

О дополнительных требованиях, предъявляемых к защитно-фильтрующим материалам закрытых дренажей при заложении их в зоне сезонного промерзания грунтов

*Д.т.н., профессор В. И. Штыков;
к.т.н., доцент А. Б. Пономарев**

ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения

Ключевые слова: геотекстиль; дренаж; сезонное промерзание; фильтрация

Исследования, выполненные в разные годы [1, 2, 3, 4, 6], показали, что при соблюдении определённых условий дренаж может закладываться в зону сезонного промерзания и при этом эффективно действовать и в весенний период. Для этого, прежде всего, необходимо, чтобы материал засыпки закрытых дренажей сохранял фильтрационную способность в мёрзлом состоянии.

Это достигается только в том случае, если роль защитно-фильтрующего материала выполняет хорошо фильтрующая засыпка в виде объёмного фильтра. При этом дренаж начинает эффективно действовать, как только глубина оттаивания достигает верха объёмного фильтра. В статье [7] представлены результаты определений льдистости и влажности минеральных прослоев и агрегатов для многолетнемерзлых грунтов, характеризующихся микро-, тонкошлифовыми и микро-, частослоистыми или микро-, мелкосетчатыми криогенными текстурами. Если же в качестве засыпки закрытого дренажа применяются суффозионные пески или песчано-гравийные смеси, то для предотвращения заиливания дренажа применяются рулонные защитно-фильтрующие материалы из геотекстилей. В настоящее время известно огромное количество геотекстилей и разрабатываются всё новые марки [8, 9]. При этом фильтрующие свойства геотекстилей даже без промерзания зависят от ряда факторов. Например, от давления грунта, растягивающих напряжений в геотекстиле, фильтрационных характеристик смежного с геотекстилем грунта [10, 11, 12, 13, 14]. Геотекстили в плане фильтрации также препятствуют капиллярному поднятию влаги [15]. Хорошо изучено внутреннее строение геотекстиля, характеристики его пористости [16].

В настоящее время накоплен уже большой опыт эксплуатации геотекстиля в конструкции железнодорожных путей. Эксплуатационные наблюдения за геотекстилями на железной дороге показали, что недостаточная фильтрация может приводить к деформациям земляного полотна, которые вызваны его переувлажнением [17, 18]. Некоторые подходы к оценке фильтрационных свойств геотекстилей, применяемых в конструкции железнодорожного пути, приводятся в статье [5].

Однако вопрос фильтрации геотекстиля в мёрзлом состоянии, когда внутри этого материала замерзает вода, удерживаемая волокнами и не имеющая возможности стечь под действием гравитации, в литературе освещён недостаточно. Между тем, разработка требований к водопроницаемости геотекстильного материала в мёрзлом состоянии необходима.

В осенне-зимний период оттепели сменяются морозами, и после свободного стекания воды из геотекстиля часть её под действием силы тяжести всё ещё остаётся в порах материала, и в случае промерзания она превращается в лёд.

Способность геотекстиля, насыщенного до полной влагоёмкости, отдавать часть воды путём свободного стекания её под действием силы тяжести, называется водоотдачей. Водоотдача характеризуется коэффициентом гравитационной водоотдачи, выражаемым в долях от единицы. Водоотдача определяется лабораторными методами.

Зная влажность геотекстиля, можно определить объёмную льдистость после замерзания внутрипоровой влаги по следующей формуле:

$$i_0 = \frac{\rho_{\Gamma} \cdot W}{\rho_{\text{л}}}, \quad (1)$$

где ρ_{Γ} – плотность геотекстиля, г/см³;

W – влажность геотекстиля по массе, в долях;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность льда, равная 0,917 г/см³.

Штыков В.И., Пономарев А.Б. О дополнительных требованиях, предъявляемых к защитно-фильтрующим материалам закрытых дренажей при заложении их в зоне сезонного промерзания грунтов

Объёмную льдистость i_0 можно вычислить также и по формуле, в которую входит коэффициент водоотдачи:

$$i_0 = \frac{(n - \mu) \cdot \rho_B}{\rho_L}, \quad (2)$$

где n – пористость геотекстиля;

μ – коэффициент водоотдачи;

ρ_B – плотность воды, г/см³.

Однако геотекстиль станет водонепроницаемым при величине льдистости, меньшей пористости. Это обусловлено следующими обстоятельствами. Примем, что геотекстиль состоит из нескольких слоёв, волокна в каждом из которых располагаются по отношению к волокнам смежных слоёв под углом 90°. Расчётная схема представлена на рис. 1.

