

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Научная статья

УДК 626.823.91

doi: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-210-226

Противофильтрационные облицовки каналов с использованием геосинтетических материалов

Александр Васильевич Колганов¹, Юрий Михайлович Косиченко²,
Елена Олеговна Скляренко³

^{1, 2}Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

³Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова –
филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск,
Российская Федерация

¹Kolganov49@mail.ru

²Kosichenko-11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9648-6441>

³SklyarenkoElen@yandex.ru

Аннотация. Цель: обоснование применения противофильтрационных облицовок оросительных каналов с использованием новых материалов и методов их расчета. **Материалы и методы.** Материалами к исследованию послужили предложенные усовершенствованные и новые конструкции противофильтрационных облицовок оросительных каналов мелиоративных систем. Для определения удельного фильтрационного расхода применялись методы расчета свободной и подпертой фильтрации для бетоннопленочных облицовок оросительных каналов при наличии повреждений в полимерной геомембране с учетом контуров увлажнения и неполного насыщения водой грунта в основании канала. **Результаты.** Среди рассмотренных конструкций облицовок каналов лучшие показатели получены для облицовок с бентонитовыми матами и защитным покрытием из каменной наброски и геотекстиля. Бентомат отличается способностью к регенерации (самозалечиванию), что обеспечивает создание надежной облицовки с высокой герметичностью. Проведенные расчеты свободной фильтрации для БСК-III с неполным насыщением грунта основания водой позволили определить потери на фильтрацию, которые составили 9,72 кв. м/сут, при отклонении полученных результатов от опытных значений 7,0 %. **Выводы.** Представлено шесть усовершенствованных и новых конструкций облицовок каналов с геомембраной и защитными покрытиями из бетона и каменной наброски, а также методы расчета свободной и подпертой фильтрации через облицовку канала. Анализ расчетных данных показал, что для двух каналов – БСК-III и Главного Каховского имеет место свободная фильтрация, это подтверждается значительной глубиной залегания грунтовых вод (более 15–30 м); на остальных объектах будет наблюдаться подпертая фильтрация с глубиной залегания уровня грунтовых вод от 2 до 7 м.

Ключевые слова: противофильтрационные облицовки, полимерные геомембраны, бентоматы, защитные покрытия, расчеты фильтрации, неполное насыщение грунта

Для цитирования: Колганов А. В., Косиченко Ю. М., Скляренко Е. О. Противофильтрационные облицовки каналов с использованием геосинтетических материалов // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 3. С. 210–226. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-210-226>.



HYDRAULIC ENGINEERING

Original article

Impervious canal linings using geosynthetic materials

Aleksandr V. Kolganov¹, Yury M. Kosichenko², Elena O. Sklyarenko³

^{1, 2}Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation

³Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

¹Kolganov49@mail.ru

²Kosichenko-11@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9648-6441>

³SklyarenkoElen@yandex.ru

Abstract. Purpose: justification of irrigation canal impervious linings use with new materials and methods for their calculation. **Materials and methods.** The proposed improved and new designs of impervious linings for irrigation canals were the materials for research. To determine the specific filtration flow, the calculation methods of free and backed filtration for concrete-film linings of irrigation canals with damage in the polymer geomembrane, taking into account moisture contours and partial soil saturation with water at the canal base were used. **Results.** Among the considered designs of canal linings, the best indicators were obtained for linings with bentonite mats and a protective coating of rockfill and geotextile. The bentomat is distinguished by its ability to regenerate (self-healing), which ensures the creation of a reliable lining with high impermeability. The calculations of free filtration for BSK-III with partial soil saturation with water at the canal base made it possible to determine the losses for filtration, which amounted to 9.72 sq. m/day, with a deviation of the results obtained from the experimental values of 7.0 %. **Conclusions.** Six improved and new designs of canal linings with a geomembrane and protective coatings made of concrete and rockfill are presented, as well as calculation methods for free and backed filtration through the canal lining. An analysis of the calculated data showed that free filtration takes place in two channels - BSK-III and the Main Kakhovskiy, this is confirmed by a significant depth of groundwater (more than 15–30 m); on other objects, backed filtration with a groundwater depth from 2 to 7 m is observed.

Keywords: impervious linings, polymeric geomembranes, bentonite mats, protective coatings, filtration calculations, partial soil saturation

For citation: Kolganov A. V., Kosichenko Yu. M., Sklyarenko E. O. Impervious canal linings using geosynthetic materials. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering*. 2022;12(3):210–226. (In Russ.). <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-3-210-226>.

Введение. На оросительных каналах в земляном русле происходят большие фильтрационные потери, достигающие 40–50 % от головного водозабора [1–4].

В связи с этим для борьбы с фильтрационными потерями используют различные типы противофильтрационных покрытий (бетонных, бетонопленочных, грунтопленочных, с бентонитовыми матами, а также с геокомпозитными покрытиями) [5, 6].

Ранее для борьбы с фильтрацией использовали простейшие мероприятия, к которым можно отнести кольматацию, битумизацию, рыхление грунта с заглаживанием, уплотнение грунта, солонцевание, оглеение, нефтевание, силикатизацию [7–9]. Однако перечисленные мероприятия дают малый эффект (в 3–4 раза), а долговечность их составляет от 1 до 5 лет.

Поэтому в настоящее время простейшие противофильтрационные мероприятия практически не применяются. Вместо них используются новые эффективные материалы, которые получили название геосинтетических или геокомпозитных материалов, эффективность которых достигает трех порядков, а срок их службы может составлять 50–75 лет и более [10–14].

