

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО ПОВЕДЕНИЯ ДОРОЖНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ УПЛОТНЕНИИ ПНЕВМОКОЛЕСНЫМ КАТКОМ

Кандидат техн. наук **Шишкин Е.А.**,
студент **Кравцов З.С.**
(Тихоокеанский государственный университет)

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF ROAD MATERIAL COMPACTED BY A PNEUMATIC-WHEEL ROLLER

E.A. Shishkin, Ph.D. (Tech.),
Z.S. Kravtsov, Student
(Pacific National University)

Аннотация. Одним из способов повышения эффективности уплотнения дорожного покрытия пневмоколесным катком является изменение давления воздуха внутри шин пневматических колес катка, что приводит к изменению контактного давления колеса. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния материала в зависимости от давления воздуха в шинах пневматических колес катка с использованием инструмента имитационного моделирования. В результате разработана методика моделирования процесса нагружения дорожного материала пневмоколесным катком. Результаты моделирования позволяют оценивать эффективность уплотнения различных дорожных материалов пневмоколесными катками. Применение методики в практике строительства автомобильных дорог позволит сократить количество проходов пневмоколесного катка, а также исключить неэффективные проходы.

Abstract. One of the ways to increase the efficiency of compaction with a pneumatic wheeled roller is to change the air pressure inside the tires of the pneumatic wheels of the roller, which leads to a change in the contact pressure of the wheel. In this work, a study was made of the stress-strain state of the material depending on the air pressure in the tires of the pneumatic wheels of the skating rink using a simulation tool. As a result, a technique has been developed for modeling the process of loading the road material with a pneumatic wheeled roller. The simulation results allow us to evaluate the efficiency of compaction of various road materials by pneumatic wheeled rollers. The application of the methodology in the practice of road construction will reduce the number of passes of a pneumatic wheeled roller, as well as eliminate inefficient passes.

Ключевые слова: автомобильные дороги, дорожные материалы, пневмоколесный каток, уплотнение, контактное давление, давление воздуха в шине, динамическая модель, остаточная деформация, эффективность.

Keywords: Road, road materials, pneumatic roller, seal, contact pressure, tire air pressure, dynamic model, permanent deformation, efficiency.

Введение

В процессе строительства и реконструкции дорожного полотна для укатки дорожных материалов широко применяют пневмоколесные катки [1]. Пневмоколесные катки обеспечивают более равномерное распределение нагрузки по поверхности контакта, высокую ровность и однородность получаемого покрытия, возможность работы при высоких температурах уплотняемого слоя [2]. По мере уплотнения жесткость дорожного материала возрастает, и давление колеса перестает обеспечивать эффективное уплотнение [3]. Одним из способов повышения эффективности уплотнения пневмоколесным катком является изменение давления воздуха внутри шин пневматических колес катка, что приводит к изменению контактного давления колеса. Важной проблемой является исследование поведения дорожного материала под нагрузкой, создаваемой пневматическим колесом во время укатки. В связи с этим задачей

исследования является моделирование процесса нагружения дорожного материала пневмоколесным катком и исследование напряженно-деформированного состояния материала в зависимости от давления воздуха в шинах пневматических колес катка.

Методика исследований

Исходной информацией для выполнения моделирования служат численные значения среднего контактного давления пневматического колеса при различных давлениях воздуха внутри шины, а также разной нагрузке, приходящейся на колесо. В качестве источника указанной информации были использованы руководства по эксплуатации различных моделей пневмоколесных катков как отечественного, так и зарубежного производства. В табл. 1 приведены значения среднего контактного давления для одного из пневмоколесных катков фирмы DYNAPAC.

Таблица 1

**Средние контактные давления (МПа)
пневмоколесного катка DYNAPAC CP2100**

Нагрузка на колесо, кг	Давление в шине, МПа					
	0,24	0,35	0,48	0,62	0,72	0,83
1125	0,2	0,24	0,27	0,3	0,33	0,34
1375	0,22	0,26	0,3	0,33	0,35	0,38
1825	0,24	0,28	0,34	0,38	0,4	0,43
2250	0,25	0,31	0,36	0,41	0,44	0,48
2750	0,26	0,32	0,39	0,44	0,48	0,52
3000	0,27	0,33	0,41	0,46	0,49	0,54

В результате статистической обработки данных, представленных в табл. 1, получено регрессионное уравнение

$$\sigma_{cp} = 0,019689 + 0,347783 p_{ш} + 0,000071 Q, \quad (1)$$

где $p_{ш}$ - давления воздуха внутри шины пневматического колеса, МПа; Q – нагрузка на пневматическое колесо, кг.

