УДК 625.085 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Р.А. Чухарев, Н.Е. Тарасова, Е.К. Чабуткин ФГБОУ ВО «ЯГТУ», г. Ярославль, Россия

аннотация

Введение. При строительстве современных скоростных магистралей большое внимание уделяется уплотнению оснований, состоящих из грунтов естественного сложения. Они требуют использования специального оборудования, в том числе и самоходных машин, осуществляющего уплотнение в непрерывном цикле. Но при его проектировании возникают определенные трудности по определению параметров ускорителей удара и массы ударной плиты. Цель работы – изучение влияния параметров рабочего оборудования на процесс деформирования грунта.

Материалы и методы. Для проверки влияния параметров трамбующего оборудования на процесс уплотнения был выбран способ математического моделирования процесса с использованием реологических моделей. Рабочий цикл трамбовки ударного действия условно разделен на четыре фазы. Дано математическое описание движения штампа и грунта в каждой из фаз движения. Рассмотрено изменение напряженного состояния во времени в теле грунтового полупространства.

Результаты. Была получена зависимость изменения напряженного состояния грунта во времени при различных жесткостях пружинного ускорителя удара и изменении массы штампа. Анализ зависимостей показал, что при проектировании оборудования ударного действия, предназначенного для уплотнения грунтов естественного сложения, требуется согласование пиковых напряжений от массы штампа и жесткости ускорителей удара. Это позволит растянуть во времени действие напряжений, быстрее сформировать уплотненное ядро в грунтовом полупространстве и потребует меньшего числа ударов по одному следу для получения требуемой плотности материала.

Обсуждение и заключение. Предложенная модель трамбующего оборудования позволила рассмотреть процессы, происходящие в грунтовом полупространстве, получить сравнительные характеристики массы штампа и жесткости ускорителей удара. Полученные данные хорошо коррелируются с данными других авторов. Результаты исследования могут быть полезны инженерным работникам, занимающимся разработкой новой техники интенсифицирующего действия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *трамбование, грунт, удар, моделирование имитационное, модель реологическая, напряженное состояние, время.*

Поступила 27.03.2020, принята к публикации 24.04.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К. Имитационное моделирование ударного процесса уплотнения грунтов. *Вестник СибАДИ*. 2020; 17 (2): 208-218. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218

© Чухарев Р.А., Тарасова Н.Е., Чабуткин Е.К.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

208

DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218

SIMULATION OF IMPACT PROCESS OF SOIL COMPACTION

Roman A. Chukharev, Natalia E. Tarasova, Evgenii K. Chabutkin Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Technical University", Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. During the construction of modern highways, much attention is paid to compaction of bases consisting of natural soils. They require the use of special equipment, including self-propelled machines, performing compaction in a continuous cycle. But when designing it, certain difficulties arise in determining the parameters of impact accelerators and the mass of the impact plate. The purpose of the work is to study the influence of the parameters of working equipment on the process of soil deformation.

Materials and methods. To check the influence of the parameters of the tamper equipment on the compaction process, a method of mathematical modeling of the process using rheological models was chosen. The working cycle of impact ramming is divided into four phases. A mathematical description of the movement of the stamp and soil in each of the phases of movement is given. The change in the stress condition in time in the body of the soil half-space is considered.

Results.The time dependence of the soil stress condition was obtained for different stiffnesses of the spring impact accelerator and the change in the stamp mass. A joint analysis of the obtained dependencies showed that when designing impact equipment intended for compaction of naturally occurring soils, it requires matching the peak stresses from the mass of the stamp and the stiffness of the impact accelerators. This will make it possible to stretch the action of stresses in time, to form a compacted core in the soil half-space quickly and require a smaller number of strokes on one track to obtain the required material density.

Discussion and conclusion. The proposed model of tamper equipment made it possible to consider the processes occurring in the soil half-space, to obtain comparative characteristics of the stamp mass and the rigidity of impact accelerators. The obtained data correlate well with the data of other authors. The results of the study may be useful to engineers involved in the development of new techniques of intensifying action.

KEYWORDS: tamping, soil, impact, simulation modeling, rheological model, stress state, time.