Таким образом, современные противофильтрационные облицовки каналов ввиду их высокой эффективности могут применяться для снижения потерь на фильтрацию из каналов и повышения соответственно их КПД до значений 0,95–0,97, что обеспечит значительную экономию водных ресурсов [6, 8, 9].

Целью данных исследований являлось обоснование применения противофильтрационных облицовок каналов с использованием новых материалов и методов их расчета.

Материалы и методы. Материалами к исследованию послужили современные конструкции противофильтрационных облицовок на каналах с использованием геомембран и новых геокомпозитных материалов. Рассмотрим их более подробно.

На рисунке 1 представлены бетонопленочные облицовки с геомембраной. Так, на рисунке 1а дается конструкция облицовки, включающая защитное покрытие из бетона с геомембраной толщиной 1,5–2,0 мм, что обеспечивает снижение повреждаемости геомембраны за счет более высокой прочности и значительного относительного удлинения до 600–700 %. Кроме того, сверху геомембраны уложено защитное покрытие в виде геотекстиля с плотностью от 350 до 670 г/м². В этом случае обеспечивается противопр-

кольное действие всей конструкции облицовки. В то же время на рисунке 1b кроме геотекстиля, уложенного сверху геомембраны, предусмотрен дополнительный слой геотекстиля такой же плотности 350–600 г/м², что увеличивает сопротивление образованию проколов в геомембране в 1,5–2,0 раза. Таким образом, вторая конструкция облицовки (на рисунке 1b) имеет больший запас надежности против проколов геомембраны и ее прочности [3, 6].

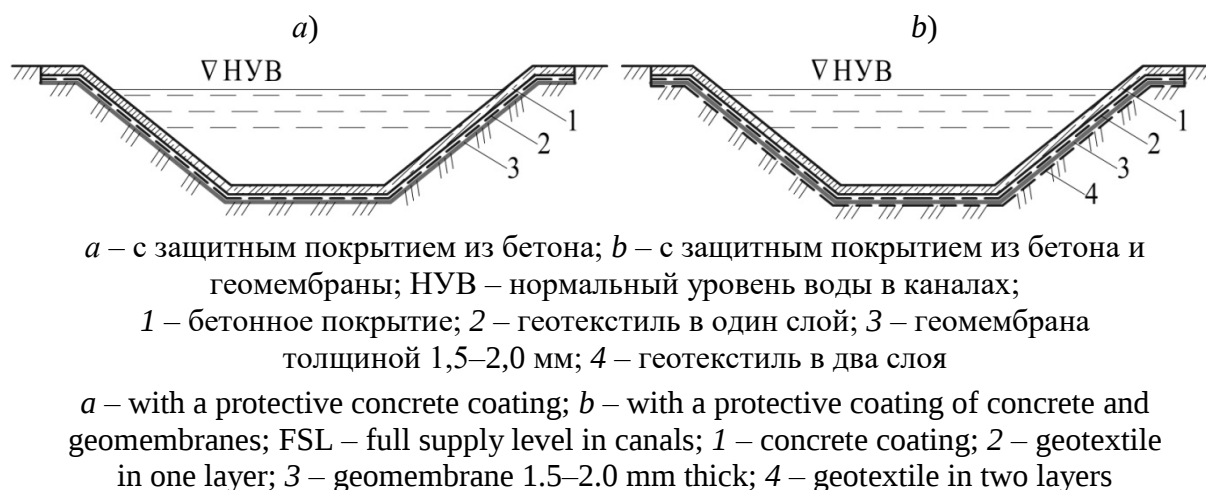
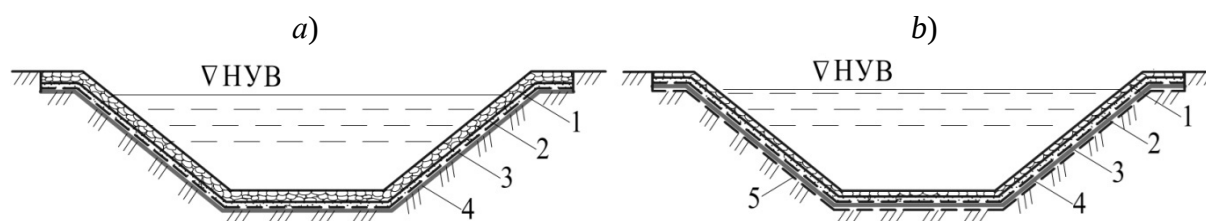


Рисунок 1 – Каналы с бетонопленочными облицовками и геомембраной

Figure 1 – Canals with concrete-film lining and geomembrane

Конструкции грунтопленочных облицовок с геомембраной приведены на рисунке 2. Конструкция, которая дана на рисунке 2a, включает защитное покрытие из каменной наброски диаметром 7–15 см толщиной 20–25 см, затем песчаный слой из крупнозернистого песка толщиной 20 см, следующий слой выполняется из полимерной геомембраны (полиэтилена высокой плотности HDPE) толщиной 1,5–2,0 мм, на нее укладывается геотекстиль марки «Дорнит» плотностью 350–600 г/м². Геотекстиль здесь служит защитным покрытием для геомембраны. На рисунке 2b дается аналогичная конструкция грунтопленочной облицовки, где защитным покрытием служит каменная наброска в один слой диаметром 10 см толщиной до 20 см. Так же, как в первой конструкции грунтопленочной облицовки, для защиты геомембраны предусмотрен геотекстиль в два слоя

сверху и снизу плотностью 350–500 г/м². В качестве герметизирующей геомембраны может использоваться полиэтилен рулонный толщиной до 2,0–2,5 мм, марки низкой плотности LDPE прочностью при разрыве поперек 20,0 МПа, вдоль 17,5 МПа, с относительным удлинением вдоль 600 %, поперек – 620 % [8, 9].