Графическая интерпретация уравнения (1) представлена на рис. 1.

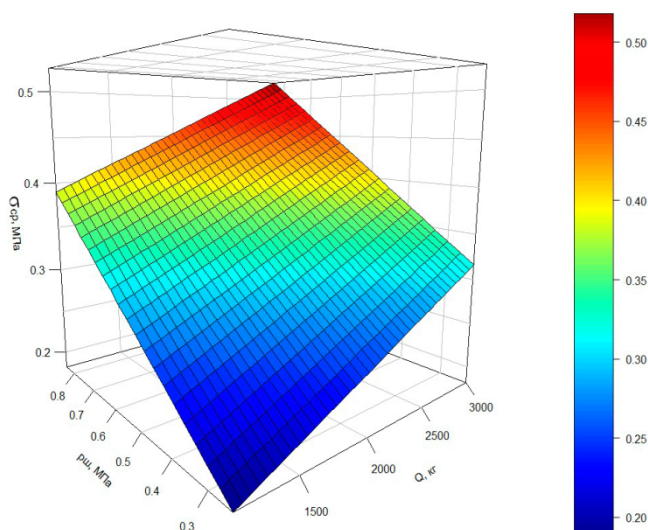


Рис. 1. Поверхность значений среднего контактного давления пневмоколесного катка DYNAPAC CP2100

В результате статистической обработки значений контактных давлений для 24 моделей пневмоколесных катков различных производителей (BOMAG, DYNAPAC, HAMM, Caterpillar, SAKAI, INGERSOLL RAND, AMMANN, PASKAT) установлено, что с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,98 - 0,99$) зависимость контактного давления от давления в шине и нагрузки на колесо может быть описана следующим уравнением

$$\sigma_{cp} = a_0 + a_1 p_{ш} + a_2 Q, \quad (2)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты уравнения регрессии.

Схема процесса уплотнения дорожного материала пневматическим колесом показана на рис. 2. С достаточной для практических целей точностью закон нагружения может быть представлен в виде параболы [4], смещенной относительно вертикальной оси пневматического колеса в сторону движения (рис. 2).

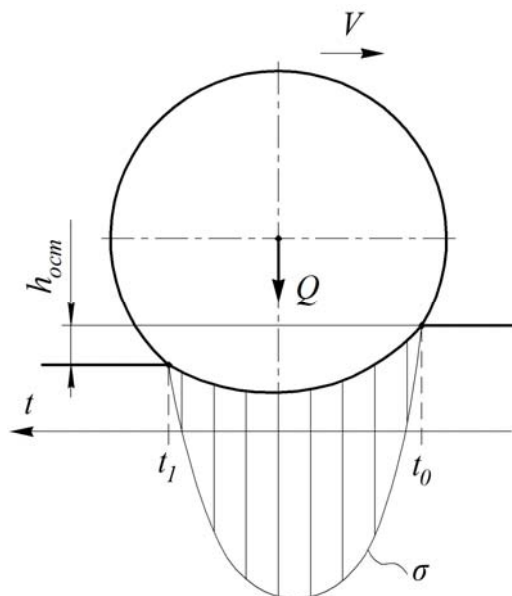


Рис. 2. Схема уплотнения дорожного материала пневматическим колесом

Согласно [5] между средним σ_{cp} и максимальным σ_{max} контактными давлениями существует соотношение

$$\sigma_{max} = \frac{3}{2} \sigma_{cp}. \quad (3)$$

Из рис. 2 следует, что среднее давление по площади контакта пневматической шины с уплотняемым материалом равно

$$\sigma_{cp} = \frac{Q}{BVt_1}, \quad (4)$$

где B – ширина пневматического колеса, м; V – скорость движения катка, м/с; t_1 – время взаимодействия колеса с произвольной элементарной площадкой уплотняемого материала, с.

Для описания напряженно-деформированного состояния дорожного материала при силовом взаимодействии с пневматическим колесом примем модель, представленную на рис. 3.

