УДК 625.731.2:624.131.3

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ЗОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ВОДОПРОПУСКНЫХ ТРУБ

В.С. Воробьев[1], Е.Л. Карелина[1], О.А. Бендер[1], К.В. Каталымова[2]
[1]ФГБОУ ВО «СГУПС», г. Новосибирск, Россия
[2]ОАО «Новосибирскавтодор», г. Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. *Возросшие технические требования к автомобильным дорогам, связанные с увеличением осевых нагрузок, интенсивности и скорости движения транспортных средств с учетом фактического технического состояния ряда дорог, инженерных сооружений, в том числе водопропускных труб, активизацией федеральных и региональных служб по приведению параметров дорожных покрытий к мировым стандартам ставят задачу разработки методов математического моделирования физико-механических характеристик грунтов в зоне расположения водопропускных труб, позволяющих снизить экономические затраты и время на проведение экспериментальных исследований деформаций по результатам мониторинга грунтов земляного полотна и дорожной одежды.*

Материалы и методы. *Рассмотрен порядок исследования технического состояния водопропускных труб, дорожной одежды и физико-механических характеристик грунтов, методы и способы экспериментальных исследований. Обоснован подход к проведению опытных работ по проходке шурфов в местах появления деформаций и на незначительном от них удалении. Выполнена оценка состояния грунтов земляного полотна и затрубного пространства водопропускных труб в местах их устройства.*

Результаты. *Определены модули деформации и упругости, плотность, влажность, консистенция, число пластичности, показатель текучести, производные физических характеристик грунта. Применительно к поставленной задаче исследований определены инженерно-геологические элементы, установлены средние значения плотности, влажности и коэффициента уплотнения, а также получены расчетные значения модулей деформации на основе компрессионных и штамповых испытаний, модуль упругости.*

Обсуждение и заключение. *Установлена зависимость дефектности дорожного покрытия от физико-механических характеристик грунтов земляного полотна.*

По результатам экспериментальных работ выполнен корреляционно-регрессионный анализ характеристик грунтов. *Получены уравнения регрессии в затрубном пространстве водопропускных труб и на удалении ±30 м от них. Установлено, что наблюдаются нарушения ровности покрытия дорожных одежд, вызванные просадками в барьерных местах. С удалением от водопропускных труб улучшаются физико-механические характеристики грунта и повышаются их прочностные характеристики.*

Практическое значение. *Применение моделей физико-механических характеристик грунта в совокупности с экспериментальными исследованиями позволяет снизить трудозатраты, время и стоимость испытаний.*

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *автомобильная дорога, водопропускные трубы, земляное полотно, дорожная одежда, физико-механические свойства грунтов, регрессионный анализ.*

© В.С. Воробьев, Е.Л. Карелина, О.А. Бендер, К.В. Каталымова

Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

STATISTICAL MODELS OF PHYSIC-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ROADS IN THE AREA OF CULVERTS

V.S. Vorobyov[1], E.L. Karelina[1], O.A. Bender[1], K.V. Katalymova[2]
[1]Siberian State Transport University
[2]Open Joint Stock Company "NovosibirskAvtoDor", Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. *Increased technical requirements for roads, associated with increasing axial loads, the intensity and speed of vehicles, with the actual technical condition of the roads number, engineering structures, including culverts, activation of federal and regional services to bring the parameters of road surfaces to the world standards, all listed parameters pose the task in developing the mathematical modeling methods of physical-mechanical characteristics of soils in the culverts area. Therefore, such methods allow to reduce economic costs and time for carrying out experimental research of deformations based on the monitoring results of the soil roadbed and pavement.*
Materials and methods. *The order of technical condition of the culverts' research, pavement and physico-mechanical characteristics of soils, methods of experimental research were discussed in the article. Moreover, the approach to carrying out experimental works on penetration of pits in places of deformations and nearby was approved. Additionally, the evaluation of the soils condition on the roadbed and the annular space of the culverts was made.*
Results. *The schemes of deformation and elasticity, density, humidity, consistency, plasticity number, fluidity, and physical properties of the soil are determined. The engineering-geological elements, mean values of density, humidity and compaction factor are established according to the research aim. Consequently, the values of the strain modules and the modulus of elasticity are calculated on the basis of compression and stamp tests.*
Discussion and conclusions. *The dependence of the pavement on the physic-mechanical characteristics of the soil of the roadbed is proved. The correlation-regression analysis of soil characteristics is performed on the basis of experimental research. As a result, the regression equations are obtained in the annular space of culverts and at the distance of ± 30 m nearby. As could be proved, there are irregularities in the coverage of road clothes caused by drawdown in barrier locations. The physic-mechanical characteristics of the ground and strength characteristics are increased by culverts' transfer on distance. The application of physic-mechanical characteristics of the soil together with experimental studies makes it possible to reduce labor costs, time and cost of testing.*

KEYWORDS: *highway, culverts, roadbed, road surfacing, physic-mechanical characteristics of the soil, regression analysis.*

© V.S. Vorobyov, E.L. Karelina, O.A. Bender, K.V. Katalymova

Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

В дорожном комплексе актуальной является проблема обеспечения качества в различных сферах производственной деятельности при реализации проектов на всех этапах жизненного цикла автомобильной дороги от изысканий, проектирования, строительства, содержания до ликвидации [1,2,3]. При этом дорожная отрасль характеризуется широким разнообразием искусственных сооружений, большим разнообразием физико-механических свойств применяемых материалов, свойств грунтов, зависящих от многих факторов, постоянным повышением потребительских качеств дороги в связи с увеличением скоростей и интенсивности движения транспортных потоков, ростом нагрузок на ось, провозной способности [4,5].

Недостатки проектирования и строительства инженерных сооружений, влияние эксплуатационных факторов приводят к большому количеству деформаций и дефектов дорожной одежды и нерациональному удорожанию конструкций и способов производства работ как при строительстве, так и при содержании и реконструкции [6,7,8]. Это относится и к водопропускным трубам, в местах устройства которых в течение циклов «замораживание-оттаивание» и вышеперечисленных факторов возникают неравномерные деформации грунтов, приводящие к деформациям частей труб, снижению их работоспособности и в конечном итоге к деформации дорожной одежды и к нарушению ровности покрытия.