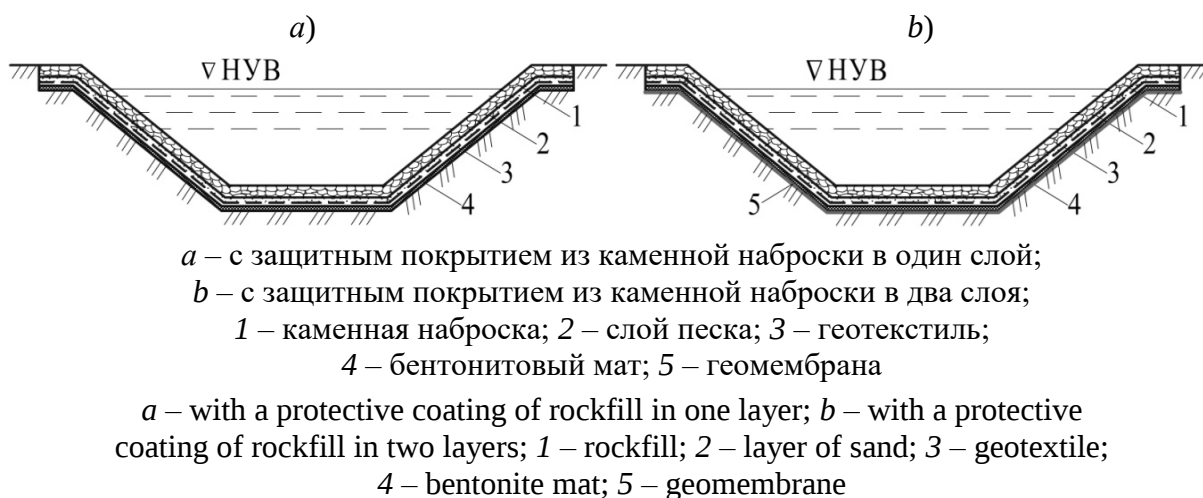
a – с защитным покрытием из каменной наброски; *b* – с защитным покрытием из каменной наброски в один слой; 1 – каменная наброска; 2 – слой песка; 3 – геотекстиль; 4 – геомембрана толщиной 1,5–2,0 мм; 5 – геотекстиль в два слоя
a – with a protective coating of rockfill; *b* – with a protective coating from rockfill in one layer; 1 – rockfill; 2 – layer of sand; 3 – geotextile; 4 – geomembrane 1.5–2.0 mm thick; 5 – geotextile in two layers

Рисунок 2 – Каналы с грунтопленочными облицовками и геомембраной

Figure 2 – Canals with ground-film lining and geomembrane

Конструкции облицовок из бентонитовых матов приведены на рисунке 3. Первая конструкция облицовки из бентонитовых матов на рисунке 3а состоит из защитного покрытия – каменной наброски толщиной 25–30 см, затем укладывается песчаный слой толщиной 20 см. Следующим элементом в конструкции облицовки приведен геотекстиль марки «Дорнит» плотностью до 500 г/м². Он служит защитным слоем бентонитового мата. Сам бентонитовый мат является основным элементом конструкции облицовки. Особенность бентонитового мата – его способность к регенерации (самозалечиванию) повреждения. Конструкция облицовки из бентонитовых матов на рисунке 3б выполнена аналогично первой, за исключением последнего элемента 5 из геомембраны. Данный элемент крепится к бентонмату термоскреплением, что обеспечивает практически полную герметичность всей конструкции. Таким образом, последняя конструкция облицовки

цовки из бентонитовых матов (см. рисунок 3b) имеет наибольшую надежность и долговечность [6, 11, 12].



**Рисунок 3 – Каналы с облицовкой
из бентонитовых матов и геомембраной**

Figure 3 – Canals with linings from bentonite mats and geomembrane

Результаты и обсуждение. *Расчеты фильтрации через облицовку канала.* Рассмотрим далее расчет фильтрации через облицовку канала с применением геомембраны при наличии микрповреждений с учетом неполного насыщения водой подэкранового основания в местах образования контуров увлажнения (рисунок 4).

Предполагается, что фильтрация из канала с облицовкой будет удовлетворять условию, когда в подэкрановом основании происходит неполное заполнение пор грунта водой (так называемая капельная фильтрация, рисунок 5) [10, 11]:

$$\frac{k_{\phi}}{k'_{\text{обл}}} > \frac{h_0 + \delta_o + H_{\kappa}}{\delta_o},$$

