

Моделирование процесса водопроницаемости противофильтрационных экранов из геомембран

О.А. Баев

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск

Аннотация: На основе теории планирования эксперимента, используя полуреплику пятифакторного эксперимента, проведены лабораторные исследования на фильтрационном лотке, получена эмпирическая зависимость для определения расхода через малые отверстия в геомембране. Произведена проверка адекватности полученного уравнения по F-критерию Фишера, рассчитана значимость полученных значений расхода по t-критерию Стьюдента. Проведено сравнение полученных результатов моделирования расхода на физической модели и расчетов по эмпирической формуле.

Ключевые слова: геомембрана, противофильтрационные покрытия, расход, фильтрация, планирование эксперимента.

Не смотря на то, что противофильтрационные покрытия (ПФП) из геосинтетических материалов являются самыми высокоэффективными конструкциями по предотвращению потерь на фильтрацию [1 – 7], тем не менее, в случаях, когда в основании экрана имеются крупные частицы грунта с диаметром более 5-10 мм и особенно частицы с острыми гранями, то вполне вероятны повреждения противофильтрационного полимерного элемента (геомембраны) в виде малых отверстий – проколов. Отсюда важным вопросом исследований служит оценка водопроницаемости полимерных экранов при наличии таких малых повреждений.

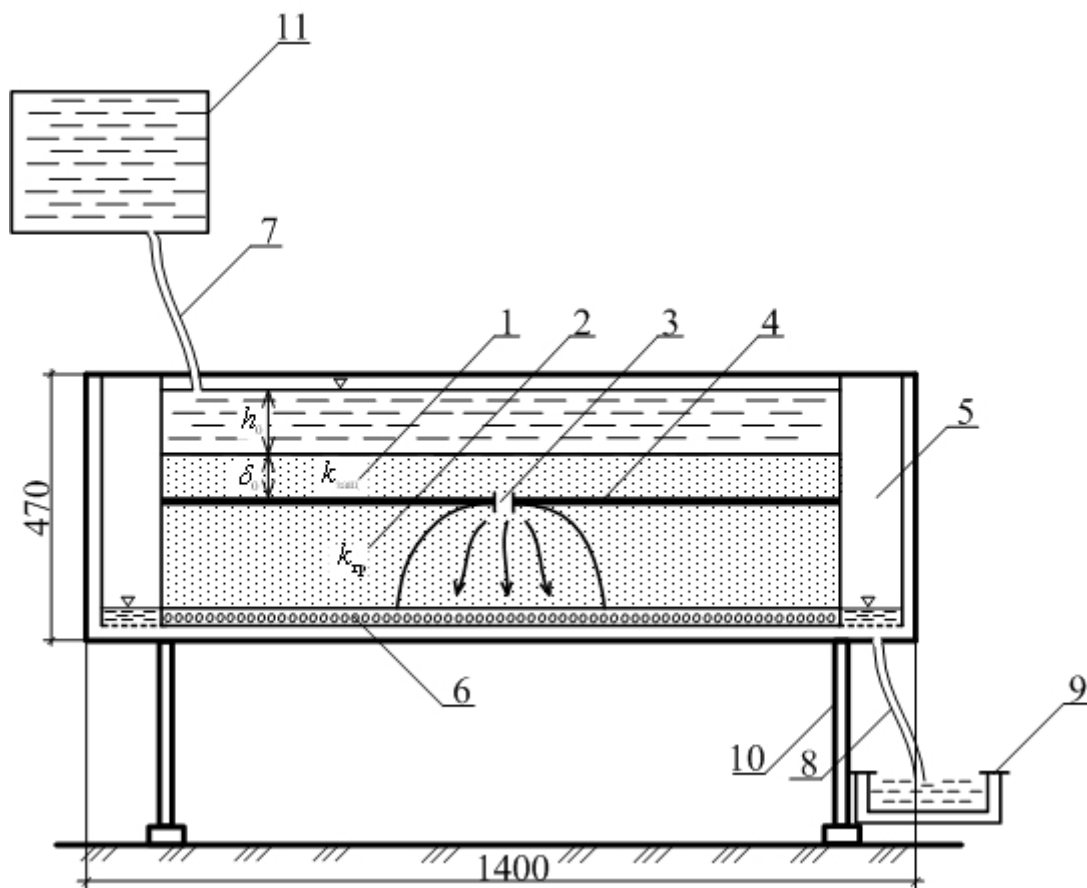
Такие исследования могут быть выполнены путем математического и компьютерного моделирования [8 – 9], на основе численных экспериментов с использованием метода планирования эксперимента [10 – 12], а также с помощью физического моделирования на фильтрационных лотках.

