

Моделирование упруговязкопластических свойств земляного полотна. Постановка задачи 1

В. М. БЕЛЬКОВ

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»),
Москва, 129626, Россия

Аннотация. Проблема устойчивости земляного полотна в последнее время приобретает особое значение в связи с переходом на обращение поездов с повышенными скоростями и осевыми нагрузками.

В настоящей статье осуществлена постановка задачи устойчивости системы глинистые грунты основной площадки — защитный слой песчаной подушки — балластная щебеночная призма в условиях воздействия гармонических колебаний на базе физико-химической механики. Суглинки или глина относятся к изотропным вязкопластическим средам, щебень и песок — к дисперсным сыпучим средам. Заполнение порового пространства слоя щебня засорителями приводит к удержанию осадков и талой влаги. При дефляционных процессах засорение щебеночного слоя растёт.

Несмотря на огромное прикладное значение, свойства гранулированных материалов до недавнего времени практически не изучались. При соответствующих условиях такой материал может вести себя и как твердое тело, и как жидкость, и как газ. Причем каждая «фаза» обладает уникальными свойствами, отличающими гранулированные материалы от всех других веществ.

Ключевые слова: балласт; засорители; гранулированные материалы; фазовые переходы; структурные особенности; глинистый грунт; деформация; динамические нагрузки

Введение. На сети железных дорог общего пользования насыпи составляют более 25% земляного полотна. Около 70% насыпей — это глинистые грунты [1]. Верхние слои — пески дисперсностью 0,1–2 мм и толщиной в среднем 0,5–1 м. Проблема устойчивости земляного полотна в последнее время приобрела особое значение в связи с планами перехода на обращение поездов с повышенными скоростями и осевыми нагрузками [1–4].

К механическим параметрам пути относятся: величины пространственной жесткости распределенных и сосредоточенных масс, участвующих в колебаниях, а также коэффициенты поглощения энергии этих колебаний. К геометрическим характеристикам относятся номинальные конструктивные размеры и фактические отступления от них в ходе эксплуатации.

В качестве подрельсовых опор в основном используются деревянные и железобетонные шпалы, которые воспринимают от колес подвижного состава через рельсы и скрепления вертикальные, боковые и продольные усилия и упруго передают их балластному

слою. Для снижения жесткости пути на железобетонных шпалах применяют упругие полимерные подкладки в промежуточных рельсовых скреплениях.

Эксплуатация пути сопровождается медленным процессом усадки (необратимая деформация) за счет истирания щебеночного камня, увеличения пористости слоя щебня и песка, уширения призмы и необратимой деформации земляной подосновы [5, 6]. Наряду с взаимопроникновением песчаной фазы в поровое пространство щебеночного слоя протекают процессы течения дисперсных сред из более нагруженных участков в места с меньшими значениями напряжений, приводящие к образованию балластных углублений [7].

Заполнение порового пространства щебня засорителями (пылевидные частицы от перевозимых грузов фракцией менее 1 мм, при истирании балласта, рельсов и колес и песок для торможения из песочниц локомотивов) приводит к удержанию воды в балластном слое. Известно, что ежегодно в балласт поступает песочная пыль из расчета 80 г/дм³ [8]. При дефляционных процессах (эоловый перенос, выдувание мелкой фракции балласта от проходящего поезда, особенно при встречном движении) засорение щебеночного слоя возрастает [9]. Экспериментально установлено, что при засорении чистого гранитного щебня барханными песками на 5–35% удельное сцепление снижается при статических нагрузках на 25%, при вибродинамических — на 29% [10].

Актуальность проблемы. Несмотря на огромное прикладное значение, свойства гранулированных материалов до недавнего времени практически не изучались. При соответствующих условиях такой материал может вести себя и как твердое тело, и как жидкость, и как газ. Причем каждая «фаза» обладает уникальными свойствами, отличающими гранулированные материалы от всех других веществ.

