

УДК 626.88

О. А. Баев

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

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ КАНАЛОВ

В статье рассматривается расчетная оценка обеспечения надежности, безопасности и долговечности противофильтрационных покрытий каналов гидромелиоративных систем. Приводится актуальность исследования, заключающаяся в значительных потерях воды на фильтрацию на необлицованных каналах и образовании аварийных ситуаций на сооружениях, выполненных без противофильтрационных устройств. Используя теорему, основанную на методе Байеса, выполнили расчеты эксплуатационной надежности противофильтрационных покрытий из геосинтетических материалов. На основе теории Райса проведены расчеты и построен график прогнозного срока службы геокомпозитов, использование которого позволяет определять их долговечность и подбирать приемлемые характеристики противофильтрационных устройств.

Ключевые слова: надежность, безопасность, долговечность, противофильтрационное покрытие, канал, геомембрана, геокомпозит, метод Байеса, вероятность отказа.

О. А. Баев

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

RELIABILITY AND DURABILITY ASSESMENT OF IMPERVIOUS CANAL LINING

The estimated assessment of ensuring reliability, safety and durability of irrigation and drainage systems membranes is considered. The urgency of the research, that consists in significant canal seepage losses in unlined canals and the formation of emergency situations on structures made without seepage-control linings is given. Using the theorem based on the Bayesian method the operational reliability of impervious coatings from geosynthetic materials is calculated. The calculations were carried out on the basis of the Ryce theory and a graph of the forecast service life of geocomposites the use of which allows determine their durability and select acceptable characteristics of seepage-control devices was constructed.

Key words: reliability, safety, durability, impervious lining, canal, geomembrane, geocomposite, Bayesian method, failure probability.

Введение. При эксплуатации гидротехнических сооружений, в частности каналов гидромелиоративных систем и водоемов (особенно выполненных без противофильтрационных покрытий), одним из основных вопросов становится проблема обеспечения их надежности и долговечности. От надежности работы отдельных конструктивных элементов зависит безопасность всех сооружений, прилегающих территорий и строений.

Под надежностью понимается свойство объекта выполнять заданные функции, сохраняя во времени значения установленных эксплуатационных показателей в заданных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования, технического обслуживания, ремонтов, хранения, транспортирования [1].

Основные вопросы надежности крупных каналов освещены в работе Ц. Е. Мирцхулавы [1]. Дальнейшее развитие методов оценки надежности сооружений мелиоративных систем детально приведено в исследованиях Ю. М. Косиченко,

В. Н. Щедрина, А. В. Колганова [2], А. И. Тищенко [3, 4] и в ряде других работ различных авторов. Особое внимание вероятностной оценке надежности и безопасности грунтовых гидротехнических сооружений в рамках системного подхода уделено в работах ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева (Е. Н. Беллендира, Д. А. Ивашинцова, Д. В. Стефанишина, А. Б. Векслера [5, 6]).

К каналам гидромелиоративных систем должны предъявляться следующие основные требования: достаточная пропускная способность, бесперебойное питание водой водопотребителя, минимальные фильтрационные и технические потери, безопасность работы, возможность аварийного опорожнения канала, минимальные затраты на строительство и некоторые другие [7]. При эксплуатации каналов также не должны возникать русловые деформации, способные изменить первоначальные их формы и параметры [1].

Следует отметить, что в Российской Федерации общая протяженность всех каналов гидромелиоративных систем, находящихся в федеральной собственности, составляет более 42700 км, 80–85 % из которых выполнены в земляном русле без гидроизоляции. Это приводит не только к значительным потерям воды на фильтрацию, составляющим до 30–40 % от водозабора (а это порядка 4,8 км³/год), но и к ряду других негативных явлений – создаются аварийные ситуации, связанные с возможным размывом откосов и дамб, образованием проранов, подтоплением и заболачиванием прилегающих территорий.