Submitted 27.03.2020, revised 24.04.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Chukharev R.A., Tarasova N.E., Chabutkin E.K. Simulation of impact process of soil compaction. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal.* 2020; 17 (2): 208-218. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-208-218

© Chukharev R.A., Tarasova N.E., Chabutkin E.K.



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



РАЗДЕЛ І ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

введение

При строительстве автомобильных дорог немаловажное значение имеет уплотнение различных конструктивных слоев. При этом большое внимание уделяется уплотнению грунтов естественного сложения нижнего основания¹ [1, 2]. Такие грунты обычно имеют недостаточную плотность, но повышенную прочность сцепления между отдельными агрегатами грунтового полупространства², что требует приложения к ним нагрузок, превышающих пределы прочности уплотняемого материала. Для этих целей требуются специальные установки динамического действия с повышенной энергией удара³ [3]. В настоящее время для уплотнения грунтов естественного сложения используются специальные машины, которые в большинстве своем выполнены в единичных экземплярах и представляют стационарное оборудование⁴ [4, 5, 6, 7]. Однако применение подобных машин при строительстве протяженных объектов, таких как основания автомобильных дорог, основания железнодорожных путей, не представляется возможным. Для этих целей нужна самоходная машина, осуществляющая уплотнение в непрерывном цикле. Такое оборудование разработано на кафедре СДМ ЯГТУ [8].



Рисунок 1 – 3D модель трамбовки

Figure 1 – 3D model of tamping

³ Dobrescu C.-F., Brăguță E. Optimization of Vibro-Compachion Technological Process Considering Rheological Properties/ Springer Proceedings in Physics 14th. Cep. "Acoustics and Vibration of Mechanical Structures-AVMS-2017 - Proceedings of the 14th AVMS Conference. 2018. pp. 287-293.

⁴ Афанасьев А.А., Чабуткин Е.К. Уплотнение грунтов трамбовками ударного действия. Семьдесят вторая Всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 24 апреля 2019. г., Ярославль: сб. материалов конф. В 3 ч. Ч. 1. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2019. С. 579–583.



¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунта земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт. 1975. 285 с.

² Chabutkin E.K. Change of Structure of Dispersion Material Under Dynamic Loads. Proceeding of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICE, 2019)/lecture Notes in Mechanical Engineering // Springer Nature Switzerland AG 2020/ V2, p.559-565. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22063-1_-59

Конструктивные особенности предлагаемой машины (рисунок 1) заключаются в том, что используется два силовых агрегата, работающих в противофазе.

Кроме того, в конструкции каждой секции применены ускорители удара, что позволяет интенсифицировать процесс уплотнения и получить компактные размеры прицепного оборудования. Однако некоторые трудности вызывает определение параметров ускорителя и массы ударной плиты.

Анализ исследований уплотнения грунтов трамбованием [9, 10, 11] показывает, что развитие напряжений на поверхности контакта штампа с грунтом, при ударе одномассным штампом, определяется только параметрами штампа (удельным импульсом удара и соотношением скорости удара к статическому давлению) и свойствами грунта.

Явление удара описывается известным выражением [12]:

$$\int_0^\tau F dt = m(V_1 - V_2) ,$$

где – время удара; F – сила, развиваемая в процессе удара; m – масса рабочего органа; V₁ – скорость рабочего органа в начале удара; V₂ – скорость рабочего органа в конце удара (обычно принимается равной нулю).

Анализ приведённой выше формулы показывает, что силы, развиваемые в процессе удара, можно регулировать за счет изменения ударной массы и скорости штампа в момент соприкосновения последнего с поверхностью грунтового полупространства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Процесс трамбования характеризуется малой продолжительностью воздействия напряжений и значительной глубиной распространения напряженно-деформативного состояния. Данные машины могут осуществлять уплотнение слоями большой толщины [13].

Экспериментальное исследование процесса уплотнения грунта и изучение влияния различных параметров на него довольно затруднительно и требует больших затрат по времени. Кроме того, нестабильность характеристик уплотняемого материала может внести определенные трудности в оценке полученных результатов. Поэтому для проверки влияния параметров трамбующего оборудования на процесс уплотнения был выбран способ имитационного математического моделирования процесса с использованием реологических моделей (рисунок 2).