Теория динамики деформирования для сыпучих сред. Если к слою щебня или песка прикладывается вибрационное поле, то энергия этого движения передается и отдельным гранулам. В результате при достаточно высокой амплитуде дрожания наступает фазовый переход: вся масса гранулированного материала приходит в движение, начинает течь из-за снижения трения

■ E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (В. М. Бельков)

между частицами и ведет себя как некая «гранулированная жидкость». Текучее состояние щебеночного камня наступает при значительно бóльших значениях амплитуды вибрации из-за его угловатой формы. Теория динамики для сыпучих сред строится на постулатах Ландау — Гинзбурга [11]: 1) между песчинками нет сил притяжения; 2) столкновения песчинок — неупругие; 3) между песчинками существует трение. Это кардинально меняет дело и приводит к возникновению двух связанных друг с другом явлений: неустойчивости относительно кластеризации и спонтанного рождения вихрей. Первое явление означает, что в системе возникают неоднородности плотности, которые не исчезают, а, наоборот, усиливаются, что приводит к распаду песка на отдельные кластеры. Причина довольно проста: если в какой-то области увеличилась концентрация частиц, то это приводит к увеличению числа столкновений, что в силу их неупругого взаимодействия влечет за собой падение скорости частиц относительно окружения. Это значит, что в этом районе нарушится баланс потоков: частиц, влетающих в этот объем, будет больше, чем вылетающих. А это приводит к дальнейшему увеличению локальной плотности: неоднородность растет. На рис. 1 показано несколько последовательных стадий эволюции релаксации гранулированного материала и ясно видно возникновение кластеров и их развитие (иллюстрация взята из работы [12]). В результате возникает гидродинамическая неустойчивость, начинается конвекция, спонтанно появляются вихри (рис. 2).

Несмотря на то что в последнее десятилетие появилось огромное количество работ, посвященных физике гранулированных материалов, их подавляющее большинство — это компьютерное моделирование явления, не более того. Настоящее же теоретическое описание поведения гранулированных материалов находится пока в зачаточном состоянии. Оказывается, что отличия гранулированных материалов от обычных веществ не только приводят к новым интересным явлениям, но и значительно усложняют их описание.

Стандартный подход к теоретическому описанию гранулированных жидкостей заключается в следующем. Берутся уравнения обычной гидродинамики и адаптируются с учетом специфики гранулированных материалов. Далее вводится дополнительный член, описывающий диссипацию энергии из-за неупругого столкновения частиц. Наконец, выбирается некая реологическая модель материала, описывающая вязкоупругие свойства, т. е. то, как материал деформируется и течет под действием напряжений. Например, в работе [12] на основании таких уравнений теоретически исследовалась текучесть «гранулированной жидкости». В частности, было отмечено аномально быстрое увеличение коэффициента вязкости с ростом плотности, точнее, при приближении плотности к критическому значению, после которого в материале

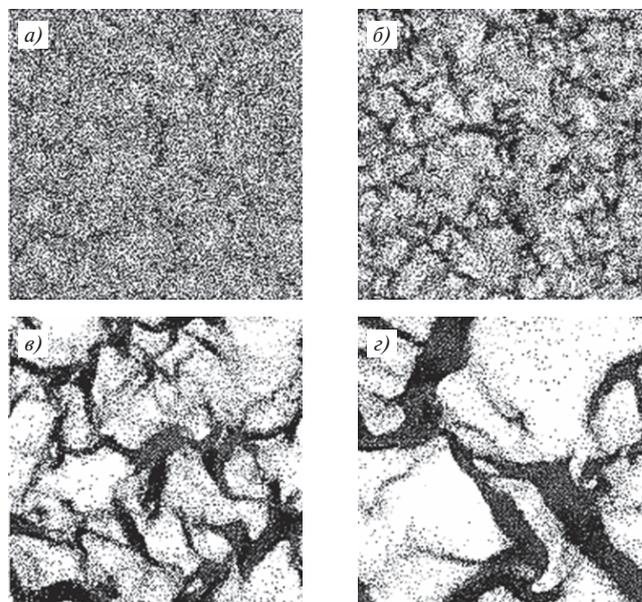


Рис. 1. Последовательные этапы кластеризации в гранулированных материалах при приложении гармонической нагрузки [12]: а — плотно упакованный песок через 0,64 с от начала приложения нагрузки при увеличении в 39 раз; б — начало процесса кластеризации песка через 2,6 с (увеличение в 70 раз); в — кластеризация песка через 41 с (увеличение в 670 раз); г — завершение процесса кластеризации, время 447 с (увеличение в 5258 раз)

