



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.04

УДК 624.138.22: 51-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРОПЛИТЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ГРУНТА

И.С. Тюремнов, С.С. Ефимов

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 27 марта 2022 г.
Одобрена: 12 октября 2022 г.
Принята к публикации:
12 декабря 2022 г.

Ключевые слова:

грунт, уплотнение, вибрация, виброплита, плита вибрационная, моделирование математическое, модель реологическая, сила реакции грунта, время нагружения грунта, время разгрузки грунта, жесткость грунта, вязкость грунта.

АННОТАЦИЯ

В работе представлена трёхмассная реологическая модель системы «грунт – основание виброплиты – рама виброплиты». Реологическая модель позволяет воспроизводить различные режимы взаимодействия основания виброплиты с грунтом: без отрыва от грунта и с различными видами отрыва от грунта. Верификация модели осуществлялась сравнением экспериментальных значений размаха вертикальных колебаний основания и рамы виброплиты Zitrek CNP 20 с рассчитанными значениями. В диапазоне изменения значений динамического модуля деформации грунта 13...30 МПа, расчетные значения размаха вертикальных колебаний основания и рамы виброплиты Zitrek CNP 20 в целом удовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными. По реологической модели был проведен вычислительный эксперимент. В качестве независимых параметров вычислительного эксперимента были использованы: масса виброплиты (50; 150; 250; 350; 450; 550; 650; 750 кг), коэффициент упругого сопротивления грунта (30; 60; 90; 120 МН/м) и коэффициент вязкого сопротивления грунта (100; 200; 300 кН·с/м). Общее количество сочетаний параметров равнялось 96. На основании обработки результатов вычислительного эксперимента получены регрессионные зависимости для расчета максимального значения силы реакции грунта, времени нагружения грунта (увеличения значений силы реакции грунта) t_1 и времени разгрузки грунта (уменьшения значений силы реакции грунта) t_2 . Результаты моделирования показывают, что в пределах одного цикла воздействия время нагружения грунта t_1 меньше времени разгрузки грунта t_2 . На соотношение t_1/t_2 оказывает влияние масса виброплиты, а также значения коэффициентов упругого и вязкого сопротивления грунта. Данная особенность ($t_1/t_2 < 1$) характерна и для вибрационных катков, и для трамбуемых машин, что подтверждается результатами соответствующих экспериментальных исследований. Полученные регрессионные зависимости максимальной силы реакции грунта, времени нагружения грунта и времени разгрузки грунта от массы виброплиты и значений коэффициентов упругого и вязкого сопротивления грунта имеют особое значение при расчете распределения напряжений и деформаций по глубине уплотняемого грунта и последующем расчете деформаций грунта на различных глубинах при его уплотнении виброплитой.

© ПНИПУ

© Тюремнов Иван Сергеевич – к.т.н., доц., e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.
Ефимов Сергей Сергеевич – инж.-конструктор 3-й категории.

Ivan S. Tyuremnov – CSc of Technical Science, Associate Professor, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.
Sergey S. Efimov – engineer-designer of the 3rd category.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

SIMULATION OF VIBRATORY PLATE INTERACTION WITH THE GROUND SURFACE

I.S. Tyuremnov, S.S. Efimov

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 27 March 2022
 Approved: 12 October 2022
 Accepted for publication:
 12 December 2022

Keywords:

soil, compaction, vibration, vibratory plate, mathematical simulation, rheological model, soil reaction force, soil loading time, soil unloading time, soil stiffness, soil viscosity.

ABSTRACT

The paper presents a three-mass rheological model of the system "soil – vibration plate base – vibration plate frame". The rheological model makes it possible to reproduce different modes of interaction between the vibratory plate base and soil: with different types of plate decoupling and without decoupling. We verify this model by comparing the experimental values of the vertical oscillation span of the base and frame of the Zitrek CNP 20 vibrating plate with the previously calculated values. As a whole, the calculated values of the span of vertical oscillations of the base and frame of the Zitrek CNP 20 vibrating plate correlate with the experimental data in the range of the dynamic modulus of soil deformation of 13...30 MPa. During the experiment we used the rheological model and obtained results are as follows: the mass of the vibrating plate (50; 150; 250; 350; 450; 550; 650; 750 kg), the coefficient of the elastic resistance of soil (30; 60; 90; 120 MN / m), and the coefficient of viscous resistance of soil (100; 200; 300 kN · s / m). The total number of combinations of parameters was 96. The processed results of the computational experiment provide the regression dependences for calculating the maximum soil reaction force, the time of soil loading (increasing the values of the reaction force of soil) t_1 , and the time of soil unloading (decrease the values of the reaction force of soil) t_2 . The simulation results show that, within one exposure cycle, the soil loading time t_1 is less than the soil unloading time t_2 . The ratio t_1/t_2 is influenced by the weight of the vibratory plate, as well as the factors of elastic and viscous resistance of soil. This feature ($t_1/t_2 < 1$) is typical for both vibratory rollers and rammers, which is confirmed by the results of the relevant experimental studies. The obtained regression dependences of parameters F_s , t_1 , and t_2 on the vibratory plate mass and the factors of elastic and viscous resistance of soil are important for calculating the distribution of stresses and strains on the depth of the compacted soil.