Подобные задачи решались и ранее, только для ПФП, выполненных из полиэтиленовых пленок (толщиной 0,2 мм по ГОСТ 10354-82). Большой вклад в развитие данного направления внесли многие ученые, особенно

необходимо отметить В.Д. Глебова, И.Е. Кричевского, В.П. Лысенко, И.М. Елшина, Ю.М. Косиченко [13 – 15].

Целью настоящей работы является моделирование процесса водопроницаемости ПФП с малыми отверстиями в геомембране на физических масштабных моделях.

Для физического моделирования использовался фильтрационный лоток, заполненный песком, имеющий размеры 1,4x1,4x0,47 м. Схема установки для проведения физического моделирования фильтрации представлена на рис. 1.



- 1 – защитный слой из песка; 2 – подстилающее основание из песка;
3 – отверстие в геомембране; 4 – полимерная геомембрана; 5 – боковые «карманы»; 6 – дренажный слой из гравийно-галечникового материала;
7 – шланг для подвода воды; 8 – шланг для сброса воды; 9 – сбросной лоток;
10 – опорная рама; 11 – напорный бак

Рис. 1 – Схема установки для проведения физического моделирования фильтрации

Подача воды в фильтрационный лоток осуществлялась из напорного бака, а отвод воды – через специальные карманы в торцовых стенках лотка.

Дно лотка сделано из металлических листов. Для визуальных наблюдений передняя, задняя и боковые стенки установки выполнены из листов органического стекла, толщиной 10-15 мм. В металлическом дне сделан кран, через которое происходит опорожнение из емкости.

Физическая модель противофильтрационного экрана из полимерной геомембраны с защитным покрытием и подстилающим слоем была выполнена из геомембраны (пленки) толщиной $\delta_m = 0,2$ мм, при принятом линейном масштабе на модели $\lambda_e = 5$, что соответствует толщине геомембраны в натуре $\delta_n = 1,0$ мм.

Выполнение модели из геомембраны или полиэтиленовой пленки толщиной $\delta_m = 0,2$ мм позволяет учитывать не только принятый линейный масштаб, но и, по существу моделировать гибкость конструкции экрана, поскольку, чем меньше толщина, тем больше гибкость полимерного материала [9].

Применение тонкой геомембраны (пленки) обеспечивало плотное прилегание экрана к подстилающему основанию под действием нагрузки от защитного слоя толщиной δ_0 . Толщина защитного слоя в натуре принималась в пределах $\delta_{0n} = 0,50 \div 1,0$ м, и соответственно, на модели $\delta_{0m} = 0,10 \div 0,20$ м.

В качестве защитного слоя на модели применялся среднезернистый песок с коэффициентом фильтрации $k_1 = 5,0 \div 8,0$ м/сут., а в основании экрана – мелкозернистый песок, с $k_2 = 3 \div 5$ м/сут.

Подача воды на установку при проведении опытов осуществлялась по шлангу диаметром 20 мм.

Отверстия в геомембране выполнялись вручную, расход измерялся объемным способом. Кроме того, вся конструкция и полимерная геомембрана по контуру в лотке были загерметизированы водостойким герметиком, что позволило полностью избежать утечек из емкости.

При проведении лабораторных исследований использовались материалы, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Характеристика исходных материалов

Материал	Технические характеристики	Производитель
Песок мелкозернистый	Модуль крупности $M_k=1,5-2,0$ мм	ОАО «Донстрансгидро-механизация»
Геомембрана полимерная (HDPE)	Толщина 1,5 мм, плотность 0,942 г/см ³ , сопротивление прокалыванию 680 Н	«NAUE» GmbH&Co KG (Германия)
Песок крупнозернистый	Модуль крупности $M_k=2,5-3,0$ мм	ОАО «Донстрансгидро-механизация»
Вода	-	-

Поверх подстилающего слоя укладывалась геомембрана с отверстиями, согласно данным, приведенным в таблице 2.

В таблице 2 приводятся выбранные факторы, их уровни и границы варьирования применительно к модели фильтрационного лотка.

