

УДК 625.1:628.2

Об особенностях гидравлического расчета фильтрующих насыпей в связных грунтах

В. И. Штыков¹, А. Б. Пономарев¹, Ю. Г. Янко²

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

²ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Российская Федерация, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14

Для цитирования: Штыков В. И., Пономарев А. Б., Янко Ю. Г. Об особенностях гидравлического расчета фильтрующих насыпей в связных грунтах // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 1. — С. 228–237. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-1-228-237

Аннотация

Цель: Создать методику гидравлического расчета фильтрующих насыпей, учитывающую новые результаты исследований расчета размывающих скоростей фильтрации в каменной наброске на контакте с окружающими грунтами, а также связь между фильтрационными свойствами геотекстильных материалов в мерзлом состоянии и их коэффициентом водоотдачи. **Методы:** Для определения размывающей скорости на контакте крупного камня с глинистым грунтом предложено использовать формулу ВНИИГ. Для проверки геотекстиля на фильтрующую способность в мерзлом состоянии используются результаты исследований коэффициентов водоотдачи. **Результаты:** Зависимость для расчета размывающей скорости грунтов на контакте с крупнозернистыми материалами получена именно для фильтрующих сооружений, а не для случая открытых потоков (в актуализированных ВСН 61—89 эти рекомендации остались без изменения), поэтому она дает более обоснованные результаты, детально учитывающие характеристики грунтов и крупнозернистых материалов. Так как фильтрующие насыпи располагаются в деятельном слое грунтов, то целесообразно, чтобы в применяемых в них для разделительных слоев геотекстильных материалах учитывался коэффициент водоотдачи, существенно влияющий на их способность фильтровать, находясь еще в мерзлом состоянии. **Практическая значимость:** Предложенная методика гидравлического и фильтрационного расчета фильтрующих насыпей позволит более обоснованно проектировать для них защитные мероприятия, исключая возможность возникновения размывов.

Ключевые слова: Фильтрующие насыпи, гидравлический расчет фильтрующих насыпей, защита от размывов откосов, фильтрационные свойства геотекстилей в мерзлом состоянии, коэффициент водоотдачи.

Введение

Фильтрующие насыпи относятся к типу бесполостных дренажей в теле водопропускных сооружений и нашли применение при строительстве железных дорог в районах вечной мерзлоты, а также в гидротехническом и мелиоративном строительстве [1–3]. Вопросы проектирования и строительства фильтрующих насыпей рассмотрены в

ВСН 61—89, которые были актуализированы в 2020 году. В этих нормах прописана рекомендуемая область применения фильтрующих насыпей, в частности в пределах равнинных участков вместо мостов и водопропускных труб [4], где вблизи имеются запасы камня морозостойких пород.

В публикациях [1] и [4] речь идет об укреплении только горизонтальных участков, прежде всего dna и верха фильтрующих насыпей, однако из теории

фильтрации известно, что скорости фильтрации одинаковы во всех точках одного и того же живого сечения фильтрационного потока. То есть по всему периметру соприкосновения каменной наброски (заполнителя фильтрующей насыпи) в рассматриваемом живом сечении с окружающим грунтом скорости одинаковы. При этом скорость движения фильтрационного потока, при которой начинается размыв окружающего грунта на выходе из сооружения v_p , определяется по формуле:

$$v_p = 1,9 \frac{Q}{\omega n}, \quad (1)$$

где n — пористость каменной наброски;

Q — фильтрационный расход, м³/с;

ω — площадь поперечного сечения фильтрующей насыпи, м².

Из зависимости (1) следует, что размывающая скорость принимается по величине в 1,9 раза больше скорости фильтрации воды в рассматриваемом живом сечении фильтрующей насыпи, то есть 1,9 — это коэффициент запаса. Далее следует рекомендация, что тип укрепления русла принимается по нормам для открытых русел.

Методы исследования

Как показали теоретические и экспериментальные исследования, выполненные во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева и нами [5–7], процесс размыва связных грунтов при фильтрации существенно сложнее, чем в случае открытых потоков.

Итогом выполненных исследований явилось получение следующей зависимости для расчета размывающей скорости [7]:

$$v_{er} = 4,3 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-6,67 \frac{W_s}{W_f}\right) n \cdot v \sqrt{\frac{d_{17}}{d_u^3}}, \quad (2)$$

где W_s и W_f — влажность грунта по массе, соответствующая его полному насыщению и на границе текучести;

v — кинематический коэффициент вязкости воды, см²/с;

d_{17} — диаметр материала заполнителя, мельче которого в его составе содержится 17 % частиц по массе, см;

d_u — расчетное значение диаметра фильтрационного хода заполнителя, см.