Среди ряда причин, приводящих к деформациям дорожной одежды, и особенно в местах устройства водопропускных труб, значимыми являются недостаточная степень уплотнения грунта при строительстве и образование разуплотненных зон земляного полотна в процессе эксплуатации автомобильной дороги[1] [9, 10, 11]. Поэтому исследования влияния физико-механических характеристик грунтов земляного полотна в местах расположения водопропускных труб являются актуальными.

Цель исследования – установление закономерности между физико-механическими характеристиками грунтов, присущих инженерно-геологическим элементам в зоне расположения водопропускных труб и последующего их применения в аналогичных условиях без проведения полного объема экспериментальных работ.

В методологическом отношении исследованию деформации дорожной одежды посвящены работы [12,13,14,15,16,17,18]. В зонах водопропускных труб исследование их технического состояния и физико-механических характеристик грунтов целесообразно проводить в следующем порядке:

- визуальное и инструментальное обследование дорожной одежды и водопропускных труб;
- анализ проектной и строительной документации, существующих нормативных документов с учетом специфики природно-климатических и геокриологических условий;
- исследование свойств грунтов с выделением инженерно-геологических элементов;
- проведение корреляционно-регрессионного анализа физико-механических характеристик грунтов автомобильных дорог в зонах расположения водопропускных труб.

Следующим важным этапом является мониторинг состояния водопропускных труб в процессе строительства и в первые годы эксплуатации. Целью мониторинга является выявление дефектов, связанных с состоянием и поведением грунтов в районе трубы, в основании и в теле насыпи.

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе проведения экспериментальных исследований по программе мониторинга установлено влияние плотности грунта земляного полотна на величину деформации дорожных одежд и определены закономерности изменения механических характеристик грунтового массива. Исследования проводились в местах устройства водопропускных труб на автомобильной дороге «К-17р» для решения следующих задач:

1. Сравнение физико-механических характеристик грунтов в местах устройства водопропускных труб и на удалении от них.
2. Определение зависимости комплексного показателя транспортно-эксплуатационного состояния дороги от свойств и состояния грунтов, слагающих земляное полотно насыпи в местах устройства водопропускных труб и на удалении от них.

[1] Пай, В.Э. Составление каталога дефектов земляного полотна и дорожной одежды для назначения восстановительных работ на основе нового подхода: научное издание / В.Э. Пай // Научно-практическая конференция «Неделя науки – 2014. Наука МИИТа – транспорту». – Москва, 2014. – Ч. 1. – С. II/36-II/37.

Для решения этих задач были выполнены визуальные и инструментальные, опытные и лабораторные исследования. Структурная схема выполнения работ приведена на рисунке 1.

В рамках визуальных и инструментальных исследований в соответствии с ОДН 218.0.006-2002[2] определены показатели ровности покрытия дорожной одежды, выявлены дефекты. Установлено, что на участках автомобильной дороги «К-17р» км 20+226; км 44+194; км 72+365; км 180+742; км 182+400; км 201+083; км 205+500; км 226+800; км 228+500; км 289+200; км 334+812 продольная ровность не обеспечивается. Покрытие автомобильной дороги на перечисленных участках не удовлетворяет требованиям, п. 4.6 табл. 4.7 ОДН 218.0.006-2002 по условиям продольной ровности.

По результатам визуальных исследований определялся комплексный показатель транспортно-эксплуатационного состояния дороги (КПд) по методике ОДН 218.0.006-2002.

Опытные работы заключались в проходке шурфов в местах появления деформаций и на незначительном удалении от них, отборе проб грунта нарушенной и ненарушенной структуры; динамическом зондировании грунтов; штамповых испытаниях грунтов статической нагрузкой.

Проходка шурфов и отбор проб грунта нарушенной и ненарушенной структуры осуществлялись в соответствии с ГОСТ 12071–2014[3] с целью получения информации о грунтах,

