

О надежности бесполостного дренажа

Штыков В. И., Пономарев А. Б.*, Янко Ю. Г.**

*ФГБОУ ВО Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, **ФГБНУ Агрофизический научно-
исследовательский институт.

Бесполостным дренаж находит всё более широкое применение в промышленном и гражданском строительстве, а также в сельском хозяйстве [1-4]. Железнодорожники проявили к нему интерес при строительстве фильтрующих насыпей в районах с вечномёрзлыми грунтами в связи с возможностями его использования для осушения земляного полотна одновременно увеличивающего его несущую способность [5].

Бесполостным дренаж имеет ряд преимуществ перед трубчатым. Бесполостному дренажу отдают предпочтение при строительстве в вечномёрзлых, в том числе пучинистых грунтах [6]. В нем применяется один вид материала, имеется возможность создания распластанного сечения без существенного заглубления в основание, а также сочетать функции дрены с функцией мероприятия по повышению несущей способности осушаемого основания. Бесполостным дренаж является технологичным, экологичным и экономичным в случае наличия карьеров возле места строительства. Однако имеются и недостатки. Одним из них является невозможность промывки такого дренажа в случае его заиливания поступающими в заполнитель мелкими частицами грунта с потоком. Кроме того, движущийся в заполнителе бесполостной дрены поток может вызывать фильтрационные разрушения, имеющие характер размыва грунта на контакте с заполнителем дрены. Дополнительные требования возникают и к геотекстилю, если дренаж закладывается в зону сезонного промерзания.

Метод исследования.

Целью статьи является установление на основе выполненных работ как авторами статьи, так и другими исследователями условий обеспечения надежности работы дренажа в течение нормативного срока службы.

Рассмотрим вначале вопрос с размывающими скоростями на контакте заполнителя бесполостных дрен при заложении их в связных грунтах.

Именно в связных (слабоводопроницаемых) грунтах наиболее перспективно применение бесполостного дренажа.

В работах В. Н. Жиленкова и Н. И. Шевченко [8, 9] было показано, что контактный размыв в связных грунтах не происходит при ламинарном режиме. Исследованиями этих же авторов были установлены критерии

контактного размыва при движении фильтрационного потока в крупнозернистых материалах на границе их соприкосновения со связными грунтами. В дальнейшем на основе многочисленных экспериментальных исследований по фильтрации в крупнозернистых заполнителях бесполостных дрен были получены формулы для критического числа Рейнольдса $Re_{кр}$, при котором режим фильтрации изменяется, и для расчета размывающих скоростей на границе фильтрационного потока со связным грунтом [10]:

$$Re_{кр} = 8,6 \cdot n \sqrt{\frac{d_{17}}{d_u}} \quad (1)$$

в которой n – пористость; d_{17} – диаметр частиц заполнителя, меньше которого в его составе содержится 17% частиц по массе, см; d_u – расчетное значение диаметра фильтрационного хода, см

$$d_u = 0,57 \sqrt[6]{\eta} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot \frac{d_{17}}{\psi}, \quad (2)$$

где $\eta = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ – коэффициент неоднородности заполнителя; ψ – коэффициент формы частиц; d_{10} и d_{60} – диаметры частиц заполнителя, меньше которых в его составе содержится соответственно 10 и 60% частиц по массе, см.

$$V_{pz} = 4,3 \cdot 10^4 \cdot \exp\left(-6,67 \frac{W_n}{W_m}\right) \cdot n \cdot v \sqrt{\frac{d_{17}}{d_u^3}}, \quad (3)$$

где W_n – влажность грунта по массе при его полном насыщении, доли единицы; W_m – влажность грунта по массе на границе текучести, доли единицы.

Расчетная зависимость (3) была проверена на многочисленных лабораторных и полевых экспериментальных данных [10]. Анализ опытных данных показал, что можно гранулометрический состав заполнителя дрены подобрать таким образом, чтобы соблюдалось условие $v < v_{pz}$. Здесь v – максимальная скорость фильтрационного потока в пределах части бесполостной дрены. Если же это условие не выполняется, то в пределах этого участка по контакту заполнителя дрены с грунтом необходимо уложить геотекстиль.