Из формулы (2) следует, что размывающая скорость зависит как от свойств грунта, так и от крупности материала заполнителя. Из нее также следует, и это подтверждено опытами, что для одного и того же грунта размывающая скорость для разных по крупности материалов будет отличаться. Раньше, в том числе и в актуализированных ВСН 61—89, это обстоятельство никак не учитывалось.

В ВСН 61—89 для защиты верха фильтрующей насыпи рекомендуются к применению геотекстильные материалы. Накопленный опыт их применения, в том числе для разделения балластного слоя, позволяет судить о том, достаточно ли полно общепринятые по состоянию на сегодняшний день требования, предъявляемые к геотекстильным материалам, учитывают условия их работы в тех или иных сооружениях. В частности, как минимум верх фильтрующих насыпей располагается в деятельном слое. Каменная наброска, служащая заполнителем фильтрующих насыпей, к весне свободна ото льда. Геотекстиль, разделяющий каменную наброску от расположенного сверху грунта, может находиться в мерзлом состоянии, и, несмотря на это, в случае необходимости он не должен препятствовать фильтрации поступающей к нему сверху воды.

Ранее нами было установлено [8], что при промерзании геотекстильных материалов в них образуется тем меньше льда, чем больше его коэффициент водоотдачи. Однако по состоянию на сегодняшний день в паспортных данных геотекстильных материалов отсутствуют такие важные данные, как коэффициент водоотдачи. Значе-

Таблица 1. Коэффициенты фильтрации некоторых марок геотекстиля в мерзлом (влажноссыщенном) и оттаявшем состояниях от коэффициента водоотдачи

Марка геотекстиля	Пористость	Коэффициент водоотдачи	Коэффициент фильтрации при состоянии геотекстиля, м/сут	
			Оттаявший	Мерзлый
Polyfelt TS-10	0,87	0,01	227	0,00
Polyfelt TS-20	0,88	0,35	253	1,05
Polyfelt TS-30	0,82	0,68	283	30,51
Polyfelt TS-60	0,82	0,37	193	6,09
Турар SF-27	0,76	0,63	123	16,10
Турар SF-40	0,68	0,49	44	4,02
Пинема	0,89	0,78	210	27,50

ния этого коэффициента необходимо для каждого материала определять в лаборатории [8].

В табл. 1 приведены коэффициенты фильтрации некоторых марок геотекстильных материалов в мерзлом состоянии.

Опыты показывают, что приемлемые значения коэффициента фильтрации показывают геотекстильные материалы с коэффициентом водоотдачи (при температуре 20 °С) не менее 0,65 при пористости не менее 0,8 [9]. Эти материалы способны отводить воду от земляного полотна в период снеготаяния, когда лед внутри них еще не растаял. В таблице обращает на себя внимание тот факт, что у одной и той же марки геотекстиля (Polyfelt) коэффициенты водоотдачи неодинаковы. По мнению авторов статьи, это может быть обусловлено различиями в составе волокон геотекстиля, хотя он и изготавливается по единой технологии.

Величину коэффициента фильтрации геотекстиля в мерзлом состоянии K_f при известных величинах его коэффициента фильтрации в исходном состоянии K_t и коэффициенте водоотдачи μ можно определить по формуле (3) [9]:

$$K_f = K_t \frac{n_e (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n_e})^2 (1-n_g) (d'_p)^2}{n_g (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n_g})^2 (1-n_e) d_p^2}, \quad (3)$$

$$n_e = n_g - \frac{W_{gf} \rho_g}{\rho_i}, \quad (4)$$

$$d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{1 - \frac{4W_{gf} \rho_g}{\pi \rho_i}}}, \quad (5)$$

где n_g — пористость геотекстиля;

n_e — условная «эффективная» пористость геотекстиля, остающаяся после замерзания воды в материале;

W_{gf} — влажность геотекстиля перед промерзанием по массе;

ρ_g — плотность геотекстиля, г/см³;

ρ_i — плотность льда, г/см³;

d_p и d'_p — диаметр волокон геотекстиля в исходном и замороженном состоянии (увеличенный за счет намерзшего льда) соответственно, см.