Коэффициент фильтрации и расчётная величина диаметра фильтрационного хода геотекстильного материала в талом состоянии определяется по формулам (3), (4) [5]:

$$K = \frac{n \cdot g \cdot d_p^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot \nu} \left(\frac{1}{\sqrt{1-n}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right)^2, \quad (3)$$

$$d_u = 2 \cdot d_p \left(\frac{1}{\sqrt{1-n}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right), \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения;

d_p – диаметр волокна;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды.

Как следует из экспериментальных данных по определению коэффициента водоотдачи геотекстильных материалов, последние обладают смачиваемостью. Следовательно, влага распределяется равномерно по поверхности волокон, и после её замерзания произойдёт увеличение диаметров волокон. Как это следует из рисунка 2, с увеличением диаметра замороженного волокна, геотекстильный материал становится водонепроницаемым, несмотря на то, что эффективная пористость не равна нулю. Определим величину этой пористости. Допустим, что рассматриваемый образец геоматериала имеет N волокон в слоях, идущих в одном направлении, и столько же в направлении, перпендикулярном слою, расположенному выше или ниже рассматриваемого, и имеет A слоёв.

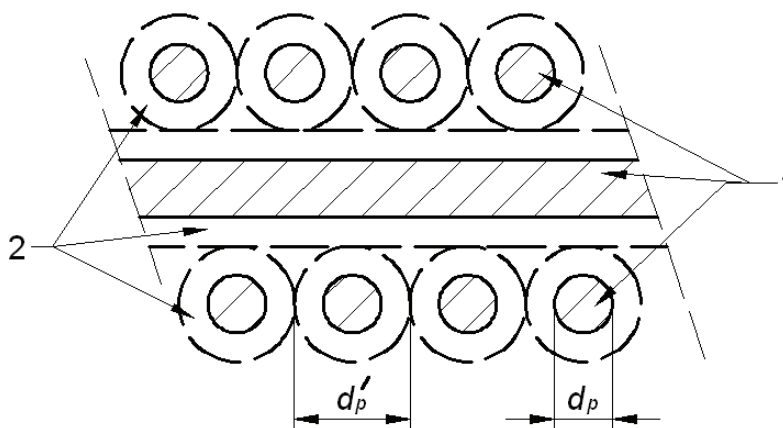


Рисунок 2. Фильтрационная схема геотекстиля в замороженном состоянии (в момент прекращения фильтрации из-за обрастания волокон льдом):
1 – волокна геотекстиля; 2 – лёд

$$F_{\text{обр}} = N \cdot d'_p \cdot N \cdot d'_p = N^2 \cdot (d'_p)^2. \quad (5)$$

Соответственно, объём образца составит:

$$W_{\text{обр}} = F_{\text{обр}} \cdot A \cdot d'_p = N^2 \cdot A \cdot (d'_p)^3. \quad (6)$$

Объём нефилтрующих пор в образце определяется зависимостью (7):

$$W_{\text{пор}} = N^2 \cdot A \cdot (d'_p)^3 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right). \quad (7)$$

Отнеся объём пор к объёму образца, получим значение пористости, при которой образец становится водонепроницаемым в мёрзлом состоянии, так как в направлении, перпендикулярном фильтрационному потоку, в каждом из слоёв, как это следует из рис. 2, утолщённые из-за намерзания на них льда волокна будут плотно примыкать друг к другу.

$$n' = \frac{W_{\text{пор}}}{W_{\text{обр}}} = \frac{N^2 \cdot A \cdot (d'_p)^3 \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)}{N^2 \cdot A \cdot (d'_p)^3} = 1 - \frac{\pi}{4} = 0,215. \quad (8)$$

Определим влажность образца по массе, при которой ледяные оболочки сомкнутся и образец станет водонепроницаемым в направлении, перпендикулярном плоскостям расположения волокон, а также величину диаметра волокна, покрытого льдом d'_p . В одном ряду у нас находится N волокон, а длина каждого из волокон, покрытых льдом, $N \cdot d'_p$. По принятому нами условию геотекстильный материал состоит из A рядов. Масса рассматриваемого образца в сухом состоянии будет равна:

$$M_{\text{обр}} = W_{\text{обр}} \cdot \rho_2 = N^2 \cdot A \cdot (d'_p)^3 \cdot \rho_2, \quad (9)$$

где ρ_2 – плотность геотекстильного материала в сухом состоянии, г/см³.

