УДК 625.12 DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-85-93

Влияние ударных сил на прочностные характеристики железнодорожного земляного полотна

О. Г. КРАСНОВ, Н. Н. АСТАНИН

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, 140402, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследований по влиянию ударных сил на прочностные характеристики грунтов основной площадки земляного полотна. Анализ расчетных предельных напряжений от действия ударных сил взаимодействия колес и рельсов выполнен с использованием метода предельного равновесия на насыпи, сложенной из глинистых грунтов. Установлено, что уровни виброколебаний с амплитудами более 300 мкм на переувлажненных грунтах приводят к снижению предельных значений напряжений на основной площадке земляного полотна в 1,6…1,7 раза.

Ключевые слова: ударные силы; виброперемещения; предельное равновесие; линии скольжения; напряжения; глинистые грунты

Состояние вопроса. Наличие дефектов на поверхности катания колес подвижного состава определяет возникновение дополнительных сил инерции необрессоренных масс, которые оказывают ударное воздействие на железнодорожный путь. Такие силы приводят к повышенному силовому и вибродинамическому воздействию на все элементы железнодорожного пути, в том числе на основную площадку земляного полотна. Исследованию влияния эксплуатационных нагрузок на прочностные характеристики грунтов железнодорожного земляного полотна посвящено значительное количество работ. Исследованиями установлено, что:

– при вибрационном воздействии на глинистые грунты происходит снижение их прочностных характеристик (угла внутреннего трения φ, удельного сцепления C, модуля деформации $E_п$) [1, 2, 3, 4];

– разупрочнение грунта при вибрационном воздействии является временным — после снятия нагрузки прочность постепенно восстанавливается.

Такое явление в земляном полотне называется тиксотропией. Воздействие от поездной нагрузки вызывает тиксотропное понижение прочности глинистых грунтов в первые 25...40 с [1]. Восстановление «нарушенной» прочности происходит в два этапа. На первой стадии происходит восстановление взаимной ориентации глинистых частиц, на второй — увеличение прочности глинистых грунтов за счет уменьшения толщины гидратных оболочек и сближения глинистых частиц. Чем выше влажность грунтов, тем быстрее происходит тиксотропное восстановление прочности [3];

– в зоне стыков от ударно-динамических сил на основной площадке земляного полотна виброскорости грунта в 4,8 раза выше, чем в средней части рельса. На бровке и в верхней части откосов виброскорости повышаются в 1,86...3 раза. Приблизительно также стыки влияют на горизонтальные колебания грунта [5].

Экспериментальные исследования. Специалистами АО «ВНИКТИ» проведены исследования ударного взаимодействия колес с дефектами в виде ползунов, наваров, неравномерного проката и железнодорожного пути [6, 7]. В процессе исследований установлены зависимости между силами ударного взаимодействия и уровнями вибраций в балластном слое и основной площадке земляного полотна (далее — ОПЗП). На рис. 1 представлены характерные осциллограммы изменения ударных сил взаимодействия колеса с дефектом и рельсом и вибровоздействия на балластный слой и ОПЗП.

В результате проведенных исследований установлено, что:

– при наличии на поверхности катания колес дефектов в виде ползунов и наваров со сверхнормативными размерами более $h = 3$ мм, неравномерного проката более $h = 4$ мм возникали импульсные ударные силы величиной 360...530 кН, которые инициировали ускорения высокого уровня в балластном слое и на основной площадке земляного полотна;

– при движении грузовых вагонов и локомотивов со скоростью $v = 60$ км/ч уровни виброперемещений на основной площадке земляного полотна находились в пределах 40...60 мкм, в балластном слое — 85...126 мкм, при ударном воздействии значения виброперемещений в вертикальном направлении в балластном слое достигали 420...610 мкм, на ОПЗП — 220...370 мкм;

– процесс изменения ускорений и виброперемещений в балластном слое и на основной площадке земляного полотна носил импульсный кратковременный характер со временем действия $t = 0{,}01...0{,}02$ с,

E-mail: krasnovog@mail.ru (О. Г. Краснов)