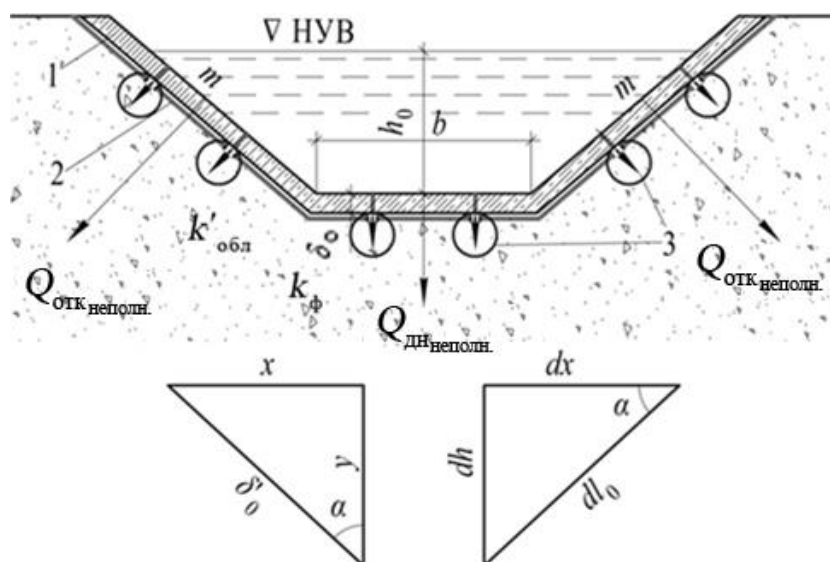
где k_{ϕ} – коэффициент фильтрации грунта основания, м/сут;

$k'_{\text{обл}}$ – коэффициент фильтрации облицовки канала, м/сут;

h_0 – глубина воды в канале, м;

δ_o – толщина облицовки, м;

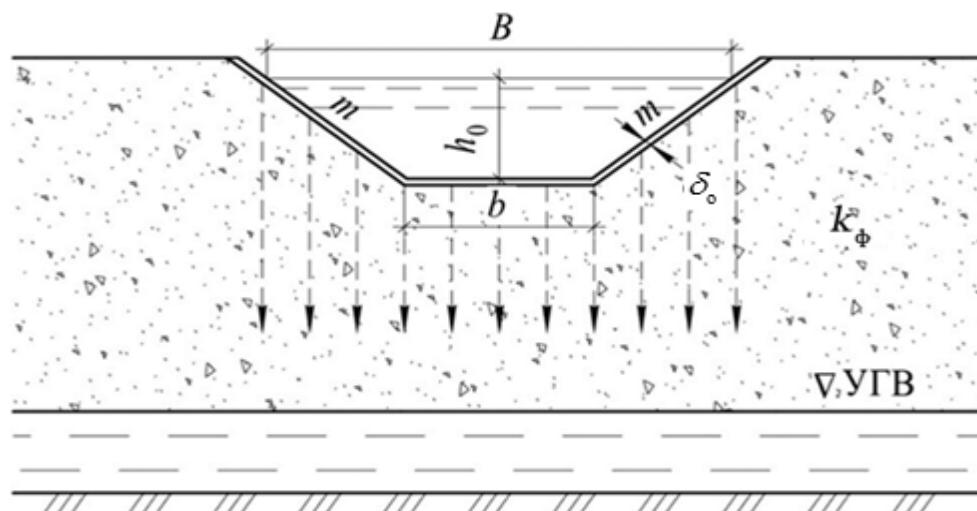
H_k – высота капиллярного вакуума грунта, принимаемая равной $H_k = 0,5...0,7 \cdot h_k$, где h_k – полная высота капиллярного поднятия воды в грунте, м, $h_k = h_0$.



1 – облицовка из бетона; 2 – геомембрана с повреждениями; 3 – контуры увлажнения;
 m – коэффициент заложения откоса; $Q_{отк_неполн.}$ – удельный расход через откос канала, м²/сут; $Q_{дн_неполн.}$ – удельный расход по дну, м²/сут; $k'_{обл}$ – коэффициент фильтрации облицовки канала, м/сут; $k_ф$ – коэффициент фильтрации грунта основания, м/сут; h_0 – глубина воды в канале, м; b – ширина канала по дну, м; δ_0 – толщина облицовки, м; x – ширина канала по откосу, м; y – глубина канала по откосу, м; δ'_0 – протяженность облицовки по откосу, м; dx – дифференцированная ширина канала; dl_0 – дифференцированная длина откоса, м; dh – дифференцированная глубина воды в канале, м; α – угол наклона облицовки

1 – concrete lining; 2 – damaged geomembrane; 3 – moisture contours; m – ratio of slope;
 $Q_{отк_неполн.}$ – specific flow rate through canal slope, m²/day; $Q_{дн_неполн.}$ – specific discharge along the bottom, m²/day; $k'_{обл}$ – filtration coefficient of the canal lining, m/day; $k_ф$ – base soil permeability, m/day; h_0 – water depth in canal, m; b – canal width along the bottom, m; δ_0 – lining thickness, m; x – canal width along the slope, m; y – canal depth along the slope, m; δ'_0 – the length of lining along the slope, m; dx – differential canal width; dl_0 – differential slope length, m; dh – differential water depth in canal, m; α – the angle of gradient of lining

Рисунок 4 – Схема к выводу зависимости для расхода фильтрации из канала с облицовкой и водопроницаемости геомембраны
Figure 4 – Scheme for the derivation of dependence for the filtration flow rate from the canal with lining and geomembrane permeability



m – коэффициент заложения откоса; h_0 – глубина воды в канале, м; b – ширина канала по дну, м; B – ширина канала по урезу воды, м; δ_o – толщина облицовки, м; k_ϕ – коэффициент фильтрации грунта, м/сут; $\nabla_{\text{УГВ}}$ – уровень грунтовых вод, м
 m – ratio of slope; h_0 – water depth in the canal, m; b – canal width along the bottom, m; B – canal width along the water's edge, m; δ_o – lining thickness, m; k_ϕ – soil permeability, m/day; $\nabla_{\text{УГВ}}$ – water table, m

Рисунок 5 – Капельная фильтрация из облицованного канала

Figure 5 – Drip filtration from a lined canal

В соответствии с расчетной схемой на рисунке 4 фильтрационный расход из канала ($Q'_{\text{ф.неполн.}}$, м²/сут) представим как сумму двух расходов:

$$Q'_{\text{ф.неполн.}} = Q_{\text{дн.неполн.}} + 2 \cdot Q_{\text{отк.неполн.}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{дн.неполн.}}$ – удельный расход фильтрации по дну канала, м²/сут;

$Q_{\text{отк.неполн.}}$ – удельный расход фильтрации через откосы канала, м²/сут.

