

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТА В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫМ КАТКОМ

Клигунова З.А., Шишкин Е.А., Клигунов Е.С.
Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Ключевые слова: уплотнение, грунт, реологическая модель, упругость, вязкость, остаточная деформация, напряжение, упругое последствие, эффективность уплотнения.

Аннотация. Дорожные катки широко используются для выполнения операции уплотнения грунтового слоя дорожного полотна. Основным условием эффективной укатки является соответствие давления под вальцом катка физико-механическим характеристикам уплотняемого материала. Поэтому исследование напряженно-деформированного состояния грунта в процессе его укатки можно считать актуальной задачей. Для математического описания процесса взаимодействия вальца катка с грунтом в настоящей работе используется аппарат реологического моделирования. В результате анализа существующих реологических моделей разработана модель поведения грунта в процессе уплотнения. Адекватность полученной модели физическому процессу уплотнения подтверждается соответствием результатов, полученных в среде визуального моделирования Simulink программы Matlab, результатам проведенных экспериментальных исследований. Разработанная модель может быть использована при оценке эффективности процесса уплотнения грунта дорожным катком с заданными конструктивными параметрами.

MATHEMATICAL MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE SOIL IN THE PROCESS OF COMPACTION BY A ROAD ROLLER

Kligunova Z.A., Shishkin E.A., Kligunov E.S.
Pacific National University, Khabarovsk

Keywords: compaction, soil, rheological model, elasticity, viscosity, residual deformation, stress, elastic aftereffect, compaction efficiency.

Abstract. Road rollers are widely used to perform the operation of compacting the soil layer of the roadway. The main condition for effective rolling is that the pressure under the roller roller corresponds to the physical and mechanical characteristics of the compacted material. Therefore, the study of the stress-strain state of the soil during its rolling can be considered an urgent task. To mathematically describe the process of interaction of the roller roller with the ground, the rheological modeling apparatus is used in this work. As a result of the analysis of existing rheological models, a model of soil behavior in the compaction process has been developed. The adequacy of the obtained model to the physical compaction process is confirmed by the correspondence of the results obtained in the Simulink visual modeling environment of the Matlab program to the results of experimental studies. The developed model can be used to evaluate the effectiveness of the soil compaction process by a road roller with specified design parameters.

Введение

В практике дорожного строительства чаще всего для уплотнения грунтов дорожного полотна используются дорожные катки. Это обусловлено высокой эффективностью данных машин в достижении требуемой плотности грунта [1]. При взаимодействии вальца катка с грунтом возникает сложное напряженно-деформированное состояние, обусловленное упруго-вязко-пластичными свойствами материала [2].

В данной статье поставлена задача создания инструмента исследования напряженно-деформированного состояния уплотняемого вальцом материала. Решение поставленной задачи весьма актуально, т.к. позволит определять наиболее эффективные режимы работы катка.

Материалы и методы исследований

Физико-механические характеристики уплотняемого материала изменяются вследствие приложения к нему внешних сил и изменения напряжений и деформаций. Большинство грунтов, используемых в дорожном строительстве, относится к упрочняющимся телам [3-5].

Для поддержания в них пластических деформаций необходимо повышать напряжения. Рост напряжений происходит с убывающей скоростью. Такое поведение грунта моделируется комбинацией идеально упругого тела Гука и идеально вязкого тела Ньютона. При параллельном соединении этих тел получается модель Кельвина–Фойгта (рис. 1), которая описывается уравнением вида [6-8]

$$\sigma = c \cdot \varepsilon + \mu \cdot \varepsilon', \quad (1)$$

где σ – напряжение, Па; ε – деформация, м; c – коэффициент жесткости, Н/м; μ – коэффициент вязкости, Н·с/м.

После преобразований (1) получим

$$\varepsilon' = \frac{\sigma}{\mu} - \frac{c}{\mu} \cdot \varepsilon. \quad (2)$$

Уравнение (2) представляет собой закон поведения модели Кельвина–Фойгта. На основе уравнения (2) в среде визуального моделирования Simulink программы Matlab была составлена модель Кельвина–Фойгта, изображенная на рисунке 2. Результаты моделирования в среде Simulink программы Matlab представлены на рисунке 3.