Течениям воды в фильтрующих элементах подобного типа посвящен ряд статей в иностранных изданиях [10–15], однако они приводят разрозненные данные преимущественно о структуре потока в самой наброске и не занимаются в достаточной степени вопросами размыва. Работа [10] подходит к решению вопроса ближе всего, но ее данные недостаточны для создания расчетной методики нашего случая.

Гидравлический расчет фильтрующей насыпи с учетом полученной за прошедший период после разработки ВСН 61—89 дополнительной новой информации, не включенной в актуализированное в 2020 году издание, лучше всего рассмотреть на примере. Начнем с фильтрационного расчета потока внутри фильтрующей насыпи.

Для проектирования фильтрующих насыпей необходимо знать: расход воды Q ; морфологию русла и поймы притока; характерные размеры насыпи; виды подверженных действию воды грунтов; характеристики камня, который будет выполнять функцию фильтрации. Рекомендуемая крупность камня 0,2–0,4 м.

Результаты исследований

Рассмотрим случай безнапорного течения в фильтрующей насыпи. Уклон дна в пределах земляного полотна равен нулю. Расход $Q = 3 \text{ м}^3/\text{с}$. Высота земляного полотна до бровки $H_e = 4 \text{ м}$; ширина основной площадки $b = 6 \text{ м}$; $m = 1,5$; в основании залегает тяжелый суглинок; камень наброски имеет угловатую форму и средний диаметр 45 см; пористость наброски $n = 0,5$.

Расчетная схема показана на рис. 1.

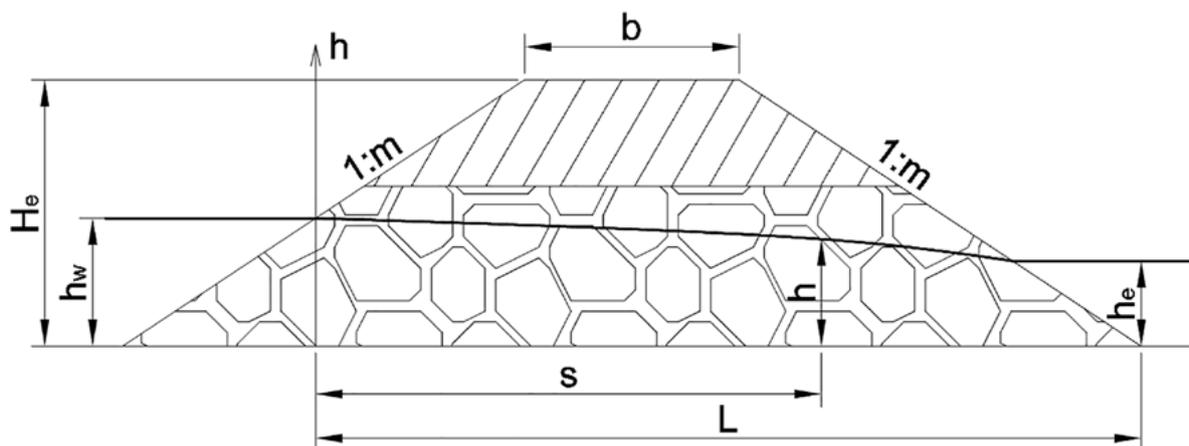


Рис. 1. Схема безнапорной фильтрующей насыпи

Гидравлический расчет фильтрующей насыпи

1. Определяем длину L (см. рис. 1).

$$L = b + 2 \cdot H_e m - h_w m = \\ = 6 + 2 \cdot 4 \cdot 1,5 - 2 \cdot 1,5 = 15 \text{ м},$$

где h_w — глубина воды перед фильтрующей насыпью.

2. Высоту фильтрующей насыпи со стороны верхового откоса принимаем равной 2,5 м.

3. В первом приближении величину гидравлического уклона фильтрационного потока I_0 определяем по формуле:

$$I_0 = \frac{h_w}{L} = \frac{2}{15} = 0,133. \quad (6)$$

4. При заданном расходе Q определяем для некоторого среднего сечения фильтрационного потока площадь живого сечения ω :

$$\omega = \frac{Q}{K \sqrt{I_0}}, \quad (7)$$

где K — коэффициент фильтрации каменной наброски в теле фильтрующей насыпи, значения которого можно принимать по табл. 2 приложения 11 ВСН 61—89. В рассматриваемом случае $K = 66 \text{ см/с}$.

$$\omega = \frac{3}{0,66\sqrt{0,133}} = 12,45 \text{ м}^2.$$

5. Рассчитаем ширину фильтрующей насыпи по низу b_b для входного сечения, где $h_w = 2$ м из формулы:

$$\omega = (b_b + m_e \cdot h_w) h_w, \quad (8)$$

где m_e — коэффициент откоса фильтрующей насыпи в поперечном ее сечении, принимается равным 1,5.