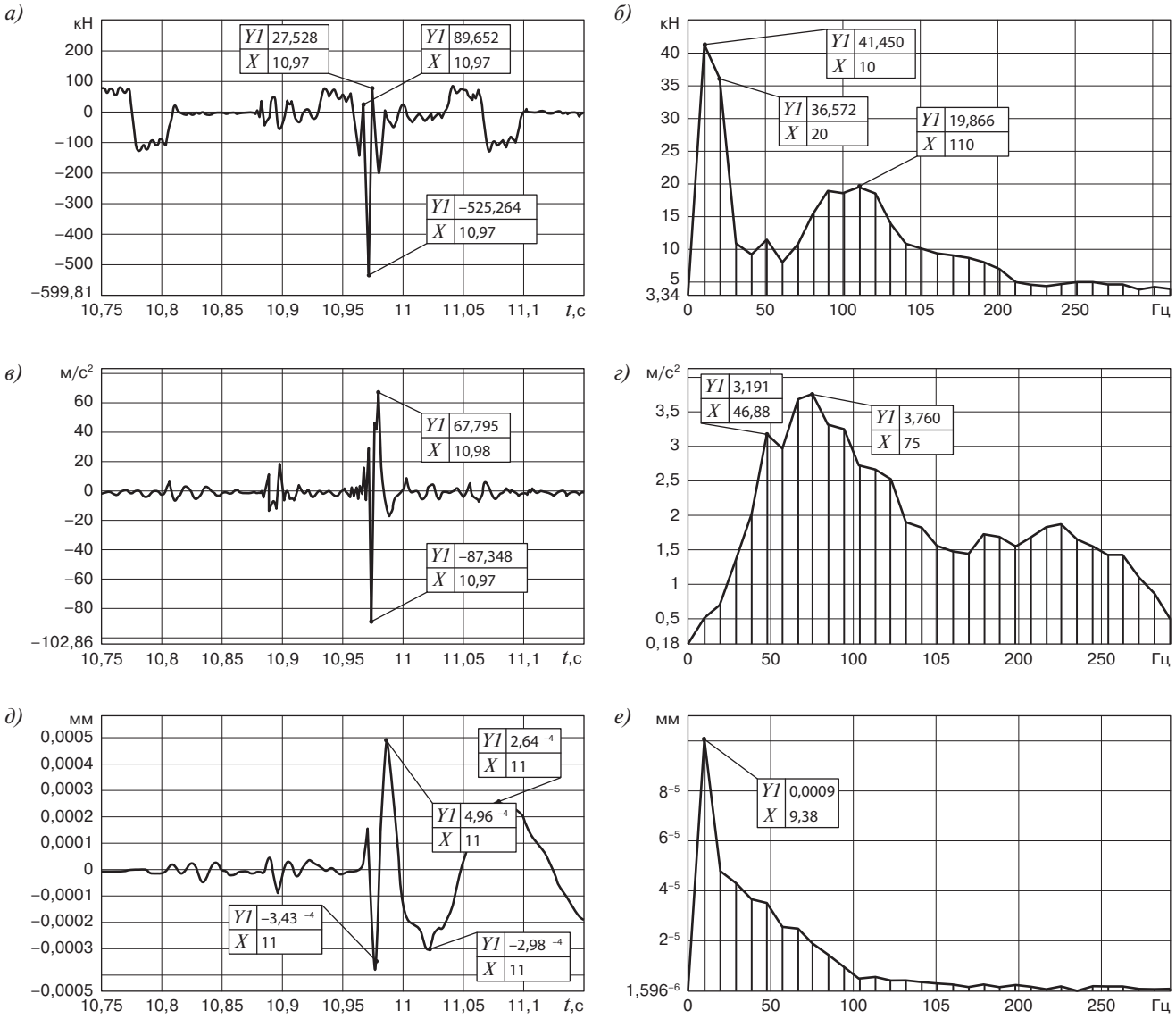


Рис. 1. Динамические процессы в подшпальном основании при ударном взаимодействии колеса с ползуном $h = 4$ мм и рельсом. Вагон груженый. Скорость движения $v = 50$ км/ч: *а* — динамическая ударная сила; *б* — автоспектр динамической ударной силы; *в* — ускорения в балластном слое при ударном воздействии; *г* — автоспектр ускорений в балластном слое; *д* — виброперемещения на ОПЗП; *е* — автоспектр виброперемещений на ОПЗП

Fig. 1. Dynamic processes in the under-sleeper base with impact interaction of the wheel with the $h = 4$ mm slider and the rail. The car is loaded. Speed $v = 50$ km/h: *а* — dynamic impact force; *б* — autospectrum of dynamic impact force; *в* — acceleration in the ballast layer under impact; *г* — autospectrum of accelerations in the ballast layer; *д* — vibro-displacement in the subgrade support; *е* — autospectrum of vibro-displacement in the subgrade support

включал 1...2 колебания, которые имели характер быстрозатухающего процесса.

При взаимодействии колеса с ползуном $h = 4$ мм грузового вагона при скорости $v = 50$ км/ч возникает импульсная ударная сила величиной $P_{уд} = 525$ кН. Спектральный анализ ударного процесса взаимодействия колеса с дефектом и рельса показал, что наибольшие амплитуды гармонических составляющих колебаний рельса сосредоточены в диапазоне частот 10...20 Гц, наблюдается также усиление колебаний рельса в диапазоне 60...140 Гц. Ударное воздействие на рельсошпальную решетку инициировало кратковременные импульсные колебания высокого уровня в балластном слое. Колебательный процесс асимметричный, с уровнями вибраций относительно исходного положения до $W_{в}^{вниз} = -87{,}4$ м/с^2 и $W_{в}^{вверх} = 67{,}8$ м/с^2. Спектр колебаний широкополосный, с диапазоном частот от 0 до 300 Гц, наибольшие амплитуды гармонических составляющих сосредоточены в диапазоне частот 50...120 Гц со снижением по мере увеличения частот колебаний.

Ударный импульс инициировал колебательный процесс и на ОПЗП. При этом так же, как и ускорения, колебательный процесс носил асимметричный характер с виброперемещениями $PP_{в}^{вниз} = -343$ мкм, $PP_{в}^{вверх} = 496$ мкм.

Спектр гармонических составляющих амплитуд сил широкополосный, с полосой изменения частот от 0 до 100 Гц с наиболее высокими уровнями гармонических составляющих колебательного процесса в диапазоне от 0 до 20 Гц с равномерным снижением при изменении частот от 20 до 100 Гц.

На ОПЗП процесс колебаний виброперемещений сосредоточен в диапазоне частот до 100 Гц с усилениями на частотах 0...20 Гц, что подтверждает факт эффективной фильтрации высокочастотных составляющих колебаний в балластном слое.

В горизонтальной плоскости вдоль и поперек пути при ударе развивались колебания с уровнями в 1,6...2,1 раза ниже, чем в вертикальном направлении.

Особенности конструкции балластного слоя на отечественных железных дорогах. В соответствии с ЦПИ-36 «Руководство по определению физико-механических характеристик балластных материалов и грунтового земляного полотна» конструкция верхнего строения пути, которая находится длительное время в эксплуатации, содержит под балластом слой щебня с засорителем. В соответствии с СП119.13330.2012 «Свод правил железной дороги колеи 1520 мм» толщина слоя накопленных материалов достигает 1...1,4 м. На границе раздела этого слоя и глинистых грунтов земляного полотна вследствие пластических деформаций образовались балластные углубления — корыта и ложа. Влажность глинистых грунтов в местах с этими углублениями в 1,2...1,3 раза больше, чем при ровной со стоком площадке. Из-за повышенной влажности происходят просадки пути, возникают пучины, проявляются сплывы и оползания откосных частей насыпей. Проведенными исследованиями [4, 8, 9] установлено, что с увеличением толщины слоя балласта и накопленных материалов из-за загасания силового воздействия уменьшаются уровни напряжений и виброперемещений на ОПЗП.

В связи с вышеизложенным выполнено исследование влияния повышенных уровней вибровоздействий на основную площадку земляного полотна при толщине слоя балласта 0,4 м для вновь построенных линий. При большей толщине слоя балласта необходимо откорректировать величины напряжений и виброперемещений на ОПЗП с учетом загасания сил взаимодействия колес и рельсов по известным зависимостям [4, 9].