Таблица № 2

Факторы и уровни изменения в масштабе для модели

Фактор	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов			Интервалы варьирования
		Верхний (+1)	Основной (0)	Нижний (-1)	
$k_{защ}$, м/сут.	x_1	8,0	6,5	5,0	1,5
$k_{гр}$, м/сут.	x_2	5,0	4,0	3,0	1,0
δ_0 , м	x_3	0,20	0,15	0,10	0,05
h_0 , м	x_4	1,0	0,60	0,20	0,40
r_0 , м	x_5	0,01	0,0055	0,001	0,0045

При проведении лабораторных исследований использовалась теория планирования эксперимента [10, 16]. Решение подобной задачи фильтрации

численным методом планирования эксперимента было получено автором ранее и представлено в работе. Данная задача может быть также решена с использованием метода теории планирования эксперимента в безразмерном виде [9].

Для проведения исследования принимаем план эксперимента как полуреплику 2^{5-1} , согласно которой, для пяти факторов достаточно провести 16 опытов. Дробный факторный эксперимент имеет свойства, аналогичные полной реплике, т.е. равен числу опытов и сохраняет свойства ортогональности. Свойство ортогональности матрицы позволяет найти все коэффициенты полинома независимо друг от друга.

Возможность аппроксимации зависимости (1) уравнением (3) устанавливается проверкой гипотезы адекватности линейной модели при выражении результата эксперимента полиномом (4):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{45}x_4x_5, \quad (1)$$

где $Y = \lg k'_{\text{обл}}$, x_1, \dots, x_5 – кодированное значение факторов.

По результатам проведенных исследований и измерений объемным способом на физической модели, был определен расход q (таблица 3) через малые отверстия в геомембране.

Таблица № 3

Результаты лабораторных исследований

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$q, \text{ м}^3/\text{с}$	0,0032	0,0046	0,0037	0,0061	0,052	0,060	0,176	0,052	0,012	0,012	0,015	0,011	0,152	0,110	0,122	0,181
$Y \lg q$	-2,49	-2,34	-2,43	-2,21	-1,28	-1,22	-0,75	-1,28	-1,92	-1,92	-1,82	-1,96	-0,82	-0,96	0,91	-0,74

По результатам лабораторных опытов, проведенных в соответствии с матрицей планирования, можно подсчитать коэффициенты регрессии линейного уравнения.

Общая зависимость для вычисления коэффициентов регрессии имеет вид:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N}. \quad (2)$$

где x_{in} – значение x_i в n -м опыте; Y_n – значение искомого параметра в том же опыте, N – число опытов.

В результате экспериментов, согласно выбранному плану, получена математическая зависимость полиномов для Y в виде:

$$Y = -1,57 - 1,09x_1 - 0,03x_2 + 0,57x_3 + 0,18x_4 - 0,054x_5 - 0,02x_1x_2 - \\ - 0,04x_1x_3 - 0,001x_1x_4 - 0,013x_1x_5 - 0,21x_2x_3 - 0,03x_2x_4 + 0,06x_2x_5 - \\ - 0,05x_3x_4 + 0,04x_3x_5 - 0,013x_4x_5. \quad (3)$$

Как видно из уравнения (3), на расход (q) наибольшее влияние оказывает 1-й фактор $x_1 = -1,09$, при $b_0 = -1,57$, заметно также влияние толщины защитного слоя $x_3 = 0,57$. Наименьшее влияние на фильтрационный расход оказывает коэффициент фильтрации грунта основания $x_4 = -0,03$.

Если фильтрационный расход, полученный по результатам исследований, принять за 100 %, то влияние каждого отдельного фактора на расход в процентном соотношении может быть представлено в следующем виде (рис. 2).

Подставляя вместо переменных в уравнение (3) их логарифмы, записываем его следующим образом:

$$\begin{aligned} \lg q_0 = & -1,57 - 1,09 \lg k_{\text{защ}} - 0,03 \lg k_{\text{гр}} + 0,57 \lg \delta_0 + 0,18 \lg h_0 - \\ & - 0,054 \lg r_0 - 0,02 \lg k_{\text{защ}} \cdot \lg k_{\text{гр}} - 0,04 \lg k_{\text{защ}} \cdot \lg \delta_0 - 0,01 \lg k_{\text{защ}} \cdot \lg h_0 - \\ & - 0,013 \lg k_{\text{защ}} \cdot \lg r_0 - 0,21 \lg k_{\text{гр}} \cdot \lg \delta_0 - 0,03 \lg h_0 + 0,06 \lg k_{\text{гр}} \cdot \lg r_0 - \\ & - 0,05 \lg \delta_0 \cdot \lg h_0 + 0,04 \lg \delta_0 \cdot \lg r_0 - 0,013 \lg h_0 \cdot \lg r_0. \end{aligned} \quad (4)$$