Из формулы (8) после подстановки известных величин получаем $b_b = 3,3$ м.

6. Для случая, когда продольный уклон дна фильтрационного потока равен нулю, можно получить точное решение для трапецеидального живого сечения.

Исходное дифференциальное уравнение в этом случае имеет вид:

$$\frac{dh}{ds} = -\frac{Q^2}{K^2 \omega_s^2}, \quad (9)$$

где h — глубина фильтрационного потока в рассматриваемом поперечном сечении, м;

s — расстояние от начального живого сечения фильтрующей насыпи до рассматриваемого сечения, м;

ω_s — площадь рассматриваемого живого сечения, м².

Выразим в формуле (9) ω_s и проинтегрируем полученное выражение:

$$\int_{h_w}^{h_e} (b_b + m_e h)^2 h^2 dh = -\frac{Q^2}{K^2} \int_0^L ds, \quad (10)$$

Из выражения (10) получаем:

$$\begin{aligned} \frac{b_b^2 (h_w^3 - h_e^3)}{3} + \frac{m_e b_b (h_w^4 - h_e^4)}{4} + \frac{m_e^2 (h_w^5 - h_e^5)}{5} = \\ = \frac{Q^2 L}{K^2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где h_e — глубина фильтрационного потока на выходе из фильтрующей насыпи.

В выражении (11) неизвестно h_e , оно и вычисляется при решении уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{3,3^2 (2^3 - h_e^3)}{3} + \frac{1,5 \cdot 3,3 (2^4 - h_e^4)}{4} + \\ + \frac{1,5^2 (2^5 - h_e^5)}{5} = \frac{3^2 15}{0,66^2}. \end{aligned}$$

Получаем $h_e = 1,67$ м.

Для построения депрессионной поверхности фильтрационного потока на рис. 1 используем уравнение (11) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{b_b^2 (h_w^3 - h^3)}{3} + \frac{m_e b_b (h_w^4 - h^4)}{4} + \frac{m_e^2 (h_w^5 - h^5)}{5} = \\ = \frac{Q^2 s}{K^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

где h и s соответственно глубина и продольная координата фильтрационного потока в живом сечении (рис. 1).

Выше уже говорилось о том, что защита от размыва фильтрационным потоком должна рассчитываться иначе, чем это рекомендуется ВСН 61—89. В случае безнапорной фильтрации защищаться должны верх, откосы и основание фильтрующей насыпи. Поперечный разрез насыпи показан на рис. 2. В рассматриваемом случае для защиты от размывов дна и откосов может вполне подойти щебень, который используется для устройства балластной призмы. Исходные данные: диаметр материала заполнителя, мельче которого в его составе содержится 17% частиц по массе $d_{17} = 2,2$ см; коэффициент неоднородности $\eta = 3,5$; $n = 0,48$; коэффициент формы частиц $\psi = 1,68$; кинематический коэффициент вязкости воды $\nu = 0,0131$ см²/с; коэффициент Шези $C_0 = 70$ (см)^{0,5}/с. Грунт — тяжелый суглинок: $W_s = 0,160$, $W_f = 0,224$; толщину защитного слоя в основании фильтрующей насыпи и на откосах примем равной 0,4 м.

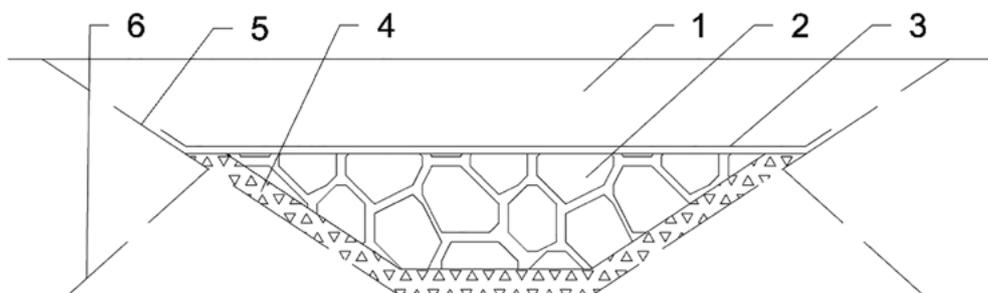


Рис. 2. Поперечный разрез фильтрующих насыпей в связных грунтах:
 1 — земляное полотно; 2 — каменная наброска; 3 — геотекстиль; 4 — защитный слой;
 5 — откосы подходов земляного полотна; 6 — откосы оголовков фильтрующей части сооружения