Необходимо отметить и тот факт, что в последние 5–7 лет и по сегодняшний день ведется значительная работа по реконструкции крупных каналов гидромелиоративных систем (например, наиболее опасных участков Донского магистрального и Пролетарского каналов), а согласно ФЦП [8] только в Южном федеральном округе реконструкция должна быть выполнена более чем на 10 каналах, что, по данным ФЦП, позволит предотвратить выход из строя около 200170 га сельскохозяйственных угодий. Несмотря на ряд принятых мер (в т. ч. по строительству и реконструкции противофильтрационных экранов), наблюдаются случаи значительной фильтрации через дно и откосы сооружений, подтопления приканальных территорий, а согласно Ц. Е. Мирцхулаве [1] эффективная эксплуатация любого крупного канала возможна лишь при обеспечении достаточной надежности его работы.

Основными причинами ненадежной работы каналов являются следующие [1, 2]:

- отказы, обусловленные ошибками при проектировании (неправильный выбор конструкции, технических, расчетных параметров, оптимального варианта);
- отказы, вызванные техническими недостатками в период строительства каналов (нарушение технологии строительства, повреждения элементов во время строительства);
- отказы, появляющиеся при нарушении требуемых режимов эксплуатации каналов гидромелиоративных систем и технологии ухода за ними.

Поскольку в последние годы при строительстве противофильтрационных покрытий на каналах гидромелиоративных систем по различным обстоятельствам не применяются пленочные, асфальтобетонные и глинистые экраны, а все большее применение находят современные строительные материалы – геосинтетические и геокомпозитные, проведем оценку их надежности и долговечности применительно к конструкциям противофильтрационных устройств каналов. Такие материалы подразделяются на водонепроницаемые (полимерные геомембраны, бентонитовые и бетонные маты), водопроницаемые (геотекстили, георешетки и геосетки, дренажные маты) и некоторые другие материалы [9, 10]. При этом сочетание нескольких таких материалов в единое целое (композит) позволяет создавать высокоэффективные конструкции противофильтрационных и дренажных устройств, обеспечивающие повышенную надежность и долговечность, а также снижение их повреждаемости в 5–10 раз и, соответственно, водопроницаемости на 1–2 порядка [10].

Материалы и методы. Основываясь на ранее известных методах оценки надежности, изложенных в работах И. А. Биргера, Ю. М. Косиченко и др. [11, 12], используем одну из основных теорем элементарной теории вероятности, основанную на методе Байеса, которая позволяет определить вероятность какого-либо события (диагноза).

С целью исследования работоспособности противофильтрационных материалов в конструкциях покрытий каналов гидромелиоративных систем рассмотрим критерии их надежности на основе методов теории надежности и теории фильтрации [13, 14].

Результаты и обсуждение. В качестве критериев технической эффективности и эксплуатационной надежности противофильтрационных покрытий из геомембранных композиций автором предлагаются следующие:

- по водонепроницаемости геомембранных композиций:

$$k'_{\text{ГМ}} \leq k'_{\text{ГМ.доп}}; \quad (1)$$

- по прочности геомембранных композиций:

$$\sigma_{\text{ГМ}} \geq \sigma_{\text{ГМ.доп}}; \quad (2)$$

- по долговечности (сроку службы) покрытий из геомембранных композиций:

$$\tau_{\text{ГМ}} \geq \tau_{\text{ГМ.нор}}; \quad (3)$$

- по вероятности безотказной работы покрытий из геомембранных композиций:

$$P_{\text{ГМ}} \geq P_{\text{ГМ.доп}}, \quad (4)$$

где $k'_{\text{ГМ}}$ и $k'_{\text{ГМ.доп}}$ – соответственно осредненный по данным исследований и расчетов и допускаемый коэффициент фильтрации покрытия из геомембранных композиций;

$\sigma_{\text{ГМ}}$ и $\sigma_{\text{ГМ.доп}}$ – соответственно прочность геомембранных композиций при растяжении по данным испытаний и нормам;

$\tau_{\text{ГМ}}$ и $\tau_{\text{ГМ.нор}}$ – соответственно срок службы покрытия из геомембранных композиций по данным наблюдений и по нормам;

$P_{\text{ГМ}}$ и $P_{\text{ГМ.доп}}$ – соответственно расчетная и нормативная вероятность безотказной работы покрытия из геомембранных композиций.