Рисунок 2 – Реологическая модель трамбовки

Figure 2 – Rheological model of tamping

Уплотняемый грунт под воздействием внешних нагрузок обладает упруго-вязко-пластичными свойствами. Однако при ограничении времени контакта плиты с грунтом пластическая составляющая сопротивления материала деформированию может рассматриваться как составляющая вязкого сопротивления [14]. При этом можно принять следующие допущения: трамбующая плита абсолютно жесткая; поверхность рабочего органа плоская; площадь контакта является величиной постоянной, не меняющейся в процессе работы машины.

Параметры грунта в процессе уплотнения также подвержены изменению. Однако в пределах рассмотрения отдельных циклов нагружения эти изменения не существенны и ими можно пренебречь.

Само по себе уплотнение является весьма сложным процессом, с множеством взаимосвязанных факторов, так или иначе оказывающих влияние **на** конечный результат. Работа всех уплотняющих машин связана с приложением к поверхности уплотняемого материала повторяющихся циклических нагрузок. При этом деформация материала зависит от величины нагрузки, определяемой контактными давлениями, скорости изменения напряженного состояния и продолжительности действия нагрузки, а следовательно и от числа повторности ее приложения⁵.

В машинах ударного действия сбрасываемый груз в момент касания грунта обладает определенной кинетической энергией $E_1 = m_1 \frac{V^2}{2}$, которая расходуется на преодоление упруго-вязких сил сопротивления среды. При этом суммарную силу сопротивления упруго-вязких сил в грунте $P_{\rm rp}$ можно записать как

$$P_{\rm rp} = k_{\rm rp} X + b_{\rm rp} \dot{X},$$

где k_{гр} – жесткость деформируемого объема грунта, b_{гр} – коэффициент вязкого сопротивления грунта, X – деформация грунта, V² – скорость сбрасываемого груза массой m₁.

Полагая движение трамбующего органа после встречи с грунтом равноускоренным, можно определить скорость движения системы «рабочий орган – грунт»

$$V_{\rm rp} = \left(m_1 / \left(m_1 + m_{\rm rp} \right) \right) V,$$

где т_ присоединенная масса грунта.

Кинетическая энергия штампа трамбовки, представленной на рисунке 2, будет образовываться не только от свободного движения массы m₁ но и от действия пружинных ускорителей с жесткостью k1. При этом интересно оценить процессы, происходящие в грунте, в зависимости от соотношения массы штампа и параметров пружинных ускорителей.

Рабочий цикл трамбовки ударного действия можно условно разделить на четыре фазы.

Первая фаза. Движение ударной плиты m₁ вверх и сжатие пружинных ускорителей. Эту фазу движения можно описать дифференциальными уравнениями:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 - 4 \cdot k_1 \cdot x_1 = -P + m_1 \cdot g \\ m_{\rm rp} \cdot \ddot{x}_{\rm rp} + k_{\rm rp} \cdot x_{\rm rp} + b_{\rm rp} \cdot \dot{x}_{\rm rp} = m_{\rm rp} \cdot g \end{cases}$$

при условии выполнения следующих соотношений: $x_{rp} < x_1; x_1 > x_0; \dot{x}_1 < 0$.

Вторая фаза. Движение массы m₁ вниз, до касания с грунтом. Этот процесс можно описать как $x_{\rm rp} < x_1; x_1 > x_0; \dot{x}_1 < 0.$

$$\begin{cases} -m_1 \cdot \ddot{x}_1 + 4 \cdot k_1 \cdot x_1 = m_1 \cdot g\\ m_{\rm rp} \cdot \ddot{x}_{\rm rp} + k_{\rm rp} \cdot x_{\rm rp} + b_{\rm rp} \cdot \dot{x}_{\rm rp} = m_{\rm rp} \cdot g \end{cases}$$