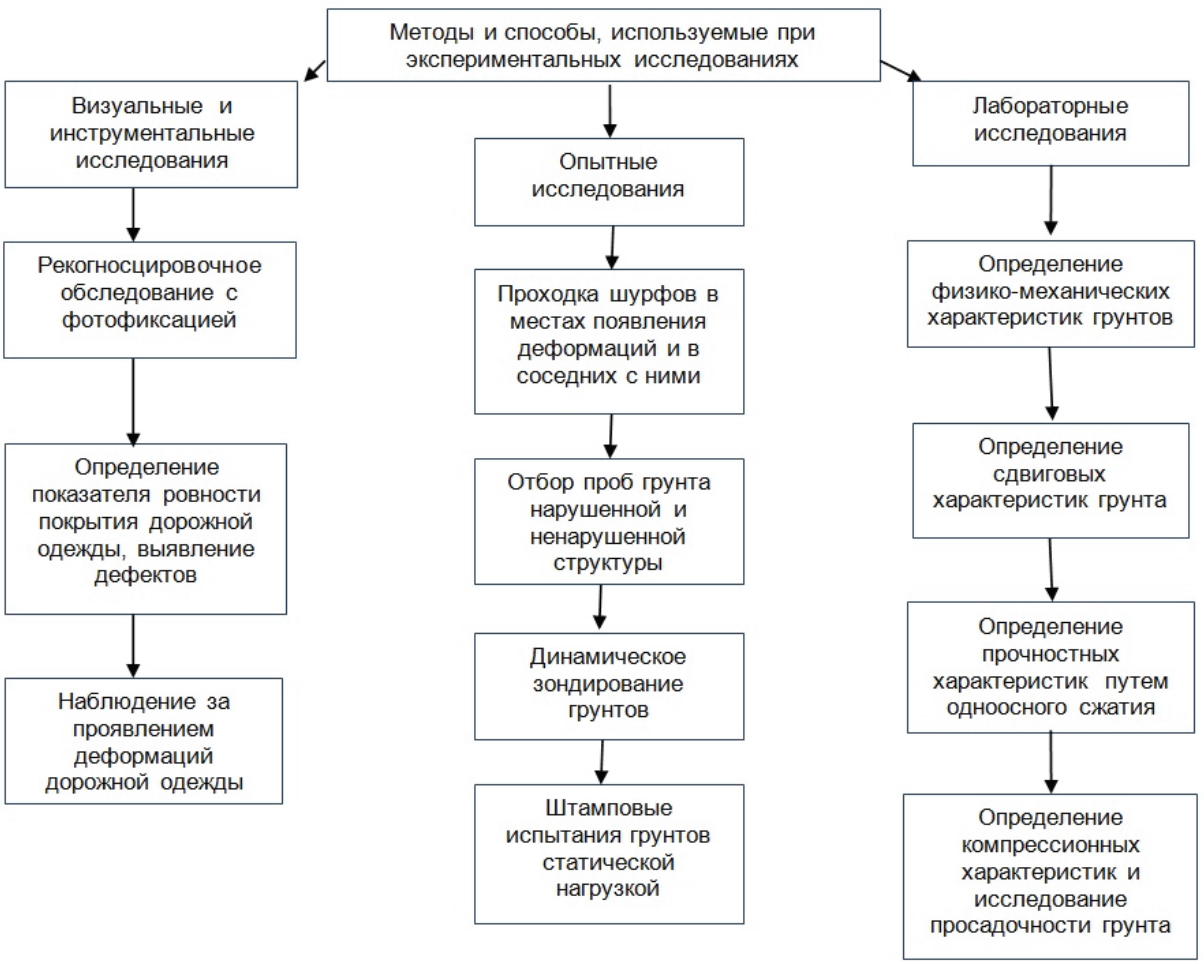

Рисунок 1 – Структурная схема выполнения работ при экспериментальных исследованиях

Figure 1 – Block diagram of work at experimental studies

[2] ОДН 218.0.006-2002 Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог. Взамен ВСН 6-90. Введ. 03.10.2002. – Министерство транспорта РФ. – М., 2002. – 140 с.

[3] ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

слагающих земляное полотно и дальнейших исследований этих грунтов в геотехнической лаборатории.

Оценка состояния грунтов земляного полотна и затрубного пространства водопропускных труб на каждом рассматриваемом участке проводилась по данным четырех шурфов №1, №2, №3, №4. Шурфы №1, №2 были назначены на обочинах в месте расположения водопропускной трубы по обеим сторонам проезжей части. Шурфы №3, №4 были вскрыты на обочинах на расстоянии 30 м от оси водопропускной трубы в обоих направлениях автомобильной дороги (рисунок 2).

Проходка шурфов осуществлялась до глубины 3,2 м в зависимости от высоты насыпи. На втором этапе опытных исследований осуществлялось динамическое зондирование грунтов и штамповые испытания. Метод динамического зондирования использовался для определения коэффициента пористости грунта в соответствии с ГОСТ 5180–2015[4]. Схема расположения точек динамического зондирования аналогична рисунку 2 и позволяет сравнить характеристики уплотненности грунта затрубного пространства водопропускных труб и грунтов тела насыпи, удаленного от водопропускной трубы участка. Общее количество пройденных точек динамического зондирования – 60. Глубина зондирования для каждой точки составила от 2,5 до 3,5 м в зависимости от высоты насыпи. Штамповые испытания грунта проводились в соответствии с ГОСТ 20276–2012[5]. Определялись характеристики сжимаемости (модуль деформации E и модуль упругости $E_{упр}$) грунтов земляного полотна затрубного пространства водопропускных труб. Для сравнения характеристик грунта испытания проводились на участках земляного полотна, расположенных на расстояниях 30 м от устройства водопропускных труб.

В геотехнической лаборатории были проведены исследования грунта, включающие в себя определение характеристик и состояния грунта в соответствии с ГОСТ 5180-–2015, а именно: плотности грунта методом режущего кольца; плотности частиц грунта; влажности грунта W; консистенции грунта; числа пластичности I_P; показателя текучести I_L; производных физических характеристик грунтов, в частности, плотности сухого грунта; пористости грунта; коэффициента пористости грунта; коэффициента водонасыщения грунта, компрессионных характеристик грунтов и исследова-

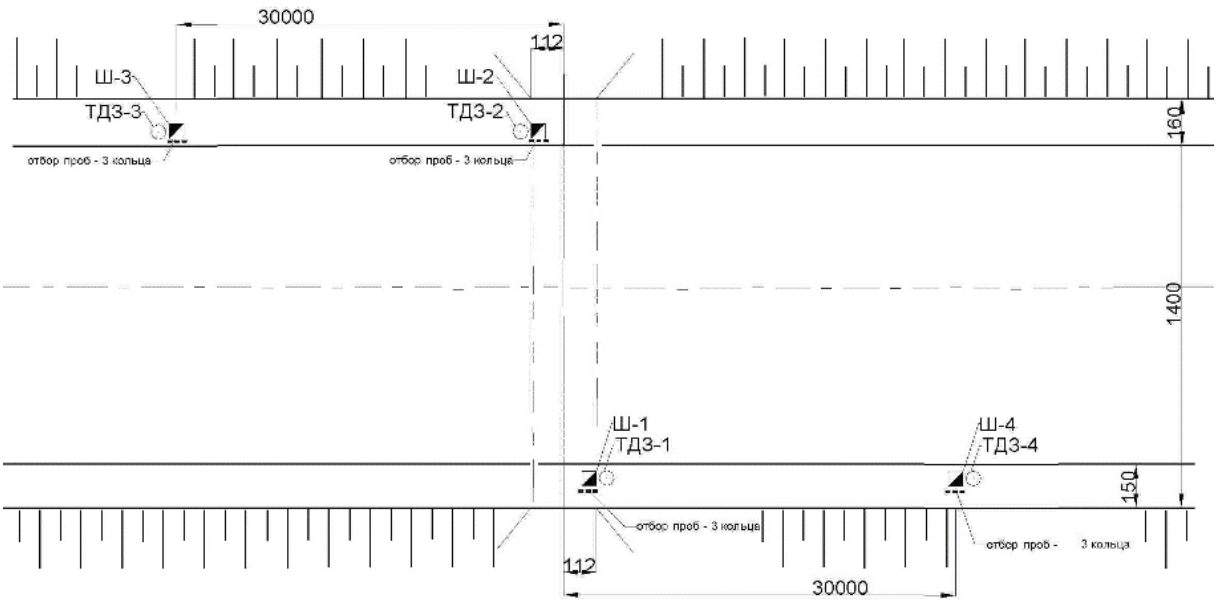

Рисунок 2 – Схема расположения выработок

Figure 2 – Scheme of the excavations' arrangement

[4] ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.

[5] ГОСТ 20276-2012 Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. Введ. 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2013. 35 с.