Масса воды в виде льда в образце определяется по следующей зависимости:

$$M_{\text{воды}} = W_{\text{л}} \cdot \rho_{\text{л}} = \frac{\pi}{4} \left[(d'_p)^2 - d_p^2 \right] N^2 d'_p K \rho_{\text{л}}, \quad (10)$$

где $W_{\text{л}}$ – объём льда в образце, см³;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность льда, равная 0,917 г/см³.

Влажность образца по массе, отнесённая к массе образца в сухом состоянии $W_{\text{м}}$, определится зависимостью (11):

$$W_{\text{м}} = \frac{M_{\text{воды}}}{M_{\text{обр}}} = \frac{\frac{\pi}{4} \left[(d'_p)^2 - d_p^2 \right] \rho_{\text{л}}}{(d'_p)^2 \cdot \rho_2}. \quad (11)$$

Зная влажность геотекстильного материала, можно определить объёмную льдистость i_0 , соответствующую этой влажности:

$$i_0 = W_{\text{м}} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_{\text{л}}} = \frac{\frac{\pi}{4} \left[(d'_p)^2 - d_p^2 \right] \rho_{\text{л}}}{(d'_p)^2 \cdot \rho_2} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_{\text{л}}} = \frac{\frac{\pi}{4} \left[(d'_p)^2 - d_p^2 \right]}{(d'_p)^2}. \quad (12)$$

Так как водопроницаемость в рассматриваемом случае равна нулю, то и эффективная пористость n_3 также равна нулю, то есть:

$$n_3 = n - i_0 - 0,215 = 0. \quad (13)$$

Откуда $i_0 = n - 0,215 = 0$, или:

$$\frac{\pi [(d'_p)^2 - d_p^2]}{4 (d'_p)^2} = n - 0,215. \quad (14)$$

Из соотношения (14) получаем, что

$$d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{1 - \frac{4(n - 0,215)}{\pi}}}. \quad (15)$$

Таким образом, если

$$W_m \geq \frac{\pi [(d'_p)^2 - d_p^2] \rho_l}{(d'_p)^2 \cdot \rho_z}, \quad (16)$$

то геотекстильный материал становится водонепроницаемым.

При $0 < W_m < \frac{\pi [(d'_p)^2 - d_p^2] \rho_l}{(d'_p)^2 \cdot \rho_z}$ геотекстильный материал способен пропускать воду,

находясь в мёрзлом состоянии. Причём эффективная пористость с увеличением влажности (льдистости) уменьшается, а диаметр волокон, покрытых слоем льда, увеличивается. Учитывая, что геотекстильные материалы имеют различную пористость и диаметр волокон, а также то, что результаты вычисления по формуле (3) согласуются с экспериментальными данными, принимаем, что формула действительна и для геотекстильных материалов в мёрзлом состоянии. В этом случае она будет иметь следующий вид:

$$K = \frac{n_3 \cdot g \cdot (d'_p)^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot \nu} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - n_3}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right)^2. \quad (17)$$

Формула действительна при льдистости, соответствующей влажности, находящейся в пределах $0 < W_m < \frac{\pi [(d'_p)^2 - d_p^2] \rho_l}{(d'_p)^2 \cdot \rho_z}$.

Величина n_3 определяется по зависимости (18):

$$n_3 = n - \frac{W_m \cdot \rho_z}{\rho_l} = n - i_0. \quad (18)$$

Как уже говорилось выше, при промерзании изменяется и диаметр волокон из-за намерзания вокруг волокон геотекстиля льда. Однако ледяные оболочки уже не будут соприкасаться между собой по всей длине волокон. Определим, чему будет равен диаметр волокон, покрытых льдом, d'_p при известной влажности W_m . Для этого воспользуемся зависимостью (11) и получим из неё формулу для определения d'_p при заданной исходной влажности. После небольших преобразований получим:

$$d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{1 - \frac{4 \cdot W_m \cdot \rho_z}{\pi \cdot \rho_l}}} \quad (19)$$

Представляет также интерес зависимость для определения коэффициента фильтрации геотекстильного материала в мёрзлом состоянии, выраженная через коэффициент фильтрации этого же геотекстильного материала в талом состоянии.