После преобразований и потенцирования уравнения (4) получим следующий вид эмпирической зависимости для определения расхода через малые отверстия в полимерной геомембране:

$$q_0 = 2,6 \cdot 10^{-2} \cdot k_{\text{защ}}^{-1,16} \cdot k_{\text{гр}}^{-0,23} \cdot \delta_0^{0,18} \cdot h_0^{0,09} \cdot r_0^{0,02}, \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (5)$$

После математической обработки определяем коэффициент детерминации и F-критерий Фишера для зависимости (5).

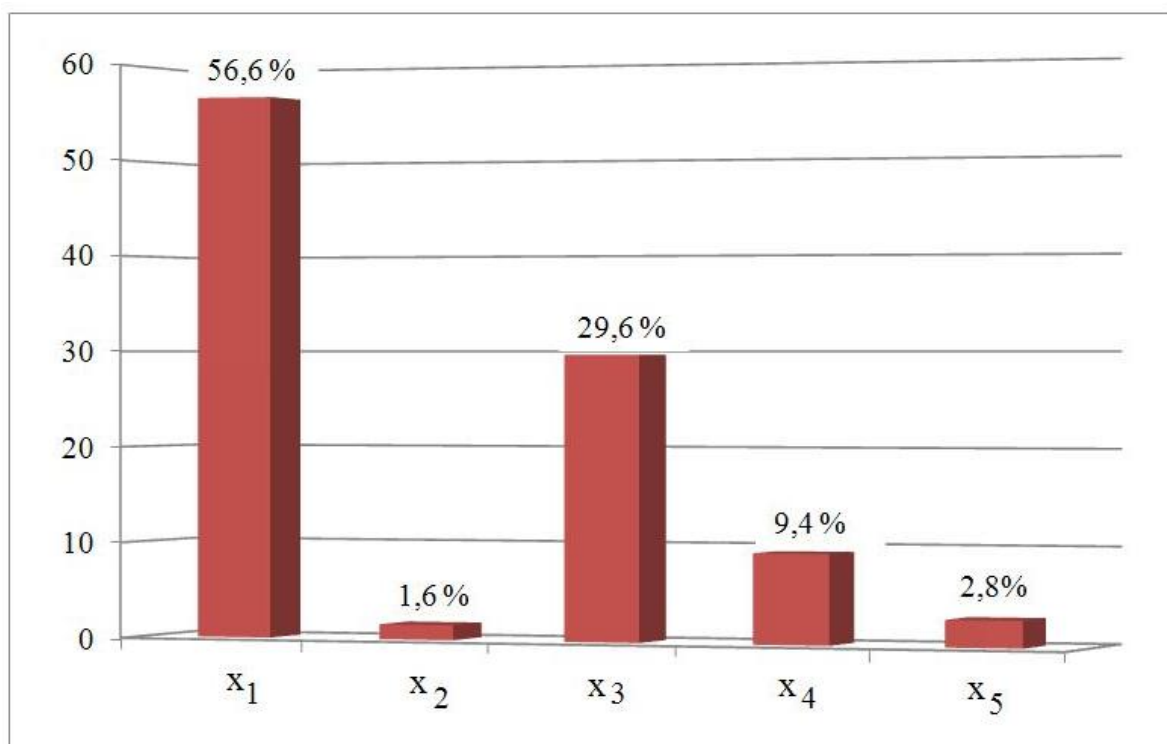


Рис. 2 – Влияние отдельных факторов на фильтрационный расход в процентном соотношении

Определяем индекс корреляции:

$$\rho_{yx} = \sqrt{1 - \frac{\sum(y - \tilde{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2}} = 0,95.$$

Найдем коэффициент детерминации: $R^2 = \rho_{yx} \cdot 100\% = 90,5$.

Вариация результата Y 90,5 % объясняется вариацией факторов x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 .

Проверим теперь адекватность полученного уравнения по F-критерию Фишера:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} n, \quad (6)$$

где n – число единиц совокупности.

Критическое значение $F_{\text{табл}}$ определим по статистическим таблицам, и для уровня значимости $\alpha=0,05$, с вероятностью 0,95, $F_{\text{табл}}=2,4$.

По результатам расчета зависимости (6) получаем $F=152,42$, следовательно, $F > F_{\text{табл}}(152,42 > 2,4)$, отсюда следует, что полученное эмпирическое уравнение с позиции критерия Фишера адекватно результатам эксперимента.