ние просадочности грунта (в соответствии с ГОСТ 12248–2010[6]), а именно: коэффициента сжимаемости m_0, МПа$^{-1}$; коэффициента относительной сжимаемости m_v, МПа$^{-1}$; модуля деформации Е, МПа; структурной прочности грунта $p_{стр}$, Мпа; прочностных характеристик грунтов: сопротивления срезу т [кПа], угла внутреннего трения φ [град] и удельного сцепления С [кПа] (в соответствии с ГОСТ 12248–2010 методом одноплоскостного среза по схеме консолидированно-дренированного испытания).

РЕЗУЛЬТАТЫ

При сопоставлении физико-механических характеристик грунта были выделены инженерно-геологические элементы, имеющие следующие значения коэффициента пористости е:

ИГЭ-1п – Супесь пылеватая, твердая, плотная; е<0,7;

ИГЭ-1с – Супесь пылеватая, твердая, средней плотности; е=0,7-0,8;

ИГЭ-1р – Супесь пылеватая, твердая, рыхлая; е>0,8;

ИГЭ-2п – Суглинок легкий с прослоями тяжелого, пылеватый, плотный; е<0,7;

ИГЭ-2с – Суглинок легкий с прослоями тяжелого, пылеватый, средней плотности; е=0,7-0,8;

ИГЭ-2р – Суглинок легкий с прослоями тяжелого, пылеватый, рыхлый; е>0,8.

Для получения штамповых модулей деформации применены фактические коэффициенты перехода от компрессионных к штамповым модулям деформации. Такие коэффициенты были получены в СГУПСе путем многочисленных сопоставительных испытаний грунтов супесей и суглинков разной номенклатуры при инженерно-геологических изысканиях.

Компрессионные испытания позволяют отразить неоднородность свойств грунта в пределах каждого ИГЭ, т.е. получить статистические характеристики, а значит получить расчетные значения модуля деформации.

Грунты в целом неоднородные, с частым переслаиванием по плотности от плотного до рыхлого. Эта неоднородность произошла из-за недостаточного уплотнения слоев укладываемого грунта, а также укладываемый грунт имел влажность менее оптимальной.

Влияние влажности и степени уплотнения грунта земляного полотна на параметры прочности[7] и деформируемости исследовались в [19,20]. Нами установлена оптимальная влажность и максимальная плотность по ИГЭ.

Для ИГЭ 1 оптимальная влажность $W_{опт}$=0,21, при этом максимальная плотность также изменяется в широком диапазоне ρ_d^{max}=1,92 т/м^3 - 2,10 т/м^3.

Для ИГЭ 2 оптимальная влажность $W_{опт}$=0,25, при этом максимальная плотность ρ_d^{max}=1,96 т/м^3 - 2,12 т/м^3.

Средние коэффициенты уплотнения приведены в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1
Средние значения плотности, влажности и коэффициента уплотнения грунта
TABLE 1
Average values of density, humidity and soil compacting coefficient

№ ИГЭ	ρ_d^{max}, т/м^3	$\rho_d^{фак}$ среднее значение, т/м^3	$K_{упл}$	$W_{опт}$ среднее значение	$W_{фак}$ среднее значение
1 п	1,96	1,66	0,84	0,21	0,13
1с	1,96	1,55	0,79	0,21	0,14
1р	1,96	1,46	0,74	0,21	014
2п	1,98	1,64	0,83	0,25	0,16
2с	1,98	1,55	0,78	0,25	0,19
2р	1,98	1,48	0,71	0,25	0,19

[6] ГОСТ 5180-2015 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Введ. 2016-04-01. М.: Стандартинформ, 2016. 21 с.

[7] Носков И.В., Ананьев С.А., Ковалева М.А. Лабораторные испытания грунта перед проведением работ по инъектированию откосов земляного полотна автомобильных дорог // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Международной научно-технической конференции. 2016. С. 201-205.

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

Грунты, слагающие земляное полотно, недостаточно увлажнены[8].

В пределах выделенных элементов грунты неоднородные – физические характеристики выше нормативных.

Механические характеристики E, C, φ практически соответствуют физическому состоянию грунтов: виду (числу пластичности I_P), консистенции (показателю текучести I_L) и плотности (коэффициенту пористости e).

В таблице 2 приведены расчетные значения модулей деформации для выделенных ИГЭ.

Примечания:

1) $m^{ф}_{к}$ – коэффициент перехода от компрессионных модулей деформации $E_к$ к штамповым $E_{шт}$, МПа;

2) $K_у$ — коэффициент перехода от модулей общей деформации E к модулю упругости по второй ветви загружения $E_у$, МПа.

Анализируя результаты лабораторных и полевых исследований, можно заключить, что состояние дорожного покрытия зависит от состояния грунтов земляного полотна.

В таблице 3 приведена зависимость дефектности дорожного покрытия по Δf от физико-механических характеристик грунтов земляного полотна.

Следует отметить, что к просадке дорожной одежды и нарушениям эксплуатационных показателей автомобильной дороги приводят деформации, возникающие в нижележащих слоях земляного полотна [17].

С целью исследования влияния показателя ровности покрытий на комплексный транспортно-эксплуатационный показатель ($КП_д$) дорожных одежд был выполнен расчет $КП_д$ дорожных одежд по частным коэффициентам обеспеченности расчетной скорости $K_{рс1}$, $K_{рс2}$, и $K_{рс8}$, построены графики зависимости $КП_д$ дорожных одежд от близости к водопропускной трубе[9]. В результате исследования выяснилось, что нарушение ровности покрытий дорожных одежд присутствует в 93% случаев, из них в 73% обнаружена просадка дорожных одежд в местах устройства водопропускных труб. В свою очередь $КП_д$ дорожных одежд превышает допустимые значения лишь в 20% случаев в местах устройства водопропускных труб, что свидетельствует о некоторых неточностях из-за обобщения данных для расчета $КП_д$. Таким образом, показатель ровности покрытия оказывает влияние на $КП_д$ дорожных одежд, являясь достаточно точным для определения ровности покрытий, а следовательно, и деформаций дорожных одежд [21].

