil'tratsionnykh ekranov kanalov, vodoemov i nakopiteley* [Recommendations on the Use of Geosynthetic Materials for Impervious Screens of Canals, Reservoirs and Storage Ponds]. Novocherkassk, 65 p., deposited in All-Union Institute of Scientific and Technical Information on 12.01.2015, no. 1-V2015. (In Russian).

6 Garbuz A.Yu., 2015. *Remont povrezhdeniy oblitsovok dlitel'no rabotayushchikh kanalov s ispol'zovaniem polimernykh kompozitsiy* [Repair of lining damage of long-term operating canals using polymer compositions]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture], no. 2(58), pp. 33-39. (In Russian).

7 Kosichenko Yu.M., Baev O.A., Garbuz A.Yu., 2016. *Otsenka vodopronitsaemosti betonoplenochnoy oblitsovki s zakol'matirovannymi shvami pri dlitel'noy ekspluatatsii kanalov* [Water permeability assessment of a concrete-foam lining with colmated seams in case of long-term operation of channels]. *Vestnik MGSU* [Bull. MGSU], no. 7, pp. 114-133. (In Russian).

8 Lomize G.M., 1951. *Fil'tratsiya v treshchinovatykh porodakh* [Filtration in Fractured Rocks]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 127 p. (In Russian).

9 Kozlov K.D., Khanov N.V., Fartukov V.A., Kozlov D.V., 2018. *Issledovaniya gidrodinamicheskogo vozdeystviya vodnogo potoka na zashchitnoe pokrytie iz geosinteticheskogo materiala* [Studies of the hydrodynamic effect of a water flow on the geosynthetic protective coating]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Science. Construction. Education], vol. 8, no. 1(27), pp. 108-117. (In Russian).

10 Baev O.A., 2014. *Primenenie planirovaniya eksperimenta dlya izucheniya vodopronitsaemosti ekrana iz geomembrany* [Application of experimental design for studying water permeability of a geomembrane screen]. *Prirodobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 46-51. (In Russian).

Гарбуз Александр Юрьевич

Должность: главный специалист

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 Yuryevich

Position: Main Specialist

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