

УДК 624.131.137

Б.С. Юшков, А.С. Сергеев

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЕЛИЧИНЫ МОРОЗНОГО ПУЧЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ОТ СКОРОСТИ ПРОМЕРЗАНИЯ

Изложены результаты экспериментальных исследований глинистых и песчаных грунтов в морозильной камере на кафедре автомобильных дорог и аэродромов.

Установлены экспериментальные зависимости параметров пучения от температуры промораживания, скорости промерзания, количества фронтов промерзания и условий миграции влаги. При увеличении скорости промерзания неравномерность морозного пучения песчаных грунтов увеличивается, а глинистых – уменьшается, в то время как величина пучения и глинистых, и песчаных грунтов уменьшается, а коэффициент неравномерности пучения увеличивается. Рост скорости промерзания, увеличивая скорость миграции влаги, уменьшает время ее фазовых переходов и количество мигрирующей к фронту промерзания воды. В результате этого унаследованные текстурные особенности глинистых грунтов, связанные с литологической и минералогическо-петрографической неоднородностью, при увеличении скорости промерзания не успевают проявиться в достаточной степени и неравномерность пучения снижается. Играть роль и меньшая интенсивность изменения неравномерности пучения глинистых грунтов при увеличении среднего влагосодержания. При этом интенсивность изменения коэффициента неравномерности морозного пучения глинистых грунтов с увеличением скорости промерзания недостаточна для увеличения абсолютного значения неравномерности пучения за один и тот же промежуток времени.

Экспериментальные исследования показали, что формируются три зоны, связанные с интенсивностью промерзания глинистого грунта. В верхней зоне силы морозного пучения образуются в результате массового пучения грунта при кристаллизации содержащейся в грунте воды и замерзании миграционной влаги.

Полученные экспериментальные и аналитические зависимости позволяют описывать морозоопасные грунты при любых условиях промерзания и пучения. Установлено, что скорость промерзания оказывает сильное влияние на скорость пучения глинистых грунтов.

Ключевые слова: морозное пучение, миграция воды, песок, глинистый грунт, промораживание.

B.S. Iushkov, A.S. Sergeev

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

RESEARCH OF DEPENDENCE OF FROST HEAVING CLAY SOILS TO FREEZING SPEED

The article describes the experimental study of clay and sandy soils in the freezer at the department of roads and airfields. Experimental parameters are set depending on the temperature of freezing frost heave, freezing rate, number of fronts, freezing conditions and moisture migration. By

increasing the speed of freezing uneven frost heave sandy soils increases and the clay is reduced, while the value of the swelling and clay and sandy soils is reduced and the ratio of non-uniformity of swelling increases. The growth rate of freezing, increasing the rate of moisture migration, reduced during the phase transitions and the number of migrating it to the front of the freezing water. As a result of inherited structural features of clay soils associated with lithological and mineralogical petrographical heterogeneity, increasing the speed of freezing do not have time to manifest itself sufficiently and uneven swelling decreases.

The experimental and analytical dependences allow to describe Frost soils under all conditions and frost heaving. It was found that the rate of freezing has a strong effect on the rate of swelling clay soils.

Keywords: frost heave, migration, water, sand, clay soil, freezing.

Всем грунтовым системам, в зависимости от вида грунта, влажности перед замерзанием, глубины и скорости промерзания, присущ неравномерный характер морозного пучения промерзающего массива, который можно охарактеризовать следующими вероятностными параметрами: средней величиной $\bar{h}$, неравномерностью R , интенсивностью морозного пучения k_n и коэффициентом неравномерности морозного пучения η .

В общем случае при одинаковых условиях промерзания и свойствах массива промерзающих глинистых и песчаных грунтов морозное пучение имеет тенденцию к возрастанию с увеличением глубины промерзания и среднего влагосодержания и к уменьшению с увеличением скорости промерзания [1].

