

УДК 625.731.2

В. С. Боровик, В. В. Боровик, В. Т. Фомичёв

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗУПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ДОРОГИ, ВЫПОЛНЕННОГО ИЗ ГРУНТОВ ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТИ

Анализируются основные причины, влияющие на процесс разуплотнения грунтов основания дорожных одежд, выполненного из грунтов повышенной плотности. Установлено, что в переуплотненных грунтах идут процессы осмоса, диффузии и капиллярного поднятия. Исследуются дополнительные силы, раздвигающие стенки порового пространства и способствующие возрастанию свободной энергии.

Ключевые слова: дорожная одежда, разуплотнение грунтов, осмос, диффузия, двойной электрический слой.

The authors analyze the main factors influencing on the process of decompaction of road dressing ground made of high-density soils. It is proved that in overconsolidated soils the processes of osmosis, diffusion and capillary height take place. Additional forces separating the walls of pore space and contributing to the increase of free energy are investigated.

Key words: road dressing, decompaction of soils, osmosis, diffusion, double electric layer.

Уплотненный грунт при увлажнении подвергается действию физических и химических сил, приводящих к деградации исходной структуры [1, 2].

Проникновение воды способствует возникновению поверхностных сил. Взаимодействие воды с грунтом приводит к растворению части солевого содержания грунта и выходу ионов в капиллярную зону, это сопровождается образованием двойного электрического слоя (ДЭС), а образование раствора в поровом пространстве — к возникновению осмотического давления. Осмос представляет диффузию вещества (обычно растворителя) через полупроницаемую перегородку, разделяющую два раствора различной концентрации. Диффузия растворителя продолжается до установления равновесия в системе в результате выравнивания концентраций по обе стороны перегородки или в результате возникновения осмотического давления [3, с. 324].

Грунты, в том числе и высокодисперсные глинистые, не являются идеальными полупроницаемыми перегородками, и в них происходит как диффузия ионов растворенных электролитов¹, так и движение растворителя — молекул воды. Но в зависимости от структуры грунта (в основном размера пор) можно наблюдать преобладание того или иного процесса. Величина коэффициента диффузии связных грунтов при их пластичной консистенции, несмотря на различие гранулометрического и минералогического составов и плотности, имеет порядок $(5...10) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$; уменьшением влажности она снижается и в воздушно-сухих грунтах при решении практических задач в связи с малой скоростью диффузии веществ не учитывается [3].

В грунтах явления осмоса и осмотического давления проявляются в двух главных случаях. Первый из них — взаимодействие воды и обменных катио-

¹ Вода в межпоровом пространстве грунтов обладает свойствами электролита.

нов. Обменные катионы притягиваются поверхностью глинистых частиц. Одновременно эти катионы взаимодействуют с молекулами воды, которые стремятся отчленив их от поверхности частиц. Это отжимающее усилие и можно рассматривать как проявление осмотического давления. В данном случае электростатическое притяжение обменных катионов со стороны грунтовых частиц уравнивает взаимодействие между ионами и молекулами воды [4, с. 329].

При наличии в грунте неравномерной засоленности также проявляется осмос. В этом случае наблюдается не только диффузия растворенных веществ из участков с более высокой их концентрацией к участкам с более низкой, но одновременно и встречное движение молекул воды (осмос). Наряду с нормальным осмосом, который состоит в передвижении растворителя от разбавленной к концентрированной части раствора, в грунтах наблюдается аномальный осмос. Он представляет собой передвижение жидкости в направлении диффузии, т. е. от более концентрированного раствора к менее концентрированному. Это передвижение можно объяснить как электроосмотическое течение жидкости через поры полупроницаемой перегородки глинистого грунта под воздействием разности диффузионного потенциала между двумя жидкими компонентами. Если свободному набуханию грунта будет препятствовать внешнее давление, то возникает осмотическое давление, величина которого в глинистых грунтах может достигнуть нескольких кг/см². Если концентрация солей в растворе будет больше, чем в поровом растворе грунта, то происходит отсос воды и возникает уплотнение грунта в результате его усадки: концентрированные растворы электролитов обладают отсасывающим действием, чем достигается уплотнение водонасыщенных глинистых грунтов [5, 6].