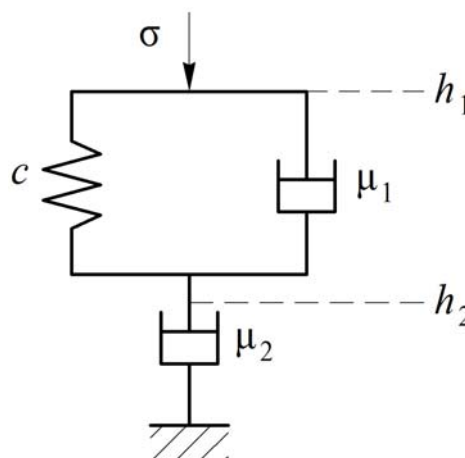


Рис. 3. Реологическая модель дорожного материала

Поведение параллельно соединенных вязкого μ_1 и упругого c элементов описывается уравнением [6]

$$\sigma = ch_1 + \mu_1 h_1'. \quad (5)$$

Поведение вязкого элемента μ_2 описывается уравнением

$$\sigma = \mu_2 h'_2. \quad (6)$$

Суммарная деформация модели (рис. 3) равна

$$h = h_1 + h_2. \quad (7)$$

Продифференцировав уравнение (7), с учетом (6) получим

$$h'_1 = h' - \frac{\sigma}{\mu_2}. \quad (8)$$

Подставим уравнение (8) в (5)

$$\sigma = ch_1 + \mu_1 \left(h' - \frac{\sigma}{\mu_2} \right). \quad (9)$$

Продифференцировав уравнение (9), с учетом (8) после преобразований получим

$$h'' = \frac{1}{\mu_1} \left[\left(1 + \frac{\mu_1}{\mu_2} \right) \sigma' + \frac{c}{\mu_2} \sigma - ch' \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) представляет собой закон поведения принятой реологической модели (рис. 3).

Для исследования напряженно-деформированного поведения дорожного материала, уплотняемого пневматическим колесом, на основании уравнений (2), (3), (4), (10) разработана имитационная модель, представленная на рис. 4.

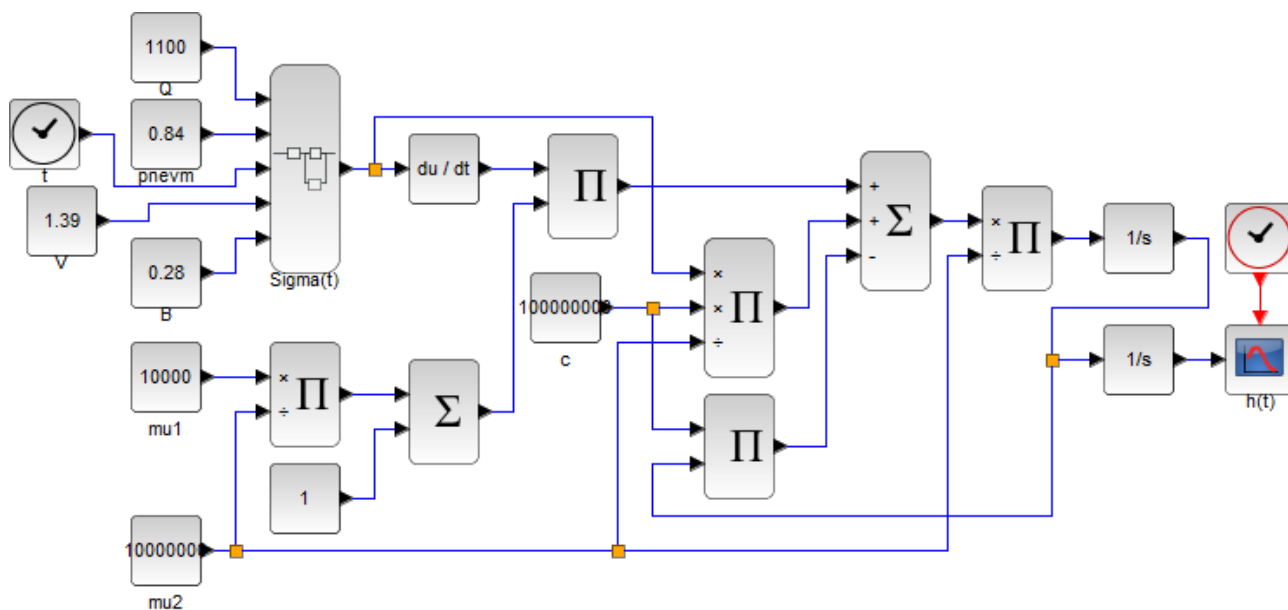


Рис. 4. Имитационная модель напряженно-деформированного поведения дорожного материала

Результаты моделирования для пневмоколесного катка DYNAPAC CP2100 приведены на рис. 5, 6, 7, 8.