Fig. 1. Consecutive steps of clustering of granular materials when applying harmonic load [12]:

а — densely packed sand after 0.64 seconds from the beginning of load application at a magnification of 39 times; б — start of the process of sand clustering after 2.6 seconds (70 times magnification); в — clustering of sand after 41 s (670 times magnification); г — end of the clustering process, after 447 s (5258 times magnification)

течение останавливается и песок приобретает упругие свойства. В работе [12] также исследовались нелинейные гидродинамические уравнения в достаточно общем виде, без выбора конкретной модели для той или иной характеристики «жидкости». Авторы показывают, что можно ввести некий параметр порядка, который определяется через поле скоростей частиц. Возникающие же уравнения можно переписать в виде уравнений на этот параметр порядка. Эти уравнения будут содержать эффективный потенциал, минимум которого и дает решение для параметра порядка,

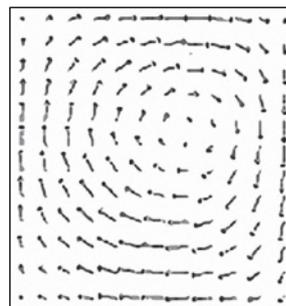


Рис. 2. Конвекция в гранулированных материалах при приложении гармонической нагрузки [12]

Fig. 2. Convection in granular materials when applying harmonic load [12]

а значит, и решение исходной задачи об эволюции системы. В результате вся теоретическая конструкция приобретает совершенно новый смысл: теория становится разновидностью общей теории фазовых переходов второго рода и критических явлений вообще Гинзбурга — Ландау. В целом же теория гранулированных материалов пока только делает свои первые шаги: еще не выработана однозначная парадигма этого раздела теоретической физики.

Постановка задачи моделирования. Из вышесказанного следует, что модель Кельвина — Фойгта можно применять для хорошо уплотненного защитного песчаного слоя, когда щебеночный и песчаный слои не загрязнены биологическими остатками сгнивших растений, пылеватыми остатками разрушения щебня, оксидами железа и нефтепродуктами. Как показано в работах [5–7], при выпадении осадков осенью или появлении вешних талых вод происходят выплески балласта в среднем на один слой толщиной 30–35 мм вследствие снижения трения между гранулами щебня.

Из-за неправильной формы щебеночного камня пористость превышает 40–45%, и при эксплуатации пути пористость постепенно увеличивается до 50–60% [5, 6]. Для описания поведения железнодорожного полотна в настоящее время используют модель Кельвина — Фойгта. Когда снимается напряжение, форма материала постепенно возвращается до недеформированного состояния. Главное соотношение выражается в виде линейного дифференциального уравнения

$$T(\tau) = ES_z(\tau) + \eta_{ш} \dot{S}_z(\tau), \quad (1)$$

где $T(\tau)$ — напряжение вдоль оси Z ; E — модуль упругости щебеночного слоя; $S_z(\tau)$ — деформация вдоль оси Z ; $\eta_{ш}$ — структурная вязкость.

Но по мере загрязнения порового пространства щебня его свойства приближаются к свойствам упруговязкопластической жидкости. Для описания поведения сухого песка также можно использовать модель Кельвина — Фойгта для довольно большой статической нагрузки, но только на начальной стадии — после уплотнения песка до близкой к гексагональной укладке. При динамических нагрузках от проходящих составов сухой песок теряет свою плотно упакованную кластерную структуру (см. рис. 1), его пористость увеличивается, и возникают конвективные потоки, спонтанно появляются вихри. В таком состоянии для описания поведения влажного песка лучше использовать модель Шведова — Бингама:

$$T(\tau) = T_0(w) + \eta_{п} \dot{S}_z(\tau), \quad (2)$$

где $T_0(w)$ — предельное напряжение сдвига, функция влажности; $\eta_{п}$ — структурная вязкость песка.