© PNRPU

Введение

Виброплиты в строительстве применяются при уплотнении грунтов в траншеях, пазухах фундаментов и в других местах, где затруднено или невозможно использовать вибрационные катки. Несмотря на то, что виброплиты выпускаются не одно десятилетие и накоплен достаточно большой опыт их практического применения, до сих пор вопрос определения технологических возможностей виброплиты с известными характеристиками при уплотнении грунта в конкретных условиях производства работ не решен. Обзор рекомендаций производителей виброплит [1] показывает, что в большинстве случаев рекомендации носят слишком общий характер и не позволяют определить, например, требуемое число проходов виброплиты с известными характеристиками при уплотнении грунта конкретного вида в слое заданной толщины до требуемого состояния (коэффициента уплотнения). Это связано с недостаточной изученностью процессов изменения напряженно-деформированного состояния грунта при динамических воздействиях, недостаточным объемом данных по численным значениям основных физико-механических характеристик грунтов при изменении вида, плотности и влажности грунта, сложным характером взаимодействий элементов виброплиты между собой и с уплотняемым грунтом, а также другими факторами. Для разработки методики влияния технических характеристик виброплиты на результаты уплотнения грунта в кон-

кретных условиях производства работ предлагается использовать подход [2], основанный на условном разделении процесса уплотнения грунта на три фазы: развития контактных напряжений; распространения напряжений по толщине слоя грунта; развития деформаций на различных глубинах грунта.

На характер развития во времени контактных напряжений влияют технические характеристики виброплиты (масса элементов виброплиты, характеристики амортизаторов виброплиты, частота и вынуждающее усилие вибровозбудителя, размеры основания виброплиты) и свойства грунта. Поскольку виброплита представляет собой многомассную колебательную систему, взаимодействующую с деформируемым ограничителем (грунтом), то для моделирования процессов в такой системе целесообразно применять метод реологического моделирования. При этом методе рассматривается поведение точек, в которых сосредоточена вся масса отдельных элементов системы. Связи между этими массами моделируются идеализированными упругими, вязкими и пластичными элементами. Различными исследователями предлагались различные варианты реологических моделей. В работах [3–7] рассматривались одномассные реологические модели, учитывающие только массу рабочего органа [3–6] или рабочего органа вместе с пригрузом от рамы машины [7]. В двухмассных реологических моделях [8–14] учитываются массы рабочего органа и грунта или массы рабочего органа и рамы. В трёхмассных реологических моделях [15–17]

учитываются масса рабочего органа, масса рамы рабочего органа и масса уплотняемого грунта (присоединённая масса грунта).

При моделировании свойств грунта в реологических моделях используются как сравнительно простые модели типа Кельвина – Фойгта [7; 15–19], так и более сложные [20–24]. Наибольшее распространение при реологическом моделировании свойств грунта получила модель Кельвина – Фойгта, сочетающая в себе сравнительную простоту и воспроизведение характерного поведения грунта при динамических нагрузках [25; 26].

В данной работе представлены результаты исследования взаимодействия виброплиты с грунтом с применением трёхмассной реологической модели системы «грунт – основание виброплиты – рама виброплиты» и моделирование упруговязких свойств грунта по схеме Кельвина – Фойгта.