Теоретические исследования. Ниже представлены исследования влияния ударных сил на тиксотропное снижение прочностных характеристик грунтов (импульсного воздействия вибраций высокого уровня от ударно-динамических сил, генерируемых дефектами на поверхности катания колес со сверхнормативными размерами). Допускалось, что от действия дополнительных инерционных сил в грунтах железнодорожного земляного полотна происходит дальнейшее снижение «нарушенной» прочности с одновременным повышением нормальных напряжений на ОПЗП.

Исследование несущей способности железнодорожного земляного полотна выполнили с использованием теории предельного равновесия. Применимость этой теории для инженерных расчетов и хорошая сходимость теоретических и практических значений нагрузок подтверждается работой [4].

Предельное напряженное состояние подшпального основания — такое состояние, при котором минимальное приращение статической или динамической нагрузки приводит к возникновению в балласте и земляном полотне сплошных поверхностей скольжения, на которых сдвигающие силы превышают удерживающие. Поверхности скольжения представляют собой совокупность отдельных площадок, образовавшихся при превышении удерживающих сил от воздействия сдвигающих. Касательные плоскости к поверхностям скольжения совпадают с площадками скольжения [1, 2]. Отдельные площадки скольжения могут образовываться в грунтовой среде и при нагрузках, не превышающих предельные, но они не вызывают деформаций массива. Лишь при нагрузках не ниже предельных формируются группы площадок — целые поверхности, по которым происходит сдвиговая деформация грунтового массива.

Для решения задачи исследования влияния ударных сил на снижение прочностных характеристик грунтов ОПЗП использовалась теория предельного равновесия земляного полотна при действии вибродинамической нагрузки [4, 10]. Данная задача сводится к совместному решению дифференциальных уравнений предельного напряженного состояния земляного полотна при прочностных характеристиках грунтов, изменяющихся под воздействием вибродинамической нагрузки. Принимая согласно рис. 2 расположение координатных осей, имеем систему уравнений следующего вида [2, 4]:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \sigma_{я}}{\partial z} + \dfrac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = \gamma \cos\theta + \rho \dfrac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \dfrac{\partial \tau_{уя}}{\partial z} + \dfrac{\partial \sigma_{y}}{\partial y} = \gamma \sin\theta + \rho \dfrac{\partial^2 \upsilon}{\partial t^2} \\ \sigma_1 + \sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2C_d ct\varphi_d)\sin\varphi_d \end{cases}$$

где $\tau_{zy} = \tau_{yz}$ — составляющие касательных напряжений; ρ — плотность грунта $\rho = \gamma / g$; g — ускорение свободного падения $g = 9{,}81$ м/с^2; γ — объемная масса

грунта; u, υ — перемещение при колебаниях в направлении осей Z и $У$; C_d, φ_d — удельное сцепление и угол внутреннего трения глинистого грунта, воспринимающего вибродинамические нагрузки.

Данная задача решена применительно к железнодорожному земляному полотну, сложенному глинистыми грунтами с учетом изменения зависимости распространения колебаний в откосной части насыпи от угла заложения откоса [4]. Получены уравнения характеристик дифференциальных соотношений вдоль линий скольжения. В дальнейшем этот метод получил развитие в работах [8, 9] и др.

Специалистами ВНИКТИ разработана программа для решения уравнений характеристик и дифференциальных соотношений с использованием метода конечных разностей. Расчеты проведены для насыпи, сложенной из глинистых грунтов. Схема насыпи к определению граничных условий представлена на рис. 3.

Геометрические параметры поперечного сечения железнодорожной насыпи, объемные характеристики грунтов, коэффициенты, характеризующие снижение прочностных характеристик грунтов, представлены в табл. 1.

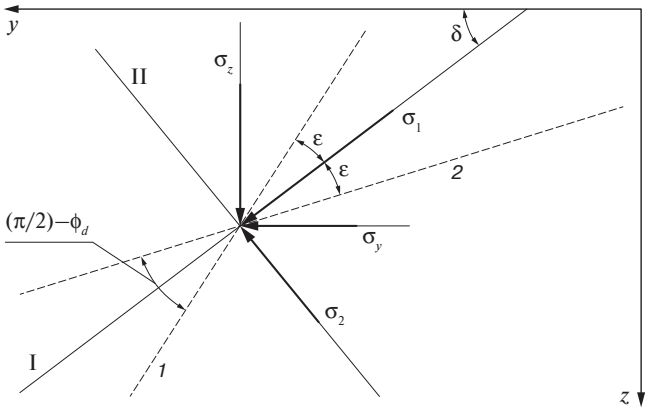


Рис. 2. Схема взаимного расположения действующих напряжений, главных площадок и линий скольжения:
I, II — главные площадки действия максимальных и минимальных главных напряжений; *1, 2* — взаимное расположение линий скольжения относительно площадок главных напряжений; σ_z,σ_y — составляющие нормальных напряжений; σ_1,σ_2 — максимальные и минимальные главные напряжения; ε — угол между линией действия максимальных главных напряжений и линией скольжения; φ_d — угол внутреннего трения грунта, воспринимающего вибродинамическую нагрузку [4]

Fig. 2. Scheme of the mutual arrangement of operating stresses, main areas and slip lines:
I, II — the main areas for the action of maximum and minimum principal stresses; *1, 2* — mutual arrangement of slip lines relative to the main stress areas; σ_z,σ_y — components of normal stresses; σ_1,σ_2 — the maximum and minimum principal stresses; ε — the angle between the line of action of the maximum principal stresses and the slip line; φ_d — the angle of internal friction of the soil that perceives the vibrodynamic load [4]

Коэффициенты снижения физико-механических характеристик грунтов от вибровоздействия (коэффициент относительного снижения угла внутреннего трения K_φ, коэффициент относительного снижения удельного сцепления K_c, коэффициент виброразрушения K_1) выбраны из табл. 2.1 и 4.1 [4].

Величины удельного сцепления C и угла внутреннего трения φ зависят от уровня вибродинамического воздействия, воспринимаемого грунтом, координат рассматриваемой точки и способности грунта поглощать передаваемое на него колебательное движение.

С использованием разработанного программного обеспечения выполнен расчет сетки линий скольжения с учетом напряжений σ в точках их пересечений при толщине слоя балласта 0,4 м и амплитуд виброколебаний A = 0, 50, 100, 300 мкм для глины с физико-механическими характеристиками: угол внутреннего трения $\varphi = 14°$, удельное сцепление C = 0,04 МПа.