Рассмотрим процесс заиления заполнителя бесполостных дрен для двух случаев. В первом случае мелкие частицы поступают в дрину сверху через геотекстиль как в процессе строительства, так и эксплуатации. Во втором случае, который характерен для дренажа в земляном полотне железных дорог заполнитель бесполостных дрен примыкает к балластной призме и в зоне примыкания укладывать геотекстиль нецелесообразно. Причины рассмотрим ниже.

В первом случае бесполостные дрены в слабоводопроницаемых грунтах сверху присыпают фильтрующим грунтом. Известно, что в этом случае из контактной зоны дрен с засыпкой допускается вынос суффозионных частиц размером менее 0,05 мм. В соответствии с действующими нормами геотекстиль такие частицы должен пропускать. Допускаемый вынос 3-5% от объема выше расположенной засыпки. При средней глубине заложения дрены на сельскохозяйственных полях равной 1,0 м, высоте дрены 0,3 м и равномерном распределении вынесенных частиц в дренах по её длине, высота рабочей части дрены уменьшится примерно на 10%, то есть не более чем на 3-4 см. Если же будет происходить перераспределение частиц по её длине, то это будет приводить к изменению уклона дна дрены или к уменьшению живого сечения на отдельных участках, что будет способствовать снижению водоотводящей способности дрены. В связи с изложенным выше, прежде чем разрабатывать мероприятия по снижению отрицательных последствий от заиливания дрен, целесообразно проанализировать характер изменения скорости фильтрации по их длине.

На основе результатов гидравлических исследований движения воды в бесполостной дрене [11] было получено следующее уравнение, характеризующее отношение вертикальной составляющей скорости фильтрации v_h к горизонтальной v_s по длине дрены.

$$\frac{V_h}{V_s} = \left(i - t - \frac{U}{t} \right), \quad (4)$$

где i – уклон дна дрены; $t = h/s$ – угловой параметр мощности потока; h – глубина воды в дрене на расстоянии s от истока; $U = \frac{q'}{k \cdot b}$ – совокупный безразмерный параметр. q' – приток к дрене на единицу её длины; b – ширина бесполостной дрены; k – коэффициент фильтрации при ламинарном режиме.

Из зависимости (4) следует, что отношение v_h/v_s зависит от уклона дна бесполостной дрены и углового параметра мощности потока $t = h/s$.

Ниже в таблице 1 приведены эпюры изменения величин v_h/v_s по длине дрены при изменении уклона дрен i в функции от безразмерного параметра U . При нулевом уклоне дна, несмотря на то, что максимальная величина отношения v_h/v_s имеет место в истоке дрены, где горизонтальная составляющая скорости v_s очень мала, уменьшение высоты дрены в этом сечении за счет заиливания практически не скажется на её водоотводящей способности. Далее горизонтальная v_s и вертикальная v_h составляющие скорости фильтрации, а также отношение v_h/v_s возрастают по длине дрены, достигая максимума в её устье. При этом отношение v_h/v_s в устье дрены будет несколько больше по сравнению с её средней частью, что следует учитывать при назначении высоты дрены в устьевой части.

Таблица 1

Изменение отношения v_h/v_s на свободной поверхности фильтрационного потока по длине бесполостной дрены при различных уклонах её дна.

№ вар.	Пределы изменения уклона дна i	Изменение v_h/v_s по длине бесполостной дрены
1	$i = 0$	
2	$0 < i < 2\sqrt{U}$	
3	$i = 2\sqrt{U}$	
4	$i > 2\sqrt{U}$	

При изменении уклона дрены в пределах $0 < i < 2\sqrt{U}$ характер изменения эюры отношения v_h/v_s практически не отличается от первого случая, поэтому все, что говорилось об интенсивности заиления и учета при назначении высоты дрены в устьевой части относится и к этому случаю. В двух последних случаях характер изменения эюр также одинаков. В обоих случаях при приближении к устью слой наилка также будет увеличиваться. Глубина же фильтрационного потока будет уменьшаться, причем довольно существенно. Таким образом, в обоих случаях в качестве принимаемых мер будет достаточным начиная от середины дрены сохранять ее высоту постоянной (не смотря на уменьшение глубин воды в дрене по мере приближения к её устью), а при гидравлических расчетах учитывать, что примерно на 10% может измениться и уклон дна рабочей части дрены, что тоже не окажет существенного влияния на эффективность действия дрены и никаких промывок не потребуется.