1. Постановка задачи

Моделирование развития во времени контактных напряжений при уплотнении грунта виброплитой осуществлялось на основании обработки результатов вычислительного эксперимента. Взаимодействие виброплиты с уплотняемым грунтом исследовалось на основе трёхмассной реологической модели. Виброплита рассматривалась состоящей из основания массой m_d и верхней части массой m_f , связанной с основанием посредством амортизаторов. К основанию виброплиты прикладывалась гармонически изменяющаяся вынуждающая сила $P \sin(\omega t)$, где P – амплитудное значение вынуждающей силы, Н; ω – угловая скорость, рад/с; t – время, с. Массы основания m_d и рамы виброплиты m_f принимались равными ($m_d = m_f$). Амортизаторы виброплиты моделировались параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления с коэффициентами k_f и b_f соответственно. Грунт моделировался массой m_s , движение которой ограничивается параллельно установленными элементами упругого и вязкого сопротивления (модель Кельвина – Фойгта) с коэффициентами k_s и b_s соответственно. Значение присоединённой массы грунта на основании исследований [15; 27] рассчитывалось как $m_s = 0,2 \cdot m_d$. Значение коэффициентов упругого k_f и вязкого b_f сопротивлений амортизаторов виброплиты рассчитывалось в зависимости от массы виброплиты по зависимостям, полученным в результате статистической обработки характеристик амортизаторов вибрационных машин для уплотнения грунтов.

2. Теория

Реологическая модель (рис. 1) позволяет исследовать взаимодействие виброплиты с грунтом как в режиме контакта, так и в режимах периодического отрыва от грунта [15; 27].

В режиме контакта с грунтом дифференциальные уравнения движения масс имеют вид:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f - b_f \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_f) - k_f \cdot (x_d - x_f) = m_f \cdot g; \\ (m_d + m_s) \cdot \ddot{x}_d + b_s \cdot \dot{x}_d + b_f \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_f) + k_s \cdot x_d + \\ + k_f \cdot (x_d - x_f) = (m_d + m_s) \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ \dot{x}_d = \dot{x}_s; \\ x_d = x_s, \end{cases} \quad (1)$$

где \ddot{x}_f – ускорение верхней части виброплиты, м/с²; \ddot{x}_d – ускорение основания виброплиты, м/с²; b_f – коэффициент вязкого сопротивления амортизаторов, соединяющих основание и верхнюю часть виброплиты, Н·с/м; b_s – коэффициент вязкого сопротивления грунта, Н·с/м; \dot{x}_f – вертикальная скорость перемещения верхней части виброплиты, м/с; \dot{x}_d – вертикальная скорость перемещения основания виброплиты, м/с; \dot{x}_s – вертикальная скорость перемещения грунта, м/с; k_f – коэффициент упругого сопротивления амортизаторов, соединяющих основание и верхнюю часть виброплиты, Н/м; k_s – коэффициент упругого сопротивления грунта, Н/м; x_f – вертикальная координата верхней части виброплиты, м; x_d – вертикальная координата основания виброплиты, м; x_s – вертикальная координата грунта, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; P – вынуждающая сила, Н; ω – угловая скорость вибровозбудителя, рад/с.

В режиме отрыва от грунта дифференциальные уравнения движения масс имеют вид:

$$\begin{cases} m_f \cdot \ddot{x}_f + k_f \cdot (x_d - x_f) + b_f \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_f) = m_f \cdot g; \\ m_d \cdot \ddot{x}_d - k_f \cdot (x_d - x_f) - b_f \cdot (\dot{x}_d - \dot{x}_f) = \\ = m_d \cdot g + P \cdot \sin(\omega t); \\ m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s = m_s \cdot g. \end{cases} \quad (2)$$

Сила реакции грунта на основание виброплиты:

$$F_s = m_s \cdot \ddot{x}_s + k_s \cdot x_s + b_s \cdot \dot{x}_s - m_s \cdot g. \quad (3)$$

Условие неприлипания грунта к основанию виброплиты:

$$F_s > 0. \quad (4)$$

Условием перехода от режима отрыва от грунта (системе уравнений (2)) к режиму контакта с грунтом (системе уравнений (1)) и наоборот является равенство вертикальных координат основания виброплиты и поверхности грунта:

$$x_d \leq x_s, \quad (5)$$

Для численного решения уравнений (1)–(2) была разработана расчетная модель в среде MATLAB Simulink.