Основные экспериментальные выводы И. А. Брилинга и Б. В. Рельтова сводятся к следующему: в более легких глинистых грунтах осмос имеет обратное направление, т. е. совпадает с направлением диффузии и является аномальным, который возрастает с увеличением среднего радиуса пор. Кроме того, осмотический поток может возникнуть и при наличии неравномерного засоления и небольших градиентов концентраций. Интенсивность осмотических процессов в дисперсных грунтах зависит от тех же внутренних и внешних (физических) факторов, что и диффузия. В наибольшей степени осмотические процессы в грунтах проявляются при наличии в них развитых ДЭС. В соответствии с этим на величину коэффициента осмоса будут влиять те же факторы, которые влияют на параметры ДЭС: минеральный состав, вид обменных катионов и концентрация порового раствора электролита и т. д. [7]. Поэтому при прочих одинаковых условиях коэффициент осмоса выше в незасоленных монтмориллонитовых глинах, чем в каолинитовых. Поскольку увеличение концентрации электролита порового раствора подавляет диффузную часть ДЭС, это приводит к снижению коэффициента осмоса. Влияние влажности на осмотическую фильтрацию исследовалось Н. П. Затенацкой, установившей, что интенсивность проявления осмотической фильтрации зависит от содержания всех категорий воды в грунтах² [8]. Она установила, что чем больше в грунтах влажность, тем выше скорость осмотической фильтрации,

² Авторы статьи полагают, что речь идет о связанных и грунтах переходного типа.

и наоборот, с понижением влажности скорость снижается. Согласно А. Н. Галкину, зависимость коэффициента осмоса глинистых грунтов от влажности имеет нелинейный характер с максимумом, близким к влажности свободного набухания (рис. 1) [9].

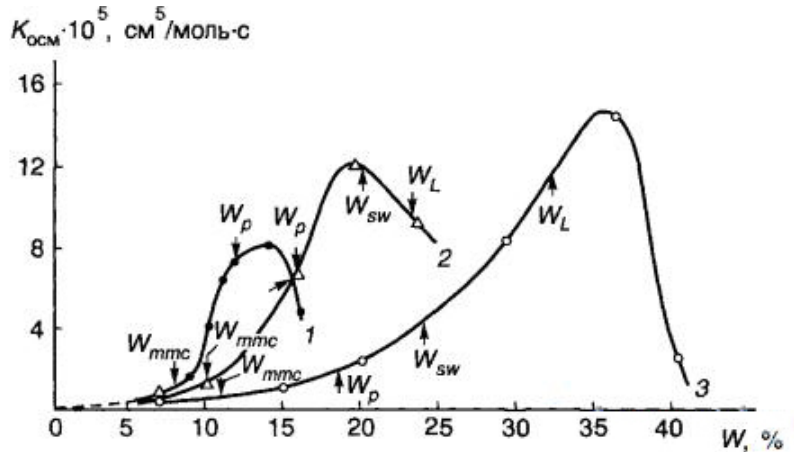


Рис. 1. Зависимость коэффициента осмоса от влажности грунтов: 1 — супесь тяжелая; 2 — суглинок средний; 3 — суглинок тяжелый; w_p — влажность нижнего предела пластичности; w_L — влажность верхнего предела пластичности; w_{sw} — влажность свободного набухания; w_{mmc} — влажность осмотическая и капиллярно-конденсированная

В соответствии с современным представлением, капиллярная и осмотическая вода в глинистых грунтах в интервале от w_{mmc} до w_{sw} образуются одновременно и уверенно количественно разделить их не удастся [4, с. 147].

Растворимость грунта как один из факторов, влияющих на прочность грунтового основания, нами не рассматривается, т. к. наличие воды в свободном состоянии в зоне переуплотненного грунта нами исключается технологией работ по устройству дорожных одежд с основаниями из переуплотненных грунтов.

Распределение ионов разного знака в диффузионном слое можно количественно выразить через электрический потенциал двойного электрического поля. Введем координату X , направленную от поверхности поры. Условимся, что в точке $x = \infty$ значение потенциала $\varphi = 0$. При $x = 0$ (поверхность частицы) значение потенциала примем φ_0 (поверхностный потенциал).

Уравнение Пуассона, связывающее дивергенцию градиента электрического потенциала в данной точке с плотностью заряда в этой точке, имеет вид

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где ρ и ε — плотность заряда и диэлектрическая проницаемость в точке x . Функция ρ определяется концентрацией ионов n (число ионов в единице объема) и зарядом z :

$$\rho = \sum_i z_i e n_i. \quad (2)$$

В этом случае в водной среде концентрация ионов определяется распределением Больцмана:

$$n_+ = n_0 \exp(-ze\varphi / kT), \quad (3)$$

$$n_- = n_0 \exp(ze\varphi / kT), \quad (4)$$

n_0 относится к $x = \infty$, т. е. соответствует концентрации, при которой $\varphi = 0$. k — постоянная Больцмана; z — заряд ионов бинарного электролита.