Проверка значимости коэффициентов полинома произведена при помощи t-критерия Стьюдента по зависимости:

$$t_p = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j}{\frac{\sqrt{1}}{N} s_y^2} > t_m, \quad (7)$$

где t_m – табличное значение t-критерия Стьюдента; N – число опытов (16); x_{ij} – кодированные значения (i – номер фактора); j – номер опыта; y_i – среднее арифметическое значение параметра оптимизации; s_y^2 – дисперсия коэффициентов регрессии).

После математической обработки и сравнив результаты расчетов (t_p) по t-критерию Стьюдента и полученные значения (t_m), можно говорить о значимости всех коэффициентов $t_p < t_m$ ($63,68 > 6,06$).

Найдем среднюю относительную ошибку аппроксимации:

$$\bar{E}_{\text{отн}} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100 \%, \quad \bar{E}_{\text{отн}} = 3,9 \%$$

Сравнение результатов моделирования расхода (q_0) на физической модели и расчетов по полученной эмпирической формуле, при принятых значениях факторов для основного уровня, приведено в таблице 4.

Таблица № 4

Результаты моделирования на физической модели и расчета по эмпирической формуле

Параметр	На физической модели	По эмпирической формуле (5)	Расхождение, %
$q_0, \text{ м}^3/\text{сут.}$	0,049	0,051	3,9

Представленные результаты опытов на физической модели и расчеты по эмпирической формуле (см. таблицу 4) свидетельствуют об их достаточно близких значениях, что подтверждает правильность полученных эмпирических зависимостей. Расхождение получается весьма несущественным и составляет для фильтрационного расхода через малое отверстие – 3,9 %.

Для количественного перевода в натуре данных, полученных путем физического моделирования на масштабной модели, необходимо вводить переходные коэффициенты подобия. Коэффициенты или масштабы подобия определяются в виде безразмерных отношений основных параметров, характеризующих фильтрацию в натуре к соответствующим параметрам на модели.

Выводы:

1. Для определения водопроницаемости противочувствительных экранов через малые отверстия в геомембране, в соответствии с планом эксперимента были проведены лабораторные исследования на фильтрационном лотке, где учитывались сочетания пяти факторов: коэффициента фильтрации защитного покрытия и грунта основания,

толщину защитного покрытия, глубину воды в канале (водоеме), радиус отверстия (повреждения) в геомембране.

2. На основании проведенных исследований с помощью физического моделирования был изучен процесс фильтрации через малые отверстия в геомембране, а полученные результаты фильтрационного расхода были сопоставлены между собой с расчетами по полученной эмпирической формуле, что свидетельствует о их незначительном расхождении в пределах до 3,9 %.
3. Адекватность полученной эмпирической формулы для определения расхода через малые отверстия в полимерной геомембране подтверждается расчетом по F-критерию Фишера, а проверка по t-критерию Стьюдента свидетельствует о значимости всех коэффициентов.

Литература:

1. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Противофильтрационные покрытия из геосинтетических материалов. Новочеркасск: РосНИИПМ, 2014. 239 с.
2. Ищенко А.В. Повышение эффективности и надежности противофильтрационных облицовок оросительных каналов: монография. Изв.вуз. Сев. – Кавк. регион. техн. науки. 2006. 211 с.
3. Гладштейн О.И. Геомембраны – уже не инновации, еще не классика // Строительство и городское хозяйство в Санкт-Петербурге и Ленинградской области. 2012. № 3. С. 22-23.
4. Scuero A.M., Vaschetti G.L. Repair of CFRDs with synthetic geomembranes in extremely cold climates. Proceedings, Hydro 2005 – Policy into practice, Villach, 2005. pp. 59-68.