Для оценки эффективности и надежности покрытия из геомембранной композиции по критерию (1) необходимо определить показатель водонепроницаемости ($k'_{\text{ГМ}}$).

Показатель водонепроницаемости покрытий из геомембранных композиций ($k'_{\text{ГМ}}$) может быть найден по данным испытаний в натурных условиях или по расчетным зависимостям, полученным в результате математического решения задач методами теории фильтрации с использованием теории функций комплексного переменного и конформных отображений. На основании проведенных теоретических выводов Ю. М. Косиченко и О. А. Баевым получены расчетные зависимости, представленные в предыдущих работах [10, 12].

При оценке надежности геомембранных композиций по критерию (2) необходимо найти прочность (напряжение) в геомембране при ее растяжении. В соответствии с рекомендациями по определению требуемой толщины полимерного противофильтрационного элемента в зависимости от гидростатического давления можно найти напряжение при растяжении полимерной геомембраны по зависимости, МПа:

$$\sigma_{\text{ГМ}} = \sqrt[3]{\frac{(0,135 \cdot \alpha_3 \cdot q_{\text{Г}} \cdot d_{\text{ф}})^2 E}{\delta_{\text{ГМ}}^2}},$$

где α_3 – коэффициент эффективности;

$q_{\text{Г}}$ – гидростатическое давление, МПа;

$d_{\text{ф}}$ – минимальный размер максимальной фракции грунта, мм;

E – модуль упругости полимерной геомембраны, МПа;

$\delta_{\text{ГМ}}$ – толщина полимерной геомембраны, мм.

Для расчетной оценки срока службы геомембранной композиции по критерию долговечности (3) предлагается зависимость, учитывающая фактор старения полимера:

$$\sigma_{\text{ГМ}} = \frac{(-\ln P)}{v_{\text{П}}} \exp \left[\frac{[\Pi_{\text{доп}} - (\Pi_{\tau} / K_{\varepsilon})]^2}{2m_{\Pi_{\tau}}^2} \right],$$

где P – вероятность безотказной работы полимерной геомембраны;

$v_{\text{П}}$ – средняя частота выбросов за средний уровень допускаемой поврежденности;

$\Pi_{\text{доп}}$ и Π_{τ} – соответственно повреждаемость геомембраны допустимая и по данным наблюдений за время эксплуатации (τ);

$K_{\varepsilon} = \varepsilon_{\tau} / \varepsilon_0$ – коэффициент старения полимера;

ε_{τ} и ε_0 – относительное удлинение геомембраны при сроке эксплуатации (τ) и первоначальное;

$m_{\Pi_{\tau}}$ – среднеквадратическое отклонение повреждаемости геомембраны.

Для оценки надежности по критерию (4) необходимо определение одного из основных показателей надежности – вероятности безотказной работы ($P_{\text{ГМ}}$).

Рассмотрим определение показателя $P_{\text{ГМ}}$ при условии последовательного соединения основных элементов противофильтрационного покрытия – противофильтрационного элемента из геомембраны, защитного покрытия из грунта или бетона, защитного слоя из тканого или нетканого геотекстиля и грунтового основания. Тогда общая зависимость вероятности безотказной работы противофильтрационного покрытия с учетом статистической связи между элементами (когда при отказе защитного слоя возможен отказ противофильтрационного элемента) может быть представлена в следующем виде:

$$P_{\text{ГМ}} = \prod_{i=1}^4 P_i + \left(P_{\min} - \prod_{i=1}^4 P_i \right) \cdot K_N,$$

где P_i – вероятность безотказной работы покрытия, включающего четыре элемента (защитное покрытие, геомембрану, геотекстиль и грунтовое основание);

$P_{\min}$ – минимальное значение из вероятности безотказной работы (P_i);

K_N – коэффициент, учитывающий статистическую взаимосвязь между отказами основных элементов противофильтрационного покрытия.

