

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 502/504:627.8

doi: 10.31774/2712-9357-2021-11-4-287-301

Вопросы реконструкции крупных каналов и оценка их эффективности

Олег Андреевич Баев¹, Михаил Юрьевич Косиченко²

¹Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация, kosmi74@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2488-0842>

Аннотация. Цель: определение эффективности крупных оросительных каналов на примере Донского магистрального и Большого Ставропольского при их реконструкции. **Материалы и методы.** Для создания комбинированных облицовок крупных каналов представляет интерес применение геокомпозитных материалов. Рассматривается геокомпозитная противофильтрационная конструкция, выполненная без защитного слоя на дне и части откоса и бетоноплочного элемента в зоне волнового и ледового воздействия. Применение такой комбинированной облицовки позволит снизить стоимость противофильтрационного экрана, сократить сроки строительства, уменьшить шероховатость русла и увеличить его пропускную способность. Методика гидравлических исследований основана на базе натуральных данных Большого Ставропольского и Донского магистрального каналов для средних и максимальных значений гидравлических параметров. В частности, необходимо было определить коэффициенты шероховатости русла канала на участке между створами. **Результаты.** Особенностью реконструкции наиболее опасных участков Донского магистрального канала является близкое расположение уровня грунтовых вод к поверхности земли, что приводит к переходу свободной фильтрации в подпертую. Общие потери, по результатам расчетов, на участке 57–70 км составляют $13,7 \cdot 10^3$ куб. м/сут, а при наличии облицовки канала – 0,504 куб. м/сут, что в 2,09 раза меньше, чем при подпертой фильтрации в земляном русле. **Выводы.** Представлены наиболее эффективные типы облицовок с использованием геокомпозитов, которые, как показывают натурные обследования, являются надежными комбинированными покрытиями. Противофильтрационные устройства из бетона и железобетона обладают высокой водонепроницаемостью, но при этом с течением времени разрушаются под воздействием воды и процессов замораживания-оттаивания.

Ключевые слова: коэффициент шероховатости, магистральный канал, фильтрация, противофильтрационная облицовка, геокомпозитное покрытие

HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Large canals reconstruction and their efficiency assessment

Oleg A. Baev¹, Mikhail Yu. Kosichenko²

¹Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, Oleg-Baev1@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0142-4270>

²South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation, kosmi74@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2488-0842>



Abstract. Purpose: to define the efficiency of large irrigation canals on the example of the Donskoy main canal and the Bolshoy Stavropol canal during their reconstruction. **Materials and methods.** The use of geocomposite materials is of interest to creating combined linings of large canals. A geocomposite anti-seepage structure made without a protective layer at the bottom and part of the slope and a concrete-film element in the zone of wave and ice impact is considered. The application of such a combined lining makes it possible to reduce the cost of the anti-seepage screen, to shorten the construction time, to reduce the canal roughness and to increase its water-carrying capacity. The method of hydraulic research is based on the field data of the Bolshoy Stavropol and the Donskoy main canals for average and maximum values of hydraulic parameters. In particular, it was necessary to determine the roughness coefficients of the canal in the area between the sections. **Results.** A feature of the reconstruction of the most dangerous sections of the Donskoy main canal is the close location of the groundwater level to the surface, which leads to the transition of free filtration to a banked-up one. According to the results of calculations, the total losses are $13.7 \cdot 10^3$ cubic meters/day in the section 57–70 km, and with canal lining – 0.504 cubic meters/day, which is 2.09 times less than with banked-up filtration in the earthen bed. **Conclusions.** The most effective types of linings with the use of geocomposites which, as shown by field surveys, are reliable combined coatings, are presented. Anti-seepage facilities made of concrete and reinforced concrete have high impermeability, though at the same time they are destroyed over time under the influence of water and freezing-thawing processes.