5. Rogers M. Exposed geomembrane liner minimizes seepage through tallest RCC dam in United States. *Hydropower & Dams*, Issue 4. 2005. pp. 1-8.
6. Косиченко Ю.М., Баев О.А., Ищенко А.В. Современные методы борьбы с фильтрацией на оросительных системах // *Инженерный Вестник Дона*, 2014, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2593.
7. Бандурин М.А. Численное моделирование объемного противofильтрационного геотекстильного покрытия с изменяемой высотой ребра // *Инженерный вестник Дона*, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1911.
8. Скляренко Е.О. Моделирование распространения загрязненного потока из накопителей промышленных отходов в грунтовых водах // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки*. 2007. № 4. С. 96-99.
9. Косиченко Ю.М., Баев О.А. Математическое и физическое моделирование фильтрации через малые повреждения противofильтрационных устройств из полимерных геомембран // *ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева*. 2015. Т. 274. С. 60-74.
10. Колганов А.В., Питерский А.М., Лисконов А.Т. Планирование эксперимента в гидромелиоративных исследованиях // *М.: Мелиоводинформ*. 1999. 214 с.
11. Каганов Г.М., Волков В.И., Секисова И.А. Приближенная оценка глубины затопления территории в нижнем бьефе при прорыве напорного фронта низконапорных гидроузлов // *Гидротехническое строительство*. 2010. № 4. С. 22-26.
12. Багин А.В., Козлов Д.В. Обобщенная математическая модель воздействия ледовых образований на гидротехнические сооружения из габионов // *Гидротехническое строительство*. 2011. № 2. С. 31-37.

13. Косиченко Ю.М. Исследования фильтрационных потерь из каналов оросительных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2006. № 6. С. 24-25.
14. Алтунин В.С., Бородин В.А., Ганчиков В.Г., Косиченко Ю.М. Защитные покрытия оросительных каналов // М.: Агропромиздат, 1988. 160 с.
15. Косиченко Ю.М., Бородин В.А., Ищенко А.В. Инструкция по расчету водопроницаемости и эффективности противофильтрационных // М., Союзгипроводхоз, ЮжНИИГиМ. 1984. 99 с.
16. Волосухин В.А., Тищенко А.И. Планирование научного эксперимента // РИОР, Инфра-М. 2014. 176 с.

References

1. Kosichenko Ju.M., Baev O.A. Protivofil'tracionnye pokrytija iz geosinteticheskikh materialov [Impervious coating of geosynthetics]. Novocherkassk: RosNIIPM, 2014. 239 p.
2. Ishchenko, A. V. Povyshenie effektivnosti i nadezhnosti protivofil'tratsionnykh oblitsovok orositel'nykh kanalov: monografiya [Improving the efficiency and reliability of anti facing irrigation canals] Izv.vuz. Sev.– Kavk. region. tekhn. nauki. 2006. 211 p.
3. Gladshtejn O.I. Stroitel'stvo i gorodskoe hozjajstvo v Sankt-Peterburge i Leningradskoj oblasti. 2012. № 3. pp. 22-23.
4. Scuero A.M., Vaschetti G.L. Repair of CFRDs with synthetic geomembranes in extremely cold climates. Proceedings, Hydro 2005 – Policy into practice, Villach, 2005. pp. 59-68.
5. Rogers M. Exposed geomembrane liner minimizes seepage through tallest RCC dam in United States. Hydropower & Dams, Issue 4. 2005. pp. 1-8.

6. Kosichenko Ju.M., Baev O.A., Ishhenko A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2593.
7. Bandurin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1911.
8. Skljarenko E.O. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki. 2007. № 4. pp. 96-99.
9. Kosichenko Ju.M., Baev O.A. VNIIG im. B. E. Vedeneeva. 2015. T. 274. pp. 60-74.
10. Kolganov A.V., Pitserskij A.M., Liskonov A.T. Planirovanie jeksperimenta v gidromeliorativnyh issledovanijah [Experimental Design in irrigation and drainage studies]. M.: Meliovodinform. 1999. 214 p.
11. Kaganov G.M., Volkov V.I., Sekisova I.A. Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. 2010. № 4. pp. 22-26.
12. Bagin A.V., Kozlov D.V. Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. 2011. № 2. pp. 31-37.
13. Kosichenko Ju.M. Melioracija i vodnoe hozjajstvo. 2006. № 6. pp. 24-25.
14. Altunin V.S., Borodin V.A., Ganchikov V.G., Kosichenko Ju.M. Zashhitnye pokrytija orositel'nyh kanalov [Protective coatings of irrigation canals] M.: Agropromizdat, 1988. 160 p.
15. Kosichenko Ju.M., Borodin V.A., Ishhenko A.V. Instrukcija po raschetu vodopronicaemosti i jeffektivnosti protivofil'tracionnyh. [Instructions for calculation of permeability and effectiveness of anti] Sojuzgiprovodhoz, JuzhNIIGiM. 1984. 99 p.
16. Volosuhin V.A., Tishhenko A.I. Planirovanie nauchnogo jeksperimenta [Planning a scientific experiment] RIOR, Infra-M. 2014. 176 p.