При воздействии напряжения для самой плотной гексагональной упаковки щебеночного камня с пористостью 35% наблюдается снижение напряжения по оси Z , и площадь приложения напряжения увеличивается

до середины расстояния между шпалами. В водонасыщенном состоянии песчаный грунт переходит в суспензию (пльвунное состояние), и в таком состоянии песок ведет себя как ньютоновская жидкость, т. е.

$$T(\tau) = \eta_{п} \dot{S}_z(\tau). \quad (3)$$

Песок, как и все материалы, включая бетон, обладает свойством ползучести — деформация уплотнения у него развивается во времени, подчиняясь логарифмическому закону. Песок представляет собой как бы крупномасштабную модель хаотически расположенных и слабо между собой связанных гранул — «молекул жидкости» и аналогично ей подчиняется статистическому закону вязкого течения [13]. Но, конечно, этот процесс протекает у песка в значительно менее выраженной форме, чем у глинистых грунтов.

Глинистый грунт — это грунт, который более чем на половину состоит из очень мелких частиц, размером менее 0,01 мм, которые имеют форму чешуек или пластин. Расстояния между этими частицами образуют щелевые поры, и они, как правило, заполняются водой, которая хорошо удерживается в глине, потому что сами частички глины воду не пропускают. Глинистые грунты имеют высокую пористость, т. е. высокое соотношение объема пор к объему грунта. Это соотношение колеблется от 0,5 до 1,1 и является характеристикой степени *уплотнения грунта*.

Глинистый грунт очень хорошо удерживает в себе влагу и никогда не отдает ее всю, даже при высыхании, поэтому относится к *пучинистым*. Влага, содержащаяся в грунте, при замерзании превращается в лед и расширяется, тем самым увеличивая объем всего грунта. Все грунты, содержащие глину, подвержены этому негативному явлению, и чем больше содержание глины, тем сильнее проявляется это свойство.

Капиллярные силы в совокупности с пластичностью частиц глины обеспечивают пластичность глинистого грунта. И чем больше содержание глины, тем пластичнее будет грунт. В зависимости от содержания частиц глины их классифицируют на супеси, суглинки и глину. Супесь песчаная или пылеватая — это глинистый грунт, который содержит по массе 50% песчаных частиц (2–0,05 мм). Супесь наименее пластичная из всех глинистых грунтов, число пластичности которой $1 \leq I_p \leq 7\%$. Из-за высокого содержания песка супесь имеет сравнительно низкую пористость: от 0,5 до 0,7. Соответственно она может содержать меньше влаги и, следовательно, быть меньше подвержена пучению. При пористости 0,5 (т. е. при хорошем уплотнении) в сухом состоянии *несущая способность* супеси составляет 3 кг/см², при пористости 0,7 — 2,5 кг/см² [13, 14].

Суглинок, легкий песчаный или пылеватый, тяжелый песчаный или пылеватый, — это глинистый грунт, который содержит по массе 40% песчаных частиц (2–0,05 мм) [13]. Число пластичности суглинка

$7 \leq I_p \leq 12\%$ у легкого и $12 \leq I_p \leq 17\%$ у тяжелого. Пористость суглинка выше, чем у супеси, и колеблется от 0,5 до 1. Суглинок может содержать больше воды и больше, чем супесь, подвержен пучению. Сухой суглинок с пористостью 0,5 имеет несущую способность 3 кг/см^2 при пористости $0,7 - 2,5 \text{ кг/см}^2$ [14].

Глина — это грунт, содержащий по массе 40% песчаных частиц ($2 - 0,05 \text{ мм}$) [13]. Число пластичности глины $17 \leq I_p \leq 12\%$ у легкой или песчанистой $17 \leq I_p \leq 27\%$, у тяжелой — 27%. Пористость глины может достигать 1,1, она сильнее всех остальных грунтов подвержена морозному пучению, потому что может содержать очень большое количество влаги. При пористости 0,5 глина имеет несущую способность 6 кг/см^2 , при пористости $0,8 - 3 \text{ кг/см}^2$ [14].