Подставляя (3—4) в уравнение (2), получаем:

$$\rho = ze(n_+ - n_-) = zen_0 \left\{ \exp\left(-\frac{ze\varphi}{kT}\right) - \exp\left(\frac{ze\varphi}{kT}\right) \right\}. \quad (5)$$

Подстановка (5) в (1) позволяет решить дифференциальное уравнение второго порядка. Используя граничные условия $\varphi = \varphi_0$ при $x = 0$ и $\varphi = 0$, $dy/dx = 0$ при $x = \infty$, получим:

$$\varphi = \frac{2kT}{ze} \ln \left\{ \frac{1 + y \exp(-kx)}{1 - y \exp(-kx)} \right\}, \quad (6)$$

где

$$y = \frac{\exp(ze\varphi_0/2kT) - 1}{\exp(ze\varphi_0/2kT) + 1}, \quad (7)$$

$$k = \left(\frac{2e^2 n_0 z^2}{\varepsilon kT} \right)^{1/2} = \left(\frac{2e^2 N_A C z^2}{\varepsilon kT} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

где N_A — число Авогадро; T — абсолютная температура; C — мольная концентрация (моль/дм³).

Для получения уравнений используем приближения Дебая — Хюккеля³ $Ze\varphi_0 \ll kT$ или $Ze\varphi_0 \ll 2kT$, которое позволяет разложить величину $y(z)$ в ряд и ограничиться первым членом [10, 11]:

$$y = Ze\varphi_0 / 4kT. \quad (9)$$

Если логарифмическую функцию, выраженную уравнением (6), записать как $\ln(1 \pm x) = \pm x$, то потенциал φ определяется как

$$\varphi = \varphi_0 \exp(-kx). \quad (10)$$

³ Теория Дебая — Хюккеля, согласно которой каждый ион под действием своего электрического заряда поляризует окружение и образует вокруг себя некоторое преобладание ионов противоположного знака — так называемую ионную атмосферу. В отсутствие внешнего электрического поля ионная атмосфера имеет сферическую симметрию, и ее заряд равен по величине и противоположен по знаку заряду создающего ее центрального иона.

Рассмотрим простейший случай взаимодействия стенок поры, образованной сближением частиц грунта с двойными электрическими полями на поверхности. При упрощении картины взаимодействия примем расстояние равным $2d$. При сближении стенок двойные слои перекрываются, в результате увеличиваются концентрации ионов в пространстве между стенками и осмотическое давление. Рост осмотического давления, в свою очередь, приводит к появлению сил отталкивания, препятствующих сближению частиц.

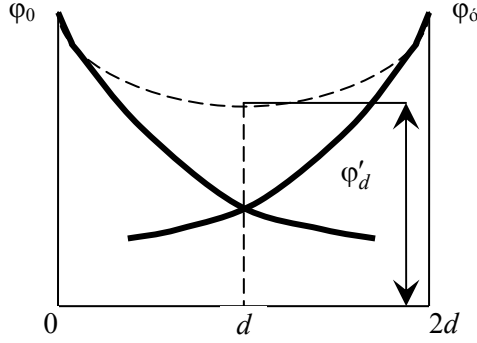


Рис. 2. Схема взаимодействия двух двойных электрических слоев между двумя твердыми частицами грунта в виде условных параллельных пластин

Увеличенная концентрация ионов ($\Delta n = \Delta n_+ + \Delta n_-$) и их распределения в такой системе можно определить из уравнений Больцмана (3), (4), n_0 соответствует концентрации, при которой $\phi = 0$.