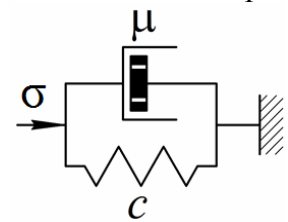


Рис. 1. Модель Кельвина–Фойгта

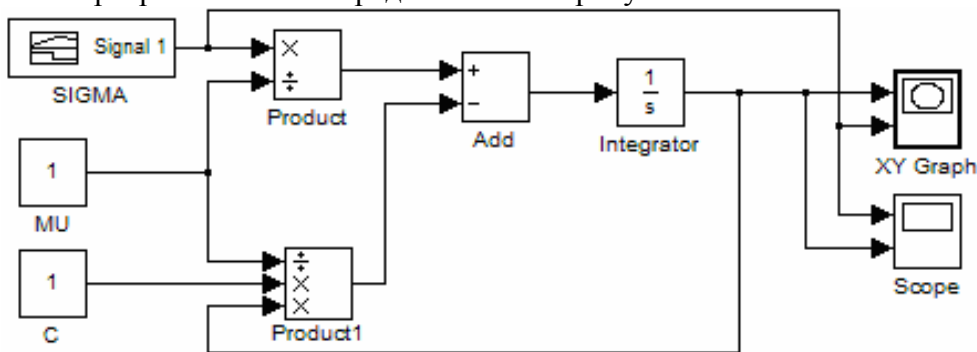


Рис. 2. Структурная схема вязко-упругой модели в среде Simulink

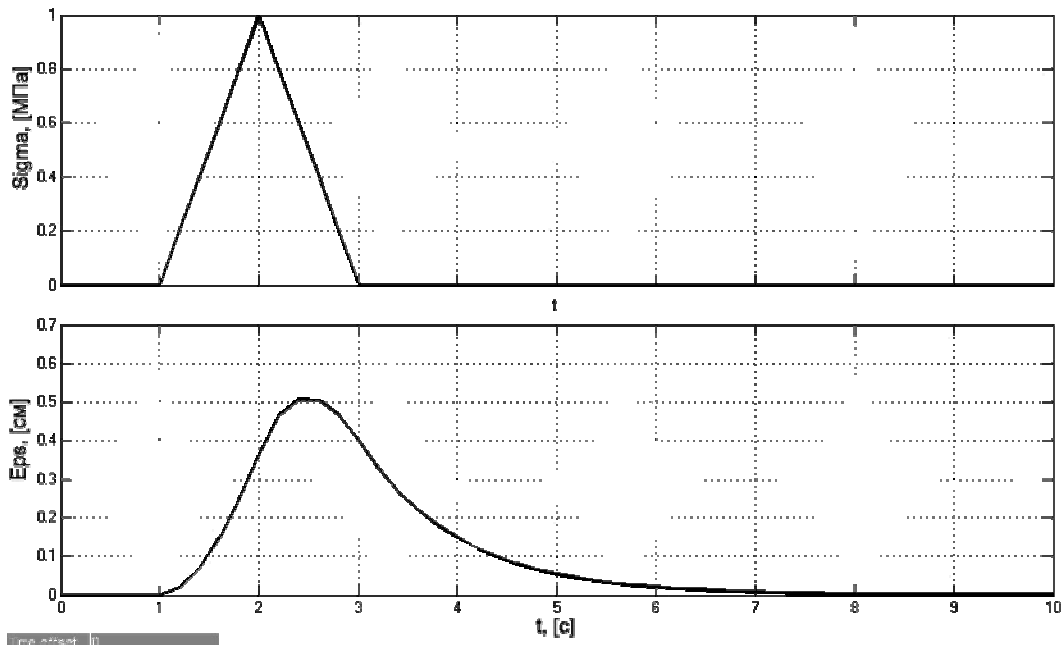


Рис. 3. Диаграммы напряжений и деформаций в результате импульсного воздействия на вязко-упругое тело

Анализ полученных результатов указывает на запаздывание развития деформации по отношению к сжимающему усилию, что характерно для поведения грунта под нагрузкой. Кроме этого, диаграмма напряжение-деформация указывает на наличие упругого последействия. Однако остаточная деформация после снятия нагрузки отсутствует, что характерно для абсолютно упругого тела (рис. 4).