Все глинистые грунты под действием нагрузки подвержены осадке, причем занимает она очень много времени — несколько сезонов. Осадка будет тем больше и дольше, чем больше пористость грунта. Чтобы уменьшить пористость глинистого грунта и тем самым улучшить его характеристики, грунт уплотняют. Минимальная пористость глинистого грунта 0,3 будет у максимально уплотненного слоя, который залегает ниже глубины промерзания, и его можно считать несжимаемым.

Насыщенный влагой глинистый грунт становится слишком пластичным, а насыщаться влагой он может в том случае, когда близко находятся грунтовые воды — и весной, и осенью. Если уровень грунтовых вод высокий и менее чем в метре от глинистого слоя, то приведенные выше значения несущей способности глины, суглинка и супеси нужно делить на 1,5 [14].

Прочностные свойства глинистого грунта в основном зависят от структурных особенностей, среди которых наиболее важными являются структурные связи между отдельными частицами и агрегатами. Наличие этих связей обусловлено молекулярными силами электромагнитной природы. Опираясь на работы академика П. А. Ребиндера, профессоров Н. Н. Маслова, Н. Я. Денисова, А. К. Ларионова, У. В. Лемба и др., Н. А. Цытович [14–17] выделил основные виды структурных связей в грунтах [15]: 1) водно-коллоидные связи; 2) кристаллизационные — хрупкие (жесткие); 3) необратимые — водостойкие и неводостойкие. Водно-коллоидные связи обуславливаются электромолекулярными силами взаимодействия между минеральными частицами и пленками воды и коллоидными оболочками. Величина этих сил зависит от толщины пленок воды; при увеличении влажности тяжелых суглинков и глины и, соответственно, толщины пленок воды водно-коллоидные связи уменьшаются до значений, близких к нулю. Вместе с тем данные связи обратимы и пластичны. Кристаллизационные связи обусловлены действием сил химического сродства, они образуют в точках контакта с минеральными частицами новые поликристаллические соединения

(оксиды железа и кремния). Это хрупкие и не восстанавливающиеся при разрушении связи. Кристаллизационные связи присущи, например, скальным грунтам, и энергия этой связи соизмерима с энергией химической связи отдельных атомов.

Выводы. 1. Краткий анализ физико-механических свойств материалов, используемых при строительстве железнодорожного полотна, показал, что для сыпучих сред (щебень и песок) в научно-технической литературе существуют разрозненные несистематизированные сведения, полученные при различных физических условиях.

2. Несистематизированные сведения о физико-механических свойствах сыпучих сред не позволяют сформулировать относительно завершённую динамическую теорию для широкого диапазона статических и динамических нагрузок, виброускорений и влажности применительно к условиям на железнодорожном транспорте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наумов В. В. Обеспечение работоспособности железнодорожных насыпей на участках обращения поездов с повышенными осевыми нагрузками: автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М., 2013. 23 с.
2. Наумов В. В. Надежность земляного полотна на участках обращения тяжеловесных поездов // Вестник ДИИТ. 2009. № 5. С. 183–186.
3. Наумов В. В., Виноградов В. В. Земляное полотно при воздействии повышенных осевых нагрузок // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 1. С. 23–24.
4. Наумов В. В., Виноградов В. В. Комплексная оценка работоспособности насыпей // Мир транспорта. 2012. № 2. С. 56–61.
5. Пейч Ю. Л. Взаимодействие элементов пути в условиях засорения и увлажнения: автореф. на соиск. ст. д-ра техн. наук по спец. 05.22.06. — железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог. М., 2011. С. 23.
6. Смоляницкий Л. А., Сычѐва А. В. Влияние капиллярных процессов в земляном полотне на развитие дефектов // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 4. С. 20–21.
7. Дыдышко П. И., Шарапов С. Н. Защитные слои подрельсового основания // Вестник ВНИИЖТ. 1998. № 4. С. 23–27.
8. Экологические требования к содержанию, ремонту пути и полосу отвода: утв. заместителем руководителя Департамента пути и сооружений Н. П. Кемежем 21 сентября 2000 г. / ПТКБ ЦП МПС. 32 с.
9. Бельков В. М., Антипов Б. В. Физико-химические основы устойчивости пути // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 12. С. 21–24.
10. Колос А. Ф., Гурсунов Х. И., Николайтист Д. С. Исследование прочностных свойств балластного материала, засоренными барханскими песками // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона», 2007–2012. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine> (дата обращения: 14.05.2013 г.).
11. Wakou J., Brito R., Ernst M., Towards a Landau-Ginzburg-type Theory for Granular Fluids, Physical Review and Letters, 1999, No. 83, p. 4069.
12. Bocquet L., Losert W., Schalk D., T. C. Lubensky, J. P. Gollub Granular Shear Flow Dynamics and Forces: Experiment and Continuum Theory // Physical Review E, 2002, art. no. 011307, 6501 1307, p. 1–19.
13. ГОСТ 25100–2011. Грунты. Классификация.
14. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строит. вузов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
15. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1971. 368 с.