Удельный расход фильтрации по дну канала с учетом неполного влагонасыщения ($Q_{\text{дн.неполн.}}$, м²/сут) определим по следующей зависимости [12, 15, 16]:

$$Q_{\text{дн.неполн.}} = k_{\text{ср.неполн.}} \frac{b(h_0 + \delta_o + H_k)}{\delta_o}, \quad (2)$$

где $k_{\text{ср.неполн.}}$ – средний коэффициент фильтрации облицовки с учетом неполного насыщения водой в основании, м/сут;

b – ширина канала по дну, м;

h_0 – глубина воды в канале, м;

δ_o – толщина облицовки, м.

Удельный расход фильтрации через облицовку по откосам канала с учетом неполного насыщения ($Q_{\text{отк.неполн.}}$) основания найдем по зависимости:

$$Q_{\text{отк.неполн.}} = \int_0^{h_0} k_{\text{ср.неполн.}} \frac{h_0 + \delta'_o \frac{m}{\sqrt{1+m^2}}}{\delta'_o} \sqrt{1+m^2} dh_0,$$

где δ'_o – протяженность облицовки по откосу, м;

h_0 – глубина воды в канале, м;

m – коэффициент заложения откоса;

dh_0 – дифференцированная глубина воды в канале, м.

После интегрирования из данной формулы получим:

$$Q_{\text{отк.неполн.}} = \frac{k_{\text{ср.неполн.}}}{\delta'_o} \left(\frac{h_0^2}{2} \sqrt{1+m^2} + \delta'_o m h_0 \right).$$

Отсюда общий удельный расход при свободной фильтрации с учетом неполного насыщения ($Q_{\text{ф.неполн.}}$) найдем по следующей зависимости [12, 15]:

$$Q'_{\text{ф.неполн.}} = k_{\text{ср.неполн.}} \left[\frac{b(h_0 + \delta_o + H_k)}{\delta_o} + 2mh_0 + \frac{h_0^2}{\delta_o} \sqrt{1+m^2} \right]. \quad (3)$$

При наличии в основании связных (глинистых) грунтов с капиллярными свойствами расчет выполняется по формуле С. Г. Хлебникова, учитывающей разрежение под облицовкой:

$$Q''_{\text{ф.неполн.}} = k_{\text{ср.неполн.}} \left[mh_0 + \frac{h_0 + \delta_o + h_p}{\delta_o} h_0 \sqrt{1+m^2} + \frac{b(h_0 + \delta_o + h_p)}{\delta_o} \right],$$

где h_p – отрицательное давление, м, принимаемое равным $h_p = 0,5 h_k$.

Свободная фильтрация будет наблюдаться до тех пор, пока уровень грунтовых вод будет ниже подошвы облицовки при условии неравенства:

$$h'_k \leq h_k - (h_0 + \delta_o), \quad (4)$$

где h'_k – максимальная ордината уровня грунтовых вод, м.

При наличии подпертой фильтрации с облицовкой (при отсутствии приканального дренажа) расчетная формула удельного расхода q_k , м²/сут, будет иметь вид [16, 17]:

$$q_k = \frac{T \cdot H}{\Phi_k + \Phi_{obl} + \sqrt{\frac{TZ_0}{\varepsilon_{\Pi}}}},$$

где T – средняя проводимость водоносной толщи, м²/сут, определяемая по зависимости:

$$T = k_1 \left(h'_0 + \frac{h_k - h_0}{2} \right) + k_2 m_2,$$

где k_1 , k_2 – коэффициенты фильтрации слоев грунта, м/сут;

h'_0 – глубина залегания уровня грунтовых вод, м;

h_k – уровень капиллярного поднятия воды в грунте, м;

m_2 – мощность второго слоя грунта, м;

H – разность уровней капиллярного поднятия воды в грунте и уровня грунтовых вод, м ($H = h_k - h'_0$);

Φ_k – фильтрационное сопротивление, обусловленное гидродинамическим несовершенством канала, м;

Φ_{obl} – дополнительное фильтрационное сопротивление облицовки канала, м;

Z_0 – критическая глубина залегания уровня грунтовых вод, м;

ε_{Π} – интенсивность испарения на поверхности почвы, %.

Подъем уровня грунтовых вод под каналом (Δh , м) вычисляем из соотношения:

$$\Delta h \sqrt{T} = k_{cp} \frac{h_0 + \delta_o + H_k}{\delta_o} \cdot \frac{B}{2} \sqrt{\frac{Z_0}{\varepsilon_{\Pi}}},$$

где $k_{\text{ср}}$ – средний коэффициент фильтрации облицовки, м/сут;

B – ширина канала по урезу воды, м.