Распределение напряжений по линиям скольжения в виде диаграмм представлено на рис. 4.

Анализ распределения расчетных напряжений вдоль линий скольжения по поперечному сечению насыпи железнодорожного земляного полотна показал их существенную неоднородность — по мере удаления от откоса к междупутью они возрастают, при этом наименьшие предельные напряжения находятся на бровке и откосе насыпи. Повышение уровня колебаний грунта от 50 до 300 мкм привело к снижению предельных напряжений на ОПЗП от 0,14 до 0,1 МПа, или в 1,4 раза, на бровке и откосе — от 0,06 до 0,04 МПа, или в 1,5 раза.

По расчетным данным построены зависимости распределения предельных напряжений вдоль ОПЗП от начала загружения к краю бровки в сторону междупутья от амплитуд виброколебаний. Кривые предельных напряжений представлены на рис. 5.

Для определения влияния физико-механических характеристик грунтов на величины предельных напряжений на ОПЗП проведены расчеты для глины с углом внутреннего трения $\varphi = 19°$ и удельным сцеплением C = 0,054 МПа. Результаты расчета в графическом виде представлены на рис. 6.

Анализ расчетных данных показал, что вибродинамические нагрузки существенно снижают прочностные характеристики грунтов. Так, при увеличении амплитуд виброперемещений на ОПЗП с A = 50 мкм до A = 300 мкм уровни предельных напряжений для глины с C = 0,04 МПа и $\varphi = 14°$ снижаются в 1,6...1,7 раза.

Для глины с углом внутреннего трения $\varphi = 19°$ и удельным сцеплением C = 0,054 МПа предельные напряжения снижаются достаточно интенсивно (см. рис. 6).

Прочностные свойства грунтов зависят от многих факторов. Сопротивление сдвигу определяется пре-

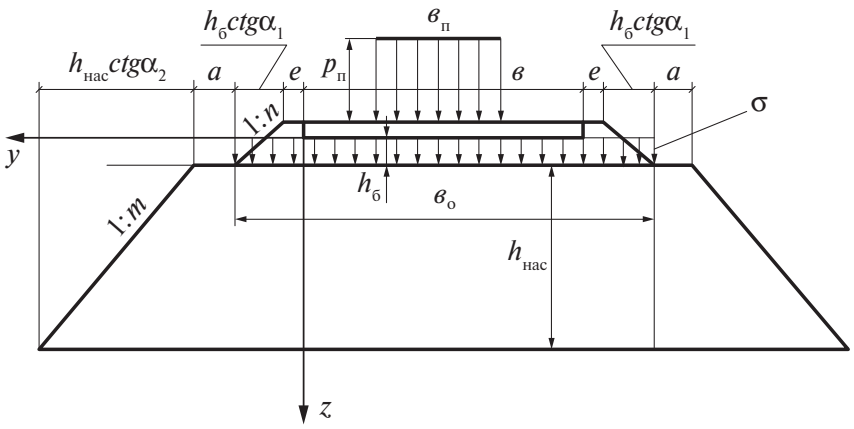


Рис. 3. Схема к определению графических условий для железнодорожной насыпи:
$h_{нас}$ — высота насыпи, м; $h_б$ — толщина слоя балласта, м; $h_{нас} \cdot$ ctg α_2 — горизонтальная проекция откоса насыпи, м; α — ширина обочины, м; $h_б \cdot$ ctg α_1 — горизонтальная проекция откоса балластной призмы, м; *е* — ширина плеча балластной призмы, м; *в* — длина шпалы, м; $в_п$ — размер зоны действия поездной нагрузки на рельсы; $в_о$ — размер зоны основной площадки, воспринимающей нагрузку от подвижного состава и верхнего строения пути; $\rho_п$ — нагрузки от подвижного состава на ОПЗП, инициирующие виброколебания с амплитудами *A*; σ — интенсивность напряжений на основной площадке земляного полотна от верхнего строения пути и подвижного состава; крутизна откоса балластной призмы 1:*n*; крутизна откоса насыпи 1:*m*

Fig. 3. Scheme to determine the graphic conditions for the railway embankment:
$h_{нас}$ — an embankment height, m; $h_б$ — the ballast layer thickness, m; $h_{нас} \cdot$ ctg α_2 — horizontal projection of the embankment slope, m; α — curb width, m; $h_б \cdot$ ctg α_1 — horizontal projection of the ballast prism slope, m; *e* — width of the ballast prism shoulder, m; *в* — sleepers length, m; $в_п$ — the size of the zone of the train load on rails action; $в_о$ — the size of the main platform zone, which receives the load from the rolling stock and the upper structure of the track; $\rho_п$ — loads from the rolling stock on the MSRB initiating vibrations with amplitudes *A*; σ — intensity of stresses on the main site of the roadbed from the track upper structure and the rolling stock; The steepness of the ballast prism slope 1:*n*; the embankment slope of the steepness 1:*m*