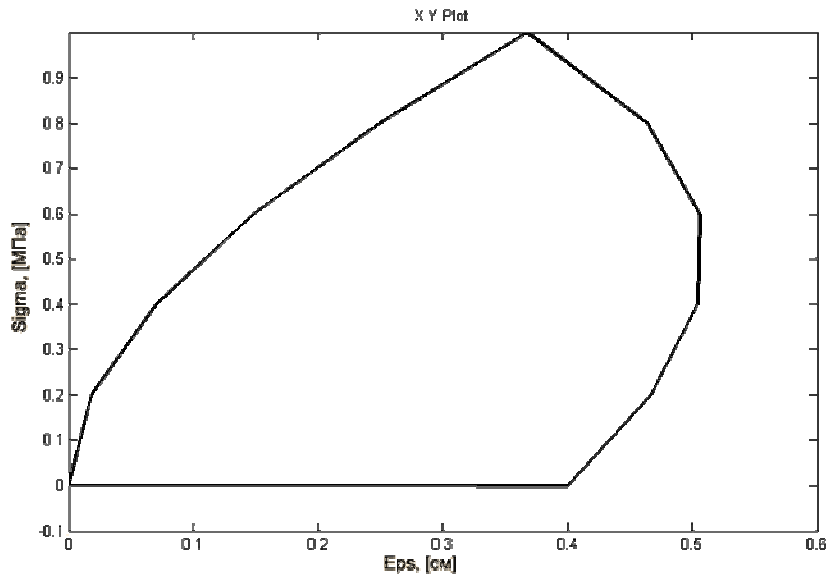


Рис. 4. Диаграмма деформация-напряжение в результате импульсного воздействия на вязкоупругое тело

При последовательном соединении элемента упругости Гука и элемента идеальной вязкости Ньютона получена модель тела Максвелла (рис. 5), которая описывается уравнением вида [6-8]

$$\epsilon' = \frac{\sigma'}{c} + \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

Главным недостатком модели Максвелла является бесконечное пластическое течение при постоянной нагрузке.

Вязко-пластичная модель Шведова-Бингама состоит из соединенных параллельно элементов Ньютона и Сен-Венана (рис. 6).

Модель Шведова-Бингама описывается уравнением вида [6-8]

$$\sigma = \sigma_T + \mu \cdot \epsilon', \quad (4)$$

где σ_T – предел текучести, Па.

При величине напряжений ниже критических данная модель ведет себя как абсолютно твердое недеформируемое тело. Кроме этого, модель не учитывает релаксацию напряжений.

Как показывает практика, применение для описания поведения материалов реологических моделей с двумя элементами дает недостаточно точные результаты, которые могут значительно отличаться от результатов, полученных с помощью экспериментальных исследований. Поэтому с целью повышения точности рассмотрим модели, состоящие из трех или четырех простейших элементов, например модель Бингама (рис. 7), которая описывается уравнением вида [6-8]

$$\epsilon' = \frac{\sigma'}{c} + \frac{\sigma - \sigma_T}{\mu} \quad (5)$$

Модель Шведова включает четыре элемента (рис. 8) и описывается уравнением вида [6-8]

$$\epsilon' = \sigma' \left(\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} \right) + \frac{\sigma - \sigma_T}{\mu}, \quad (6)$$

где c_1, c_2 – коэффициенты жесткости, соответствующие элементам на рисунке 8, Н/м.

Общим недостатком двух последних моделей является абсолютно упругое поведение до достижения некоторого напряжения σ_T .

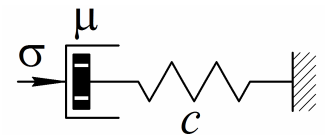


Рис. 5. Модель Максвелла

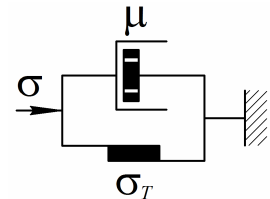


Рис. 6. Вязко-пластичная модель Шведова-Бингама

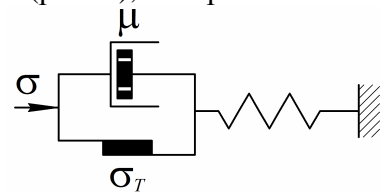


Рис. 7. Вязко-пластичная модель Бингама

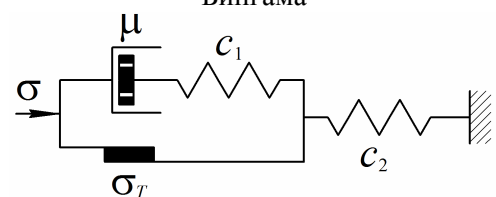


Рис. 8. Модель Шведова

В результате анализа существующих реологических моделей различной сложности разработана модель, представленная на рисунке 9.