Составим отношение K_m/K_T , воспользовавшись формулами (3) и (17):

$$\frac{K_m}{K_T} = \frac{\frac{n \cdot g \cdot d_p^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot \nu} \left(\frac{1}{\sqrt{1-n}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right)^2}{\frac{n_3 \cdot g \cdot (d'_p)^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot \nu} \left(\frac{1}{\sqrt{1-n_3}} - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \right)^2} \quad (20)$$

После незначительных преобразований получим следующую зависимость:

$$K_m = K_T \cdot \frac{n_3 (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n_3})^2 (1-n)}{n (\sqrt{\pi} - \sqrt{1-n})^2 (1-n_3)} \cdot \frac{(d'_p)^2}{d_p^2} \quad (21)$$

где $n_3 = n \cdot \frac{W_m \cdot \rho_z}{\rho_l}$; $d'_p = \frac{d_p}{\sqrt{1 - \frac{4 \cdot W_m \cdot \rho_z}{\pi \cdot \rho_l}}}$.

Влажность геотекстильного материала, а следовательно, и льдистость, зависят от коэффициента водоотдачи.

Влияние коэффициента водоотдачи на изменение фильтрационных свойств геотекстилей в мёрзлом состоянии представлено в таблице, из которой следует: чем больше коэффициент водоотдачи материала, тем больше и его коэффициент фильтрации в мёрзлом состоянии.

Таблица 1. Зависимость коэффициента фильтрации геотекстильных материалов в мёрзлом состоянии от коэффициента водоотдачи

№ п/п	Марка геотекстиля	Коэффициент водоотдачи μ , в долях	Эффективная пористость n_3 , в долях	Коэффициент фильтрации в зависимости от состояния геотекстиля, м/сут	
				в талом (K_T)	в мёрзлом (K_m)
1	Polyfelt TS-10	0,01	0,00	227	0,00
2	Polyfelt TS-20	0,35	0,30	253	79
3	Polyfelt TS-30	0,68	0,67	283	121
4	Polyfelt TS-60	0,37	0,33	193	27
5	Турар SF-27	0,63	0,53	123	45
6	Турар SF-40	0,49	0,49	44	20
7	Пинема	0,78	0,77	210	84

В Петербургском государственном университете путей сообщения для укладки в путь в качестве разделительного слоя рекомендуют применять геотекстильные материалы с коэффициентом водоотдачи, определённым в лабораторных условиях (при температуре 20°C), равным не менее 0,65. При этом в период снеготаяния геотекстиль, находясь в мёрзлом состоянии, будет способствовать отведению влаги из зоны основной площадки земляного полотна.

Когда геотекстиль, уложенный на основную площадку в мёрзлом состоянии, теряет способность фильтровать, при высоком уровне грунтовых вод в зимний период происходит миграция влаги к фронту промерзания, которую прервёт геотекстиль. В этом случае под последним возможно образование значительных по объёму прослоек льда. Места льдообразования могут стать опасными с точки зрения нарушения геометрии рельсовой колеи.

В случае дренажа требование к коэффициенту водоотдачи должно соответствовать требованиям к коэффициенту фильтрации геотекстильных материалов, исходя из максимально возможной приточности по оттаявшему пахотному слою к дренажу в ранневесенний период. При этом притекающий расход будет зависеть от мощности пахотного слоя h_n и его коэффициента фильтрации в талом состоянии K_n , который может быть определён по формуле Сливтера [6]:

$$q = 1,48 \cdot K_n \cdot h_n. \quad (22)$$

Этот же расход должен беспрепятственно пройти в дренаж через защитно-фильтрующий материал из геотекстиля, находящийся в мёрзлом состоянии.

Принимая, что при полностью насыщенном водой пахотном слое поступающий через слой защитно-фильтрующего материала расход q пропускается с градиентом напора, равным единице, получаем зависимость, по которой можно определить коэффициент фильтрации геотекстильного материала в мёрзлом состоянии:

$$K_m \geq \frac{1,48 K_n \cdot h_n}{\pi \cdot d}, \quad (23)$$

где K_m – коэффициент фильтрации геотекстильного материала;
 d – внешний диаметр дренажной трубы с учётом толщины и количества слоёв защитно-фильтрующего материала из геотекстиля.

Зная величину K_m , используя зависимости (2), (17), (18) и (19), мы можем определить коэффициент водоотдачи μ , которым должен обладать геотекстильный материал. Величина коэффициента водоотдачи определяется в лабораторных условиях по методике, разработанной в Петербургском государственном университете путей сообщения.

Выводы

1. Исходя из принятой фильтрационной расчётной схемы геотекстильных материалов получены зависимости для определения величин влажности W_m (льдистости i_0) и диаметра волокон, покрытых льдом d_p' , при которых геотекстиль становится водонепроницаемым в направлении, совпадающем с фильтрационным потоком.