Для получения расчетной оценки эксплуатационной надежности противофильтрационного покрытия из геомембранной композиции используем известную в теории надежности [11] формулу Байеса в развернутом виде:

$$P(D_i / K_1 \cdot K_2) = [P(K_1 / D_i) P(K_2 / D_i)] / [P(D_1) P(K_1 / D_1) \cdot P(K_2 / D_1) + P(D_2) P(K_1 / D_2) \cdot P(K_2 / D_2) + P(D_3) P(K_1 / D_3) \cdot P(K_2 / D_3) + P(D_4) P(K_1 / D_4) \cdot P(K_2 / D_4)],$$

где $P(D_i)$ – априорная вероятность диагноза D_i ;

$P(K_i / D_i)$ – условная вероятность признака K_i у объектов с состоянием D_i .

Используя полученную расчетную зависимость, построим график прогнозного срока службы геокомпозитных материалов (рисунок 1), который позволяет определить их долговечность и выделить приемлемые характеристики покрытий, соответствующие требованиям к гидротехническим сооружениям (заштрихованная область на графике).

В таблице 1 рассмотрены следующие диагнозы (состояния) для геокомпозитных материалов [15]: D_1 – образование в противофильтрационном элементе сквозных механических повреждений; D_2 – деформации основания; D_3 – изменение прочности вследствие старения материала; D_4 – нормальное (безотказное) состояние материала. При этом в процессе наблюдений определяются следующие диагностические признаки: K_1 – показатель водонепроницаемости геокомпозита; K_2 – показатель прочности геокомпозита.

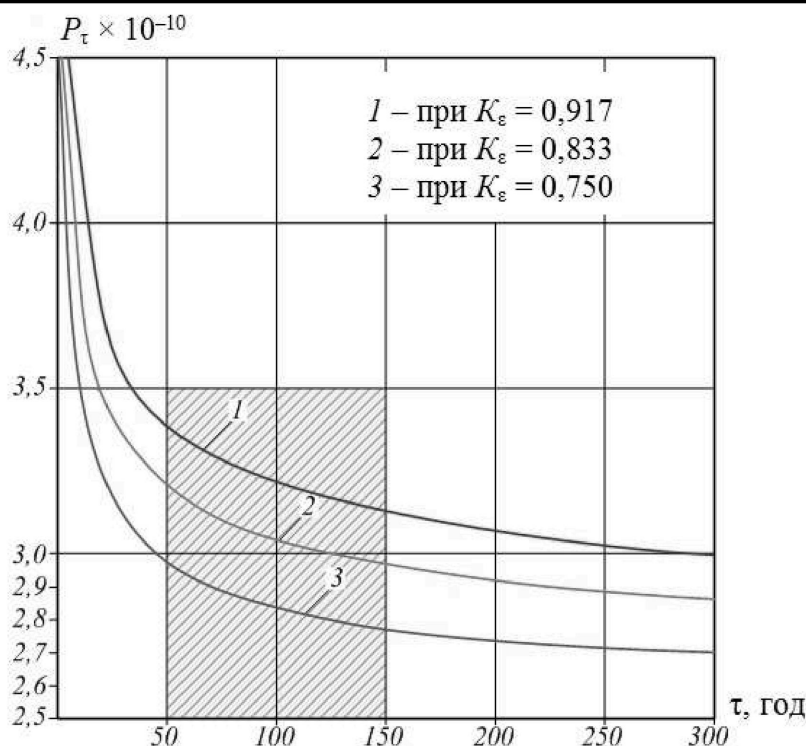


Рисунок 1 – График срока службы геокompозитных материалов в конструкциях покрытий каналов в зависимости от повреждаемости и коэффициента старения

Таблица 1 – Результаты оценки надежности различных типов геокompозитных материалов в конструкциях противofильтрационных устройств