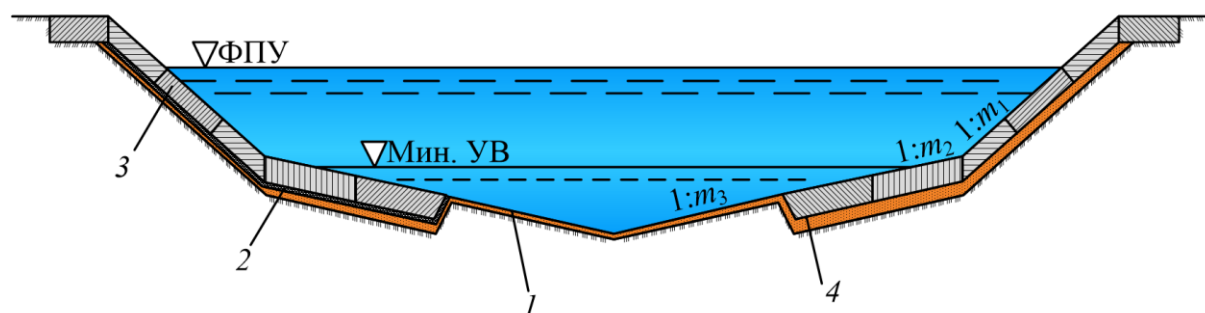
Keywords: roughness coefficient, main canal, filtration, anti-seepage lining, geocomposite coating

Введение. Наиболее эффективными типами облицовок, как показывают ранее выполненные обследования каналов [1–3], являются комбинированные облицовки с геокompозитными материалами. Процент использования монолитного бетона в строительстве противофильтрационных облицовок занимает от общего объема до 20–30 %.

Накопленный отечественными исследователями [4–7] опыт строительства и реконструкции оросительных и магистральных каналов гидромелиоративных систем свидетельствует о целесообразности устройства комбинированных облицовок в качестве противофильтрационных элементов. Бетонные покрытия, как правило, в последние годы применяются лишь в качестве защитных устройств (непосредственно в зоне волновых воздействий), для предотвращения размыва и деформаций.

Цель исследований – определение гидравлических характеристик Большого Ставропольского канала первой очереди (БСК-1) по данным натурных исследований, а также расчет подпертой фильтрации из Донского магистрального канала (ДМК) в земляном русле и при наличии облицовки.

Для создания комбинированных облицовок крупных каналов представляет интерес применение геокомпозитных материалов. Рассмотрим вариант конструкции экрана оросительного канала, выполненного без защитного покрытия на дне и части откоса и бетоноплочной облицовки в зоне волнового и ледового воздействия (рисунок 1).