Неравномерность морозного пучения повышается при возрастании среднего влагосодержания и уменьшается с увеличением скорости промерзания. При этом как увеличение, так и уменьшение неравномерности отличаются равномерными монотонным характером по всей глубине промерзающей толщи. Аналогичные изменения присущи и значению величины морозного пучения. Изменение же коэффициента неравномерности морозного пучения носит прямо противоположный характер [2]. С увеличением скорости промерзания коэффициент неравномерности морозного пучения увеличивается. Так, при глубине промерзания 80 см величина η изменяется с 0,1 при скорости промерзания 0,7 см/сут до 2,15 при скорости промерзания 2,5 см/сут. Это подтверждается криогенными текстурами грунтов, полученными в результате специальных лабораторных экспериментов. При уменьшении скорости промерзания скорость пучения уменьшается, а общая его величина зависит от времени промерзания грунтов с пониженной скоростью и может достигать больших величин за счет мигрирующей в зону фазовых переходов влаги из нижележащих слоев грунта. Криогенная текстура характеризуется преимущественно горизонтальными прослоями льда, что способствует выравниванию величины пучения по площади. Аналогичная зависимость наблюдается и при промерза-

нии грунта с постоянной скоростью, но с увеличением влажности [3]. В этих случаях криогенная текстура характеризуется увеличением горизонтальных прослоев льда, наклонные линзы и прослои льда уменьшаются по количеству и мощности. И наоборот, при увеличении скорости промерзания значение величины и неравномерности морозного пучения уменьшается, а коэффициент неравномерности повышается. В этом случае увеличивается доля наклонных прослоев и линз льда, а горизонтальные прослои и линзы имеют искривления, способствующие увеличению неравномерности пучения. Аналогичную зависимость заметили в своих исследованиях Джексон и Чалмерс [4].

При промерзании песчаных грунтов в изменении величины неравномерности пучения и коэффициента неравномерности наблюдаются в основном те же зависимости, что при промерзании глинистых грунтов. Исключение составляют изменение коэффициента неравномерности пучения при изменении скорости промерзания, а также темпы изменения этой величины в начальный период промерзания [5].

При увеличении скорости промерзания неравномерность морозного пучения песчаных грунтов увеличивается, а глинистых – уменьшается, в то время как величина пучения и глинистых, и песчаных грунтов уменьшается, а коэффициент неравномерности пучения увеличивается. Рост скорости промерзания, увеличивая скорость миграции влаги, уменьшает время ее фазовых переходов и количество мигрирующей к фронту промерзания воды [6]. В результате этого унаследованные текстурные особенности глинистых грунтов, связанные с литологической и минералого-петрографической неоднородностью, при увеличении скорости промерзания не успевают проявиться в достаточной степени и неравномерность пучения снижается. Игрет роль и меньшая интенсивность изменения неравномерности пучения глинистых грунтов при увеличении среднего влагосодержания. При этом интенсивность изменения коэффициента неравномерности морозного пучения глинистых грунтов с повышением скорости промерзания недостаточна для увеличения абсолютного значения неравномерности пучения за один и тот же промежуток времени [7].

Результаты многочисленных испытаний глинистых и песчаных грунтов в лаборатории грунтов автодорожного факультета позволили установить зависимость средней интенсивности морозного пучения грунтов $\bar{k}_n$ от средней скорости промерзания $\bar{V}_H$ при различных имеющих место в природе термовлажностных режимах промерзания [8].

Экспериментальные исследования проводились в лабораторном холодильно-морозильном шкафу «Зил» – создавался процесс промораживания грунта при температурах от $+5$ до -20 °С. Для того чтобы промораживание грунтов происходило сверху вниз, дно и нижние боковые стороны контейнеров были теплоизолированы плитами толщиной 25 мм из экструзионного пенополистирола, по нормативной литературе термическое сопротивление теплоизоляционного кожуха должно быть не менее $0,8 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Дж}$ (рис. 1).

Из рис. 2 видно, что зависимость $\bar{k}_n$ от $\bar{V}_H$ при природной влажности перед промерзанием $W_0 = (1,5 - 2)W_p$ (W_p – влажность на границе раскатывания) близка к гиперболической, и только при влажности $W_0 = W_p$ она приближается к линейной [9]. При этом следует отметить, что интенсивность пучения уменьшается с увеличением скорости промерзания при значениях $W_0 \geq W_p$ ($G \geq 0,35$); при иных значениях интенсивность пучения практически не изменяется с изменением $\bar{V}_H$.