ТАБЛИЦА 2
Модули деформации и упругости грунта
TABLE 2
Modules of soil deformation and elasticity

№ ИГЭ	Модуль деформации. Компрессионные испытания $E_к$ средний, МПа	Коэффициент перехода $m^{ф}_{к}$	Модуль деформации. Штамповые испытания $E_{шт}$, МПа	Коэффициент перехода $K_у$	Модуль упругости $E_у$, МПа
1п	10,3	2,7	28	3,2	90
1с	9,6	2,7	26	3,2	83
1р	3,8	2,7	7,6	3,2	24
2п	9,8	3,1	31	3,5	108
2с	8,8	3,1	27	3,5	94
2р	6,0	3,1	19	3,5	66

[8] Карелина Е.Л., Определение причин нарушения ровности покрытия дорожной одежды на участках устройства водопропускных труб // Политранспортные системы: материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». 2015. С. 287-293.

[9] Пак Е.Л. Определение комплексного показателя транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги // Политранспортные системы: Материалы IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы». 2016. С. 114-116.

ТАБЛИЦА 3
Физико-механические характеристики грунтов земляного полотна и дефектность дорожного покрытия
TABLE 3
Physic-mechanical characteristics of the roadbed soil and paving deficiency

№ п/п	Адрес участка, км +	№ ИГЭ	№ шурфа	Глубина шурфа, Н, м	Средневзвешенный коэффициент пористости $e_{ср}$	Среднее значение		Модуль деформации Е, МПа	Разница стрелы прогиба Δf, мм
						С, МПа	φ, град		
1	156+758	1п	Ш-2	0,7	0,630	0,018	30,8	9,7	-3
2	171+607	2п	Ш-1	0,2	0,604	0,032	25,2	10,9	-4
3	303+674	1п	Ш-1	0,5	0,688	0,024	25,3	9,4	-3
4	182+400,5	1с	Ш-1	0,5	0,751	0,022	24,6	7,4	10
5	201+82,5	2с	Ш-2	2,0	0,791	0,026	23,2	7,5	7
6	228+500,5	1с	Ш-1	0,5	0,724	0,16	28,2	7,8	10
7	20+226,5	1р	Ш-1	1,2	0,855	0,012	26,6	4,8	20
8	180+742,5	2р	Ш-1	0,9	0,819	0,021	23,3	6,5	23
9	205+499,5	2р	Ш-1	1,0	0,856	0,020	22,7	6,5	25

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что характеристики грунтов земляного полотна и затрубного пространства водопропускных труб оказывают существенное влияние на ровность покрытий дорожных одежд. Это объясняется тем, что свойства грунтов земляного полотна и затрубного пространства водопропускных труб оказались различны. Наибольшая разница заключалась в степени уплотненности грунтов. Степень уплотненности грунтов измерялась разными методами как в лабораторных, так и полевых условиях, что позволяет рационально оценить этот показатель. При этом худшее значение уплотненности грунта было получено в непосредственной близости от водопропускной трубы, что подтверждает вывод об образовании разуплотненных зон в затрубном пространстве водопропускных труб.

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментальных работ на 16-ти участках выполнен корреляционно-регрессионный анализ физико-механических характеристик грунтов. В качестве исходных данных использованы глубина просадки (просвета) мм r **,** плотность грунта, г/см^3 (**ρ**), угол внутреннего трения, град. (**φ),** удельное сцепление, МПа (**C),** модуль деформации, Мпа (**E).** Проверялись статистические связи: r=f(**E**); **E** =f(r); r =f **(E**, **ρ, φ, C**); **E=f(ρ); E** =f **(φ**); **E**=f(**C**); **E** =f(r, **ρ, φ, C**)**; ρ** =f(**r**); **φ** =f(**r**); **C** =f(**r**); **E** =f**(ρ, φ, C**); **C** =f(**φ, ρ**).

Расчеты выполнены в статистическом блоке EXCEL. Матрица парных коэффициентов корреляции физико-механических характеристик грунтов показывает отсутствие связи между глубиной просадки (просвета) дорожной одежды над водопропускной трубой (r) плотностью грунта (**ρ**), углом внутреннего трения (**φ**), удельным сцеплением **C**, модулем деформации (**E**). В то же время связи между парами характеристик грунтов являются сильными, близкими к функциональным (таблица 4). Аппроксимация проводилась экспоненциальной, логарифмической, степенной и линейной функциями.

t-критерий Стьюдента (tp > tтабл) подтверждает достоверность коэффициентов линейной зависимости модуля деформации от плотности грунта. Вместе с тем уравнение регрессии может быть нелинейным. Достоверность правильности выбора взаимосвязи устанавливается критерием Фишера (F - критерий). При Fp > Fтабл. уравнение регрессии считается статистически достоверным.

Коэффициенты детерминации превышают 0,9, что позволяет принять любое уравнение регрессии из приведенных. Поэтому нами проведены статистические исследования на ряде водопропускных труб, увеличивающие число наблюдений и повышающие репрезентативность выборки.

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

ТАБЛИЦА 4
Регрессионные модели физико-механических характеристик грунтов
TABLE 4
Regression models of the soil physic-mechanical characteristics

№ п/п	км а/д	Парные уравнения регрессии в затрубном пространстве водопропускных труб					
		E= f (ρ)	Коэффициент детерминации	E= f (φ)	Коэффициент детерминации	E= f (C)	Коэффициент детерминации
1	20	$y = 0{,}208e^{1{,}9819x}$	0,91	$y = 0{,}1196e^{0{,}1379x}$	0,98	$y = 1{,}6749e^{84{,}937x}$	0,97
		y = 22,655ln(x) - 5,8373	0,93	y = 25,793ln(x) - 80,163	0,98	y = 8,3645ln(x) + 41,327	0,93
		$y = 0{,}9697x^{3{,}4566}$	0,92	$y = 1E\text{-}05x^{3{,}9759}$	0,98	$y = 1432{,}1x^{1{,}3006}$	0,96
		y = 13,023x - 15,984	0,93	y = 0,8966x - 19,344	0,98	y = 550x - 2,15	0,96
		Парные уравнения регрессии по двум шурфам на удалении ±30 м от водопропускных труб					
2	20	$y = 0{,}9074e^{1{,}1315x}$	0,40	$y = 0{,}4793e^{0{,}0892x}$	0,59	$y = 2{,}8947e^{52{,}325x}$	0,54
		y = 13,964ln(x) - 1,2006	0,40	y = 16,99ln(x) - 50,78	0,53	y = 5,399ln(x) + 29,09	0,50
		$y = 2{,}0907x^{2{,}0475}$	0,41	$y = 0{,}001x^{2{,}5901}$	0,59	$y = 196{,}09x^{0{,}8158}$	0,55
		y = 7,7258x - 6,9088	0,39	y = 0,5859x - 10,576	0,53	y = 347,8x + 1,1673	0,50
		Парные уравнения регрессии по четырем шурфам по длине в 60 м					
3	20	$y = 0{,}3475e^{1{,}6773x}$	0,76	$y = 0{,}2175e^{0{,}1165x}$	0,85	$y = 1{,}9631e^{75{,}461x}$	0,83
		y = 19,189ln(x) - 4,0822	0,75	y = 21,549ln(x) - 66,074	0,81	y = 7,4462ln(x) + 37,512	0,80
		$y = 1{,}2603x^{2{,}9492}$	0,76	$y = 8E\text{-}05x^{3{,}3615}$	0,85	$y = 797{,}8x^{1{,}1584}$	0,83
		y = 10,941x - 12,514	0,75	y = 0,748x - 15,229	0,81	y = 488,35x - 1,1567	0,81