Теперь рассмотрим пример расчета при следующих исходных данных: $b = 5,0$ м, $b_{\text{отк}} = 3,0$ м, $h_{\text{к}} = h_0 = 3,0$ м, $\delta_o = 0,5$ м, $m = 2$, $k_{\text{ср}} = 0,916$ м/сут, $k_{\text{срнеполн.}} = 0,0951$ м/сут.

Удельный расход фильтрации по дну канала найдем по формуле (2):

$$Q_{\text{дннеполн.}} = 0,0951 \cdot \frac{5 \cdot (3 + 0,5 + 0,5 \cdot 3)}{0,5} = 4,76 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Далее определим удельный расход фильтрации на откосах канала:

$$\begin{aligned} Q_{\text{откнеполн.}} &= k_{\text{срнеполн.}} \cdot \frac{2b_{\text{отк}} \cdot (h_0 + \delta_o + H_{\text{к}})}{\delta_o} = \\ &= 0,0951 \cdot \frac{2 \cdot 3,0 \cdot (3 + 0,5 + 0,5 \cdot 3)}{0,5} = 5,71 \text{ м}^2/\text{сут.}, \end{aligned}$$

где $b_{\text{отк}}$ – ширина откоса канала, м.

Суммарный удельный расход фильтрации рассчитываем по формуле (1):

$$Q'_{\text{ф}} = 4,76 + 5,71 = 10,47 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Для сравнения проведем расчеты удельного расхода фильтрации при условии полного насыщения грунта основания водой по формуле:

$$Q_{\text{днполн.}} = k_{\text{ср}} \cdot \frac{b \cdot (h_0 + \delta_o + H_{\text{к}})}{\delta_o} = 0,916 \cdot \frac{5,0 \cdot (3,0 + 0,5 + 0,5 \cdot 3)}{0,5} = 45,8 \text{ м}^2/\text{сут.}$$

Таким образом, при полном насыщении водой грунта удельный расход значительно увеличивается по сравнению с неполным насыщением (более чем в 4 раза) [18].

При подпертой фильтрации условие (4) будет записываться в виде неравенства:

$$h'_{\text{к}} > h_{\text{к}} - (h_0 + \delta_o).$$

Далее рассмотрим пример расчета крупного канала – Большого

Ставропольского канала (III очереди). Примем следующие исходные данные: $k_{cp} = 0,53 \cdot 10^{-3}$ м/сут, $h_k = 27,5$ м, $h'_0 = 5,0$ м, $h_0 = 2,87$ м, $B = 18$ м, $\delta_o = 0,105$ м, $Z_0 = 2,5$ м, $\varepsilon_{II} = 0,0033$, $k_1 = 2,0$ м/сут. Тогда удельный расход фильтрации из канала составит $0,27$ м²/сут.

В первом приближении примем глубину от подошвы слоя до уровня воды в канале $h'_k = h_k = 27,5$ м, тогда средняя проводимость водоносной толщи $T = 34,64$ м²/сут, а окончательная ордината уровня грунтовых вод $h'_{k.оконч.} = 5,66$ м.

Во втором приближении задаемся $h''_k = 5,60$ м, тогда получим $h''_{k.оконч.} = 5,68$ м.

В третьем приближении $h'''_k = 5,70$ м, тогда получим $h'''_{k.оконч.} = 5,69$ м.

Отсюда, так как $h'_k < h_k - (h_0 + \delta_o)$, получим $5,69 < 27,5 - (2,87 + 0,105)$, или окончательно $5,69 < 24,52$ м, в этом случае получим свободную фильтрацию, что подтверждается натурными данными.

Выполним расчеты для других каналов, сводные данные результатов расчета приведем в таблице 1.

Таблица 1 – Сводные результаты расчета облицованных каналов и их КПД

Table 1 – Summary results of the calculation of lined canals and their efficiency

Характеристика	Канал				
	Большой Ставропольский (III очередь)	Распределительный Бг-Р-7	Главный Каховский магистральный	Северо-Крымский (головной участок)	Кулундинский магистральный (I очередь)
1	2	3	4	5	6
Показатели канала: - расход, м ³ /с - КПД	55,0 0,984	6,4 0,979	530,0 0,990	300,0 —	22,0 0,976
Тип облицовки	бетонопленочная	бетонопленочная	грунтопеночная	бетонопленочная	грунтопеночная

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

1	2	3	4	5	6
Коэффициент фильтрации об- лицовки, 10^{-6} см/с	0,61	2,62	0,56	0,42	3,18
Глубина залега- ния грунтовых вод, м	15–30	3	20	3–7	2–7
Характер филь- трации из канала	свободная	подпертая	свободная	подпертая	подпертая
Потери на филь- трацию из канала, л/(сут·м ²):					
- расчетные	9,7	30,6	4,2	10,3	8,8
- опытные	11,3	36,4	3,4	11,4	9,3
Отклонение рас- четных от опыт- ных данных, %	7,0	–15,9	24,7	–9,6	–5,4
Примечание – Опытные данные получены по результатам исследований Севкав- гипропроводхоза с использованием метода фильтромеров [19].					

Удельный расход фильтрации по формуле (3) с учетом неполного насыщения грунта водой составит $Q'_{\text{ф.неполн.}} = 9,72 \text{ м}^2/\text{сут}$. Отклонение полученного результата от опытных значений составило 7,0 %.