Диагноз (состояние) D_j	Тип материала покрытия	Интенсивность λ_j , 1/год	Вероятность признака и априорного состояния			Вероятность появления диагноза (состояния) $P(D_j / K_1 K_2)$
			$P(K_1 / D_j)$	$P(K_2 / D_j)$	$P(D_j)$	
D_1	ГМ	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,20	$0,38 \cdot 10^{-3}$	0,0125
	ГМ + ГТ	$0,53 \cdot 10^{-3}$	0,25	0,20	$0,11 \cdot 10^{-3}$	0,0026
	ГКМ	$0,27 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,15	$0,03 \cdot 10^{-3}$	0,00033
D_2	ГМ	$1,07 \cdot 10^{-2}$	0,70	0,60	$0,375 \cdot 10^{-2}$	0,380
	ГМ + ГТ	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,25	$0,2 \cdot 10^{-3}$	0,0097
	ГКМ	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,20	0,15	$0,025 \cdot 10^{-3}$	0,00037
D_3	ГМ	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,35	0,25	$0,05 \cdot 10^{-3}$	0,0028
	ГМ + ГТ	$0,25 \cdot 10^{-3}$	0,30	0,15	$0,012 \cdot 10^{-3}$	0,00028
	ГКМ	$0,12 \cdot 10^{-3}$	0,05	0,00	$0,007 \cdot 10^{-3}$	0
D_4	ГМ	–	0,05	0,05	0,9994	0,600
	ГМ + ГТ	–	0,04	0,04	0,9998	0,800
	ГКМ	–	0,05	0,05	0,9999	0,9999

Принятые обозначения покрытий: ГМ – полимерная геомембрана; ГТ – геотекстиль; ГКМ – геокompозитный материал.

Согласно существующим требованиям к гидротехническим сооружениям, изложенным в СП 58.13330.2012 [16], срок их службы (и основных элементов) для I–II классов устанавливается не менее 100 лет, а для III–IV классов – не менее 50 лет.

Результаты оценки надежности различных типов покрытий с использованием одно-, двух-, трех- и многослойных геокомпозиатов представлены в таблице 1.

Анализ результатов расчета надежности различных типов геокомпозиатов, представленных в таблице 1, показал, что для однослойной геомембраны по диагнозам $D_1 - D_3$ расчетная оценка получена более высокой как от образования сквозных повреждений, деформаций основания, так и вследствие снижения ее прочности по причине старения материала. В то же время по диагнозу D_4 для геомембраны получена наименьшая оценка с вероятностью появления диагноза $P = 0,600$, что свидетельствует о более высокой степени снижения вероятности нормального (безотказного) состояния.

Геокомпозиаты, включающие геомембрану и геотекстиль (ГМ + ГТ) или бентонитовые маты (ГКМ), имеют (по диагнозам $D_1 - D_3$) малую вероятность проявления отказов, а по диагнозу D_4 – высокую оценку появления нормального (безотказного) состояния. При этом наиболее высокая оценка появления безотказного состояния ($P = 0,9999$) характерна для геокомпозиатного бентонитового мата, что объясняется его высокой надежностью вследствие регенерации возможных (даже небольших) повреждений.

Выводы

1 На основании обобщения опыта применения геосинтетических и геокомпозиционных материалов для противофильтрационных покрытий каналов гидромелиоративных систем разработаны критерии их технической эффективности и эксплуатационной надежности по водонепроницаемости, долговечности и вероятности безотказной работы.

2 Результаты оценки надежности противофильтрационных покрытий из геокомпозиционных материалов (в сравнении с полимерной геомембраной) показали, что для однослойной геомембраны вероятность появления диагноза составляет $P = 0,600$, в то время как для геокомпозиционных (трех- и многослойных) материалов по результатам расчета получена высокая оценка появления безотказного состояния ($P = 0,9999$).