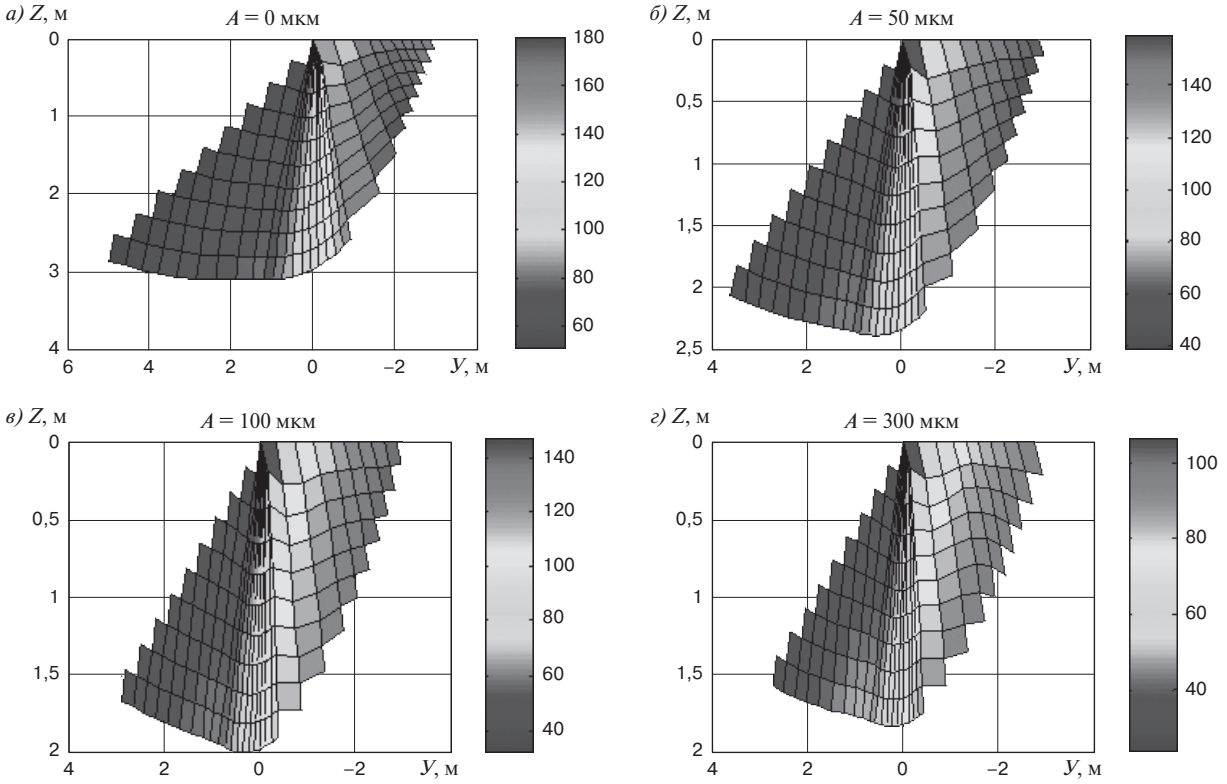


Рис. 4. Распределение напряжений по линиям скольжения в насыпи железнодорожного земляного полотна высотой *H* = 2 м, сложенной из глинистых грунтов с удельным сцеплением *C* = 0,04 МПа, углом внутреннего трения φ = 14°. Амплитуды виброколебаний грунтов на ОПЗП: *а* — *A* = 0 мкм; *б* — *A* = 50 мкм; *в* — *A* = 100 мкм; *г* — *A* = 300 мкм

Fig. 4. The stress distribution along sliding lines in rail embankment of roadbed of *H* = 2 m height, folded from specific cohesion *C* = 0,04 MPa, the internal friction angle φ = 14°. Amplitudes of soils vibration on the MSRB: *a* — *A* = 0 μm; *б* — *A* = 50 μm; *в* — *A* = 100 μm; *г* — *A* = 300 μm

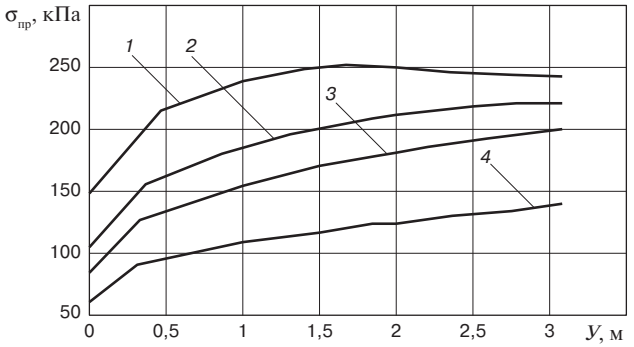


Рис. 5. Зависимости распределения предельных значений напряжений вдоль поперечного сечения ОПЗП от амплитуд виброколебаний. Грунт — глина с границей текучести $I_L < 0{,}25$, с удельным сцеплением $C = 0{,}04$ МПа, углом внутреннего трения φ = 14°. Амплитуды виброколебаний: *1* — $A = 0$ мкм; *2* — $A = 50$ мкм; *3* — $A = 100$ мкм; *4* — $A = 300$ мкм

Fig. 5. Dependences of the limited values distribution of stresses along the transverse section of the MSRB from the amplitudes of vibrations. The soil is a clay with a yield point $I_L < 0{,}25$, with specific cohesion $C = 0{,}04$ MPa, an internal friction angle of φ = 14 deg. Vibration amplitudes: *1* — $A = 0$ μm; *2* — $A = 50$ μm; *3* — $A = 100$ μm; *4* — $A = 300$ μm

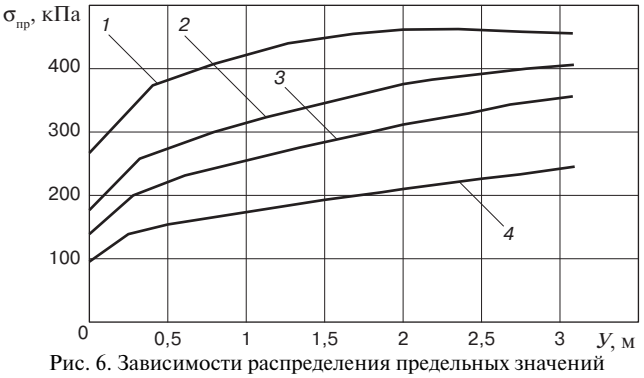


Рис. 6. Зависимости распределения предельных значений напряжений вдоль поперечного сечения ОПЗП от амплитуд виброколебаний. Грунт — глина с границей текучести $I_L < 0{,}25$, с удельным сцеплением $C = 0{,}054$ МПа, углом внутреннего трения φ = 19°. Амплитуды виброколебаний: *1* — $A = 0$ мкм; *2* — $A = 50$ мкм; *3* — $A = 100$ мкм; *4* — $A = 300$ мкм

Fig. 6. Dependences of the limiting values distribution of stresses along the transverse section of the MSRB from the amplitudes of vibrations. A ground — clay with a yield point $I_L < 0{,}25$, with specific cohesion $C = 0{,}054$ MPa, an internal friction angle φ = 19 deg. Vibration amplitudes: *1* — $A = 0$ μm; *2* — $A = 50$ μm; *3* — $A = 100$ μm; *4* — $A = 300$ μm

жде всего удельным сцеплением C, углом внутреннего трения φ, которые снижаются при вибрационном воздействии и зависят от амплитуды и частоты колебаний грунта и его влажности. Нормативные значения физико-механических характеристик для глин, суглинков, супесей представлены в таблице (п. 5.2 справочника [11]).