На рис. 5 приведены кривые нагружения элементарной площадки дорожного материала шиной при различной нагрузке на пневматическое колесо.

В результате моделирования получены фазовые траектории изменения деформации элементарной площадки дорожного материала (рис. 6) в соответствии с законом нагружения, представленном на рис. 5.

В результате анализа фазовых траекторий «деформация – контактное давление» (рис. 6) установлено, что координаты точки, в которой деформация принимает максимальное значение, могут быть использованы для оценки текущей жесткости слоя уплотняемого дорожного материала следующим образом

$$E = \frac{\sigma}{h_{max}}, \quad (11)$$

где E – модуль жесткости материала, $\text{H}/\text{м}^3$; h_{max} – максимальная деформация материала под пневматическим колесом, м; σ – контактное давление колеса на материал, соответствующее деформации h_{max} , Па.

Условие окончания уплотнения дорожного материала имеет вид

$$E \geq E_{mp}, \quad (12)$$

где E_{mp} – требуемый модуль жесткости материала, $\text{H}/\text{м}^3$.

Значение модуля жесткости E_{mp} для заданного дорожного материала необходимо определять в условиях производства работ с помощью специального оборудования [7, 8].

В результате моделирования установлено, что остаточная деформация дорожного материала зависит от давления воздуха в шинах пневматических колес катка, а также нагрузки на колесо катка (рис. 7).

Анализ различных сечений поверхности остаточных деформаций дорожного материала, представленных на рис. 8, позволяет сделать вывод о качественном соответствии полученных результатов физическому процессу уплотнения дорожного материала пневмоколесным катком. Увеличение давления в шине пневматического колеса приводит к увеличению остаточной деформации. Остаточная деформация увеличивается с ростом нагрузки на пневматическое колесо.

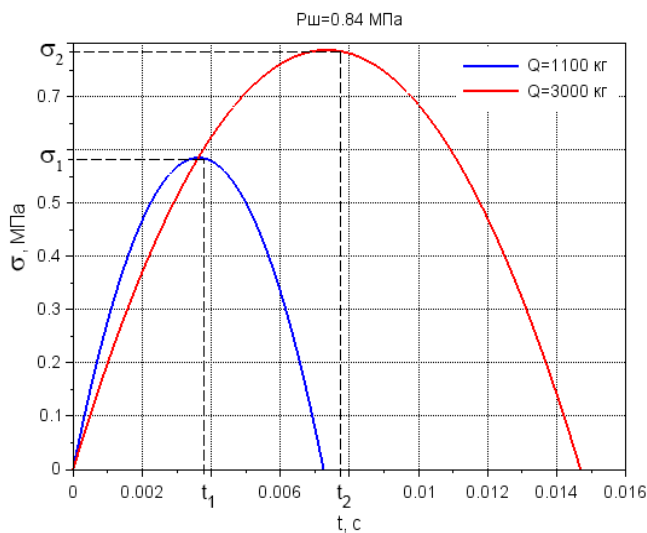


Рис. 5. Изменение контактного давления во времени

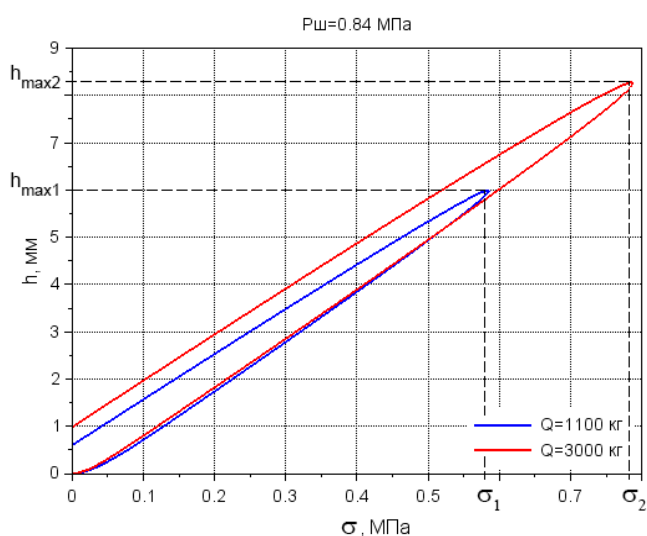


Рис. 6. Фазовые траектории «деформация – контактное давление» для различной нагрузки на пневматическое колесо