при соблюдении условий $x_{rp} < x_1; x_1 > x_0; \dot{x}_1 > 0.$

Третья фаза. Касание ударной плиты с грунтом (удар) и движение совместно штампа и присоединенной массы грунта,

$$\begin{cases} (m_1 + m_{rp}) \cdot \ddot{x}_1 + k_{rp} \cdot x_1 + k_1 \cdot x_1 \cdot 4 + b_{rp} \cdot \dot{x}_{rp} = (m_1 + m_{rp}) \cdot g \\ x_1 = x_{rp} \end{cases}$$

при этом должны выполняться условия: $x_{rp} = x_1; \dot{x}_{rp} = \dot{x}_1; \dot{x}_1 > 0.$

Четвертая фаза. Восстановление грунта. После отрыва штампа от грунтового полупространства сжатый грунт начинает восстанавливаться. При этом в теле грунтового полупространства создается уплотненное ядро и при следующих ударах нарастание плотности происходит снизу вверх. Штамп движется со скоростями значительно выше, чем происходит восстановление грунта и его движение описывается дифференциальными уравнениями, соответствующими первой фазе движения.

⁵ Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Л.: Машиностроение, 1973. 176 с.

TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

PART I





Рисунок 3 – Аналоговые расчетные схемы, построенные в подпрограмме Simulink: а – первая фаза движения; б – вторая фаза движения; в – третья фаза движения; г – четвертая фаза движения

Figure 3 – Analog calculation schemes built in the Simulink subroutine: a – the first phase of movement; b – the second phase of movement; c – the third phase of movement; d – the fourth phase of movement

В тоже время движение присоединенной массы грунта можно описать как

$$-m_{\mathrm{rp}}\cdot \ddot{x}_{\mathrm{rp}} - k_{\mathrm{rp}}\cdot x_{\mathrm{rp}} - b_{\mathrm{rp}}\cdot \dot{x}_{\mathrm{rp}} = m_{\mathrm{rp}}\cdot g$$
 ,

при соблюдении условия $x_{rp} < x_1$.

В составленной выше модели приняты следующие обозначения: m_1 – масса уплотняющей плиты; g – ускорение свободного падения; P – сила, необходимая для поднятия трамбующей плиты и преодоления сопротивления сжатия ускорителей; k_1 – жесткость ускорителей; x_0 – нулевая координата (координата рамы машины); x_1 – координата максимального поднятия трамбующей плиты; \dot{x}_1 – скорость движения трамбующей плиты; \ddot{x}_1 – ускорение трамбующей плиты; $m_{\rm rp}$ – присоединенная масса грунта, принимаем $m_{\rm rp} = \frac{1}{2} \cdot m_1$, в соответствии с рекомендациями⁶; $k_{\rm rp}$ – упругость грунта; $b_{\rm rp}$ – вязкость грунта; $x_{\rm rp}$ – координата уровня грунта; $\dot{x}_{\rm rp}$ – скорость перемещения грунта; $\ddot{x}_{\rm rp}$ – ускорение перемещения грунта, $P_{\rm rp}$ – реакция грунта.

Решение описанной выше модели осуществлялось с использованием программы Matlab 2015 в подпрограмме Simulink. Полученные расчетные схемы представлены на рисунке 3.

Данные расчетные схемы позволяют определить перемещения рабочей плиты и поверхности грунтового полупространства после удара во времени. Однако для сопоставления процессов, происходящих в грунте, интересно изменение напряженного состояния в последнем.

⁶ Альберт И.У. Теоретические основы динамических методов поверхностного уплотнения грунтов. М., 1974. 67 с.



Рисунок 4 — Изменение напряженного состояния в грунте при применении различных по жесткости ускорителей удара

Figure 4 – Change in the stress condition in the soil when using shock accelerators of different stiffness

Зная сопротивление упруго-вязких сил в грунте $P_{\rm rp}$, при неизменной площади поверхности жесткого штампа, легко перейти к контактным напряжениям σ_0 . Поэтому задачей исследования является определение максимального значения остаточных напряжений при изменении таких параметров, как масса ударной части m1 и жесткости пружинного ускорителя k1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет изменения напряженно-деформационного состояния грунтового полупространства осуществлялся применительно к конструкции прицепной трамбовки, навешиваемой на трактор третьего тягового класса [8]. В качестве управляемых параметров выбраны: масса ударной части m_1 , которая изменялась в диапазоне от 150 до 500 кг, и жесткость ускорителя удара k_{1} , изменяемая в диапазоне от 150 до 500 кН/м. При этом площадь рабочего органа составляла S=1 м², при ширине B=0,8 м. Проверка работоспособности модели проводилась для легкого суглинка со следующими характеристиками: вязкость $b_{rp} = 212$ кПас и жесткость $k_{rp} = 300$ кН/м.