Рис. 1. Экспериментальные лотки в холодильной камере

На рис. 3 изображены экспериментальные зависимости средней скорости морозного пучения грунтов $\bar{V}_h$ от средней скорости промерзания $\bar{V}_H$, которые построены в соответствии с эмпирическими формулами. Как видно из рис. 3, выборочной средней результатов изменения скорости промерзания исследуемых грунтов соответствует определенное значение выборочной средней результатов определения скорости морозного пучения. Функциональная зависимость между $\bar{V}_h$ и $\bar{V}_H$ иллюстрируется характерными кривыми (см. рис. 3). С ростом $\bar{V}_H$ увеличивается $\bar{V}_h$, достигая максимума при $\bar{V}_H = 2...3$ см/сут (для глинистых грунтов с $W_0 = 2W_p$ и песков с $G = I$). С уменьшением влажности грунтов до $W_0 = 1,5 W_p$ ($G = 0,75$) максимум функции $\bar{V}_h = f(\bar{V}_H)$ отмечает-

ся при меньших скоростях промерзания ($\overline{V}_H = 2,0$ см/сут). При дальнейшем уменьшении влажности до $W_0 = W_p$ ($G = 0,5$) зависимость $\overline{V}_h = f(\overline{V}_H)$ максимально приближается к линейной с наступлением максимума при значении $\overline{V}_H = 1,0 \dots 1,5$ см/сут [10].

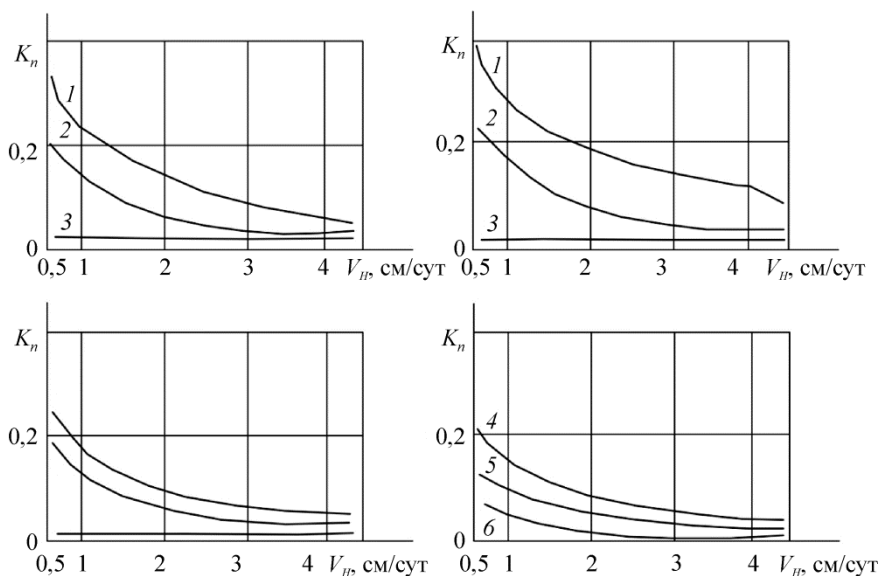


Рис. 2. Зависимость интенсивности морозного пучения $\overline{K}_n$ от скорости промерзания $\overline{V}_H$ глин (а), суглинков (б), супесей (в) и мелких пылеватых песков (г): 1 – при $W_0 = 2W_p$; 2 – при $W_0 = 1,5W_p$; 3 – при $W_0 = W_p$; 4 – при $G = 1,5$; 5 – при $G = 0,7$; 6 – при $G = 0,4$

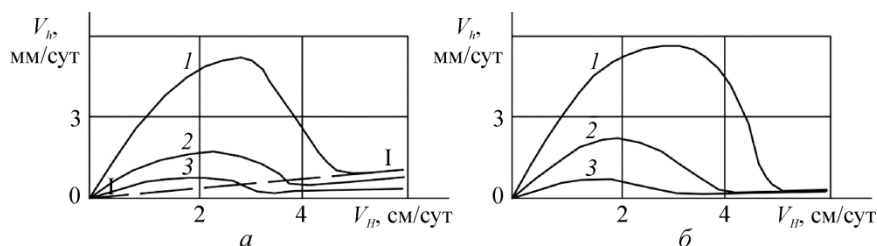


Рис. 3. Зависимость скорости морозного пучения $\overline{V}_h$ глинистых грунтов (а) и мелких пылеватых песков (б) от скорости промерзания $\overline{V}_H$:

1 – при $W_0 = 2W_p$, $G = 1$; 2 – $W_0 = 1,5W_p$, $G = 0,75$; 3 – $W_0 = W_p$, $G = 0,5$

В водонасыщенном состоянии у грунтов при скоростях промерзания, превышающих вышеуказанный максимум, отмечается резкое снижение величины $\overline{V}_h$, что связано с уменьшением миграционного

потока влаги в промерзающую зону. Перенос влаги в промерзающих тонкодисперстных грунтах происходит под действием кристаллизационно-пленочного и компрессионно-вакуумного механизмов, которые определяют величину потенциала переноса. Величина потенциала переноса влаги определяется градиентом потенциала. Следовательно, при некотором максимуме скоростей промерзания у каждого грунта в водонасыщенном состоянии происходит резкое снижение эффективности действия кристаллизационно-пленочного и компрессионно-вакуумного механизмов миграции влаги, о чем свидетельствует незначительное изменение суммарной влажности в рассматриваемой промерзающей зоне в связи с тем, что основная часть поровой влаги замерзает на месте. При $\overline{V}_H = 4,0 \dots 5,0$ см/сут кривая $\overline{V}_h = f(\overline{V}_H)$ становится параллельной оси абсцисс, а затем с увеличением $\overline{V}_H$ начинается линейный рост $\overline{V}_h$, обусловленный кристаллизацией грунтовой влаги на месте при фазовых переходах первого рода [11].

Снижение влажности грунтов приводит не только к уменьшению значения максимальной скорости промерзания, при которой происходит перелом графика функции $\overline{V}_h = f(\overline{V}_H)$, но и к более плавному дальнейшему уменьшению значения $\overline{V}_h$. При значениях же влажности $W_0 = W_p$ скорость пучения уменьшается с увеличением скорости промерзания. На рис. 3 линия I-I отражает изменение скорости пучения за счет фазовых переходов влаги, находящейся в грунте перед его промерзанием. Следует предположить, что есть какая-то скорость промерзания $\overline{V}_{H \max}$, после которой $\overline{V}_h$ больше не увеличивается. Эта скорость соответствует такой температуре грунта, при которой практически вся вода в грунте будет заморожена. Поле, ограниченное линией I-I и графиком функции $\overline{V}_h = f(\overline{V}_H)$ на рис. 3, характеризует скорость пучения за счет миграционного влагонакопления [12].

На рис. 4 изображены графики зависимости средней скорости морозного пучения различных грунтов от средней скорости промерзания. Из рис. 4 видно, что увеличение дисперсности грунтов вызывает возрастание скорости пучения при одной и той же скорости промерзания. При этом максимальной скорости пучения соответствует большая скорость промерзания у глин, которая снижается с уменьшением дисперсности грунтов [13].

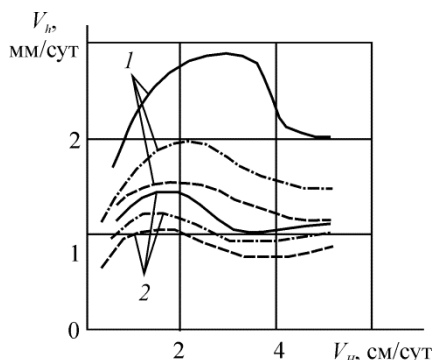


Рис. 4. Зависимость скорости морозного пучения $\bar{V}_h$ от скорости промерзания $\bar{V}_n$: 1 – песков при $G = 1$, глин при $W_0 = 2W_p$; 2 – песков $G = 0,75$, глин при $W_0 = 1,5W_p$

Как следует из изложенного, скорость промерзания грунтов оказывает существенное влияние как на абсолютные величины параметров пучения, так и, в особенности, на скорость их проявления.