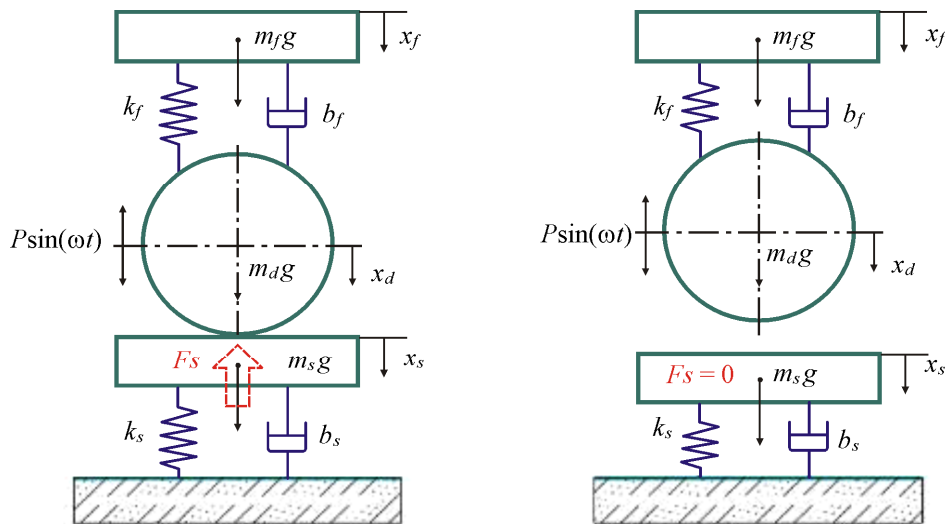


Рис. 1. Трёхмассная реологическая модель взаимодействия виброплиты с уплотняемым грунтом [27]

Fig. 1. Three-mass rheological model of interaction between a vibrating plate and compacted soil [27]



Рис. 2. Экспериментальные исследования уплотнения грунта виброплитой Zitrek CNP 20

Fig. 2. The experimental studies of soil compaction with a Zitrek CNP 20 vibratory plate

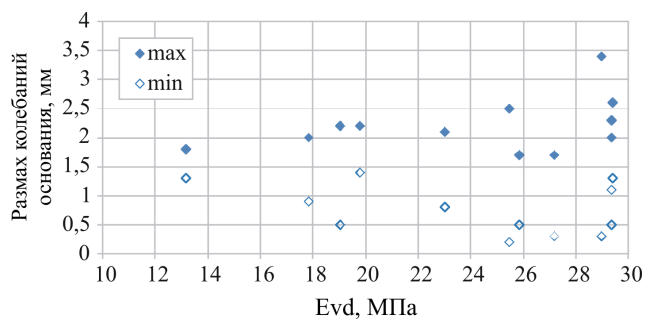


Рис. 3. Экспериментальные значения размаха вертикальных колебаний основания виброплиты Zitrek CNP 20

Fig. 3. The experimental values of the vertical base oscillation range of the Zitrek CNP 20 vibratory plate

Верификация разработанной реологической модели осуществлялась на основании сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

Экспериментальные исследования уплотнения грунта виброплитой Zitrek CNP 20 в полевых условиях [28] проводились в августе 2021 г. на одной из строительных площадок г. Ярославля. В процессе исследований регистрировались вертикальные перемещения основания и рамы виброплиты. Регистрация перемещений осуществлялась лазерным датчиком BAUMER OADM 13U6480/S35A, который в процессе движения виброплиты удерживался испытателем на высоте 100–150 мм над исследуемой поверхностью (основанием или рамой виброплиты) (рис. 2), что обеспечивало разрешающую способность датчика 0,25 мм и линейную ошибку измерений не более 0,8 мм.

При частоте колебаний виброплиты 90 Гц время отклика датчика перемещений составляло менее 0,9 мс, что позволяло осуществлять опрос датчика с частотой около 1,1 кГц и обеспечивало не менее 10 измерений вертикального положения поверхности виброплиты в каждом цикле колебаний. Регистрация показаний лазерного датчика перемещений происходила при помощи анализатора спектра ZET 017-U8. Обработка результатов измерений осуществлялась с использованием технологии цифровой фильтрации сигналов в программе ZET ANALIZ с граничной частотой фильтра низких частот 200 Гц. Уплотнение грунта после каждого прохода виброплиты оценивалось значением динамического модуля деформации грунта E_{vd} , измеряемого при помощи установки динамического нагружения ZORN ZFG 3.0. В качестве грунта использовался песчано-гравелистый грунт. Результирующие значения размаха вертикальных колебаний основания и рамы виброплиты Zitrek CNP 20, полученные после обработки экспериментальных данных, представлены на рис. 3, 4.