В результате проведенного вычислительного эксперимента была получена зависимость изменения напряженного состояния грунта во времени при различных жесткостях пружинного ускорителя удара и постоянной массе ударного штампа (рисунок 4). Анализ полученных зависимостей показывает, что при увеличении жесткости пружин ускорителя растет импульс удара

При этом сокращается время нарастания пиковых значений напряжений в грунтовом полупространстве. Максимальные пиковые напряжения при жесткости ускорителей удара в 150 кН/м появляются через 0,5 с, в то время как при жесткости в 500 кН/м – через 0,15 с. Очевидно это связано с возросшей скоростью удара по сравнению со свободным падением штампа. В дальнейшем, при отрыве штампа от поверхности грунта, происходит спад напряжений с их стабилизацией через 0,7 с.

Естественно, на формирование напряженного состояния в грунтовом полупространстве основное влияние оказывают параметры ударного штампа (рисунок 5).

В этом случае пиковые значения напряжений проявляются через 0,2...0,3 с, со смещением в большую сторону как по абсолютному значению напряжений, так и по времени их проявления, при увеличении массы штампа. Очевидно этот эффект связан с большей инерционностью уплотняющего рабочего органа.



Рисунок 5 – Изменение напряженного состояния в грунте при изменении массы штампа

> Figure 5 – Change in stress condition in the soil when changing the mass of the stamp



Рисунок 6 – Изменение напряженного состояния в грунте при использовании штампа с ускорителем удара

Figure 6 – Change in stress condition in the soil when using a stamp with a shock accelerator При этом и время стабилизации напряжений наступает значительно позже – 0,9 с, при использовании штампа массой 500 кг.

Совместный анализ полученных зависимостей показывает, что при проектировании оборудования ударного действия, предназначенного для уплотнения грунтов естественного сложения, требуется обоснованный подход к выбору массы штампа и жесткости ускорителей удара. Так, для разработанной машины [8] с параметрами, указанными выше, целесообразно использовать массу ударной части в 350 кг при жесткости ускорителей удара в 500 кH/м. В этом случае и от штампа, и от импульса удара будут создаваться пиковые напряжения в 2000 Па, но наступление их будет растянуто по времени от 0,15 до 0,3 с (рисунок 6).

Такой процесс позволит быстрее сформировать уплотненное ядро в грунтовом полупространстве и потребует меньшего числа ударов по одному следу для получения требуемой плотности материала. При этом, как показывают исследования, представленные в работе [15, 16], увеличивается и глубина распространения напряжений.

Обычно машины ударного действия работают в частотном режиме, обеспечивающем нанесение следующего удара после полного затухания процессов, происходящих в массе грунта. Анализ полученных зависимостей показывает, что этот момент наступает примерно через 0,8...0,9 с. Таким образом, уплотняющая машина должна работать с частотами 60...100 ударов в минуту. Этот вывод хорошо согласуется с данными, полученными другими авторами [17, 18].

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При строительстве скоростных магистралей необходимо повышать несущую способность не только конструктивных слоев дороги, но и оснований. Однако специализированное оборудование для этих целей отсутствует, а используемые технологии требуют больших затрат как по времени, так и по финансам. Повышение прочности и плотности грунтов оснований естественного сложения требует приложения к ним ударных нагрузок. Для этих целей нужна маневренная машина с повышенной энергией удара и осуществляющая работы в непрерывном цикле.

Интенсификация процесса уплотнения ударными нагрузками возможна только за счет увеличения массы штампа, высоты сбрасывания ударной плиты или за счет увеличения скорости удара. Применение первых двух способов в малогабаритной самоходной машине весьма затруднительно, а третий способ требует дополнительных устройств, одним из которых могут быть ускорители удара.