Предлагаемая модель построена на основе модели Кельвина-Фойгта, соединенной последовательно с вязким элементом Ньютона.

Уравнение модели Кельвина-Фойгта имеет вид (1). Последовательно установленный вязкий элемент Ньютона описывается уравнением:

$$\sigma = \mu_2 \cdot \varepsilon'. \quad (7)$$

Деформация модели состоит из деформации модели Кельвина-Фойгта и деформации вязкого элемента Ньютона:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

откуда после дифференцирования получим:

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon'_2, \quad (8)$$

$$\varepsilon'_2 = \frac{\sigma}{\mu_2},$$

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon' - \frac{\sigma}{\mu_2}. \quad (9)$$

Продифференцировав (9) и (1), имеем:

$$\varepsilon''_1 = \varepsilon'' - \frac{\sigma'}{\mu_2}, \quad (10)$$

$$\sigma' = c \cdot \varepsilon'_1 + \mu_1 \cdot \varepsilon''_1. \quad (11)$$

Подставив (9) и (10) в (11), получим:

$$\sigma' = c \cdot \varepsilon' - \frac{c}{\mu_2} \sigma + \mu_1 \cdot \varepsilon'' - \frac{\mu_1}{\mu_2} \sigma'. \quad (12)$$

После преобразования (12) получим закон поведения разработанной реологической модели

$$\varepsilon'' = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\mu_1 \mu_2} \sigma' + \frac{c}{\mu_1 \mu_2} \sigma + \frac{c}{\mu_1} \cdot \varepsilon'. \quad (13)$$

Согласно уравнению (13) в среде визуального моделирования Simulink программы Matlab была составлена структурная схема, изображенная на рисунке 10.

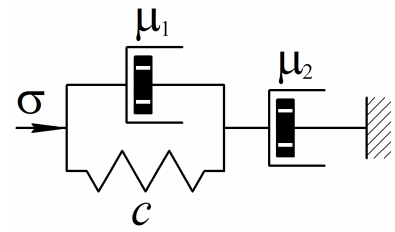


Рис. 9. Предлагаемая модель уплотнения грунта

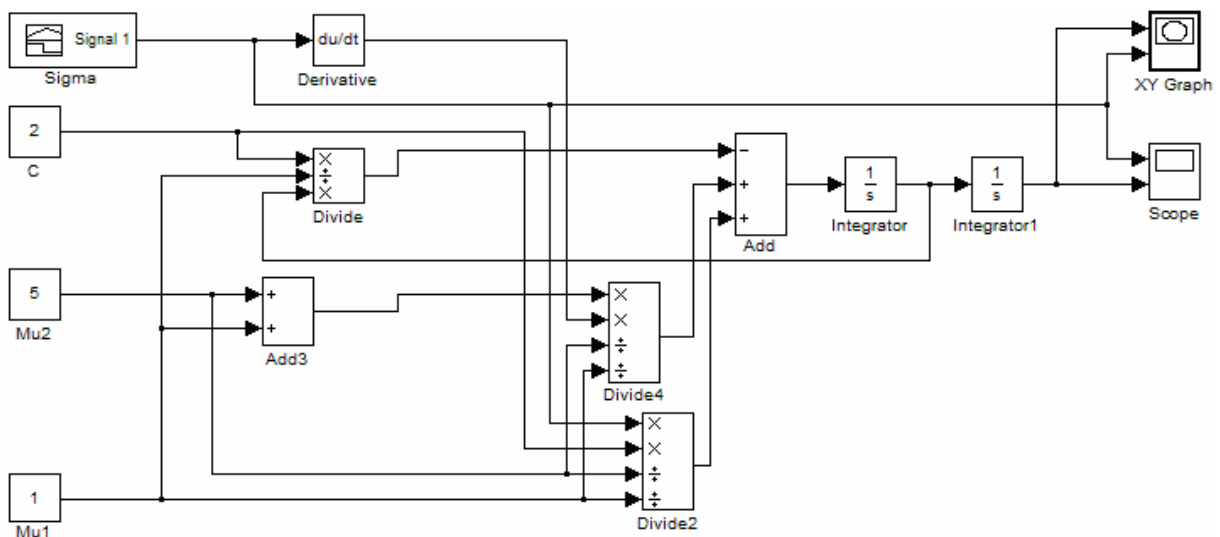


Рис. 10. Структурная схема модели разработанной модели в среде Simulink

Анализ результатов и выводы

Результаты моделирования (рис. 11) свидетельствуют о наличии запаздывания развития деформации по отношению к сжимающему усилию, а также о наличии упругого последействия (рис. 12). Кроме этого в данной модели присутствует остаточная деформация после снятия нагрузки.