3 Выполненные натурные, лабораторные и теоретические исследования, посвященные изучению процесса водонепроницаемости, регенерации повреждений геокомпозиционных материалов, позволяют с уверенностью сделать выводы о том, что многослойные геокомпозиаты на основе бентонита с заранее заданными свойствами в настоящее время являются самыми надежными элементами гидротехнических и природоохранных сооружений, обеспечивающими полную водонепроницаемость, повышенную долговечность и безопасность.

Список использованных источников

1 Мирцхулава, Ц. Е. О надежности крупных каналов / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1981. – 318 с.

2 Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2004. – 388 с.

3 Тищенко, А. И. Методы повышения надежности гидротехнических сооружений / А. И. Тищенко, О. Г. Мирошникова, Г. Н. Кузьменко // Межвузовский сборник научных трудов / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – Новочеркасск, 2004. – С. 136–140.

4 Тищенко, А. И. О мероприятиях, обеспечивающих стабильную и надежную работу гидротехнических сооружений мелиоративных систем / А. И. Тищенко // Материалы научно-практической конференции по итогам работы сотрудников НГМА / Новочеркас. гос. мелиоратив. акад. – 2000. – С. 34–36.

5 Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин, О. М. Финагенов, С. Г. Шульман. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2003. – 524 с.

6 Векслер, А. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидро-

технических объектов: оценка риска и принятие решений / А. Б. Векслер, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. – 592 с.

7 Поколения оросительных систем: прошлое, настоящее, будущее: монография / В. Н. Щедрин [и др.]. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. – 164 с.

8 Федеральная целевая программа «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы» (утв. Постановлением Правительства РФ от 12 октября 2013 г. № 922) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru>, 2019.

9 Косиченко, Ю. М. Исследования в области борьбы с фильтрацией и эксплуатационной надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Ю. М. Косиченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. – 2012. – № 2(06). – 9 с. – Режим доступа: http://rosniipm-sm.ru/dl_files/udb_files/udb13-rec108-field6.pdf.

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

11 Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.

12 Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка надежности конструкций противофильтрационных экранов из геокомпозитов / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – Т. 275. – С. 68–77.

13 Kosichenko, Yu. M. Geo-Composite Materials with Preset Properties and their Application in Hydraulic Engineering Construction / Yu. M. Kosichenko, O. A. Baev // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 284. – P. 970–974.

14 Косиченко, Ю. М. Вопросы безопасности и эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / Ю. М. Косиченко // Природообустройство. – 2008. – № 3. – С. 67–71.

15 Kosichenko, Y. M. Modified geomembrane compositions for hydraulic structure impervious coatings / Y. M. Kosichenko, O. A. Baev // Materials Engineering and Technologies for Production and Processing III. Materials Science. – 2017. – P. 548–553.

16 Гидротехнические сооружения. Основные положения (актуализированная редакция СНиП 33-01-2003): СП 58.13330.2012: утв. М-вом регион. развития Рос. Федерации 29.12.11: введ. в действие с 01.01.13. – М.: Минрегион России, 2012. – 39 с.

УДК 631.671

Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов, В. Ф. Сильченко, Е. А. Козарезова

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

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ НА ФИЛЬТРАЦИЮ ИЗ МАГИСТРАЛЬНОГО КАНАЛА

Целью исследований является разработка методики расчета потерь при фильтрации из каналов, выполненных в земляном русле, на примере Бурлинского магистрального канала (МК) в Алтайском крае. В качестве исходных данных использовались продольные профили на первом – четвертом бьефах и физико-механические свойства грунтов по трассе Бурлинского МК. Расчеты потерь проводились по формулам свободной и подпертой фильтрации. Результаты расчета показывают, что суммарные потери на фильтрацию при проектном расходе в канале $Q = 36,5 \text{ м}^3/\text{с}$ составляют $0,474 \text{ м}^3/\text{с}$, или 1,3 %, и при расходе $Q = 10 \text{ м}^3/\text{с} - 0,228 \text{ м}^3/\text{с}$, или 2,3 %. Полученные результаты свидетельствуют о незначительных фильтрационных потерях из канала,