Предложенная модель трамбующего оборудования позволила рассмотреть процессы, происходящие в грунтовом полупространстве, получить сравнительные характеристики массы штампа и жесткости ускорителей удара. Полученные данные хорошо коррелируются с данными, полученными ранее другими авторами [17].

Однако при повышенных скоростях удара явно просматриваются волновые процессы, происходящие в грунте. Поэтому в дальнейшем необходимо изучить процесс нарастания коэффициента уплотнения с использованием волновых подходов [19] и оценить влияние параметров дополнительных устройств на процесс уплотнения. Кроме того, требует дополнительного изучения взаимное влияние двух штампов, работающих в противофазе.

Полученные результаты исследования могут быть полезны инженерным работникам, занимающимся разработкой новой техники интенсифицирующего действия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Serridge C.J. Synac O. Ground Improvement Solutions for Motorway Widening Schemes and New Highway Embankment Construction Over Soft Ground. *Ground Improvement Journal.* 2007. Vol.11(4). pp. 219–228.

2. Karczewski J. Identification of Heavy Machines Impaction on Soil Using Ground Penetrating Radar. Karczewski J., Pysz P., Tomecka-Suchoń S., Akinniyi A., Uhl T. Mechanisms and Machine Science. 2019. Vol. 73. pp. 3741–3748.

3. Доценко А.И., Никитин Д.В. Пути повышения эффективности грунтоуплотняющих машин ударного действия // Вестник МАДИ. 2019. №3 (58). С. 27–31.

4. Дьяконов П.Ю., Болтунов В.А., Потапов А.Д. Применение тяжелых трамбовок при возведении насыпей в транспортном строительстве // Вестник МГСУ. 2009. № 1. С. 97–99.

5. Летунин С.Б., Савенков А.В. Анализ использования грунтоуплотняющих машин при возведении земляного полотна // Сб. «Специальная техника и технологии транспорта Санкт-Петербурга». Петергоф, 2019. С. 88–92.

6. Халафов Н.М., Габиров Ф.Г., Амрахов А.Т. Утрамбовывание просадочных лессовых грунтов тяжелыми трамбовками и разработка новых конструкций // Строительство и архитектура. 2016. Т.4 № 1. С. 6–9.

7. Галдин Н.С. Рабочее оборудование ударного действия для уплотнения грунта трамбованием: монография [Электронный ресурс]: Н.С. Галдин; СибАДИ, кафедра ПТТ-МиГ. Электрон. дан. Омск: СибАДИ, 2016. 104 с.

8. Чухарев Р.А., Чабуткин Е.К. Трамбовка ударного действия для уплотнения грунтов естественного сложения. Механизация и автоматизация строительства [Электронный ресурс]: сборник статей / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. С.7–12.

9. Костельов М.П., Хархута Н.Я. Определение основных параметров трамбующих машин для уплотнения грунтов // Строительные и дорожные машины. 1969. № 11. С. 11–14.

10. Тюремнов И.С., Разумов С.В., Доценко А.И. Методика расчета параметров и режимов работы двухмассных рабочих органов трамбующих машин // Известия вузов, Машиностроение. 2005. №2. С. 37–43.

11. Polyakov A.P. Dynamic powder compaction processes // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Iss.2. pp.42–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.042-082.

12. Галдин Н.С., Егорова Н.Н. Моделирование трамбующего рабочего органа // Вестник Воронежского гос.техн.ун-та. 2011. т.7. № 1. С. 49–52.

13. Абелев М.Ю., Романов Н.В., Коптева О.В. Уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 16–21.

14. Савельев С.В., Михеев В.В. Исследование деформирования упруго-вязкой среды при ударном нагружении // Вестник Сибади. 2012. №4. С.100–103.

15. Тюремнов И.С., Разумов С.В. К вопросу о повышении эффективности рабочих органов трамбующих машин // Известия вузов. Строительство. 1999. № 10. С. 88–93.