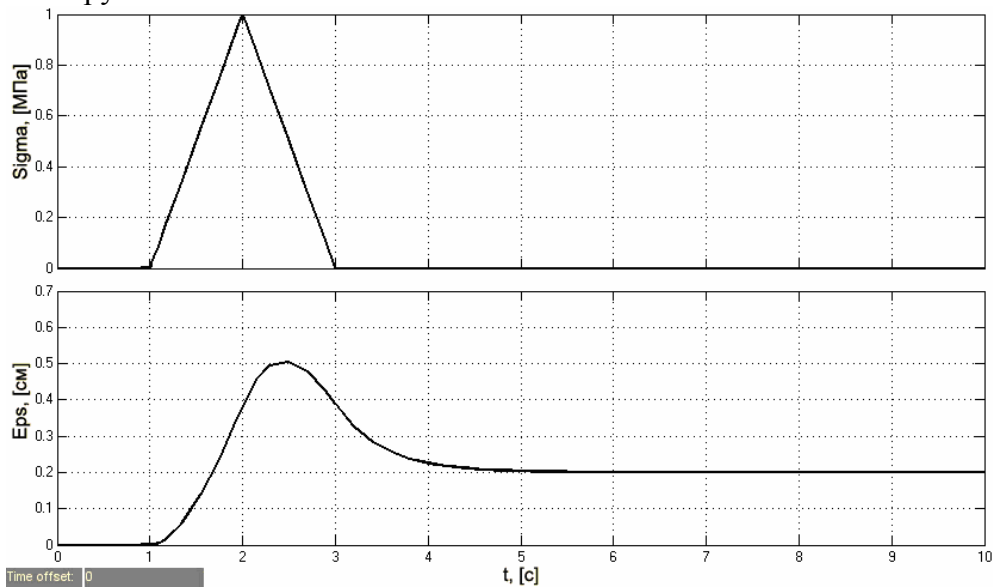


Рис. 11. Диаграммы напряжений и деформаций в результате импульсного воздействия

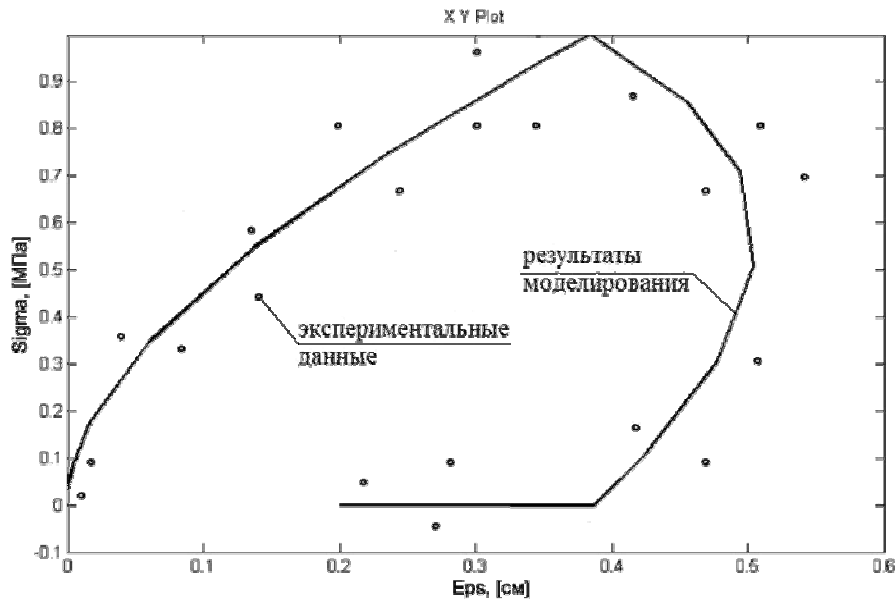


Рис. 12. Диаграмма деформация-напряжение в результате импульсного воздействия на предлагаемую модель

Адекватность результатов моделирования в среде Simulink подтверждается экспериментальными данными источников [9, 10].