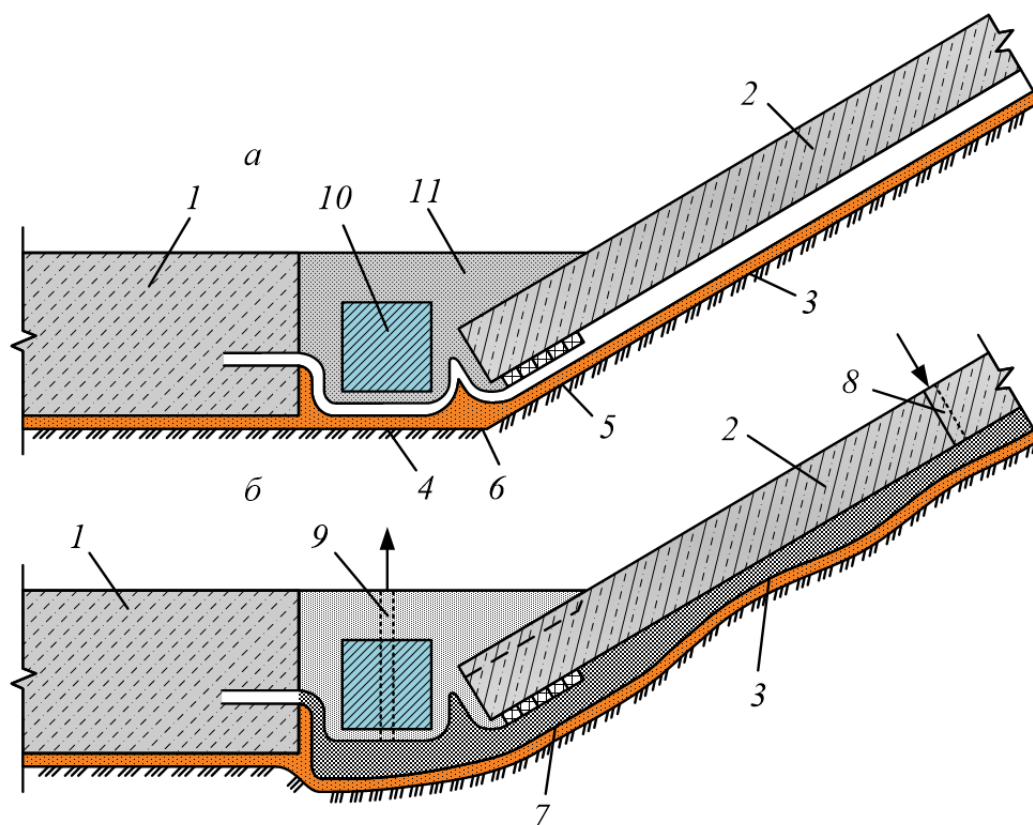


1 – геокомпозитный материал, совмещенный с геомембраной;
2 – геомембрана из полиэтилена; 3 – сборные плиты НПК; 4 – шов соединения;
ФПУ – форсированный подпорный уровень; УВ – уровень воды

**Рисунок 1 – Комбинированная облицовка
с использованием геокомпозитного материала**

Данная конструкция комбинированной облицовки была использована на БСК-1 (5-й километр), она состоит из сборных плит НПК с геомембраной и монолитного бетона без геомембраны по дну (рисунок 2). Применение противотрационного экрана в данном исполнении позволило снизить стоимость и сроки строительства, уменьшить шероховатость русла и увеличить его пропускную способность [5–7].

Геомембранные покрытия на каналах в соответствии с рекомендациями компании Carpi [8] целесообразно выполнять открытыми с целью уменьшения живого сечения канала и повышения гидравлической эффективности. Для открытого геомембранного покрытия имеются следующие преимущества: такое покрытие не подвержено обрастанию и легко ремонтируется, поскольку повреждения, даже самые малые, можно обнаружить и устранить. В случае, когда требуется высокая гидравлическая эффективность, для исключения в геомембране складок осуществляется ее натяжение с помощью анкерных устройств [8].



- a* – компенсатор деформаций в виде складок противофильтрационного элемента;
б – образование складки из противофильтрационного элемента при нагнетании инъекционного раствора и выход раствора через контрольное отверстие;
1 – монолитный бетон; *2* – железобетонные плиты; *3* – противофильтрационный элемент; *4* – защитное покрытие; *5* – место проклейки; *6* – компенсатор в виде складки; *7* – затвердевающий состав из цементно-песчаной смеси; *8* – инъекционный раствор; *9* – отверстие для контроля выхода раствора; *10* – упоры в виде бетонных кубиков; *11* – цементный раствор

Рисунок 2 – Противофильтрационное устройство облицовки канала

Так, например, для канала Сеньора до Порто (Португалия) длиной 2,5 км из-за образования крупных трещин, повышенной шероховатости облицовки и бетона наблюдалось значительное снижение пропускной способности. Поэтому целью реконструкции была герметизация трещин и улучшение пропускной способности за счет устройства новой облицовки и наращивания высоты стен на 10 %. Проведенные гидравлические расчеты свидетельствуют о том, что вариант с покрытием из геомембраны с ПВХ при таком же наращивании высоты стен обеспечивал пропускную способность на 50 % выше, чем вариант с армированным бетоном [8].

Для повышения эксплуатационной надежности и эффективности про-

тивофильтрационной защиты каналов [9] разработана конструкция комбинированной облицовки с бетонопленочным покрытием из сборных плит НПК на откосах и геомембраны, а также монолитного бетона (см. рисунок 2).

Материалы и методы. Определение гидравлических характеристик для Большого Ставропольского канала (в частности, БСК-1) осуществлялось по данным натурных исследований по следующей схеме.

1 Проводились натурные наблюдения на участках канала. Для этого выбирались четыре створа наблюдений на первой очереди БСК.

2 Глубина канала определялась с помощью механических измерителей глубин – наметки лота ручного или эхолота. Глубина канала находилась дважды: при средних глубинах (h_{cp} , м) и максимальных (h_{max} , м).

3 Ширина русла канала по урезу также определялась дважды: при среднем значении (B_{cp} , м) и максимальном (B_{max} , м).

4 Далее определялась площадь живого сечения канала при средних глубинах (ω_{cp} , м²) и максимальных (ω_{max} , м²).

5 Затем вычислялась средняя скорость течения при средних глубинах в створах (v_{cp} , м/с), максимальная скорость течения в створе (v_{max} , м/с). Скорости замерялись в трех точках вертикали гидрометрическими вертушками ГР-55.

6 Расход воды (Q , м³/с) определялся методом «скорость – площадь» между вертикалями с последующим суммированием между скоростными вертикалями ($\sum \Delta Q_i$) по следующей формуле:

$$Q = \sum \Delta Q_i = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n,$$

где $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ – расходы между скоростными вертикалями, м³/с.