16. Paulmichl I., Furpass J.: Mitteltiefe Verdichtung mit dem Impulsverdichter – Fallbeispiele aus der Praxis. Tagungsband der 7. Österreichische Geotechniktagung des Österreichischen Nationalkomitees der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) und des ÖIAV, Austria Center Vienna, 21. – 22. Jänner 2009.

17. Костельов М.П. Напряженное состояние грунта, уплотняемого ударными нагрузками // В сб. «Вопросы проектирования и сооружения земляного полотна автомобильных дорог». Тр.Союздорнии, вып. 37, Балашиха, 1970. С. 177–194.

18. Попов Г.Н., Разумов С.В., Травников К.К. Определение технологических параметров трамбующих машин в условиях эксплуатации // Строительные и дорожные машины. № 3. 1987. С. 16–17.

19. Попов Г.Н., Разумов С.В. Расчетная модель грунтоуплотняющих машин ударного действия. // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1986. № 8. С. 103–107.

REFERENCES

1. Serridge C.J. Synac O. Ground Improvement Solutions for Motorway Widening Schemes and New Highway Embankment Construction Over Soft Ground. *Ground Improvement Journal.* 2007; 11(4): 219-228. 2. Karczewski J. Identification of Heavy Machines Impaction on Soil Using Ground Penetrating Radar. Karczewski J., Pysz P., Tomecka-Suchoń S., Akinniyi A., Uhl T. *Mechanisms and Machine Science*. 2019; 73: 3741–3748.

3. Docenko A.I., Nikitin D.V. Puti povyshenia effektivnosti gruntouplotniaushih mashin udarnogo deystvia. [Ways to improve the efficiency of impact compacting machines]. *Vestnik MADI*. 2019; 3(58): 27–31 (in Russian).

4. Diakonov P.U., Boltunov V.A., Potapov A.D. Primenenie tiagelyh trambovok pri vozvedenii nasypei v transportnom stroitelstve [The use of heavy tampers in the construction of embankments in transport construction]. *Vestnik MGSU*. 2009; 1: 97–99 (in Russian).

5. Letunin S.B., Savenkov A.V. Analiz ispolzovania gruntouplotniaushih masin pri vozvedenii zemlianogo polotna [Analysis of the use of soil compacting machines in the construction of subgrade]. *Sb.Spetsialnaya equipment and technology transport St. Petersburg*, Peterhof, 2019:88–92 (in Russian).

6. Halafov N.M., Gabirov F.G., Amrahov A.T. Utrambovyvanie prosadochnyh lessovyh gruntov tiagelymi trambovkami I razrabotka novyh konstrukcyi [Tamping subsidence forest soils with heavy rammers and the development of new designs.]. *Construction and Architecture*. 2016; 4 no1: 6–9 (in Russian).

7. Galdin N.S. *Rabochee oborudovanie udarnogo deistvia dlia uplotnenia grunta trambovaniem* [Working equipment of impact action for compaction of soil by ramming]. Omsk, 2016: 104 (in Russian).

8. Chukharev R.A., Chabutkin E.K. Trambovka udarnogodeistviadliauplotneniagruntovestestvennogo slogenia. [Impact ramming for compaction of soils of natural composition]. *Mechanization and automation of construction. In the collection of articles.* Samara: Samar. state tech. University, 2019: 7–12 (in Russian).

9. Kosteliov M.P., Harhuta N.Ia. Opredelenie osnovnyh parametrov trambuyschih mashin dlia uplotnenia gruntov [Determination of the main parameters of tamping machines for soil compaction]. *Construction and road machines*. 1969; 11: 11–14 (in Russian).

10. Turemnov I.S., Razumov S.V., Docenko A.I. Metodika rascheta parametrov I regimov raboty dvuhmassnyh rabochih organov trambuushih mashin [Methodology for calculating the parameters and operating modes of two-mass working elements of tamping machines]. University Proceedings, *Mechanical Engineering*. 2005; 2: 37–43 (in Russian).

11. Polyakov A.P. Dynamic powder compaction processes. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures.* 2018; 2: 42–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.2.042-082.

12. Galdin N.S., Egorova N.N. Modelirovanie trambuuschego rabochego organa. [Modeling tampering working body]. *Vestnik Voronezhskogo teknikal university.* 2011; Vol.7, no.1: 49–52 (in Russian).