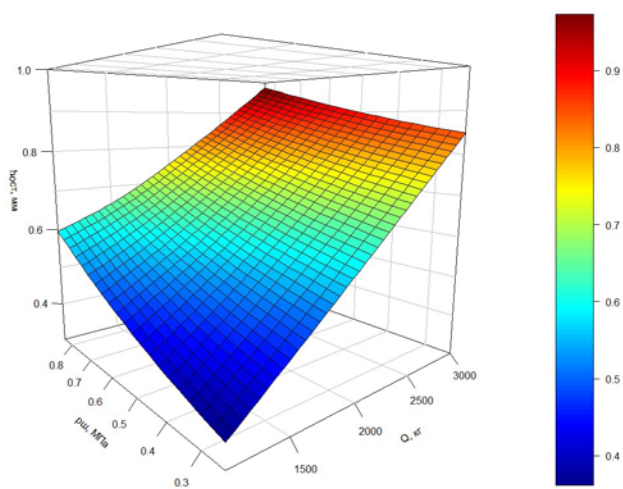


Рис. 7. Поверхность остаточных деформаций дорожного материала, уплотняемого пневмоколесным катком DYNAPAC CP2100

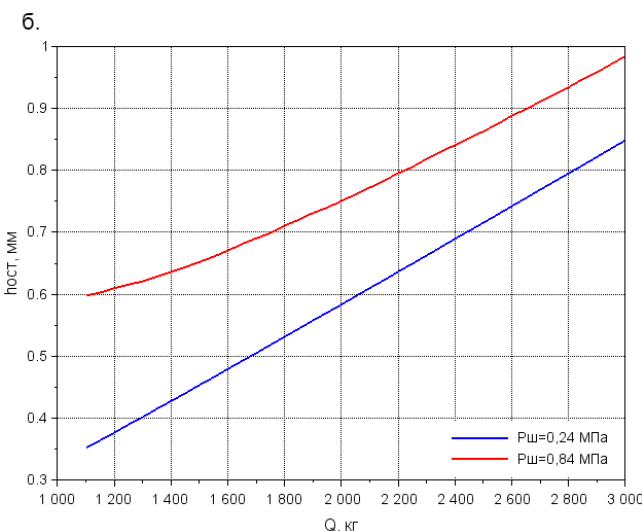
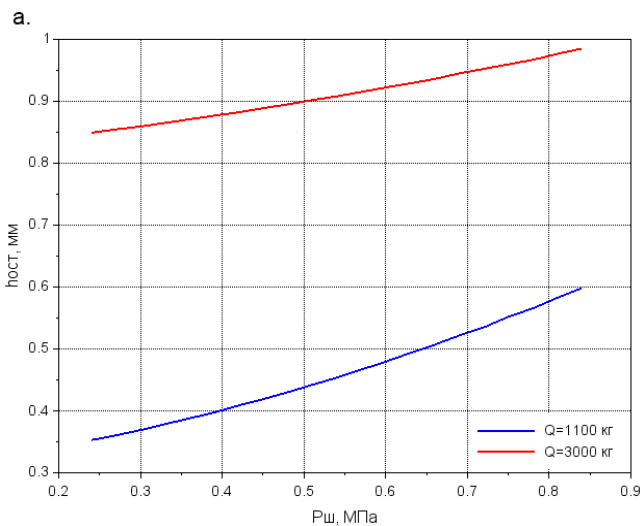


Рис. 8. Изменение остаточной деформации в зависимости от: а – давления воздуха в шине пневматического колеса; б – нагрузки на пневматическое колесо

Полученные результаты могут быть использованы для оценки эффективности уплотнения дорожного материала заданным пневмоколесным катком. Условие продолжения уплотнения слоя дорожного материала пневмоколесным катком имеет вид

$$\frac{h_{ост\ i}}{h_{ост\ 1}} > \Delta, \quad (13)$$

где $h_{ост\ i}$ – остаточная деформация слоя после i -го прохода катка, м; $h_{ост\ 1}$ – остаточная деформация слоя после первого прохода катка, м; Δ – коэффициент, определяемый экспериментально.

В случае нарушения условия (13) контактное давление должно быть увеличено за счет изменения давления в шине пневматического колеса. Это приведет к увеличению остаточной деформации и выполнению условия (13).