Для определения влияния показателя текучести на предельное состояние глинистых грунтов при высоких значениях виброколебаний проведены расчеты для глин с разными значениями C и φ при показателях текучести $I_L < 0{,}25$; $0{,}25 < I_L < 0{,}5$; $0{,}5 < I_L < 0{,}75$.

Таблица 1

Геометрические параметры железнодорожной насыпи и коэффициенты

Table 1

Geometrical parameters of the railway embankment and coefficients

Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Высота насыпи от основания до балластного слоя	$h_{нас}$	м	2,0
Толщина слоя балласта	$h_б$	м	0,4*...1,2**
Крутизна откоса насыпи	1:m	–	1:2
Крутизна откоса балластной призмы	1:n	–	1:1,5
Плечо балластной призмы	e	м	0,4
Ширина обочины	a	м	0,8
Коэффициент относительного снижения удельного сцепления	K_c	–	0,4...0,5
Коэффициент относительного снижения угла внутреннего трения	$K_φ$	–	0,4...0,55
Коэффициент виброразрушения	K_1	–	0,011
Объемный вес грунта	$γ_{уд}$	т/м³	1,91

Примечание. *0,4 м — для вновь строящегося пути; **1,2 м — для эксплуатирующихся линий.

Таблица 2

Физико-механические свойства глинистых грунтов при разной влажности

Table 2

Physical and mechanical properties of clay soils at different humidity

Вид грунта	Показатель текучести грунта	Характеристики грунта	Значения удельного сцепления C, МПа, угла внутреннего трения φ при коэффициенте пористости ε	
			0,65	0,75
Глина	$0 < I_L < 0{,}25$	C, МПа	0,068	0,054
		φ, град.	20	19
	$0{,}25 < I_L < 0{,}5$	C, МПа	0,057	0,05
		φ, град.	18	17
	$0{,}5 < I_L < 0{,}75$	C, МПа	0,045	0,041
		φ, град.	15	14
Суглинки	$I_L < 0{,}25$	C, МПа	0,031	0,025
		φ, град.	24	23
	$0{,}25 < I_L < 0{,}5$	C, МПа	0,028	0,023
		φ, град.	22	21
	$0{,}5 < I_L < 0{,}75$	C, МПа	0,025	0,020
		φ, град.	19	18

Физико-механические характеристики для ряда глинистых грунтов с разными показателями текучести представлены из [11] в табл. 2.

Результаты расчета предельных напряжений для глинистых грунтов с разными C и φ и разной влажностью показаны на рис. 7.

Анализ расчетных данных изменения предельных напряжений на основной площадке земляного полотна при ударных нагрузках показал:

– существенное значение на снижение прочностных свойств глинистых грунтов железнодорожного земляного полотна при ударном воздействии оказывала их влажность. Так, для глин с C = 0,068 МПа, φ = 20° при изменении показателя текучести с $I_L < 0{,}25$ до $0{,}25 < I_L < 0{,}5$ уровни предельных напряжений на ОПЗП снижались в 1,25...1,28 раза, при изменении I_L в пределах $0{,}5 < I_L < 0{,}75$ значения предельных напряжений уменьшались в 1,81...1,86 раза;

– при сложении насыпи из грунтов с более низкими физико-механическими характеристиками наблюдалось снижение величин предельных напряжений в пропорциях, близких к вышепредставленным;

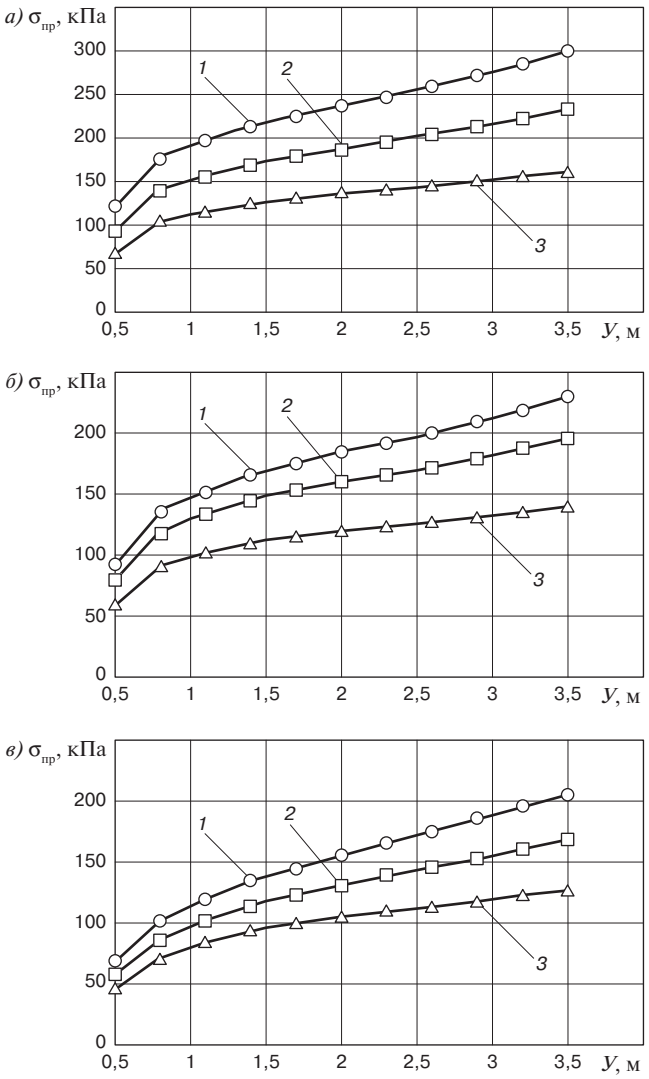
– уровни предельных напряжений уменьшались по ширине основной площадки земляного полотна, имея наиболее низкие значения у бровки ОПЗП. При значениях коэффициента текучести $0{,}5 < I_L < 0{,}75$ и уровнях виброперемещений с A = 300 мкм значения предельных напряжений снижались до $\sigma_z = 0{,}05...0{,}062$ МПа.