13. Abelev M.U., Romanov N.V., Kopteva O.V. Uplotnenie gruntov tiazhelymi trambovkami [Compaction of soils with heavy tampers]. *Industrial and civil engineering.* 2018; 4: 16–21 (in Russian).

14. Saveliev S.V., Mikheev V.V. Issledovanie deformirovania uprugo-viazkoi sredy pri udarnom nagruzhenii. [Reseach Deformation of Elastik-viscous Medium Under Impact Loading]. *Vestnik SibADI*. 2012; 4: 100–103 (in Russian).

15. Turemnov I.S., Razumov S.V. K voprosu o povyshenii effectivnosti rabochih organov trambuuschih masin [On the issue of improving the efficiency of the working bodies of tamping machines]. *University News. Construction*, 1999, no. 10, pp. 88–93 (in Russian).

16. Paulmichl I., Furpass J.: Mitteltiefe Verdichtung mit dem Impulsverdichter – Fallbeispiele aus der Praxis. Tagungsband der 7. Österreichische Geotechniktagung des Österreichischen Nationalkomitees der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE) und des ÖIAV, Austria Center Vienna, 21–22. Jänner 2009.

17. Kosteliov M.P. Napriazhennoe sostoianie grunta, uplotniaemogo udarnymi nagruzkami [The stress state of the soil, compacted by shock loads]. *Trudy Souzdornii*. 1970; Iss.37, Balashiha; 177–194 (in Russian).

18. Popov G.N., Razumov S.V., Travnikov K.K. Opredelenie tehnologicheskih parametrov trambuuschih mashin v usloviah ekspluatacii [Determination of technological parameters of tamping machines in operating conditions]. *Construction and road machines*. 1987; 3: 16–17 (in Russian).

19. Popov G.N., Razumov S.V. Raschetnaia model gruntouplotniauschih mashin udarnogo deistvia. [A design model of shock-tightening soil compacting machines]. *University News. Construction and architecture.* 1986; 8: 103–107 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Чухарев Роман Алексеевич – Написание статьи, разработка расчетной схемы и математической модели, участие в проведении вычислительного эксперимента и обработке полученных результатов.

Тарасова Наталья Евгеньевна – Оказание помощи в разработке математической модели, обработка полученных результатов, написание основного раздела работы.

Чабуткин Евгений Константинович – Общее руководство работой, корректировка содержательной части работы, формулирование результатов работы.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Roman A. Chukharev – Writing an article, developing a calculation scheme and a mathematical model, participating in a computational experiment and processing the results.

Natalia E. Tarasova – Assisting in the development of a mathematical model, processing the results, writing the main section of the work.

Evgenii K. Chabutkin – The general management of the work, correction of the content of the work, the formulation of the results.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чухарев Роман Алексеевич – инженер, кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)», (150023, Ярославль, Московский пр., д. 88, e-mail: aryergard@yandex.ru).

Тарасова Наталья Евгеньевна — канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)», ORCID 0000-0002-3782-6768 (150023, г. Ярославль, Московский пр., д. 88, e-mail: tarasovane@ystu.ru).

Чабуткин Евгений Константинович – канд. техн. наук, доц., кафедра «Строительные и дорожные машины», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ)», ORCID 0000-0001-6979-410X (150023, г. Ярославль, Московский пр., д. 88, e-mail: chabutkin-ek@yandex.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Chukharev – Engineer, the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (YGTU), (150023, Yaroslavl Region, Yaroslavl, Moskovskii Prospect, 88, e-mail: aryergard@yandex.ru).

Natalia E. Tarasova – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (YGTU), ORCID 0000-0002-3782-6768 (150023, Yaroslavl Region, Yaroslavl, Moskovskii Prospect, 88, e-mail: tarasovane@ystu.ru).

Evgenii K. Chabutkin – Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, the Department of Construction and Road Machines, Yaroslavl State Technical University (YGTU), ORCID 0000-0001-6979-410X (150023, Yaroslavl Region, Yaroslavl, Moskovskii Prospect, 88, e-mail: chabutkin-ek@yandex.ru).