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

Также получены следующие уравнения регрессии:

1) E = f(r, ρ, φ, C); E = - 0 , 0 1 2 × r + 1 , 4 4 9 × ρ + 1 , 6 7 5 × φ - 543,222×C-35,5426. Коэффициент детерминации (R2) составляет 0,99.

2) E = f(ρ, φ, C); E =1,439×ρ+1,55×φ-466,34×C-33,3424; R2 =0,98.

3) C = f(φ, ρ); C =0,0027×ρ+0,0014×φ-0,03; R2 = 0,99.

Уравнения регрессии по шурфам на удалении ±30 м от водопропускных труб, учитывающие продольную ровность (r), имеют следующий вид:

1) r= f(E) (глубина просадки дорожной одежды как функция модуля деформации) y=-0,064×x + 7,95 при множественном R, равном 0,398, R^2=0,159, что свидетельствует о слабой корреляции указанных параметров. Это свидетельствует о том, что статистическая зависимость продольной ровности (колейности) от модуля деформации возрастает с удалением от трубы. Это подтверждается следующим уравнением:

2) r = f(E, ρ, φ, C)

r = - 7,586×E + 79,507×ρ – 5,572×φ + 4371,8×C + 21,467.

Множественный R= 0,729, R^2 = 0,532.

Корреляция и статистика между модулем деформации E = f(r, ρ, φ, C) и приведенными выше показателями иллюстрируется таблицами 5,6,7.

ТАБЛИЦА 5
Коэффициенты корреляции между глубиной просадки дорожной одежды и физико-механическими характеристиками грунтов
TABLE 5
Correlation coefficients between sag depth of the road surfacing and soil physic-mechanical characteristics

	r	ρ	φ	C	E
	1				
ρ	0,075 566	1			
φ	-0,022 4	0,677 291	1		
C	-0,043 3	0,394 636	0,906 637	1	
E	-0,398 3	0,622 562	0,730 792	0,703 427	1

ТАБЛИЦА 6
Регрессионная статистика
TABLE 6
Regression statistics

Множественный R	0,915 428
R-квадрат	0,838 008
Нормированный R-квадрат	0,622 019
Стандартная ошибка	0,512 211
Наблюдения	32

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные экспериментальные исследования показали:

1) При обследовании пятнадцати участков автомобильной дороги в местах устройства водопропускных труб установлено, что на четырнадцати из них присутствуют нарушения ровности покрытия дорожных одежд в виде просадок, трещин, выбоин.

2) На участках, удаленных от водопропускных труб на расстоянии 30 м по обеим сторонам километража отмечается улучшение физико-механических характеристик грунтов земляного полотна, в том числе снижение (или уменьшение) влажности. Также отмечено меньшее количество дефектов дорожной одежды, что указывает на улучшение прочностных свойств грунтов земляного полотна.

3) Сопоставив результаты измерений ровности покрытий динамического зондирования, визуального осмотра, физико-механических свойств грунтов, можно сделать вывод, что первопричиной нарушения ровности покрытий дорожной одежды на барьерных участках является образование разуплотненных зон в затрубном пространстве водопропускных труб.

ТАБЛИЦА 7 Статистические показатели
TABLE 7 Statistics

Коэффициенты		Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение	Нижние 95%	Верхние 95%
Y-пересечение	1,280 784	10,497 5	0,122 008	0,910 606	-32,126 9	34,688 52
r	-0,068 94	0,038 012	-1,813 61	0,167 385	-0,1899 1	0,052 032
ρ	9,371 402	5,581 74	1,678 939	0,191 756	-8,392 19	27,134 99
φ	-0,635 36	0,781 96	-0,812 52	0,475 983	-3,123 9	1,853 19
C	546,584 4	385,406 6	1,418 202	0,251 162	-679,951	1773,12

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

Применение корреляционно-регрессионного анализа для оценки качества автомобильных дорог в совокупности с экспериментальными исследованиями позволяет значительно сократить время и стоимость испытаний физико-механических характеристик грунтов, что будет способствовать повышению эффективности планирования ремонтов, повышению качества и безопасности автомобильных дорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лазарев Ю.Г., Симонов Д.Л., Новик А.Н. Формирование потребительских и эксплуатационных свойств автомобильных дорог // Технико-технологические проблемы сервиса. 2016. № 1(35). С. 43-47.

2. Воробьев В.С., Пингасов Д.В., Мирошниченко С.В. Управление рисками строительства автомобильных дорог // Известия вузов. Строительство. 2012. №1, Изд-во Сибстрин. С. 84-91.

3. Бендер О.А. Прогнозирование рисков в системе капитального ремонта автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2012. № 6(28). С. 15-18.

4. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Шамраев Л.Г. Современный подход к оценке транспортно- эксплуатационных показателей автомобильных дорог государственной компании «Российские автомобильные дороги». САПР и ГИС автомобильных дорог. 2016. № 1(6). С. 39-51.

5. Daniel J. Findley Part 4 Highway Geometric Design. Highway Engineering. 2016, Pages 167-253. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801248-2.00004-6

6. Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Бадина М.В. Совершенствование норм проектирования дорожных одежд в части уточнения дислокации дорожно-климатических зон для субъектов Российской Федерации // Мир дорог. 2014. № 74. С. 21–23.