2. Получены расчётные зависимости, позволяющие определять коэффициент фильтрации геотекстиля в мёрзлом состоянии в функции от его льдистости (влажности перед промерзанием), диаметра волокна и пористости, а также через коэффициент фильтрации этого же геотекстильного материала в талом состоянии.

3. Получена зависимость для определения допустимой величины коэффициента фильтрации геотекстильного материала в мёрзлом состоянии в зависимости от фильтрационных свойств и мощности пахотного слоя, а также диаметра дренажа, зная которую, можно установить величину коэффициента водоотдачи, которой должен обладать требуемый геотекстильный материал.

Литература

1. Штыков В. И. Методические указания по проектированию засыпок закрытых дренажей в зоне сезонного промерзания. Л.: СевНИИГиМ, 1980. 35 с.
2. Штыков В. И. О минимальных величинах слоя фильтрующей засыпки дрен // Доклады РАСХН. 1996. № 3. С. 37-41.
3. Штыков В. И. Закрытый дренаж в условиях глубокого промерзания почв. // Мелиорация и водное хозяйство. 1995. № 3. С. 28-30.
4. Штыков В. И. Дренажная фильтрующая засыпка. Мелиоративная энциклопедия, т. 1. М.: Росинформагротех, 2003. 464 с.
5. Блажко Л. С., Штыков В. И., Пономарёв А. Б., Бушуев М. В. Геотекстильные материалы в зоне промерзания // Путь и путевое хозяйство. 2006. № 9. С. 32-34.
6. Писарьков Х. А. Анализ действия осушительных систем на минеральных почвах // Сборник научных трудов СевНИИГиМ. Вып. XX. Л.: 1963. С. 28-71.
7. Конченко Л. А. Аппроксимация показателей льдистости и влажности многолетнемерзлых пород с использованием модели регрессии // Криосфера Земли. 2007. Том XI. С. 40-48.
8. Олевский В. А. Новые отечественные гидроизоляционные и геотекстильные материалы // Строительные материалы. 2004. №5. С. 40-41.
9. Jay T. Геосинтетические материалы с улучшенными функциональными характеристиками // Железные дороги мира. 2003. №2. С. 65-66.
10. Назарова Ю. В., Тюменев Ю. Я., Мухамеджанов Г. К. Влияние давления на характеристики строения нетканых материалов для дорожного строительства // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2008. №6. С. 55-57.
11. Palmeira Ennio M., Tatto Janaina, Araujo Gregorio L.S. Sagging and filtration behaviour of nonwoven geotextiles overlying different bedding materials // Geotextiles & Geomembranes. 2012. Vol. 31. Pp. 1-14.
12. Hong Yung-Shan, Wu Cho-Sen. Filtration behaviour of soil-nonwoven geotextile combinations subjected to various loads // Geotextiles & Geomembranes. 2011. Vol. 29, Issue 2. Pp. 102-115.
13. Raisinghani D. V., Viswanadham B. V. S. Evaluation of permeability characteristics of a geosynthetic-reinforced soil through laboratory tests // Geotextiles & Geomembranes. 2010. Vol. 28, Issue 6. Pp. 579-588.
14. Dedov A. Compression characteristics of needlepunch materials // Fibre Chemistry. 2006. Vol. 38, Issue 2. Pp. 147-150.
15. McInnes Kevin J., Thomas James C. Passive Control of Downslope Capillary Wicking of Water in Sand-based Root Zones // HortScience. 2012. Vol. 47, Issue 2. Pp. 275-279.
16. Rawal Amit, Saraswat Harshvardhan. Pore size distribution of hybrid nonwoven geotextiles // Geotextiles & Geomembranes. 2011. Vol. 29, Issue 3. Pp. 363-367.
17. Крисмер С., Ричардсон Г. Эксплуатационные испытания геотекстиля в США // Железные дороги мира. 1988. № 4. С. 56-60.
18. Giraud J. P. Применение геотекстиля в конструкции железнодорожного пути // Железные дороги мира. 1980. № 3. С. 31-35.

** Андрей Борисович Пономарёв, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. раб.: +7(812)310-50-55; эл. почта: pol1nom@yandex.ru

© Штыков В.И., Пономарев А.Б., 2012

doi: 10.5862/MCE.30.6

Additional requirements for protective filtering materials of closed drainage laying in the seasonal soil frost zone

V.I. Shtykov*Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia***A.B. Ponomarev***Saint-Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia*

+7(812)310-50-55; e-mail: pol1nom@yandex.ru

Key words

geotextiles; drainage; seasonal freezing; filtering

Abstract

The paper considers the problem of preserving the filtration properties of the drainage material in the zone of seasonal freezing. Studies have shown that drainage can lay in the zone of seasonal freezing, but the pores in the filter should not be completely filled with ice. The drainage filter may include a geotextile.