Выводы

1 Разработаны шесть усовершенствованных и новых конструкций противофильтрационных облицовок оросительных каналов с использованием полимерных геомембран и бентонитовых материалов с различными защитными покрытиями из бетона и каменной наброски.

2 Рассмотрены методы расчета свободной и подпертой фильтрации для бетонопленочных облицовок оросительных каналов при наличии повреждений в геомембране с учетом контуров увлажнения и неполного насыщения водой грунта в основании.

3 Анализ результатов расчета в таблице 1 показывает, что для двух каналов (БСК-III и Главного Каховского) имеет место свободная фильтрация, это подтверждается значительной глубиной залегания грунтовых вод

(более 15–30 м). В то же время для каналов Бг-Р-7, Северо-Крымского и Кулундинского будет наблюдаться подпертая фильтрация с глубиной залегания уровня грунтовых вод от 2 до 7 м.

Список источников

1. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Гидравлическая эффективность оросительных каналов при эксплуатации // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15, № 8. С. 1147–1162. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162.
2. Косиченко Ю. М. Обобщение данных по шероховатости русел каналов в земляном русле и облицовке // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. 2020. № 2(5). С. 155–168. URL: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=69> (дата обращения: 19.05.2022). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-2-155-168>.
3. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Рекомендации по применению геосинтетических материалов для противофильтрационных экранов каналов, водоемов и накопителей / ФГБНУ «РосНИИПМ». Новочеркасск, 2015. 65 с. Деп. в ВИНТИ РАН 12.01.15, № 1-В-2015.
4. Косиченко Ю. М., Баев О. А. Обоснование эффективности Пролетарского магистрального канала при реконструкции // Природообустройство. 2021. № 2. С. 78–84. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-77-84.
5. Ищенко А. В., Баев О. А. Анализ существующих методик испытаний физико-механических свойств бентонитовых матов // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2013. № 2(10). С. 175–185. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=648> (дата обращения: 19.05.2022).
6. Гарбуз А. Ю. Экспериментальные исследования водопроницаемости локальных повреждений бетонных облицовок каналов // Экология и водное хозяйство [Электронный ресурс]. 2020. № 1(4). С. 76–88. URL: <http://www.rosniipm-sm1.ru.rosniipm.ru/article?n=54> (дата обращения: 19.05.2022). <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-1-76-88>.
7. Результаты исследований эффективности применения геосинтетических материалов в конструкциях грунтовых гидротехнических сооружений на опытном полигоне / С. В. Сольский, Е. Е. Легина, С. А. Быковская, П. В. Кондратенко, П. Н. Белоусов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2021. Т. 301. С. 13–30.
8. Алимов А. Г. Противофильтрационная защита канала и водоемов // Гидротехническое строительство. 2008. № 4. С. 36–41.
9. Алимов А. Г. Методика обоснования и выбора конструкций противофильтрационных облицовок каналов // Вестник РАСХН. 2009. № 3. С. 42–44.
10. Проблемы применения геосинтетических материалов (геомембран) в конструкции противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, С. А. Быковская, В. А. Клушенцев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2020. Т. 276. С. 22–42.
11. Сольский С. В., Быковская С. А. Анализ основных причин нарушений противофильтрационных элементов из геомембран на гидротехнических сооружениях // Гидротехническое строительство. 2021. № 2. С. 33–40. <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.50.18.003>.
12. Ищенко А. В., Баев О. А. Оценка эффективности противофильтрационного экрана на Донском магистральном канале // Градостроительство и архитектура. 2017. Т. 7, № 4. С. 67–72. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2017.04.11>.

13. Abdel-Razek A. Y., Rowe R. K. Interface transmissivity of conventional and multicomponent GCLs for three permeants // *Geotextiles and Geomembranes*. 2019. Vol. 47. P. 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.10.001>.

14. Prabakaran P. A., Sathyamoorthy G. L., Adhimayan M. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geosynthetic material, cement mortar and material lining // *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 7, № 4. P. 81–83.

15. Алимов А. Г. Современные противofiltrационные конструкции защитных облицовок каналов и водоемов // *Гидротехническое строительство*. 2008. № 7. С. 26–36.

16. Чернов М. А. Обоснование противofiltrационной эффективности облицовок каналов с применением полимерных материалов // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2011. № 2. С. 108–113.

17. Баев О. А. Противofiltrационные покрытия с применением бентонитовых матов для накопителей жидких отходов // *Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]*. 2013. № 3(11). С. 115–124. URL: <http://rosniipm-sm.ru/article?n=681> (дата обращения: 19.05.2022).

18. Баев О. А. Моделирование процесса водопроницаемости противofiltrационных экранов из геомембран // *Инженерный вестник Дона [Электронный ресурс]*. 2015. № 1, ч. 2. С. 1–13. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2818 (дата обращения: 19.05.2022).

19. Косиченко Ю. М. Каналы переброски стока России. Новочеркасск: НГМА, 2004. 470 с.

References

1. 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* [News of MGSU], vol. 15, no. 8, pp. 1147-1162, DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1147-1162. (In Russian).

2. Kosichenko Yu.M., 2020. [Integrating data on canal bed roughness in earthen channel and lining]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo*, no. 2(5), pp. 155-168, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru/article?n=69> [accessed 19.05.2022], <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-2-155-168>. (In Russian).

3. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2015. *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 Waste Ponds]. RosNIIPM, Novocherkassk, 65 p., deposited in VINITI RAS on 12.01.15, no. 1-B-2015. (In Russian).