Фильтрационный расчет на устойчивость к размыву на границе защитного слоя

1. Определяем скорость фильтрации в защитном слое для некоторого среднего сечения, расположенного между входным и выходным сечениями фильтрующей насыпи. Движение фильтрационного потока является плавно изменяющимся. Следовательно, живые сечения являются плоскими и вертикальными и во всех точках одного и того же живого сечения пьезометрический уклон одинаков. Однако скорости фильтрации в каменной наброске в каждом живом сечении при одной и той же величине пьезометрического уклона будут существенно превышать скорости фильтрации в защитном слое. Поскольку нами уже определена глубина фильтрационного потока на выходе из фильтрующей насыпи, то представляется возможность уточнить среднее значение пьезометрического уклона и, соответственно, более точно вычислить среднее значение скорости фильтрации в защитном слое:

$$I_0^m = \frac{h_w - h_e}{L} = \frac{2,0 - 1,67}{15} = 0,022,$$

$$v_{pl} = K_{pl} \sqrt{I_0^m}, \quad (13)$$

где K_{pl} — коэффициент фильтрации защитного слоя при турбулентном режиме, см/с;

v_{pl} — скорость фильтрации в защитном слое, вычисленная для некоторого среднего между входным и выходным сечениями фильтрационного потока в фильтрующей насыпи, см/с.

$$K_{pl} = \frac{n C_0}{\pi^2} \sqrt{2d_u}, \quad (14)$$

где n — пористость щебня, из которого выполнен защитный слой;

C_0 — коэффициент Шези, см^{0,5}/с;

d_u — расчетное значение диаметра фильтрационного хода, см.

$$d_u = 0,57 \sqrt[5]{\eta} \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi}. \quad (15)$$

Подставляя последовательно в формулы (13)–(15) заданные выше величины, получаем: $d_u = 0,85$ см; $K_{pl} = 8,24$ см; $v_{pl} = 1,22$ см/с.

2. По зависимости (2) вычисляем величину размывающей скорости фильтрации для окружающего грунта на контакте с щебнем заданной крупности: $v_{er} = 4,3$ см/с.

Так как полученная скорость v_{er} больше фактической величины скорости фильтрации в защитном слое v_{pl} , то размывов не будет.

Поскольку фильтрующие насыпи применяются, как правило, на равнинных участках и имеют небольшую высоту, то верх ее контакти-

рует либо с балластной призмой, либо с грунтом земляного полотна. В статье мы рассматриваем лишь связные грунты. Исходные данные по крупности камня, который является заполнителем фильтрующей насыпи, и грунту земляного полотна остаются прежними. Расчеты по определению диаметра фильтрационных ходов в каменной наброске показали, что в зависимости от степени неоднородности камней по крупности диаметр фильтрационных ходов изменяется от 8 до 12 см, то есть при вибродинамической поездной нагрузке щебень будет просыпаться внутрь фильтрующей насыпи. По этой же причине даже в случае безнапорных насыпей суглинок будет отслаиваться и крошиться на контакте с камнями. Поэтому здесь в качестве разделительного слоя целесообразно применение геотекстиля.

Как уже говорилось выше, целесообразно, чтобы геотекстильный материал, находясь еще в мерзлом состоянии, был способен пропускать через себя воду, поступающую к нему сверху из оттаявшей части земляного полотна. Коэффициент водоотдачи не указывается в паспортных данных геотекстиля. Его можно определить в лабораторных условиях либо при использовании данных полевых обследований по установлению количества воды, содержащейся в порах геотекстильного материала к моменту его промерзания, или льда уже после промерзания.