7 Уклон дна канала (i_0) принимается равным уклону свободной поверхности воды J , $i_0 = J$ (%) – в промилле.

8 Гидравлический радиус (R , м) определяется по формуле:

$$R = \frac{\omega}{\chi},$$

где ω – площадь живого сечения, м²;

χ – смоченный периметр, м.

9 Коэффициент Шези (C) определяли по зависимости Г. В. Железнякова для установившегося неравномерного движения потока:

$$C = \frac{v_{cp}}{\sqrt{J - \alpha \cdot \frac{v_2^2 - v_1^2}{2gl}} \cdot R},$$

где v_{cp} – средняя скорость течения в створе, м/с;

J – уклон водной поверхности, ‰;

α – коэффициент Кориолиса, определяемый в среднем как для речных потоков ($\alpha \approx 1,25$);

v_1, v_2 – средние скорости движения потока в начале и конце участка, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

l – длина участка канала, м;

R – гидравлический радиус, м.

10 В заключение методики определяется важная гидравлическая характеристика – средний условный коэффициент шероховатости русла канала (n_{cp}) на участке между створами по следующей формуле [10]:

$$n_{cp} = \frac{R^{2/3} \cdot J^{1/2}}{v_{cp}}.$$

Результаты и обсуждение. В таблице 1 представлены результаты определения гидравлических характеристик канала БСК-1.

Результаты определения гидравлических характеристик канала БСК-1 показывают, что полученные значения практически всех характеристик существенно отличаются по створам наблюдений: по глубинам h_{cp} и h_{max} , по ширине B_{cp} , площади живого сечения потока ω_{cp} и ω_{max} , скорости тече-

ния v_{cp} и v_{max} , а также по уклону дна i_0 , расходу Q , гидравлическому радиусу R , коэффициенту Шези C . Важным результатом этих исследований является определение коэффициентов шероховатости при средних и максимальных скоростях. Эти значения отличаются по коэффициентам шероховатости в 1,4–1,2 раза. При этом коэффициенты шероховатости отличаются в сторону их снижения при максимальных характеристиках, в частности расходах, что подтверждается исследованиями И. Карасева, Г. В. Железнякова, Е. К. Рабковой и др.

В последние годы (с 2012 г.) проводится реконструкция ДМК на первой очереди канала с 45-го до 115-го километра. Особенностью реконструкции ДМК является близкое расположение уровня грунтовых вод (УГВ) к поверхности земли на глубине $h_{г.в.} = 5,2$ м.

Достаточно высокий УГВ, который установился на приканальной территории в период остановки канала, объясняется тем, что за период эксплуатации магистрального канала (50 лет) при фильтрации из ДМК наблюдалось значительное подтопление при слабом оттоке УГВ. После остановки ДМК в 2004 г. уровень воды в канале был на 1 м выше дна, что свидетельствовало о наличии подпертой фильтрации.

Наблюдения за такими условиями фильтрации из ДМК показывают подъем УГВ, который снижает потери на фильтрацию. Затем после понижения УГВ условия фильтрации меняются, а процесс фильтрации переходит из подпертого режима в свободный. При свободном режиме фильтрации потери из канала значительно увеличатся. В этом случае для исключения больших потерь из ДМК в дальнейшем необходимо устройство противофильтрационных покрытий, особенно на участках грунта основания с коэффициентом фильтрации более 0,20 м/сут.

Расчетная схема подпертой фильтрации из канала в двухслойном основании приведена на рисунке 3.

Таблица 1 – Результаты определения гидравлических характеристик первой очереди Большого Ставропольского канала (по данным натурных исследований)