Выводы. 1. При наличии на поверхности катания колес дефектов в виде ползунов и наваров со сверхнормативными размерами h = 3 мм и более, неравномерного проката h = 4 мм и более возникают импульсные ударные силы величиной 360...530 кН, которые инициируют ускорения высокого уровня в балластном слое и на ОПЗП.

2. При движении грузовых вагонов и локомотивов с колесами без дефектов со скоростями v = 50...60 км/ч амплитуды виброперемещений на ОПЗП находятся в пределах 50...60 мкм. При ударном воздействии колес со сверхнормативными дефектами значения виброперемещений в вертикальном направлении достигали: 420...610 мкм — в балластном слое; 220–370 мкм — на ОПЗП.

3. Процесс изменения ускорений и виброперемещений в балластном слое и на основной площадке земляного полотна носит импульсный кратковременный характер со временем действия t = 0,01...0,02 с, включая 1...2 колебания, которые имели характер быстрозатухающего процесса.

4. Анализ расчетных предельных напряжений от действия ударных сил, возникающих при взаимодействии колес и рельсов, выполненный с использованием метода предельного равновесия на насыпи высотой H = 2 м, сложенной из глинистых грунтов, показал:



1. $I_L < 0{,}25$; 2. $0{,}25 < I_L < 0{,}5$; 3. $0{,}5 < I_L < 0{,}75$

Рис. 7. Распределение предельных напряжений на ОПЗП от положения зоны для глинистых грунтов с разными физико-механическими характеристиками C и φ, разной влажности:
а — глина, A = 300 мкм: *1* — C = 0,068 МПа, φ = 20°; *2* — C = 0,057 МПа, φ = 18°; *3* — C = 0,045 МПа, φ = 15°;
б — глина, A = 300 мкм: *1* — C = 0,054 МПа, φ = 19°; *2* — C = 0,05 МПа, φ = 17°; *3* — C = 0,041 МПа, φ = 14°;
в — суглинок, A = 200 мкм: *1* — C = 0,031 МПа, φ = 24°; *2* — C = 0,028 МПа, φ = 22°; *3* — C = 0,025 МПа, φ = 19°

Fig. 7. Distribution of limiting stresses on the roadbed main area from the position of the zone for clay soils with various physico-mechanical characteristics C and φ, various humidity:
a — clay, A = 300 μm: *1* — C = 0.068 MPa, φ = 20°; *2* — C = 0.057 MPa, φ = 18°; *3* — C = 0.045 MPa, φ = 15°;
б — clay, A = 300 μm: *1* — C = 0.054 MPa, φ = 19°; *2* — C = 0.05 MPa, φ = 17°; *3* — C = 0.041 MPa, φ = 14°;
в — loam, A = 200 μm: *1* — C = 0.031 MPa, φ = 24°; *2* — C = 0.028 MPa, φ = 22°; *3* — C = 0.025 MPa, φ = 19°

– уровни виброколебаний с амплитудами более A = 300 мкм на слабых глинистых или переувлажненных грунтах приводят к снижению предельных значений напряжений на ОПЗП в 1,6...1,7 раз;

– повышение влажности глинистых грунтов при ударных нагрузках является существенным фактором в снижении значений предельных напряжений;

– для глин с повышением показателя текучести грунта $I_L < 0{,}25$ до $0{,}25 < I_L < 0{,}5$ при $A = 300$ мкм предельные напряжения снижаются в 1,1...1,28 раза, при увеличении показателя текучести грунта $0{,}5 < I_L < 0{,}75$ — в 1,5...1,96 раза;

– для суглинков с повышением показателя текучести грунта $I_L < 0{,}25$ до $0{,}25 < I_L < 0{,}5$ предельные напряжения снижаются в 1,16...1,21 раза, с увеличением показателя текучести до $0{,}5 < I_L < 0{,}75$ — в 1,58...1,6 раза.

5. Эксплуатация подвижного состава со сверхнормативными размерами дефектов на поверхности катания колес может приводить к микросдвигам грунтового пространства, накоплению деформаций и дефектов в земляном полотне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович Н. А. Механика грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.

2. Флорин В. А. Основы механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961. Т. 1. 357 с.

3. Коншин Г. Г. Прочность грунта и тиксотропные явления в земляном полотне // Путь и путевое хозяйство. 2012. № 8. С. 25–27.

4. Прокудин И. В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамическую нагрузку: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06. Л.: ЛИИЖТ, 1982. 455 с.

5. Коншин Г. Г., Шмаков А. П. Вибрации грунта земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 11. С. 31–34.

6. Краснов О. Г., Сенча В. Н. Исследование вертикальных сил взаимодействия дефектных колес с рельсами // Вагоны и вагонное хозяйство. 2012. № 2. С. 42–43.

7. Влияние ударных сил на вибрации в балластном слое / О. Г. Краснов [и др.] // Путь и путевое хозяйство. 2013. № 3. С. 1–5.

8. Колос А. Ф., Николайтист Д. С., Морозова А. А. Оценка чувствительности путевого щебня к действию вибродинамической нагрузки // Материалы X научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». М.: МИИТ, 2013. С. 164–166.

9. Морозова А. А. Несущая способность подшпального основания железнодорожного пути на участках обращения поездов с осевыми нагрузками до 300 кН: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06. СПб.: ПГУПС, 2014. 184 с.

10. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1960. 121 с.

11. Дыдышко П. И. Земляное полотно железнодорожного пути. Справочник: науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ». М.: Интекст, 2014. 416 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

КРАСНОВ Олег Геннадьевич,
канд. техн. наук, заведующий отделом «Путь и специальный подвижной состав», АО «ВНИКТИ»

АСТАНИН Николай Николаевич,
заведующий лабораторией «Автоматизированные системы управления СПС», АО «ВНИКТИ»

Статья поступила в редакцию 31.03.2016 г. актуализирована 14.07.2016 г.; 06.10.2016 г., принята к публикации 01.12.2016 г.