4. Kosichenko Yu.M., Baev O.A., 2021. *Obosnovanie effektivnosti Proletarskogo magistral'nogo kanala pri rekonstruktsii* [Substantiation of the effectiveness of the Proletarsky main canal during reconstruction]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 2, pp. 78-84, DOI: 10.26897/1997-6011-2021-2-77-84. (In Russian).

5. Ishchenko A.V., Baev O.A., 2013. [Analysis of existing test methods for physical and mechanical properties of bentonite mats]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 2(10), pp. 175-185, available: <http://www.ros-niipm-sm.ru/article?n=648> [accessed 19.05.2022]. (In Russian).

6. Garbuz A.Yu., 2020. [Experimental research of water permeability of local damage of canal concrete lining]. *Ekologiya i vodnoe khozyaystvo*, no. 1(4), pp. 76-88, available: <http://www.rosniipm-sm1.ru.rosniipm.ru/article?n=54> [accessed 19.05.2022], <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2020-1-76-88>. (In Russian).

7. Solsky S.V., Legina E.E., Bykovskaya S.A., Kondratenko P.V., Belousov P.N.,

2021. *Rezultaty issledovaniy effektivnosti primeneniya geosinteticheskikh materialov v konstruktsiyakh gruntovykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na opytном poligone* [Investigation of the effectiveness in the applying of geosynthetic materials in the soil hydraulic construction at the test site]. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva* [Proceeding of the VNIIG], vol. 301, pp. 13-30. (In Russian).

8. Alimov A.G., 2008. *Protivofil'tratsionnaya zashchita kanala i vodoemov* [Anti-filtration protection of canals and water bodies]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 4, pp. 36-41. (In Russian).

9. Alimov A.G., 2009. *Metodika obosnovaniya i vybora konstruktsiy protivofil'tratsionnykh oblitsovok kanalov* [Rationale for the construction of impervious linings of canals]. *Vestnik RASKHN* [Bulletin of RAAS], no. 3, pp. 42-44. (In Russian).

10. Solsky S.V., Lopatina M.G., Bykovskaya S.A., Klushentsev V.A., 2020. *Problemy primeneniya geosinteticheskikh materialov (geomembran) v konstruktsii protivofil'tratsionnykh elementov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Issues of geosynthetic materials (geomembranes) application in structure of hydraulic structures watertight elements]. *Izvestiya VNIIG im. B. E. Vedeneeva* [Proceeding of the VNIIG], vol. 276, pp. 22-42. (In Russian).

11. Solsky S.V., Bykovskaya S.A., 2021. *Analiz osnovnykh prichin narusheniy protivofil'tratsionnykh elementov iz geomembran na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh* [Analysis of the main causes of violations of anti-filtration elements from geomembranes at hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 2, pp. 33-40, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2021.50.18.003>. (In Russian).

12. Ishchenko A.V., Baev O.A., 2017. *Otsenka effektivnosti protivofil'tratsionnogo ekrana na Donskom magistral'nom kanale* [Estimation of efficiency of the impervious screen at the Donskoy main canal]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], vol. 7, no. 4, pp. 67-72, <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2017.04.11>. (In Russian).

13. Abdel-Razek A.Y., Rowe R.K., 2019. Interface transmissivity of conventional and multicomponent GCLs for three permeants. *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 47, pp. 60-74, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.10.001>.

14. Prabakaran P.A., Sathyamoorthy G.L., Adhimayan M., 2019. An experimental and comparative study on canal lining exploitation geosynthetic material, cement mortar and material lining. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 81-83.

15. Alimov A.G., 2008. *Sovremennye protivofil'tratsionnye konstruktsii zashchitnykh oblitsovok kanalov i vodoemov* [Modern anti-filtration designs for protective lining and water bodies]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction], no. 7, pp. 26-36. (In Russian).

16. Chernov M.A., 2011. *Obosnovanie protivofil'tratsionnoy effektivnosti oblitsovok kanalov s primeneniem polimernykh materialov* [Justification of the impervious efficiency of canal lining using polymeric materials]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], no. 2, pp. 108-113. (In Russian).

17. Baev O.A., 2013. [Anti-filtration coatings with the use of bentonite mats for liquid waste accumulators]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 3(11), pp. 115-124, available: <http://rosniipm-sm.ru/article?n=681> [accessed 19.05.2022]. (In Russian).

18. Baev O.A., 2015. *Modelirovanie protsessa vodopronitsayemosti protivofil'tratsionnykh ekranov iz geomembran* [Simulation of the process of water permeability of impervious coating of geomembranes]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], no. 1, pt. 2, pp. 1-13, available: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2818 [accessed 19.05.2022]. (In Russian).

19. Kosichenko Yu.M., 2004. *Kanaly perebroski stoka Rossii* [Runoff Transfer Canals in Russia]. Novocherkassk, NGMA, 470 p. (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Колганов – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор;
Ю. М. Косиченко – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор;
Е. О. Складченко – доцент, кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Kolganov – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor;
Yu. M. Kosichenko – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor;
E. O. Sklyarenko – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

*Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата,
самоплагиата и других нарушений в сфере этики научных публикаций.*

*Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
All authors are equally responsible for detecting plagiarism, self-plagiarism and other ethical
violations in scientific publications.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

*Статья поступила в редакцию 03.06.2022; одобрена после рецензирования 14.07.2022;
принята к публикации 09.08.2022.*

*The article was submitted 03.06.2022; approved after reviewing 14.07.2022; accepted for
publication 09.08.2022.*