Исходные данные: для защиты фильтрующей насыпи сверху используется геотекстильный материал Polyfelt TS-30, $n_g = 0,82$; $K_t = 283$ м/сут. Льдистость после промерзания i_0 составила 0,15.

$$n_e = n_g - \frac{W_{gf} \rho_g}{\rho_i} = n - i_0 = 0,82 - 0,15 = 0,67.$$

Из (5) следует, что

$$\left(\frac{d'_p}{d_p}\right)^2 = \frac{1}{1 - \frac{4}{\pi} i_0} = \frac{1}{1 - \frac{4}{3,14} 0,15} = 1,24;$$

$$K_f = K_t \frac{n_e (\sqrt{\pi} - \sqrt{1 - n_e})^2 (1 - n_g)}{n_g (\sqrt{\pi} - \sqrt{1 - n_g})^2 (1 - n_e)} \left(\frac{d'_p}{d_p}\right)^2 =$$

$$= 124 \text{ м/сут.}$$

Если бы мы выбрали геотекстильный материал марки Polyfelt TS-20, то из-за малого коэффициента водоотдачи его $K_f = 40$ м/сут. Таким образом, при промерзании он ведет себя значительно хуже.

Заключение

Фильтрующие насыпи нашли применение при строительстве железных дорог в районах с вечной мерзлотой. В 2020 году были актуализированы ВСН 61—89, в которых рассмотрены вопросы проектирования этих сооружений. Однако в них не были учтены полученные за последние годы результаты исследований по размывающим скоростям грунтов при фильтрации и изменению фильтрационных свойств геотекстилей в результате их промерзания.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями было установлено, что размывающая скорость при фильтрации зависит не только от свойств грунта, но и от крупности материала заполнителя фильтрующего сооружения, контактирующего с грунтом. Для расчета размывающей скорости в основании и откосах фильтрующих сооружений предложена расчетная зависимость, учитывающая перечисленные выше характеристики грунта и заполнителя фильтрующей насыпи.

Установлено, что фильтрационные свойства геотекстильных материалов в мерзлом состоянии зависят от коэффициента водоотдачи. Поскольку он размещается, как правило, в деятельном слое, то целесообразно, чтобы еще до оттаивания геотекстильный материал был способен пропускать внутрь фильтрующей насыпи поступающую к нему воду из вышерасположенного оттаявшего слоя.

Рассмотрен пример полного гидравлического и фильтрационного расчета как в целом фильтрующей насыпи, так и отдельных ее частей с учетом последних результатов исследований по расчету размывающих скоростей при фильтрации на контакте крупнозернистых материалов с грунтами и зависимости фильтрационных свойств геотекстильных материалов в мерзлом состоянии от их коэффициента водоотдачи.

Список источников

1. Bogomolova N. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way” / N. Bogomolova, Y. Milyushkan, S. Shkurnikov et al. // *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*, Saint Petersburg, April 15–22, 2019. — Vol. 2. — Singapore: Springer Nature, 2019. — Pp. 215–221. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.
2. Штыков В. И. Гидравлический расчет бесполостного пластового дренажа при грунтовом напорном питании / В. И. Штыков, А. В. Козлова // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 2007. — Т. 247. — С. 84–90.
3. Штыков В. И. Бесполостной дренаж периодического профиля / В. И. Штыков, Ю. Г. Янко // *Мелиорация и водное хозяйство*. — 2009. — № 4. — С. 35–37.
4. ВСН 61—89. Изыскания, проектирование и строительство железных дорог в районах вечной мерзлоты / ЦНИИС Минтрансстрой СССР. — М.: ЦНИИС, 1990. — 208 с.
5. Жиленков В. Н. Гидродинамические условия контактного размыва глинистых грунтов фильтрационным потоком / В. Н. Жиленков, Н. И. Шевченко // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 1980. — Т. 144. — С. 11–19.
6. Жиленков В. Н. О сопротивляемости глинистых грунтов контактному размыву фильтрационным потоком / В. Н. Жиленков, Н. И. Шевченко // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*. — 1981. — Т. 146. — С. 55–67.
7. Штыков В. И. О расчете размывающих скоростей при проектировании фильтрующих сооружений в связных грунтах / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев, Ю. Г. Янко // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2021. — Т. 18. — № 2. — С. 303–312. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-303-312.
8. Штыков В. И. О дополнительных требованиях, предъявляемых к защитно-фильтрующим материалам закрытых дренажей при заложении их в зоне сезонного промерзания грунтов / В. И. Штыков, А. Б. Пономарев // *Инженерно-строительный журнал*. — 2012. — № 4(30). — С. 39–45. — DOI: 10.5862/МСЕ.30.6.
9. Гулюк Г. Г. Руководство по мелиорации полей / Г. Г. Гулюк, Ю. Г. Янко, В. И. Штыков и др. — СПб.: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2020. — 219 с. — DOI: 10.25695/k9292-1099-3543-i.
10. Yan H. Modelling the effects of water chemistry and flowrate on clay erosion / H. Yan, M. Sedighi, A. Jivkov // *Engineering Geology*. — 2021. — Vol. 294. — DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106409.
11. Siddiqua S. Evaluating Turbulent Flow in Large Rockfill / S. Siddiqua, J. A. Blatz, N. C. Privat // *Journal of Hydraulic Engineering*. — 2011. — Vol. 137. — Iss. 11. — Pp. 1462–1469. — DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000442.
12. Smith N. S. Numerical Modeling of the Effects of Toe Configuration on Throughflow in Rockfill Dams / N. S. Smith, G. H. R. Ravindra, F. G. Sigtryggisdóttir // *Water*. — 2021. — Vol. 13. — P. 1726. — DOI: 10.3390/w13131726.
13. Ferdos F. Hydraulic Conductivity of Coarse Rockfill used in Hydraulic Structures / F. Ferdos, A. Wörman, I. Ekström // *Transport in Porous Media*. — 2015. — Vol. 108. — Pp. 367–391. — DOI: 10.1007/s11242-015-0481-1.
14. Martins R. Turbulent seepage flow through rockfill structures / R. Martins // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. — March 1990. — Vol. 42. — Iss. 3. — Pp. 41–45. — DOI: 10.1016/0148-9062(90)90640-N.