Анализ экспериментальных исследований показал, что формируются три зоны, связанные с интенсивностью промерзания глинистого грунта.

В верхней зоне силы морозного пучения образуются в результате массового пучения грунта при кристаллизации содержащейся в грунте воды и замерзании миграционной влаги.

При кристаллизации воды в процессе перехода в лед ее объем увеличивается на 10–17 %, вызывая массовое пучение грунта. Массовое пучение определяется скоростью движения границ раздела фаз. При быстром промерзании глинистого грунта величина сил пучения меньше, чем при медленном. Это объясняется тем, что при быстром промерзании вода фиксируется в порах грунта и ее миграция к фронту промерзания затрудняется. Следовательно, процесс миграции воды в зону промерзания развивается не в полной мере. Чем медленнее углубляется фронт промерзания, тем большие напряжения развиваются в грунте [14]. Увеличение напряжений по глубине объясняется высокой степенью обезвоживания промерзающего грунта при медленном промерзании. По результатам экспериментальных исследований, основную долю пучения верхней зоны составляет миграционное льдонакопление. Эта величина равна 60–90 % от суммарного льдонакопления. Такое увеличение льдонакопления связано с резким повышением плотности потока влаги по причине роста градиента температуры. Миграционная влага поступает в верхнюю зону из талых зон, расположенных ниже, степень промерзания которой будет всегда меньше по отношению к рассматриваемой зоне. Это объясняется тем, что промерзание верхней зоны всегда будет проходить более интенсивно благодаря поступлению холодного воздуха. Из-за интенсивного промерзания у дневной поверхности верхней зоны, вызывающей на себя значитель-

ные миграционные потоки влаги, создаются условия для появления участков значительного обезвоживания пылевато-глинистого грунта. На фоне обезвоживания возникают деформации усадки, создающие условия для перемещения промерзающего грунта соседних участков в этом направлении. Обезвоженная промерзшая зона, испытывая давление промерзающего грунта, уплотняется. Уплотненная средняя зона вблизи фронта промерзания в дальнейшем не обезвоживается и становится зоной транзитного переноса влаги при постоянной плотности миграционного потока при достижении глинистым грунтом предельной влажности усадки [15].

Список литературы

1. Бартоломей А.А., Омельчак И.М., Юшков Б.С. Прогноз осадок свайных фундаментов. – М.: Стройиздат, 1994. – 381 с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447с.
3. Кузнецов Г.Б. Об одном подходе к описанию ползучести и релаксации материалов до разрушения // В кн.: Исследования по механике полимеров и систем. – Свердловск, 1978. – С. 115–124.
4. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 342 с.
5. Основания и фундаменты резервуаров / под ред. П.А.Коновалова. – М.: Стройиздат, 1989. – 223 с.
6. Кузнецов Г.Б. О влиянии скорости в начале процесса на ползучесть и релаксацию материалов // Проектирование, строительство и эксплуатация зданий и сооружений / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1972. – С. 21–24.
7. Бронин В.Н., Вишневский Г.Д. Прикладная теория ползучести грунтов: учеб. пособие. – Л.: ЛИСИ, 1983. – 49 с.
8. Вознесенский Е.А. Поведение грунтов при динамических нагрузках. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 286 с.
9. Сергеев Е.М. Теоретические основы инженерной геологии. – М.: Недра, 1986. – 334 с.
10. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
11. Юшков Б.С., Сергеев А.С. Экспериментальные исследования затухающей ползучести грунтов в условиях компрессии // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 458–466.

12. Iushkov B.S., Sergeev A.S. Research dependent quantities frost heaving clay soils from freezing speed // Proceedings of the 1st International Academic Conference "Applied and Fundamental Studies". – St. Louis, Missouri, USA, 2012. – P. 204–212.

13. Юшков Б.С., Сергеев А.С. Три экспериментальных лабораторных исследований связанных с образованием поперечных трещин на склонах автомобильных дорог // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 163–173.

14. Юшков Б.С., Сергеев А.С. Движение конструкции дорожной одежды автомобильных дорог по склону и образование трещин // Естественные и технические науки. – 2015. – № 8. – С. 112–122.