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \Delta n &= \{n_0 \exp(-ze\phi_d / kT) - n_0\} + \{n_0 (\exp ze\phi_d / kT) - n_0\} = \\ &= n_0 \{ \exp(-ze\phi_d / kT) + \exp(ze\phi_d / kT) - 2 \}. \end{aligned} \quad (11)$$

Соответствующее увеличение осмотического давления ΔP определяется выражением

$$\Delta p_{\text{осм}} = \Delta n k T. \quad (12)$$

Подстановка значения Δn в данное значение дает:

$$\Delta p = n_0 k T \left\{ \exp\left(-\frac{ze\phi_d}{kT}\right) + \exp\left(\frac{ze\phi_d}{kT}\right) - 2 \right\}. \quad (13)$$

Разлагая в ряд экспоненциальную функцию в приближении Дебая — Хюккеля [10, 11] ($Ze\phi_d \ll kT$) и учитывая первые члены, получим приближенное выражение:

$$\Delta p = n_0 k T \left(\frac{ze\phi_d}{kT} \right)^2. \quad (14)$$

Потенциал ϕ_d в данном случае представляет сумму потенциалов в точке d :

$$\phi'_d = 2\phi_d. \quad (15)$$

Решая совместно уравнения (15) и (14), получаем:

$$\Delta p = 4n_0kT \left(\frac{ze\phi'_d}{kT} \right)^2. \quad (16)$$

Например: z — заряд условного электролита (водного раствора химических элементов, окружающих твердые частицы грунта), число элементарных зарядов 2; k — термодинамическая константа Больцмана $1,346 \cdot 10^{-16}$; T — термодинамическая температура ($^{\circ}\text{C} + 273 \text{ K}$); e — заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$; ϕ'_d — усредненный потенциал 50 милливольт; n_0 — число ионов 2. При $t = 20^{\circ}\text{C}$ $\Delta p = 0,442 \cdot 10^{-18}$ МПа.

Вычисленные значения Δp показывает, что при заданных параметрах грунта в начальный период формирования основания влияние осмоса незначительно.

Увеличение $2d$ (рис. 2) за счет капиллярного поднятия приводит к увеличению суммарного объема порового пространства и, следовательно, поступлению жидкости в объем переуплотненного грунта за счет осмоса. Поэтому с начального момента формирования переуплотненного основания начинается разуплотнение, объясняемое капиллярным поднятием и универсальным явлением осмоса. Исследования показывают, что чем выше коэффициент уплотнения грунта, тем медленнее происходит разуплотнение. Это иллюстрируются рис. 3 и 4, на которых видно, как изменяется влажность и прочность грунта при коэффициенте уплотнения 1,05 и 0,98.

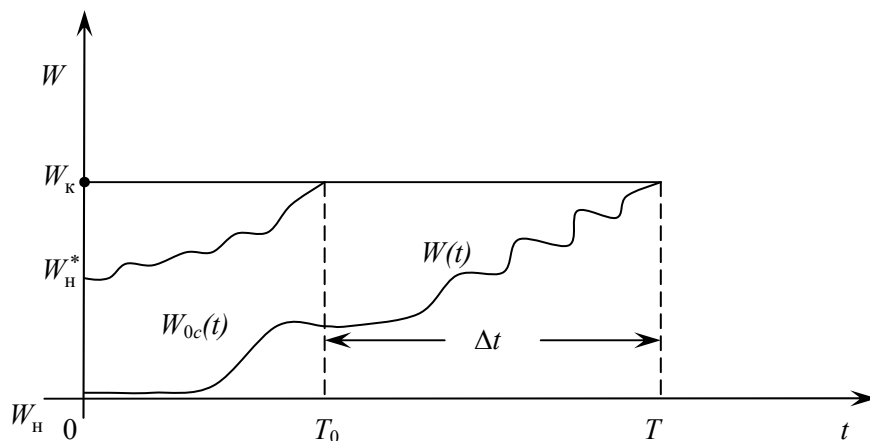


Рис. 3. Зависимость времени разуплотнения грунта от степени начального уплотнения: T_0 — время осмотической фазы; T — общее время разуплотнения; $W_{\text{н}}$, $W_{\text{н}}^*$ — влажность грунта при коэффициенте уплотнения 1,05 и 0,98 соответственно