Створ наблюдений	Пикет	Глубина, м		Ширина по урезу B , м		Площадь живого сечения, m^2		Скорость течения, м/с		Уклон дна канала, ‰	Расход воды, m^3/c	Гидравлический радиус, м	Коэффициент Шези, $m^{0,5}/c$	Коэффициент шероховатости
		h_{cp}	h_{max}	B_{cp}	B_{max}	ω_{cp}	ω_{max}	v_{cp}	v_{max}					
–	–									i_0	Q	R	C	n_{cp}
1	ПК 36 + 00 – ПК 38 + 01	3,52	5,20	47,0	49,0	166	175	1,0	1,42	0,129	166	3,43	45	$\frac{0,0258}{0,0182}$
2	ПК 86 + 66 – ПК 92 + 00	3,19	4,86	48,3	49,0	154	159	1,17	1,58	0,108	181	3,11	67	$\frac{0,0189}{0,0140}$
3	ПК 213 + 40 – ПК 214 + 23	2,88	4,91	45,3	45,5	130	135	1,41	1,80	0,210	184	2,82	70	$\frac{0,0205}{0,0160}$
4	ПК 350 + 00 – ПК 350 + 80	3,56	5,23	47,3	48,0	168	171	1,14	1,39	0,135	196	3,33	61	$\frac{0,0227}{0,0186}$

Примечание – Коэффициенты шероховатости по формуле Г. В. Железнякова (п. 9) отличаются в сторону снижения при максимальных скоростях.

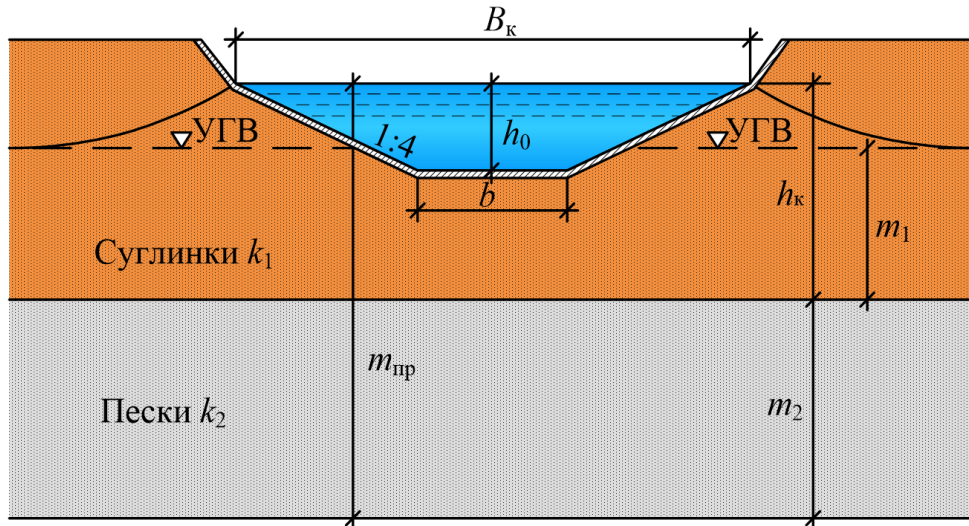


Рисунок 3 – Расчетная схема фильтрации на участке канала

Исходные данные для расчета на участке канала от 57-го до 70-го километра (скв. 2): $h_0 = 5$ м; $B = 67$ м; $b = 27$ м; $h_k = 15$ м; $m_1 = 11$ м; $m_2 = 50$ м; $k_1 = 0,20$ м/сут; $k_2 = 1$ м/сут; $z_0 = 4,0$ м; $\varepsilon_{п} = 0,0033$ мм/сут.

Вычислим подпертую фильтрацию на участке ДМК (земляное русло) в полуограниченном пласте в двухслойном основании по зависимости [11]:

$$q_k = T' \frac{\bar{h}_k}{\Delta L + \sqrt{T' \cdot (z_0 / \varepsilon_{п})}},$$

где q_k – односторонний погонный отток на фильтрацию из канала, м/сут;

T' – средняя проводимость водоносной толщи для двухслойного основания, м/сут, определяемая как:

$$T' = k_1 \cdot (h_1 + h_k / 2),$$

где k_1 – коэффициент фильтрации первого слоя основания (суглинка), м/сут;

h_1 – пьезометрический напор, м;

h_k – расстояние от уровня воды до подошвы первого слоя, м;

\bar{h}_k – расстояние между уровнем воды в канале и границей между первым и вторым слоем, м:

$$\bar{h}_k = h_k - h_1;$$

ΔL – сопротивление, обусловленное гидродинамическим несовершенством канала, м:

$$\Delta L = \Delta L' + 2\Delta L'',$$
$$\Delta L' = \xi_0 \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot m_{\text{пр}} \cdot f'_k + \frac{k_1 - k_2}{k_1} \cdot m_1 \cdot f'_{k_1},$$

где ξ_0 – поправочный коэффициент;

k_2 – коэффициент фильтрации второго слоя основания (песка), м/сут;