15. Bonelli S. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees / S. Bonelli, F. Nicot // *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*. — 2013. — 388 p. — DOI: 10.1002/9781118577165.

Дата поступления: 31.01.2025

Решение о публикации: 26.02.2025

Контактная информация:

ШТЫКОВ Валерий Иванович — чл.-корр. РАН,

д-р техн. наук, проф.; shtykov41@mail.ru

ПОНОМАРЕВ Андрей Борисович — канд. техн. наук,
доц.; pol1nom@yandex.ru

ЯНКО Юрий Григорьевич — канд. техн. наук;

yanko@agrophys.ru

Specifics of Rockfill Dam Hydraulic Calculations in Clay Soils

V. I. Shtykov¹, A. B. Ponomarev¹, Yu. G. Yanko²

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

²Agrophysical Research Institute, 14, Grazhdansky pr., Saint-Petersburg. 195220, Russian Federation

For citation: Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G. Specifics of Rockfill Dam Hydraulic Calculations in Clay Soils // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 1, pp. 228–237. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-1-228-237

Summary

Purpose: To develop a rockfill dam hydraulic calculation method based on the latest research on filtration erosion rate in coarse-grained materials at the contact with surrounding soils as well as the dependence of the geotextile filtration properties in the frozen state on its water loss coefficient. **Methods:** The erosion rate at the contact of coarse-grained materials with clay soils is proposed to be calculated by the formula developed at the Vedeneev All-Russia Institute of Hydraulic Engineering. The geotextile filtration properties in the frozen state have been tested using the water loss coefficient of these materials. **Results:** The proposed dependence for calculating the erosion rate of soils at the contact with coarse-grained materials has been obtained specifically for filtration facilities. It is not designed for open flows (in the updated VSN 61-89 Construction Norms, these recommendations remained unchanged); therefore, it provides more substantiated results taking into account soils and coarse-grained material properties. Since filtering embankments are built in the soils prone to climate-induced variability, the geotextile material separating layers should be calculated taking into account the water-loss coefficient that significantly affects their ability to filter, especially in their frozen state. **Practical significance:** The proposed method of hydraulic and filtration calculation of filtering embankments will allow designing more adequate protective measures for eliminating erosion.

Keywords: Filtering embankments, hydraulic calculation of filtering embankments, protection against slope erosion, filtration properties of geotextiles in a frozen state, water-loss coefficient.

References

1. Bogomolova N., Milyushkan Y., Shkurnikov S. et al. Features of engineering surveys in areas of permafrost prevalence by the example of the project “northern latitudinal way”. *Transportation Soil Engineering in Cold Regions: Proceedings of TRANSOILCOLD 2019*, Saint Petersburg,

April 15–22, 2019, vol. 2. Singapore: Springer Nature, 2019, pp. 215–221. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_23.