15. Юшков Б.С., Сергеев А.С. Линейные уравнения наследственной ползучести в глинистых грунтах // Дороги и мосты. – 2013. – С. 45–59.

References

1. Bartolomei A.A., Omel'chak I.M., Iushkov B.S. Prognoz osadok svainykh fundamentov [Forecast sediment pile foundations]. Moscow: Stroizdat, 1994. 381 p.

2. Vialov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov [Rheological basics of soil mechanics]. Moscow: Vysshaia shkola, 1978. 447p.

3. Kuznetsov G.B. Ob odnom podkhode k opisaniiu polzuchesti i relaksatsii materialov do razrusheniia [On an approach to the description of creep and relaxation of materials to fracture]. *Issledovaniia po mekhanike polimerov i sistem*. Sverdlovsk, 1978, pp. 115-124.

4. Meschian S.R. Eksperimental'naia reologiiia glinistykh gruntov [Experimental rheology of clay soils]. Moscow: Nedra, 1985. 342 p.

5. Osnovaniia i fundamenty rezervuarov [Foundations tanks]. Ed. P.A. Konovalov. Moscow: Stroizdat, 1989. 223 p.

6. Kuznetsov G.B. O vliianii skorosti v nachale protsessa na polzuchest' i relaksatsiiu materialov [On the influence of the speed at the start of creep and relaxation materials]. *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiia zdanii i sooruzhenii*: Perm': Permskii politekhnicheskii institut, 1972, pp. 21-24.

7. Bronin V.N., Vishnevskii G.D. Prikladnaia teoriia polzuchesti gruntov [Applied theory of soil creep]. Leningrad: LISI, 1983. 49 p.

8. Voznesenskii E.A. Povedenie gruntov pri dinamicheskikh nagruzkakh [The behavior of soils under dynamic loading]. Moscow: MGU, 1997. 286 p.

9. Sergeev E.M. Teoreticheskie osnovy inzhenernoi geologii [Theoretically the basics of engineering geology]. Moscow: Nedra, 1986. 334 p.
10. Tsytoich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of frozen soils]. Moscow: Vysshaia shkola, 1973. 448 p.
11. Iushkov B.S., Sergeev A.S. Eksperimental'nye issledovaniia zatukhaiushchei polzuchesti gruntov v usloviakh kompressii [Experimental studies of transient creep soil under compression]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2012, no. 6, pp. 458-466.
12. Iushkov B.S., Sergeev A.S. Research dependent quantities frost heaving clay soils from freezing speed. *Proceedings of the 1st International Academic Conference "Applied and Fundamental Studies"*. St. Louis, Missouri, USA, 2012, pp. 204-212.
13. Iushkov B.S., Sergeev A.S. Tri eksperimental'nykh laboratornykh issledovaniia svyazannykh s obrazovaniem poperechnykh treshchin na sklonakh avtomobil'nykh dorog [Three experimental laboratory studies associated with the formation of transverse cracks on the slopes of roads]. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 4, pp. 163-173.
14. Iushkov B.S., Sergeev A.S. Dvizhenie konstruktssii dorozhnoi odezhdyy avtomobil'nykh dorog po sklonu i obrazovanie treshchin [The movement of the structure of the pavement of roads on a slope, and the formation of cracks]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2015, no. 8, pp. 112-122.
15. Iushkov B.S., Sergeev A.S. Lineinye uravneniia nasledstvennoi polzuchesti v glinistykh gruntakh [Linear equations hereditary creep in clay soils]. *Dorogi i mosty*, 2013, pp. 45-59.

Получено 2.11.2015

Об авторах

Юшков Борис Семёнович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 19а, e-mail: admnpiru@mail.ru).

Сергеев Андрей Сергеевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры «Автомобильные дороги и мосты» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 19а, e-mail: zzverdvd@mail.ru).

About the authors

Boris S. Iushkov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Professor, Head of Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University (19a, Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: admpnipu@mail.ru).

Andrei S. Sergeev (Perm, Russian Federation) – Assistant, Department of Highways and Bridges, Perm National Research Polytechnic University (19a, Academician Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation, e-mail: zzverdvd@mail.ru).