$m_{\text{пр}}$ – расстояние от отметки уровня воды в канале до водоупора, м:

$$m_{\text{пр}} = h_k + m_2,$$

где m_2 – мощность второго слоя грунта, м;

f'_k – фильтрационное сопротивление для приведенного слоя:

$$f'_k = \frac{B_k}{2m_{\text{пр}}} - 1,466 \cdot \lg \operatorname{ch} \frac{\pi B_k}{4m_{\text{пр}}},$$

где B_k – ширина канала по урезу воды, м:

$$B_k = b + 2m_0 h_0,$$

где b – ширина канала по дну, м;

m_0 – коэффициент заложения откосов канала;

h_0 – глубина воды в канале, м;

m_1 – мощность естественного УГВ до подошвы первого слоя, м;

f'_{k_1} – фильтрационное сопротивление для первого слоя:

$$f'_{k_1} = \frac{B_k}{2m_1} - 1,466 \cdot \lg \operatorname{ch} \frac{\pi B_k}{4m_1},$$

$$\Delta L'' = \xi_0 \cdot \frac{k_2}{k_1} \cdot m_{\text{пр}} \cdot f''_k + \frac{k_1 - k_2}{k_1} \cdot m_1 \cdot f''_{k_1},$$

где f''_k – фильтрационное сопротивление для приведенного слоя:

$$f''_k = 0,733 \cdot \lg \operatorname{cth} \frac{\pi B_k}{4m_{\text{пр}}};$$

$f_{к1}''$ – фильтрационное сопротивление для второго слоя:

$$f_{к1}'' = 0,733 \cdot \lg \operatorname{cth} \frac{\pi B_{к}}{4m_2};$$

z_0 – критическая глубина грунтовых вод, при которой испарение равно нулю, м:

$$z_0 = \bar{h}_{к};$$

$\varepsilon_{п}$ – интенсивность испарения с поверхности земли, мм/сут.

В таблице 2 представлено сравнение результатов расчета подпертой фильтрации из ДМК в земляном русле и при наличии облицовки.

Таблица 2 – Результаты расчета подпертой фильтрации из Донского магистрального канала в земляном русле и при наличии облицовки

Участок ДМК, км	Односторонние потери на фильтрацию $q_{к}$, м ² /сут	Удельные потери на фильтрацию ($Q_{ф} = 2q_{к}$), м ² /сут	Общие потери в земляном русле (на участке 57–70 км) ($Q'_{ф} = Q_{ф} \cdot L_{к}$), м ³ /сут	Потери в земляном русле при свободной фильтрации $Q_{фсв}$, м ² /сут	Потери при наличии облицовки $Q_{фобл}$, м ² /сут	Общие потери при наличии облицовки (на участке 57–70 км) ($Q'_{ф} = Q_{ф} \cdot L_{к}$), м ³ /сут
57–70	0,526	1,052	$13,7 \cdot 10^3$	16,0	0,504	$6,55 \cdot 10^3$

Анализ результатов расчета подпертой фильтрации (см. таблицу 2) из ДМК в земляном русле с потерями при наличии облицовки показывает, что при применении противофильтрационных покрытий потери на фильтрацию снижаются в 2,09 раза, а общие потери на участке 57–70 км – в $6,55 \cdot 10^3$ раз.

Конструкции противофильтрационных устройств с применением геосинтетических и композитных материалов находят все большее применение в гидротехническом строительстве [12–15], что доказывает их большую эффективность по сравнению с традиционными бетонными, железобетонными и другими типами облицовок.

Выводы

1 Опыт проектирования и строительства крупных каналов свидетельствует о целесообразности применения для противофильтрационной защиты комбинированных облицовок, которые являются наиболее эффективными и в последние годы выполняются из современных строительных композитных материалов.

2 Результаты определения гидравлических характеристик канала БСК-1 (по данным натурных исследований) показывают, что полученные значения практически всех характеристик отличаются по створам наблюдений. Так, значения коэффициентов шероховатости отличаются в 1,2–1,4 раза в сторону их снижения при максимальных значениях.

3 Проводимая реконструкция ДМК на первой очереди канала (с 45-го по 115-й километр) свидетельствует об особенностях, которые состоят в близком расположении УГВ и подпертой фильтрации, снижающих потери по сравнению со свободной фильтрацией. При наличии облицовки расход потерь на фильтрацию также будет снижаться в 2,09 раза, а общие потери на участке 57–70 км – в $6,55 \cdot 10^3$ раз.