7. Ефименко С.В., Ефименко В.Н., Сухоруков А.В. Совершенствование норм проектирования автомобильных дорог Российской Федерации в части методологии учёта особенностей природно-климатических условий // Вестник КГУСТА. 2016. № 1. С. 53–59.

8. Zapata C.E., Houston W.N. Calibration and validation of the enhanced integrated climatic model for pavement design. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2008. 62 p.

9. Крицкий М.Я., Шестаков В.Н. О классификации дефектов земляного полотна автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. Омск, 2007. Вып 5. С. 69–76.

10. Николенко Д.А., Кмета А.Г. Прогнозирование деформаций и разрушений дорожных конструкций автомобильных дорог: научное издание // Строительство. Ростов на Дону, 2014. С. 35-36.

11. Воробьев В.С., Пак Е.Л. Влияние физико-механических характеристик грунта земляного полотна на образование деформаций дорожной одежды // Вестник ТГАСУ, Томск, 2017. № 1 (60). С. 190-199.

12. Александрова Н.П., Семенова Т.В., Стригун К.Ю. Совершенствование методов экспресс оценки качества уплотнения грунтов земляного полотна строительства автомобильных дорог // Вестник СибАДИ. 2015. № 4(44). С. 46-57.

13. GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions for pavement engineering and geoscience applications / F. Tosti, A. Benedetto, L.B. Ciampoli, S. Lambot, C. Patriarca, E.C. Slob // Near surface geophysics, 2016. Т.: 14, в 2. P. 127–144.

14. Лаврентьев П.А. Отечественные и зарубежные методологии прогнозирования продольной ровности покрытия автомобильных дорог // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 4(39). С. 168-172.

15. Шустов А.В., Ганзин С.В., Самек Е.И. Оценка применяемых методов диагностики ровности покрытия автомобильных дорог при их эксплуатации // Известия ВолгГТУ. 2013. № 21(124). С. 100-103.

16. Афиногенов О.П., Афиногенов А.О., Серякова А.А. Влияние степени уплотнения грунтов на величину их модуля упругости // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2014. № 3(103). С.110-113.

17. Ярмолинский А.И., Ярмолинский В.А., Украинский И.С. Анализ деформации и разрушений автомобильных дорог юга Дальнего Востока и предпосылки их устранения // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: международный сборник научных трудов. Хабаровск: Издательство ТОГУ, 2014. № 14. С. 20-28.

18. Углова Е.В., Тиратурян А.Н., Ляпин А.А. Комплексный подход к исследованию характеристик динамического деформирования на поверхности нежестких дорожных одежд

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

с использованием методов неразрушающего контроля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 2. С. 111–130. DOI: 10.15593/perm.mech/ 2016.2.08

19. Семенова Т.В., Кузин Н.В. Влияние влажности и степени уплотнения грунта земляного полотна на параметры прочности и деформируемости // Научный альманах. 2016. № 7-1(21). С. 451-453.

20. Qiao Y. Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life / Qiao Y., Flintscli G., Dawson A., Parry T. // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2013. №. 2349. pp. 100-107.

21. Могильный К.В., Чванов В.В., Красиков О.А. Требования к ровности дорожных оснований и покрытий. Методы и средства измерений неровностей // Дороги и мосты. 2011. Т. 26. № 2. С. 151-169.

REFERENCES

1. Lazarev YU.G., Simonov D.L., *Novik A.N.* Formirovanie potrebitel'skih i ehkspluatacionnyh svojstv avtomobil'nyh dorog [Formation of consumer and operational properties of highways]. *Tekhniko-tekhnologicheskie problemy servisa,* 2016, no. 1(35), pp. 43-47. (in Russian).

2. Vorob'ev V.S., Pingasov D.V., Miroshnichenko S.V. Upravlenie riskami stroitel'stva avtomobil'nyh dorog [Risk management of road construction]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*, 2012, no. 1, pp. 84-91. (in Russian).

3. Bender O.A. Prognozirovanie riskov v sisteme kapital'nogo remonta avtomobil'nyh dorog [Forecasting of risks in system of highways major maintenance]. *Vestnik SibADI*. Omsk, 2012. no 6(28). pp. 15-18. (in Russian).

4. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., SHamraev L.G. Sovremennyj podhod k ocenke transportno-ehkspluatacionnyh pokazatelej avtomobil'nyh dorog gosudarstvennoj kompanii «Rossijskie avtomobil'nye dorogi» [A modern approach to assessing the transport and operational performance of highways of the state company "Russian Highways"]. *SAPR i GIS avtomobil'nyh dorog*, 2016, no. 1(6), pp. 39-51. (in Russian).

5. Daniel J. Findley Part 4 Highway Geometric Design. Highway Engineering. 2016, Pages 167-253. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801248-2.00004-6

6. Efimenko S.V., Efimenko V.N., Badina M.V. Sovershenstvovanie norm proektirovaniya dorozhnykh odezhd v chasti utochneniya dislokatsii dorozhno-klimaticheskikh zon dlya sub"ektov Rossiyskoy Federatsii [Improvement of pavement design standards in terms of road-building climatic zoning for subjects of the Russian Federation]. *Mir dorog*, 2014, no. 74, pp. 21–23. (in Russian).

7. Efimenko S.V., Efimenko V.N., Sukhorukov A.V. Sovershenstvovanie norm proektirovaniya avtomobil'nykh dorog Rossiyskoy Federatsii v chasti metodologii ucheta osobennostey prirodnoklimaticheskikh usloviy [Improving highway design standards of the Russian Federation accounting for natural-climatic conditions]. *Vestnik KSUCTA*, 2016, no. 1, pp. 53–59. (in Russian).

8. Zapata C.E., Houston W.N. Calibration and validation of the enhanced integrated climatic model for pavement design – Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2008. 62 p.

9. Krickij M.YA., SHestakov V.N. O klassifikacii defektov zemlyanogo polotna avtomobil'nyh dorog [About classification of defects of a road bed of highways]. *Vestnik SibADI*, 2007, no 5, pp. 69–76. (in Russian).

10. Nikolenko, D.A., Kmeta A.G. Prognozirovanie deformacij i razrushenij dorozhnyh konstrukcij avtomobil'nyh dorog: nauchnoe izdanie [Forecasting deformations and fractures of road structures of highways: a scientific publication]. *Stroitel'stvo*, Rostov na Donu, 2014, pp. 35-36. (in Russian).