The article introduces the filtration model, taking into account the freezing of water in the geotextile. The model analysis allows obtaining conclusions about changes in the porosity and the coefficient of filtration of geotextile with according to changes in ice content. The diameter of the geotextile fiber, the initial porosity and the experimentally determined water loss geotextiles are considered. The formulas relating these parameters are found.

The results can be applied for the selection of geotextiles used in the zone of seasonal freezing for the drainage protection or as separating filter layers in the soil.

References

1. Shtykov V. I. *Metodicheskiye ukazaniya po proyektirovaniyu zasypok zakrytykh drenazhey v zone sezonnogo promerzaniya* [Guidelines for the design of fillings of closed drains in the zone of seasonal freezing]. Leningrad: SevNIIGiM, 1980. 35 p. (rus)
2. Shtykov V. I. *Doklady RASKhN* [Proceedings of RASKhN]. 1996. No. 3. Pp. 37-41. (rus)
3. Shtykov V. I. *Melioratsiya i vodnoye khozyaystvo* [Melioration & Water Industry]. 1995. No. 3. Pp. 28-30. (rus)
4. Shtykov V. I. *Drenazhnaya filtruyushchaya zasypka. Meliorativnaya entsiklopediya* [The drain filter filling. Melioration encyclopedia]. Vol. 1. Moscow: Rosinformagrotekh, 2003. 464 p. (rus)
5. Blazhko L. S., Shtykov V. I., Ponomarev A. B., Bushuyev M. V. *Put i putevoye khozyaystvo* [Roads and road industry]. 2006. No. 9. Pp. 32-34. (rus)
6. Pisarkov Kh. A. *Sbornik nauchnykh trudov SevNIIGiM* [Proceedings collection of SevNIIGiM]. Vol. XX. Leningrad: 1963. Pp. 28-71. (rus)
7. Konchenko L. A. *Kriosfera Zemli* [The earth cryosphere]. 2007. Vol. XI. Pp. 40-48. (rus)
8. Olevskiy V. A. *Stroitelnyye materialy* [Building materials]. 2004. No. 5. Pp. 40-41. (rus)
9. Jay T. *Zheleznyye dorogi mira* [The railways of the world]. 2003. No. 2. Pp. 65-66. (rus)
10. Nazarova Yu. V., Tyumenev Yu. Ya., Mukhamedzhanov G. K. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstilnoy promyshlennosti* [News of higher educational institutions. Technology of textile industry]. 2008. No. 6. Pp. 55-57. (rus)
11. Palmeira Ennio M., Tatto Janaina, Araujo Gregorio L.S. Sagging and filtration behaviour of nonwoven geotextiles overlying different bedding materials. *Geotextiles & Geomembranes*. 2012. Vol. 31. Pp. 1-14.
12. Hong Yung-Shan, Wu Cho-Sen. Filtration behaviour of soil-nonwoven geotextile combinations subjected to various loads. *Geotextiles & Geomembranes*. 2011. Vol. 29, Issue 2. Pp. 102-115.
13. Raisinghani D. V., Viswanadham B. V. S. Evaluation of permeability characteristics of a geosynthetic-reinforced soil through laboratory tests. *Geotextiles & Geomembranes*. 2010. Vol. 28, Issue 6. Pp. 579-588.

14. Dedov A. Compression characteristics of needlepunch materials. *Fibre Chemistry*. 2006. Vol. 38, Issue 2. Pp. 147-150.
15. McInnes Kevin J., Thomas James C. Passive Control of Downslope Capillary Wicking of Water in Sand-based Root Zones. *HortScience*. 2012. Vol. 47, Issue 2. Pp. 275-279.
16. Rawal Amit, Saraswat Harshvardhan. Pore size distribution of hybrid nonwoven geotextiles. *Geotextiles & Geomembranes*. 2011. Vol. 29, Issue 3. Pp. 363-367.
17. Krismer S., Richardson G. *Zheleznyye dorogi mira* [The railways of the world]. 1988. No. 4. Pp. 56-60. (rus)
18. Giraud J. P. *Zheleznyye dorogi mira* [The railways of the world]. 1980. No. 3. Pp. 31-35 (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 39-45.