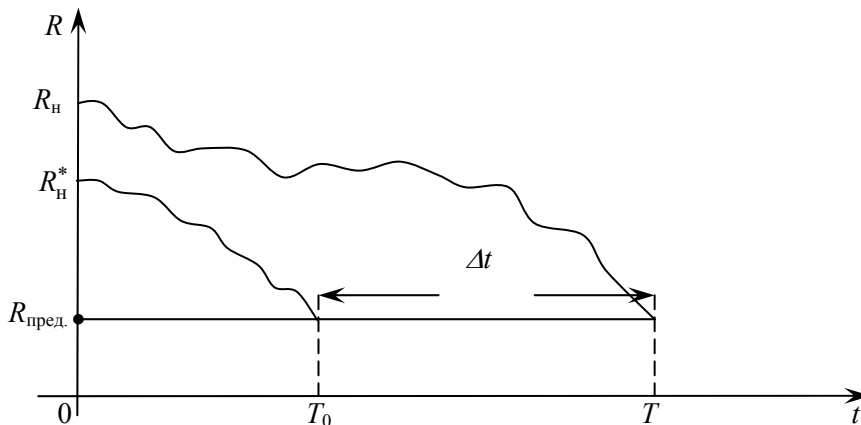


Рис. 4. Изменение прочности грунта во времени при различных коэффициентах уплотнения: R_H, R_H^* — прочность грунта с коэффициентом уплотнения 1,05 и 0,98 соответственно

Исследования показывают, что при стремлении суммарного порового объема к некоторому значению V_0 осмотические явления уступают по энергии своего проявления место явлениям капиллярного поднятия и тепловлагопереноса, приводящим к усилению процесса осмоса, увлажнения, а, следовательно, по нашему мнению, к разуплотнению. Как отмечено в [12], на этом этапе температурное поле определяет тепло-влажностные потоки в основании дороги, которые оказывают доминирующее влияние на дальнейшую динамику разуплотнения грунтового основания дорожной одежды. Поэтому можно говорить о двух взаимосвязанных фазах разуплотнения, развивающихся в пространстве и во времени:

- 1) начальная фаза — осмос и взаимодействие ДЭС. Имеется в виду прямой осмос и обратный осмос (замедляющий динамику разрушения);
- 2) вторая фаза: капиллярное поднятие и скалярное поле температур, вызывающие векторное поле тепловлагопереноса, приводящее к увлажнению и разуплотнению основания и, как следствие, снижению его прочностных характеристик.

Из рис. 3 и 4 также видно, что увеличение времени Δt можно объяснить осмотической фазой продолжительностью T_0 . В соответствии с современным представлением [3, с. 332], «осмотические и диффузионные процессы имеют наиболее важное значение в таких грунтах, где подавлены... другие процессы массопереноса. В наибольшей мере они проявляются в глинистых грунтах». Исследования А. Н. Галкина коэффициента осмоса глинистых грунтов от влажности показали, что его величина имеет нелинейный характер с максимумом, близким к влажности свободного набухания [3, с. 332]. Это подтверждает справедливость наших рассуждений (рис. 3 и 4).

Выводы. Переуплотненный грунт основания дорожной одежды в момент завершения работ имеет влажность порядка ($W\% = 5...8\%$), и, следовательно, коэффициент осмоса $K_{осм}$ в начальный период эксплуатации дороги минимальный (рис. 1), и взаимно погашается антиосмосом, что и определяет длительность осмотического периода T_0 . Повышенная плотность грунта активизирует капиллярные свойства грунтов и способствует усилению процесса те-