Таким образом, разработанная модель может быть использована при моделировании процесса уплотнения грунта гладковальцевыми дорожными катками.

Величина напряжения, передаваемая вальцом дорожного катка грунту в процессе уплотнения, определяется конструктивными параметрами вальца. Разработанная реологическая модель взаимодействия вальца дорожного катка с грунтом устанавливает связь между деформированным состоянием уплотняемого материала и конструктивными параметрами дорожного катка. Моделирование уплотнения грунта различной начальной плотности возможно путем изменения параметров модели. Таким образом, модель позволяет оценивать эффективность уплотнения грунта в результате каждого прохода дорожного катка.

Однако неизвестной остается взаимосвязь физико-механических характеристик грунта (плотность, влажность) и параметров разработанной реологической модели. Установление такой зависимости в результате проведения серии лабораторных экспериментов является одним из направлений дальнейших исследований.

Список литературы

1. Летунин С.Б., Савенков А.В. Анализ использования грунтоуплотняющих машин при возведении земляного полотна // Специальная техника и технологии. – 2019. – №1(39). – С. 88-92.
2. Безматерных А.В., Офрихтер В.Г. Изучение особенностей развития пластических деформаций в грунтах // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 9, № 2. – С. 88-97. – doi.org/10.15593/2224-9826/2018.2.08.
3. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
4. Гольштейн М. Н. Механические свойства грунтов. – М.: Изд-во лит. по строительству, 1971. – 368 с.
5. Черныш А.С., Губарев С.А. Учет реологических особенностей грунта // Вектор ГеоНаук. – 2018. – Т. 1, №1. – С. 5-7.
6. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
7. Шапиро Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники: моногр. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 164 с.
8. Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К. Имитационное моделирование ударного процесса уплотнения грунтов // Вестник СибАДИ. – 2020. – №17(2). – С. 208-218. – doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218.
9. Крутов В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах. – М.: Стройиздат, 1988. – 223 с.
10. Пономарев А.Б., Сазонова С.А. О некоторых результатах исследований насыпных грунтов // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 2. – С. 109-116.

References

1. Letunin S.B., Savenkov A.V. Analysis of the use of soil compacting machines in the construction of subgrade // Special equipment and technologies. 2019, no. 1(39), pp. 88-92.
2. Bezmaternykh A.V., Ofrikhter V.G. The study of the features of increasing of plastic deformations in soils // Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture. 2018, vol. 9, no. 2, pp. 88-97. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.2.08.
3. Boldyrev G.G. Methods for determining the mechanical properties of soils. The state of the question. – Penza, PSUAS, 2008. – 696 p.
4. Golshtein M.N. Mechanical properties of soils. – M.: Publ. house of literature on construction, 1971. – 368 p.
5. Chernysh A.S., Gubarev S.A. 2018. Given the rheological characteristics of the soil // Vector of Geosciences. 2018, no. 1(1), pp 5-7.
6. Vialov S.S. Rheological fundamentals of soil mechanics. – M.: Higher school, 1978. – 447 p.
7. Shapiro D.M. Theory and computational models of geotechnical bases and objects. – Voronezh: Scientific book, 2012. – 164 p.
8. Chukharev R.A., Tarasova N.E., Chabutkin E.K. Simulation of impact process of soil compaction // The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020, vol. 17(2), pp. 208-218. doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218.
9. Krutov V.I. Bases and foundations on filled soil. – M.: Strojizdat, 1988. – 223 p.
10. Ponomarev A.B., Sazonova S.A. Some results of bulk soil research // News of universities. Construction. 2016, no. 2, pp. 109-116.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Клигунова Зоя Александровна – аспирант	Kligunova Zoya Aleksandrovna – postgraduate student
Шишкин Евгений Алексеевич – кандидат технических наук, доцент Высшей школы Промышленной инженерии	Shishkin Evgeny Alekseevich – candidate of technical sciences, associate professor at the Higher school of Industrial engineering
Клигунов Евгений Сергеевич – старший преподаватель Высшей школы Транспортных систем и технологий	Evgeny Sergeyevich Kligunov – senior lecturer at the Higher school of Transport systems and technologies
005196@pnu.edu.ru	

Получена 25.03.2024