16. Методы прикладной вязкоупругости / А.А. Адамов [и др.]. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. 412 с.

17. Машенко А.В., Пономарев А.Б., Сычкина Е.Н. Специальные разделы механики грунтов и механики скальных грунтов: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед.-политехн. ун-та, 2014. 176 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛЬКОВ Владимир Максимович,

д-р физ.-мат. наук, научный консультант НКЦ, АО «ВНИИЖТ»

Статья поступила в редакцию 27.07.2016 г., принята к публикации 19.10.2016 г.

Modelling of elastoviscoplastic properties of the subgrade. Problem statement 1

V.M. BEL'KOV

Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

Abstract. A brief analysis of the physical and mechanical properties of materials, used in the construction of the rail bed, has shown that in scientific and technical literature there is scattered unsystematic information obtained under different physical conditions for bulk materials (gravel and sand).

Unstructured data on the physical and mechanical properties of granular materials does not allow formulating a relatively complete dynamic theory for a wide range of static and dynamic loads, vibration acceleration and humidity conditions in relation to rail transport.

In this article the authors formulate the problem of stability of the system "clayey soils in the main area – protective layer of sand cushions – ballast crushed stone prism" under the impact of harmonic oscillations on the basis of physico-chemical mechanics. Loam or clay belongs to isotropic visco-plastic media, sand and gravel – to disperse granular media. Filling the pore space of the gravel with weeds leads to the retention of precipitation and melt liquid. During deflation processes clogging of the gravel layer is increased.

Despite the enormous practical value, properties of granular materials, until recently, practically not been studied. Under appropriate conditions this material may behave as a solid and as liquid and as gas. Each phase has unique properties that distinguish granular materials from all other substances.

If the vibration field is applied to layer of gravel or sand, the energy of this motion is passed even through individual granules. As a result, with sufficiently high amplitude of jitter a phase transition occurs: the entire mass of granular material gets in motion, begins to flow due to reduction in friction between the particles and behaves as a kind of "granular liquid". Fluid state of gravel stone occurs at much large values of the amplitude of vibration because of its angular shape. The result is a hydrodynamic instability, then convection starts and the vortices spontaneously appear.

Keywords: ballast; weeds; granulated materials; phase transitions; structural features; clayey soils; deformations; dynamic loads

DOI: <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2016-75-6-334-338>

REFERENCES

1. Naumov V.V. *Obespechenie rabotosposobnosti zheleznodorozhnykh nasypov na uchastkakh obrashcheniya poezdov s povyshennymi osevyimi nagruzkami*. Kand. tekhn. nauk diss. [Ensuring functionality of railway embankments on circulation areas of trains with high axial loads. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2013, 23 p.

2. Naumov V.V. *Nadezhnost' zemlyanogo polotna na uchastkakh obrashcheniya tyazhelovesnykh poezdov* [Reliability of subgrade in areas handling heavy haul trains]. Vestnik DIIT, 2009, no. 5, pp. 183 – 186.