Практически во всех закрытых дренажах в качестве защитно-фильтрующих материалов применяется геотекстильный материал, ассортимент которых с каждым годом растет.

В каких бы отраслях строительства (промышленное, гражданское, мелиоративное, гидротехническое, а также при строительстве автомобильных и железных дорог) геотекстиль не применялся, везде в требованиях указывается величина, ниже которой его коэффициент фильтрации не должен опускаться в течение срока службы. При этом имеется в виду не только уменьшение его коэффициента фильтрации вследствие кольтматирования материала с течением времени, но и в связи с воздействием на него отрицательных температур, если дренаж попадает в зону сезонного промерзания. Но ни в одном нормативном документе как в нашей стране, так и за рубежом до последнего времени этот фактор не учитывался. А ведь в дренажах, например, в мелиорации, очень важным является своевременное вступление в действие того же бесполостного дренажа в ранневесенний период еще до достижения глубины оттаивания всей зоны заложения дрены. При этом коэффициент фильтрации геотекстильного материала в мерзлом состоянии в случае заложения бесполостного дренажа в слабоводопроницаемые грунты должен удовлетворять следующему условию [12]

$$k_m \geq \frac{1,48 \cdot k_n \cdot h_n}{S}, \quad (5)$$

где k_m – коэффициент фильтрации геотекстильного материала в мерзлом состоянии, м/сут; k_n – коэффициент фильтрации корнеобитаемого слоя в талом состоянии, м/сут; h_n – мощность корнеобитаемого слоя, м; S – длина периметра контакта геотекстильного материала с фильтрующей засыпкой.

Если в слабоводопроницаемых грунтах бесполостная дрена прямоугольного сечения защищается только сверху, то S принимается равной ширине бесполостной дрены поверху.

Вычислив величину k_m , и используя формулы (6), (7), (8) и (9), мы можем определить величину коэффициента водоотдачи μ , которым должен обладать геотекстильный материал [12, 13]

$$k = k_m \frac{n_s (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n_s}) (1-n) d_p^2}{n (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n})^2 (1-n_s) d_p^2}, \quad (6)$$

$$n_s = n - \frac{W \cdot \rho_z}{\rho_l}, \quad (7)$$

$$d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{1 - \frac{4 \cdot W \cdot \rho_z}{\pi \cdot \rho_l}}} \quad (8)$$

$$\mu = n - \frac{W \cdot \rho_z}{\rho_v} \quad (9)$$

В формулах (6)-(9) k_T – коэффициент фильтрации геотекстильного материала в исходном состоянии, м/сут; n – пористость геотекстильного материала в исходном состоянии, доли единицы; n_e – эффективная пористость геотекстильного материала, доли единицы; W – влажность геотекстильного материала по массе перед промерзанием; ρ_T – плотность геотекстильного материала, г/см³; ρ_l – плотность льда, г/см³; ρ_v – плотность воды, г/см³; d_p и d'_p – диаметры волокон геотекстиля, соответственно в исходном и замороженном состоянии, см.

Как уже говорилось выше, к сожалению коэффициент водоотдачи геотекстильных материалов не приводится в их паспортных данных и его приходится определять в лабораторных условиях. В Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I такая методика разработана. По результатам исследований для укладки в железнодорожный путь в качестве разделительного слоя рекомендовано применять геотекстильный материал с коэффициентом водоотдачи равным $\geq 0,65$ при пористости $\geq 0,8$ [12].

Отдельно следует остановиться на обеспечении надежности работы бесполостных дрена при заложении их в железнодорожное земляное полотно. Рассмотрим случай, когда сверху бесполостная дрена не перекрывается геотекстилем (рис. 1). Как следует из рисунка, с боков и со стороны дна в качестве разделительного слоя (одновременно это мероприятие по предотвращению контактных размывов) прокладывается геотекстиль даже в связных грунтах. Обусловлено это вибродинамической поездной нагрузкой. Отсутствие защиты сверху способствует беспрепятственному поступлению мелких частиц крупностью менее 0,16 мм в заполнитель бесполостных дрена.