11. Vorob'ev V.S., Pak E.L. Vliyanie fiziko-mekhanicheskih harakteristik grunta zemlyanogo polotna na obrazovanie deformacij dorozhnoj odezhdy [Influence of physicomechanical characteristics of ground of an earthen cloth on the formation of deformations of pavemen]. *Vestnik TGASU*, Tomsk, 2017, no. 1 (60), pp. 190-199. (in Russian).

12. Aleksandrova N.P., Semenova T.V., Strigun K.YU. Sovershenstvovanie metodov ehkspress ocenki kachestva uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna stroitel'stva avtomobil'nyh dorog [Improvement of the methods of express assessment of the quality of compaction of soil in the roadway of road construction]. *Vestnik SibADI*, 2015, no 4(44), pp. 46-57. (in Russian).

13. Tosti F., Benedetto A., Ciampoli L.B., Lambot S., Patriarca C., Slob E.C. GPR analysis of clayey soil behaviour in unsaturated conditions

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI

for pavement engineering and geoscience applications. *Near surface geophysics*, 2016. T.: 14, в 2, pp. 127–144.

14. Lavrent'ev P.A. Otechestvennye i zarubezhnye metodologii prognozirovaniya prodol'noj rovnosti pokrytiya avtomobil'nyh dorog [Domestic and foreign methodologies for predicting the longitudinal smoothness of the road surface coverage]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*, 2013, no. 4(39), pp. 168-172. (in Russian).

15. SHustov, A.V., Ganzin S.V., Samek E.I. Ocenka primenyaemyh metodov diagnostiki rovnosti pokrytiya avtomobil'nyh dorog pri ih ehkspluatacii [Estimation of applied methods of diagnostics of smoothness of a covering of highways at their operation]. *Izvestiya VolgGTU*, 2013, no. 21(124), pp. 100-103. (in Russian).

16. Afinogenov O.P., Afinogenov A.O., Seryakova A.A. Vliyanie stepeni uplotneniya gruntov na velichinu ih modulya uprugosti [Influence of the degree of compaction of soils on the magnitude of their modulus of elasticity]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no. 3(103), pp.110-113. (in Russian).

17. YArmolinskij, A.I., YArmolinskij V.A., Ukrainskij I.S. Analiz deformacii i razrushenij avtomobil'nyh dorog yuga Dal'nego Vostoka i predposylki ih ustraneniya [Analysis of deformation and destruction of highways in the South of the Far East and the prerequisites for their elimination] *Dal'nij Vostok. Avtomobil'nye dorogi i bezopasnost' dvizheniya: mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov - Habarovsk: Izdatel'stvo TOGU*, 2014, no. 14, pp. 20-28. (in Russian).

18. Uglova E.V., Tiraturyan A.N., Liapin A.A. Integrated approach to studying characteristics of dynamic deformation on flexible pavement surface using nondestructive testing. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no 2, pp. 111–130. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.08. (in Russian).

19. Semenova T.V., Kuzin N.V. Vliyanie vlazhnosti i stepeni uplotneniya grunta zemlyanogo polotna na parametry prochnosti i deformiruemosti [Influence of humidity and the degree of soil compaction of the roadbed on the parameters of strength and deformability]. *Nauchnyj al'manah*, 2016, no. 7-1(21), pp. 451-453. (in Russian).

20. Qiao Y., Flintscli G., Dawson A., Parry T. Examining Effects of Climatic Factors on Flexible Pavement Performance and Service Life Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2013. no. 2349. pp. 100-107.

21. Mogil'nyj K.V., CHvanov V.V., Krasikov O.A. Trebovaniya k rovnosti dorozhnyh osnovanij i pokrytij. Metody i sredstva izmerenij nerovnostej [Requirements for the smoothness of road bases and coatings. Methods and means for measuring irregularities]. *Dorogi i mosty*, 2011, Vol. 26, no 2, pp. 151-169. (in Russian).

Поступила 24.06.2018, принята к публикации 20.08.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Валерий Степанович (г. Новосибирск, Россия) – доктор технических наук, профессор, декан факультета «Строительство железных дорог», заведующий кафедрой «Технология, организация и экономика строительства» ФГБОУ ВО «СГУПС» (630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчука, 191 e-mail: Vorobjev@stu.ru).

Карелина Елена Леонидовна (г. Новосибирск, Россия) – аспирант кафедры «Технология, организация и экономика строительства» ФГБОУ ВО «СГУПС» (630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчука, 191 e-mail: karelinaelena23@mail.ru).

Бендер Оксана Анатольевна (г. Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Изыскания, проектирование и постройка железных и автомобильных дорог» ФГБОУ ВО «СГУПС» (630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчука, 191 e-mail: O_Ben@mail.ru).

Каталымова Ксения Валерьевна (г. Новосибирск, Россия) – кандидат технических наук, директор по правовой и кадровой работе ОАО «Новосибирскавтодор» (630099, г. Новосибирск, ул. Каменская,19 e-mail: Katalymova@nskavd.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valery S. Vorobjev – doctor of technical science, Professor, Dean of the Rail Road Construction Faculty, Head of the Construction Technology, Organization and Economics Department, Siberian State Transport University

(630049, Novosibirsk, Russia, 191,D. Kovalchuk St., e-mail: Vorobjev@stu.ru).

Karelina Elena Leonidovna – graduate student of the Construction Technology, Organization and Economics Department, Siberian State Transport University (630049, Novosibirsk, Russia, 191,D. Kovalchuk St., e-mail: karelinaelena23@mail.ru).

Bender Oxana Anatolievna – candidate technical science, associate professor of the Researches, Design and Construction of Railway and Highways Department, Siberian State Transport University (630049, Novosibirsk, Russia, 191,D. Kovalchuk St., e-mail: O_Ben@mail.ru).

Katalymova Ksenia Valeryevna – candidate technical science, Director of Legal and Personnel Department, Open Joint Stock Company "NovosibirskAvtoDor" (630099, Novosibirsk, 19, Kamenskaya St., e-mail: Katalymova@nskavd.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Все соавторы внесли равный вклад.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Authors have equal contribution to the research.

© 2004–2018 Вестник СибАДИ
Vestnik SibADI