Список источников

1. Косиченко Ю. М. Исследования фильтрационных потерь из каналов оросительных систем // Мелиорация и водное хозяйство. 2006. № 6. С. 24–25.
2. Косиченко Ю. М., Ломакин А. В. Гибкие конструкции противофильтрационных и берегоукрепительных покрытий с применением геосинтетических материалов // Известия высших учебных заведений. Технические науки. 2012. № 2. С. 73–79.
3. Абдразаков Ф. К., Рукавишников А. А. Современные облицовочные материалы для оросительных каналов и требования к ним // Основы рационального природопользования: материалы VI Нац. конф. с междунар. участием. Саратов, 2020. С. 11–14.
4. Kosichenko Yu. M., Baev O. A. Efficiency and durability of the linings channels of geosynthetics // Magazine of Civil Engineering. 2020. Iss. 4, vol. 96. P. 42–59. DOI: 10.18720/MCE.96.4.
5. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Теоретическая оценка водопроницаемости противофильтрационных облицовок нарушенной сплошности // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2014. № 3. С. 68–74.
6. Бандурин М. А., Юрченко И. Ф. Обоснование эколого-экономической эффективности применения противофильтрационных геотекстильных покрытий водопроводящих сооружений оросительных систем // Вестник Южно-Российского государственного

ного технического университета (Новочеркасского политехнического института). Серия: Социально-экономические науки. 2018. № 3. С. 95–103.

7. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации // Вестник МГСУ. 2020. № 8, т. 15. С. 1147–1162.

8. Зверев А. О., Саинов М. П., Лукичев Р. В. Результаты экспериментального исследования полимерных геомембран на двухосное растяжение // Вестник евразийской науки. 2018. Т. 10, № 4. С. 27–28.

9. Косиченко Ю. М., Баев О. А., Ищенко А. В. Современные методы борьбы с фильтрацией на оросительных системах // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3. С. 30–43.

10. Латышенков А. М. Выбор наиболее выгодных размеров каналов трапецеидальной формы // Гидротехника и мелиорация. 1966. № 5. С. 5–12.

11. Олейник А. Я. Геодинамика дренажа. Киев: Наукова думка, 1982. 283 с.

12. Проблемы применения геосинтетических материалов (геомембран) в конструкции противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, С. А. Быковская, В. А. Клушенцев // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2020. Т. 296. С. 22–43.

13. Пат. 2141552 Российская Федерация, МПК⁶ E 02 В 7/02. Подпорно-аэрационное регулирующее сооружение и способ его возведения / Кашарина Т. П., Кашарин Д. В., Волошков В. М., Косиченко Ю. М.; заявители и патентообладатели Юж. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации, Ростовводэксплуатация. № 96121488/13; заявл. 30.10.96; опубл. 20.11.99. 6 с.

14. Абдразаков Ф. К., Рукавишников А. А. Исключение непроизводительных потерь водных ресурсов из оросительной сети за счет использования инновационных облицовочных материалов // Аграрный научный журнал. 2019. № 12. С. 35–38.

15. Sainov M. P. Artificial materials in seepage-control structures of embankment dams: A review // AlfaBuild. 2020. Vol. 14. Article number: 1405. DOI: 0.34910/ALF.14.5.

References

1. Kosichenko Yu.M., 2006. *Issledovaniya fil'tratsionnykh poter' iz kanalov orositel'nykh sistem* [Research of filtration losses from canals of irrigation systems]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Irrigation and Water Management], no. 6, pp. 24-25. (In Russian).

2. Kosichenko Yu.M., Lomakin A.V., 2012. *Gibkie konstruksii protivofil'tratsionnykh i beregoukrepitel'nykh pokrytiy s primeneniem geosinteticheskikh materialov* [Flexible structures of anti-seepage and bank protection coatings with the use of geosynthetic materials]. *Tekhnicheskie nauki* [Technical Sciences], no. 2, pp. 73-79. (In Russian).

3. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A., 2020. *Sovremennye oblitsovochnye materi-ly dlya orositel'nykh kanalov i trebovaniya k nim* [Modern facing materials for irrigation canals and requirements for them]. *Osnovy ratsional'nogo prirodopol'zovaniya: materialy VI Nats. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Fundamentals of Rational Environmental Management: Proc. of VI National Conference with International Participation]. Saratov, pp. 11-14. (In Russian).

4. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2020. Efficiency and durability of the linings channels of geosynthetics. *Magazine of Civil Engineering*, iss. 4, vol. 96, pp. 42-59, DOI: 10.18720/MCE.96.4.

5. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2014. *Teoreticheskaya otsenka vodopronitsaemosti protivofil'tratsionnykh oblitsovok narushennoy sploshnosti* [Theoretical assessment of water permeability of impervious facing discontinuities]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], no. 3, pp. 68-74. (In Russian).

6. Bandurin M.A., Yurchenko I.F., 2018. *Obosnovanie ekologo-ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya protivofil'tratsionnykh geotekstil'nykh pokrytiy vodoprovodyashchikh*

sooruzheniy orositel'nykh sistem [Substantiation of the ecological and economic efficiency of the use of anti-seepage geotextile coatings for water supply structures of irrigation systems]. *Vestnik Yuzhno-Rossiyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Novocherkasskogo politekhnicheskogo instituta). Seriya: Sotsial'no-ekonomicheskie nauki* [Bulletin of the South Russian State Technical University (Novocherkassk Polytechnic Institute). Series: Socio-Economic Sciences], no. 3, pp. 95-103. (In Russian).

7. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2020. *Gidravlicheskaya effektivnost' orositel'nykh kanalov pri ekspluatatsii* [Hydraulic efficiency of irrigation canals in the course of operation]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MGSU], no. 8, vol. 15, pp. 1147-1162. (In Russian).

8. Zverev A.O., Sainov M.P., Lukichev R.V., 2018. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya polimernykh geomembran na dvukhosnoe rastyazhenie* [Results of an experimental study of polymer geomembranes for biaxial tension]. *Vestnik evraziyskoy nauki* [Bulletin of Eurasian Science], vol. 10, no. 4, pp. 27-28. (In Russian).

9. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., Ishchenko A.V., 2014. *Sovremennye metody bor'by s fil'tratsyey na orositel'nykh sistemakh* [Modern methods of filtration control in irrigation systems]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], no. 3, pp. 30-43. (In Russian).

10. Latyshenkov A.M., 1966. *Vybor naivyygodneyshikh razmerov kanalov trapetseidal'noy formy* [Selection of the most advantageous sizes of trapezoidal canals]. *Gidrotekhnika i melioratsiya* [Hydraulic Engineering and Land Reclamation], no. 5, pp. 5-12. (In Russian).

11. Oleinik A.Ya., 1982. *Geodinamika drenazha* [Drainage Geodynamics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 283 p. (In Russian).

12. Sol'skiy S.V., Lopatina M.G., Bykovskaya S.A., Klushentsev V.A., 2020. *Problemy primeneniya geosinteticheskikh materialov (geomembran) v konstruktsii protivofil'tratsionnykh elementov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Problems of geosynthetic materials (geomembranes) application in the design of hydraulic structures impervious elements]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Bulletin of All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedeneev], vol. 296, pp. 22-43. (In Russian).

13. Kasharina T.P., Kasharin D.V., Voloshkov V.M., Kosichenko Yu.M., 1999. *Podpor-no-aeratsionnoe reguliruyushchee sooruzhenie i sposob ego vozvedeniya* [Backwater Aeration and Regulation Structure and Method of Its Erection]. Patent RF, no. 2141552. (In Russian).

14. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A., 2019. *Isklyuchenie neproizvoditel'nykh poter' vodnykh resursov iz orositel'noy seti za schet ispol'zovaniya innovatsionnykh oblitsovochnykh materialov* [Elimination of unproductive losses of water resources from the irrigation network through the use of innovative facing materials]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian Scientific Journal], no. 12, pp. 35-38. (In Russian).

15. Sainov M.P., 2020. Artificial materials in seepage-control structures of embankment dams: A review. *AlfaBuild*, vol. 14, article number: 1405, DOI: 0.34910/ALF.14.5.

Информация об авторах

О. А. Баев – старший научный сотрудник, кандидат технических наук;

М. Ю. Косиченко – доцент кафедры прикладной математики, кандидат технических наук.

Information about the authors

O. A. Baev – Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences;

M. Yu. Kosichenko – Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Candidate of Technical Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 01.09.2021; одобрена после рецензирования 12.10.2021; принята к публикации 14.10.2021.

The article was submitted 01.09.2021; approved after reviewing 12.10.2021; accepted for publication 14.10.2021.