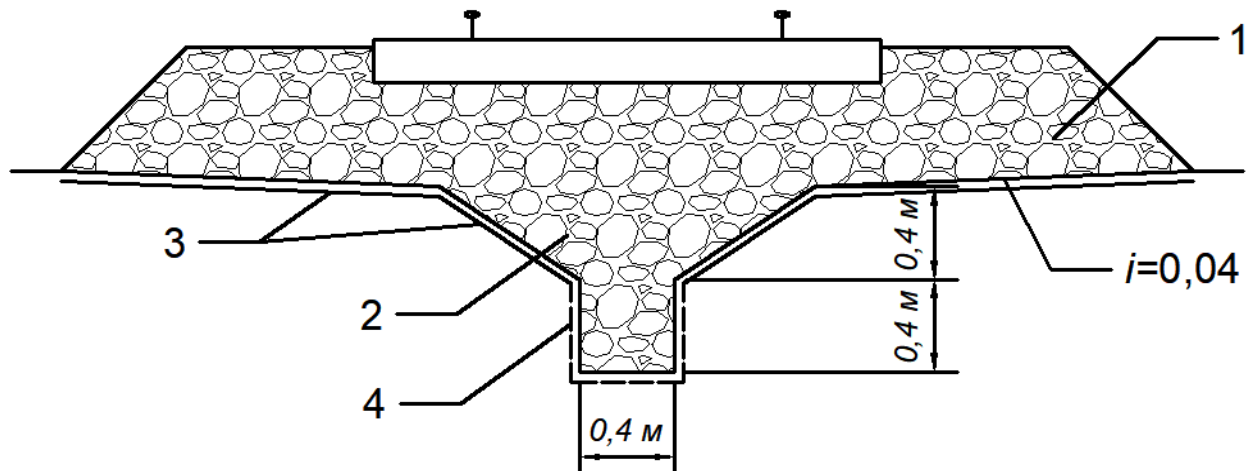


Рис. 1. Бесполостная дрена, уложенная в железнодорожное полотно.

На рисунке: 1 – балластная призма; 2 – бесполостная дрена; 3 – водонепроницаемый геоматериал; 4 – геотекстиль.

Из практики известно, что любые твердые тела подвержены истираемости при взаимодействии с подобными телами при условии, что тела вовлечены в колебательный процесс. Чтобы получить ответ на вопрос: сколько и какой крупности частицы образуются на путях 1 и 2 классов за период наработки тоннажа 350 млн. т. брутто, в лабораторных условиях с помощью вибропресса был смоделирован процесс воздействия вибродинамической поездной нагрузки за период нормативного срока службы геотекстиля (30 лет) [12]. На рис. 2 показана фотография кольматирующих частиц, выполненная на электронном микроскопе ИГГД РАН.

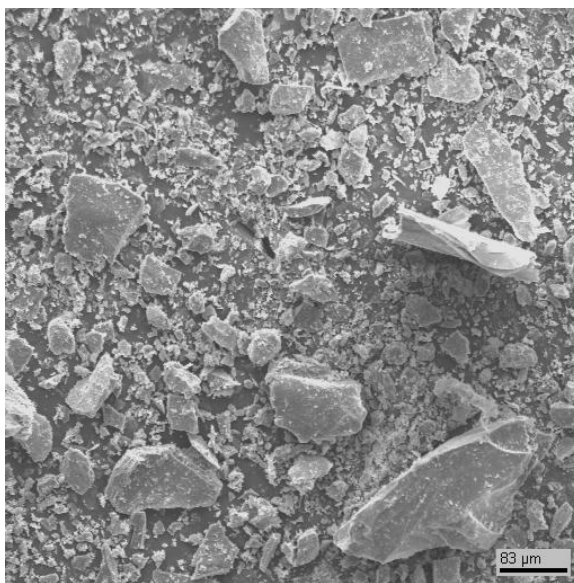


Рис. 2. Фотография частиц истирания щебня, проба взята на действующем участке железной дороги. Остаток после сита 0,16 мм.