Рассматривая деформирование элементарного столбика дорожного материала, выделенного из уплотняемого слоя, получим

$$\frac{K_{y0}}{K_{yi}} = \frac{h_i}{h_0}, \quad (14)$$

где K_{y0} – начальный коэффициент уплотнения слоя;
 K_{yi} – коэффициент уплотнения слоя, достигнутый после i -го прохода катка;
 h_0 – начальная толщина слоя, м;
 h_i – толщина слоя после i -го прохода катка, м.
Из уравнения (14) получим

$$h_i = \frac{K_{y0} h_0}{K_{yi}}. \quad (15)$$

После выполнения пневмоколесным катком i проходов изменение толщины слоя материала составит

$$h_0 - h_i = \sum_{i=1}^n h_{ocm\ i}. \quad (16)$$

Подставляя выражение (15) в уравнение (16), после преобразований получим

$$K_{yi} = \frac{K_{y0} h_0}{h_0 - \sum_{i=1}^n h_{ocm\ i}}. \quad (17)$$

Уравнение (17) позволяет определять численное значение коэффициента уплотнения, достигнутое после выполнения i проходов пневмоколесным катком. Значение K_{y0} определяется на объекте строительства с помощью специальных устройств [9, 10].

Уплотнение дорожного материала завершается в случае выполнения условия

$$K_{yi} \geq K_{y\ mp}, \quad (18)$$

где $K_{y\ mp}$ – требуемый коэффициент уплотнения дорожного материала [11].

В случае невозможности дальнейшего увеличения контактного давления для заданного пневмоколесного катка, полученное значение коэффициента уплотнения K_{yi} используется в качестве исходной информации для следующего дорожного катка из уплотняющего звена.

Заключение

Разработанная методика позволяет осуществлять моделирование процесса нагружения дорожного материала пневмоколесным катком, учитывая давление воздуха в шинах пневматических колес катка и нагрузку на колесо. Результаты моделирования позволяют оценивать эффективность уплотнения различных дорожных материалов пневмоколесными катками. Применение методики в практике строительства автомобильных дорог позволит сократить количество проходов пневмоколесного катка, а также исключить неэффективные проходы.

Литература

1. Троицкий С.Н., Клашанов Ф.К. Анализ уплотняющих возможностей пневмоколесных катков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – № 11(106). – С. 52–54.
2. Костельов М.П. Уплотняющая способность дорожных катков для устройства оснований и покрытий // Дорожная техника. – 2010. – С. 20–33.

3. Зубков А.Ф. Сравнительная оценка по уплотняющему эффекту параметров гладковальцовых катков статического и вибрационного действия при строительстве дорожных покрытий нежесткого типа // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 1(9). – С. 139–148.

4. Алипов А.А., Беляков В.В., Блохин А.Н., Зезюлин Д.В. Распределение давлений в контакте шины с дорогой // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 1(49). – С. 15–18.

5. Богомолов В.А. Расчетное распределение давлений в пятне контакта шины с поверхностью дорожной одежды // Вестник ХНАДУ. – 2016. – № 72. С. 143–150.

6. Anderegg R., Kaufmann K. Intelligent compaction with vibratory rollers: feedback control systems in automatic compaction and compaction control // Transportation Research Record. 2004. Vol. 1868. Pp. 124–134. DOI:10.3141/1868-13.

7. Rahim A., Kalankamary P.G. Falling weight deflectometer for estimating subgrade elastic moduli // Journal of Transportation Engineering-asce. 2003. Vol. 129. Pp. 100–107. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:1(100).

8. Herath A., Mohammad L., Gaspard K.J., Gudishala R., Abu-Farsakh M. The use of dynamic cone penetrometer to predict resilient modulus of subgrade soils // In proceedings: Advances in Pavement Engineering. 2005. DOI:10.1061/40776(155)2.

9. Drnevich, Lin C., Yi Q., Lovell J. Real-time determination of soil type, water content, and density using electromagnetics // Publication FHWA/IN/JTRP-2000/20. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2001. DOI: 10.5703/1288284313300.

10. Костельов М.П., Никольский Ю.Е., Райский Ю.Э. Методы и средства контроля качества уплотнения дорожного земляного полотна, щебеночного основания и асфальтобетонного покрытия [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Стройка». – 2003. – Режим доступа: <http://library.stroit.ru/articles/control> (дата обращения: 21.01.2022).

11. СП 78.13330.2012 Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85 (с Изменением N 1). – М.: Минрегион России, 2012. – 114 с.

Сведения об авторах:

Шишкин Евгений Алексеевич – доцент кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», Тихоокеанский государственный университет.

Телефон 84212375202,
e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

Кравцов Захар Сергеевич – студент кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», Тихоокеанский государственный университет.

Телефон 84212375202,
e-mail: 2018102370@pnu.edu.ru.

Адрес университета: 680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.