пловлагодпереноса, что позволяет сделать предположение о дальнейшем развитии осмотических процессов с последующей возможной их стабилизацией при условии отсутствия дополнительных источников увлажнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ярмолинский В. А.* Особенности расчета водно-теплового режима земляного полотна автомобильных дорог Дальнего Востока в условиях глубокого сезонного промерзания // Транспортное строительство. 2009. № 2. С. 18—20.
 2. *Боброва Т. В., Бедрин Е. А., Дубенков А. А.* Прогнозирование эффективности дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // Вестник СибАДИ. 2011. № 4 (22). С. 11—16.
 3. Физико-химические свойства грунтов. URL: <http://www.ecopole.info/inzhenerno-geologicheskie-izyskaniya/fiziko-himicheskie-svoystva-gruntov.html>. Дата обращения 03.02.2014.
 4. Грунтоведение / В. Т. Трофимов, В. А. Королев, Е. А. Вознесенский, Г. А. Голодовская, Ю. К. Васильчук, Р. С. Зиангиров. — М. : МГУ, Наука, 2005. 1024 с.
 5. *Брилинг И. А.* Исследование переноса водных солевых растворов в порах глинистых грунтов // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 1967. № 2. С. 90—99.
 6. *Рельтов Б. Ф., Новицкая Н. А.* Осмотические явления в связанных грунтах при неравномерном их засолении // Известия ВНИИГ. 1954. Т. 51. С. 94—122.
 7. *Брилинг И. А.* Фильтрация в глинистых породах. М., 1984. 61 с.
 8. *Затенацкая Н. П.* Экспериментальные данные по диффузии солей в глинистых породах // Тр. ГИН. 1965. Вып. 115.
 9. *Галкин А. Н.* Диффузионно-осмотические свойства глинистых пород юго-востока Беларуси в условиях загрязнения геологической среды. Витебск : ВГУ им. П. М. Машерова, 2004. 126 с.
 10. *Дебай П.* Избранные труды. Л. : Наука, 1987. 559 с.
 11. *Балданова Д. М., Танганов Б. Б., Балдов М. М.* Электростатическая теория растворов электролитов Дебая — Хюккеля и проблема устойчивости систем зарядов. URL: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=7796591 (Дата обращения 15.01.2014)
 12. Моделирование водно-теплового режима земляного полотна при устройстве оснований дорожных одежд из переуплотненного грунта / В. С. Боровик, В. В. Боровик, Ю. Е. Прокопенко, Д. А. Проценко // Наука и техника в дорожной отрасли. 2014. № 1.
1. *Yarmolinskii V. A.* Osobennosti rascheta vodno-teplovogo rezhima zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog Dal'nego Vostoka v usloviyakh glubokogo sezonnogo promerzaniya // Transportnoe stroitel'stvo. 2009. № 2. S. 18—20.
 2. *Bobrova T. V., Bedrin E. A., Dubenkov A. A.* Prognozirovanie effektivnosti dorozhnykh konstruksii na mnogoletnemmerzlykh gruntakh // Vestnik SibADI. 2011. № 4 (22). S. 11—16.
 3. Fiziko-khimicheskie svoystva gruntov. URL: <http://www.ecopole.info/inzhenerno-geologicheskie-izyskaniya/fiziko-himicheskie-svoystva-gruntov.html>. Data obrashcheniya 03.02.2014.
 4. Gruntovedenie / V. T. Trofimov, V. A. Korolev, E. A. Voznesenskii, G. A. Golodovskaya, Yu. K. Vasil'chuk, R. S. Ziangirov. — M. : MGU, Nauka, 2005. 1024 s.
 5. *Briling I. A.* Issledovanie perenosa vodnykh solevykh rastvorov v porakh glinistykh gruntov // Vestnik MGU. Ser. 4. Geologiya., 1967. № 2. S. 90—99.
 6. *Rel'tov B. F., Novitskaya N. A.* Osmoticheskie yavleniya v svyazannykh gruntakh pri neravnomernom ikh zasolenii // Izvestiya VNIIG. 1954. T. 51. S. 94—122.
 7. *Briling I. A.* Fil'tratsiya v glinistykh porodakh. M., 1984. 61 s.
 8. *Zatenatskaya N. P.* Eksperimental'nye dannye po diffuzii solei v glinistykh porodakh // Tr. GIN. 1965. Vyp. 115.
 9. *Galkin A. N.* Diffuzionno-osmoticheskie svoystva glinistykh porod yugo-vostoka Belarusi v usloviyakh zagryazneniya geologicheskoi sredy. Vitebsk : VGU im. P. M. Masherova, 2004. 126 s.
 10. *Debai P.* Izbrannyye trudy. L. : Nauka, 1987. 559 s.
 11. *Baldanova D. M., Tanganov B. B., Baldov M. M.* Elektrostaticheskaya teoriya rastvorov elektrolitov Debaya — Khyukkelya i problema ustoychivosti sistem zaryadov. URL: http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=7796591 (Data obrashcheniya 15.01.2014)

12. Modelirovanie vodno-teplovogo rezhima zemlyanogo polotna pri ustroistve osnovanii dorozhnykh odezhd iz pereuplotnennogo grunta / V. S. Borovik, V. V. Borovik, Yu. E. Prokopenko, D. A. Protsenko // *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli*. 2014. № 1.

© Боровик В. С., Боровик В. В., Фомичёв В. Т., 2014

*Поступила в редакцию
в феврале 2014 г.*

Ссылка для цитирования:

Боровик В. С., Боровик В. В., Фомичёв В. Т. Моделирование процесса разуплотнения грунтового основания дороги, выоплненного из грунтов повышенной плотности // *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая*. 2014. Вып. 3(34). Ст. 20. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Borovik V. S., Borovik V. V., Fomichev V. T. [Modelling of the process of decompaction of road supporting ground made of high-density soils]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 3(34), paper 20. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>