Influence of impact forces on the strength characteristics of the railway roadbed

O. G. KRASNOV, N. N. ASTANIN

Joint Stock Company "Scientific Research and Design Technology Institute of Rolling Stock" (JSC "VNIKTI"), Kolomna, 140402, Russia

Abstract. The article presents the results of studies on the influence of impact forces on the strength characteristics of the soil of the main site of the roadbed (MSRB). It is shown that impulsive shock forces of 360 ... 530 kN, which initiate high-level accelerations in the ballast layer and on the main pad of the subgrade, arise in the presence of defects in the form of sliders and welds with oversized sizes on the rolling surface. When freight cars and locomotives running with speeds $v = 50 ... 60$ km/h, the levels of vibro-displacement on the main site of the roadbed are in the range of 50 ... 60 μm, but due to the impact of wheels with oversized defects, the values of vibro-displacement are reached at 220 ... 370 μm. The process of changing accelerations and vibro-displacements in the ballast layer and on the main site of the roadbed has an impulse short-term nature. The article analyzes the calculated limiting stresses from the action of the shock forces of interaction between wheels and rails performed using the theory of limiting equilibrium on an embankment of $H = 2$ m height, composed of clay soils, which showed that vibration levels with amplitudes of more than 300 μm on weak clay bases or waterlogged soils lead to a reduction of the stress limits on the FPRP by 1.6 ... 1.7 times. Increasing the humidity of clayey soils under impact loads is an important factor in reducing the values of ultimate stresses:

– for clays with an increase in the yield index to 0.5 at an amplitude of vibrations of 300 μm, the ultimate stresses are reduced by 1.1 ... 1.28 times, with an increase in the yield index to 0.75 in 1.5 ... 1.96 times;

– for loams with an increase in the yield index to 0.5 in 1.16 ... 1.21 times, with an in-crease in the yield coefficient to 0.75 in 1.58 ... 1.6 times.

Operation of the rolling stock with oversized defects on the rolling surface of the wheels can lead to micro-shifts in the ground space, the accumulation of deformations and defects in the roadbed.

Keywords: impact forces; vibration displacements; limit equilibrium; slip lines; stresses; clay soils

DOI: http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2017-76-2-85-93

REFERENCES

1. Tsytovich N. A. *Mekhanika gruntov* [Soils mechanics]. Moscow, Higher school Publ., 1973, 448 p.
2. Florin V. A. *Osnovy mekhaniki gruntov* [Basics of soil mechanics]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1961, Vol. 1, 357 p.
3. Konshin G. G. *Prochnost' grunta i tiksotropnye yavleniya v zemlyanom polotne* [Durability and soil in thixotropic phenomenon in subgrade]. Put' i putevoye khozyaystvo [Railway track and facilities], 2012, no. 8, pp. 25 – 27.
4. Prokudin I. V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushchikh vibrodinamicheskuyu nagruzku. Dokt. tekhn. nauk diss.* [Strength and deformability of the railway roadbed from clay soils, receiving vibrodynamic load. Dr. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, LIIZhT, 1982, 455 p.
5. Konshin G. G., Shmakov A. P. *Vibratsii grunta zemlyanogo polotna* [Soil vibrations of the subgrade]. Put' i putevoye khozyaystvo [Railway track and facilities], 2011, no. 11, pp. 31 – 34.
6. Krasnov O. G., Sencha V. N. *Issledovanie vertikal'nykh sil vzaimodeystviya defektnykh koles s rel'sami* [Investigation of vertical forces of interaction of defective wheels with rails]. Vagony i vagonnoye khozyaystvo, 2012, no. 2, pp. 42 – 43.
7. Krasnov O. G., Akashev M. G., Efimenko A. V., Sencha V. N. *Vliyanie udarnykh sil na vibratsii v ballastnom sloe* [Influence of impact forces on vibration in the ballast layer]. Put' i putevoye khozyaystvo [Railway track and facilities], 2013, no. 3, pp. 1 – 5.
8. Kolos A. F., Nikolaytist D. S., Morozova A. A. *Otsenka chuvstvitel'nosti putevogo shchebnya k deystviyu vibrodinamicheskoy nagruzki* [Assessment of the sensitivity of track gravel to the action of vibrodynamic load]. Materialy X nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sovremennye problemy proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti" [Materials X-th scientific and technical conference with international participation. Modern problems of design, construction and operation of the railway track]. Moscow, MIIT Publ., 2013, pp. 164 – 166.
9. Morozova A. A. *Nesushchaya sposobnost' podshpal'nogo osnovaniya zheleznodorozhnogo puti na uchastkakh obrashcheniya poezdov s osevymi nagruzkami do 300 kN. Kand. tekhn. nauk diss.* [Bearing capacity of the railway under-sleeper base of the railway track on the areas of train handling with axial loads up to 300 kN. Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, PGUPS, 2014, 184 p.
10. Sokolovskiy V. V. *Statika sypuchey sredy* [Static of the granular medium]. Moscow, Gos. izd-vo fiz.-mat. literatury [State publishing house of physical-mathematical literature], 1960, 121 p.
11. Dydyshko P. I. *Zemlyanoe polotno zheleznodorozhnogo puti* [Roadbed of railway track]. Spravochnik. Sb. nauch. tr. OAO "VNIIZhT" [Reference book. Proc. of JSC "VNIIZhT"]. Moscow, Intext Publ., 2014, 416 p.

E-mail: krasnovog@mail.ru (O. G. Krasnov)

ABOUT THE AUTHORS

Oleg G. KRASNOV,
Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department
"Tracks and specialized rolling stock", JSC "VNIKTI"

Nikolay N. ASTANIN,
Head of Laboratory "Automated control systems SPS",
JSC "VNIKTI"

Received 31.03.2016
Revised 14.07.2016 and 06.10.2016
Accepted 01.12.2016

«Вестник ВНИИЖТ»
ГДЕ подписаться?

Подписку **на научно-технический журнал «Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта» («Вестник ВНИИЖТ»)** можно оформить в любом почтовом отделении связи по Объединенному каталогу «Пресса России», том 1 или агентствах по распространению печатных изданий «Урал-Пресс», АРЗИ.

Подписной индекс журнала — 70116.

Также можно оформить подписку (годовую и полугодовую) на договорных условиях в редакции. Адрес редакции журнала: 129626, Москва, 3-я Мытищинская ул., д. 10, тел.: +7 (499) 260-43-19, факс: +7 (499) 262-00-70, E-mail: journal@vniizht.ru.

Подписчики стран ближнего и дальнего зарубежья могут подписаться на журнал «Вестник ВНИИЖТ» по каталогам подписного агентства АО «МК-Периодика» (www.periodicals.ru).