На рис. 3 представлен гранулометрический состав этих частиц. Из гистограммы следует, что частиц крупностью менее 0,05 мм довольно много и все они даже в случае защиты заполнителя бесполостной дрены сверху геотекстилем попадут внутрь ее и отложатся на его поверхности, резко снижая фильтрационные свойства.



Рис. 3. Гистограмма распределения частиц истирания щебня по размерам для одного из образцов.

Таким образом, если дрена сверху геотекстилем не перекрывается, то все образующиеся над бесполостной дренами частицы будут откладываться на её дно. В результате исследований было установлено, что при ширине бесполостной дрена по дну, равной 0,4 м это будет соответствовать уменьшению высоты рабочей части дрена примерно на 10 см за 100 лет. Это все несложно учесть на стадии проектирования при гидравлическом расчете бесполостной дрена. Из изложенного выше следует, что защищать бесполосную дрена геотекстилем сверху в рассматриваемом случае нецелесообразно.

Результаты и выводы.

Чтобы бесполостной дренаж успешно выполнял свои функции в течение нормативного срока службы необходимо обеспечить выполнение следующих условий (требований).

При ламинарном режиме в отсутствии вибродинамической нагрузки в связных грунтах контактные размывы на границе с крупным заполнителем в бесполостных дренах не возникают. Получена формула для определения критического числа Рейнольдса $Re_{кр}$. И если число Re_v в любом живом сечении бесполостной дрена $\leq Re_{кр}$, то никаких мероприятий по защите от заиливания не требуется. Если число Рейнольдса $> Re_{кр}$, то по предлагаемой в статье формуле необходимо определить размывающую скорость $v_{рз}$, которая по величине должна быть меньше действительной скорости v фильтрации в любом живом сечении бесполостной дрена. Если это условие не

соблюдается, т. е. $v > v_{pz}$, то между заполнителем дрены и окружающим ее грунтом геотекстиль прокладывается по всему периметру.

При заложении бесполостных дрен в железнодорожное земляное полотно из-за постоянно действующей вибродинамической поездной нагрузки, независимо от величины скорости в бесполостной дрене заполнитель защищается со стороны дна и с боков, так как из-за вибродинамической нагрузки будет происходить взаимопроникновение грунта в заполнитель и наоборот.

В дренажах, применяемых в промышленном и гражданском строительстве, а также в сельском хозяйстве, нормами допускается вынос частиц крупностью $\leq 0,05$ мм через геотекстиль в дрину из засыпки от 3 до 5% от ее объема, расположенного выше геотекстиля, защищающего дрину сверху. При этом высота рабочей части бесполостной дрены при заложении её в среднем на глубину 1,0 м составит 3-4 см. Перераспределение частиц по длине дрены из-за увеличения вертикальной составляющей скорости начинается в основном с середины дрены по направлению к устью и в качестве мероприятия, учитывающего увеличение толщины слоя откладываемых частиц, достаточно сохранять высоту слоя заполнителя дрены постоянной до самого устья.

Изменение уклона дрены при этом не будет превышать также 10%. Все эти изменения несложно учесть на стадии проектирования.

В случае применения бесполостных дрен для осушения железнодорожного земляного полотна, защищать заполнитель дрены геотекстилем сверху нецелесообразно. Мелкие частицы крупностью менее 0,16 мм, образующиеся в балластной призме в результате истирания щебня под воздействием вибродинамической поездной нагрузки за 100 лет, отложатся слоем не более 10 см, что также должно учитываться на стадии проектирования.

В случае использования геотекстильного материала в качестве защитно-фильтрующего в закрытых дренажах, а также разделительного слоя к необходимости предъявления к нему требований пропуска талых вод к дренажу в весенний период, коэффициент водоотдачи геотекстиля μ должен быть не менее 0,65 при исходной пористости $\geq 0,8$.

При выполнении рекомендуемых требований бесполостной дренаж будет выполнять свои функции в течение нормативного срока службы.