3. Naumov V.V., Vinogradov V.V. *Zemlyanoe polотно pri vozdeystvii povyshennykh osevykh nagruzok* [Subgrade under the influence of high axial loads]. Put' I putevoe khozyaistvo [Track and track facility], 2011, no. 1, pp. 23 – 24.

4. Naumov V.V., Vinogradov V.V. *Kompleksnaya otsenka rabotosposobnosti nasypov* [Comprehensive assessment of functionality of embankments]. Mir transporta [World of transport], 2012, no. 2, pp. 56 – 61.

5. Peych Yu.L. *Vzaimodeystvie elementov puti v usloviyakh zasoreniya i uvlazhneniya*. Dokt. tekhn. nauk diss. [Interaction of track elements in terms of clogging and moistening. Dr. Sci. diss.]. Moscow, 2011, 23 p.

6. Smolyanitskiy L.A., Sycheva A.V. *Vliyaniye kapillyarnykh protsessov v zemlyanom polotne na razvitie defektov* [Influence of capillary processes in subgrade on the development of defects]. Put' I putevoe khozyaistvo [Track and track facility], 2012, no. 4, pp. 20 – 21.

7. Dydyshko P.I., Sharapov C.N. *Zashchitnye sloi podrel'sovogo osnovaniya* [Protective layers of rail base]. Vestnik VNIIZhT [Vestnik of the Railway Research Institute], 1998, no. 4, pp. 23 – 27.

8. *Environmental requirements for maintenance, repair of tracks and the right of way*. Approved by Deputy Head of the Department of Rails and Structures N.P. Kemezh on September 21, 2000. PTKB TsP MPS, 32 p.

9. Bel'kov V. M., Antipov B.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy us-toychivosti puti* [Physico-chemical basis of the stability of the track]. Put' I putevoe khozyaistvo [Track and track facility], 2013, no. 12, pp. 21 – 24.

10. Kolos A.F., Tursunov Kh.I., Nikolaytist D.S. *Issledovanie prochnostnykh svoystv ballastnogo materiala, zasorennymi barkhannymi peskami* [Investigation of strength properties of ballast material, clogged with sand dunes]. Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Inzhenernyy vestnik Dona" [Electronic scientific journal "Engineering Bulletin of Don region"], 2007 – 2012. May 15, 2013. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine>

11. Wakou J., Brito R., Ernst M. *Towards a Landau-Ginzburg-type Theory for Granular Fluids*. Physical Review Letters, 1999, no. 83, p. 4069.

12. Bocquet L., Losert W., Schalk D., Lubensky T.C., Golub J.P. *Granular Shear Flow Dynamics and Forces: Experiment and Continuum Theory*. Physical Review E, 2002, no. 011307, 6501 1307, pp. 1 – 19.

13. GOST 25100–2011 *Soils. Classification*. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 44 p.

14. Vyalov S.S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov*. Ucheb. posobie dlya stroit. vuzov [Rheological basics of soil mechanics. Manual for building schools]. Moscow, Vysshaya shkola [Higher School] Publ., 1978, 447 p.

15. Gol'dshteyn M.N. *Mekhanicheskie svoystva gruntov* [Mechanical properties of soils]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971, 368 p.

16. Adamov A.A., Matveenko V.P., Trufanov N.A., Sharda-kov I.N. *Metody prikladnoy vyazkouprugosti* [Methods of applied visco-elasticity]. Ekaterinburg, Uro RAN Publ., 2003, 412 p.

17. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B., Sychki-na E.N. *Spetsial'nye razdeli mekhaniki gruntov i mekhaniki skal'nykh gruntov*. Ucheb. posobie [Special sections of soil mechanics and mechanics of rocky soils. Manual]. Perm', Perm' National Research-Polytechnic University Publishing, 2014, 176 p.

ABOUT THE AUTHOR

BEL'KOV Vladimir Maksimovich,

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Scientific Adviser of Science and consultancy center (NKTs), JSC "VNIIZhT"

Received 27.07.2016

Accepted 19.10.2016

E-mail: belkov.vladimir@vniizht.ru (V.M. Bel'kov)