2. Shtykov V. I., Kozlova A. V. *Gidravlicheskiy raschet bespolostnogo plastovogo drenazha pri gruntovom napornom pitanii* [Hydraulic calculation of cavity-free formation drainage with ground pressure feeding]. *Izvestiya*

Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev]. 2007, vol. 247, pp. 84–90. (In Russian)

3. Shtykov V. I., Yanko Yu. G. Bepolostnoy drenazh periodicheskogo profilya [Cavity-free drainage of a periodic profile]. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* [Land reclamation and water management]. 2009, Iss. 4, pp. 35–37. (In Russian)

4. *VSN 61—89. Izyskaniya, proektirovanie i stroitel'stvo zheleznykh dorog v rayonakh vechnoy merzloty. TsNIIS Mintransstroya SSSR* [VSN 61—89. Surveys, design and construction of railways in permafrost areas. TsNIIS Mintransstroy USSR]. Moscow: TsNIIS Publ., 1990, 208 p. (In Russian)

5. Zhilenkov V. N., Shevchenko N. I. Gidrodinamicheskie usloviya kontaktnogo razmyva glinistykh gruntov fil'tratsionnym potokom [Hydrodynamic conditions of contact erosion of clay soils by filtration flow]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev]. 1980, vol. 144, pp. 11–19. (In Russian)

6. Zhilenkov V. N., Shevchenko N. I. O soprotivlyaemosti glinistykh gruntov kontaktnomu razmyvu zhil'tratsionnym potokom [On the resistance of clay soils to contact erosion by filtration flow]. *Izvestiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* [Bulletin of the All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering named after B. E. Vedeneyev]. 1981, vol. 146, pp. 55–67. (In Russian)

7. Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Yanko Yu. G. O raschete razmyvayushchikh skorostey pri proektirovanii fil'truyushchikh sooruzheniy v svyaznykh gruntakh [On the calculation of erosion velocities in the design of filter structures in cohesive soils]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2021, vol. 18, Iss. 2, pp. 303–312. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-303-312. (In Russian)

8. Shtykov V. I., Ponomarev A. B. O dopolnitel'nykh trebovaniyakh, pred'yavlyayemykh k zashchitno-fil'truyushchim materialam zakrytykh drenazhey pri zalozhenii ikh v zone sezonnogo promerzaniya gruntov [On additional requirements for protective and filtering materials of closed drainage systems when laying them in the zone of seasonal soil freezing]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Civil

Engineering Journal]. 2012, Iss. 4(30), pp. 39–45. DOI: 10.5862/MCE.30.6. (In Russian)

9. Gulyuk G. G., Yanko Yu. G., Shtykov V. I. et al. *Rukovodstvo po melioratsii poley* [Field Reclamation Guide]. St. Petersburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo" Publ., 2020, 219 p. DOI: 10.25695/k9292-1099-3543-i. (In Russian)

10. Yan H., Sedighi M., Jivkov A. Modelling the effects of water chemistry and flowrate on clay erosion. *Engineering Geology*, 2021, vol. 294. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106409.

11. Siddiqua S., Blatz J. A., Privat N. C. Evaluating Turbulent Flow in Large Rockfill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, vol. 137, Iss. 11, pp. 1462–1469. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000442.

12. Smith N. S., Ravindra G. H. R., Sigtryggssdóttir F. G. Numerical Modeling of the Effects of Toe Configuration on Throughflow in Rockfill Dams. *Water*. 2021, vol. 13, p. 1726. DOI: 10.3390/w13131726.

13. Ferdos F., Wörman A., Ekström I. Hydraulic Conductivity of Coarse Rockfill used in Hydraulic Structures. *Transport in Porous Media*, 2015, vol. 108, pp. 367–391. DOI: 10.1007/s11242-015-0481-1.

14. Martins R. Turbulent seepage flow through rockfill structures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. March 1990, vol. 42, Iss. 3, pp. 41–45. DOI: 10.1016/0148-9062(90)90640-N.

15. Bonelli S., Nicot F. Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees. *Erosion in Geomechanics Applied to Dams and Levees*, 2013, 388 p. DOI: 10.1002/9781118577165.

Received: January 31, 2025

Accepted: February 26, 2025

Author's information:

Valeriy I. SHTYKOV — Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. in Engineering, Professor; shtykov41@mail.ru

Andrey B. PONOMAREV — PhD in Engineering, Associate Professor; pollnom@yandex.ru

Yuriy G. YANKO — PhD in Engineering; yanko@agrophys.ru