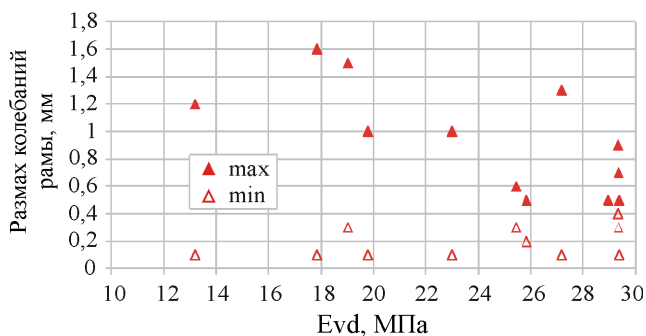


Рис. 4. Экспериментальные значения размаха вертикальных колебаний рамы виброплиты Zitrek CNP 20

Fig. 4. The experimental values of the vertical span oscillation range of the Zitrek CNP 20 vibratory plate

При моделировании колебаний основания и рамы виброплиты выполнялись расчеты по разработанной реологической модели для виброплиты с характеристиками, соответствующими характеристикам виброплиты Zitrek CNP 20: масса основания $m_d = 54,5$ кг; масса рамы виброплиты $m_f = 32,2$ кг; присоединенная масса грунта $m_s = 10,9$ кг; вынуждающая сила $P = 19,8$ кН; частота колебаний 91 Гц; ω – угловая скорость вибровозбудителя $\omega = 661$ рад/с (соответствует частоте колебаний 91 Гц). Значение коэффициента упругого сопротивления амортизаторов виброплиты определялось на основании специально проведенных экспериментальных исследований и составляло $k_f = 2,11$ МН/м. Значение коэффициента вязкого сопротивления амортизаторов определялось с учетом [29] и составляло $b_f = 3,19$ кН·с/м.

Расчетные значения размаха вертикальных колебаний основания и рамы виброплиты Zitrek CNP 20, полученные на основании разработанной реологической модели, представлены на (рис. 5–6).

Анализ графиков экспериментальных и расчетных значений размаха вертикальных колебаний основания и рамы виброплиты Zitrek CNP 20 (рис. 3–6) показывает, что в сопоставимых диапазонах изменения свойств грунта (диапазону $k_s = 10 \dots 50$ МН/м при $b_s = 200$ кН·с/м соответствует диапазон $E_{vd} = 7 \dots 33$ МПа для песчано-гравелистого и супесчаного грунта) расчетные значения размаха вертикальных колебаний основания виброплиты Zitrek CNP 20 находятся внутри диапазона значений, полученных при экспериментальных исследованиях. Расчетные значения размаха вертикальных колебаний рамы виброплиты Zitrek CNP 20 на большей части диапазона согласуются с экспериментальными значениями. Лишь в зоне значений $k_s \geq 40$ МН/м расчетный размах колебаний рамы незначительно превышает полученные при экспериментальных исследованиях значения.

Таким образом, можно сделать вывод об удовлетворительной верификации разработанной реологической модели взаимодействия виброплиты с уплотняемым грунтом.

Для определения особенностей изменения во времени контактных напряжений при уплотнении грунта виброплитой по разработанной модели был проведен вычис-

лительный эксперимент. С учетом исследований [30] в качестве независимых параметров виброплиты была выбрана масса виброплиты $m = (m_d + m_f)$. Значения угловой скорости колебаний ω и вынуждающего усилия P виброплиты рассчитывались в зависимости от массы m [30].

В качестве независимых параметров грунта были выбраны коэффициенты упругого k_s и вязкого b_s сопротивления грунта.

В табл. 1 представлены значения независимых параметров вычислительного эксперимента. Общее количество сочетаний факторов равнялось 96.

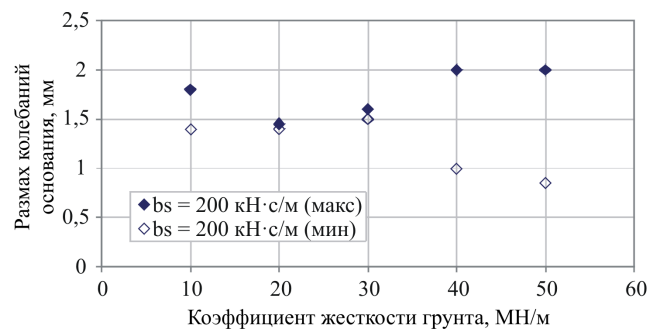


Рис. 5. Расчетные значения размаха вертикальных колебаний основания виброплиты Zitrek CNP 20

Fig. 5. The calculated values of the vibratory plate vertical base oscillation range of the Zitrek CNP 20

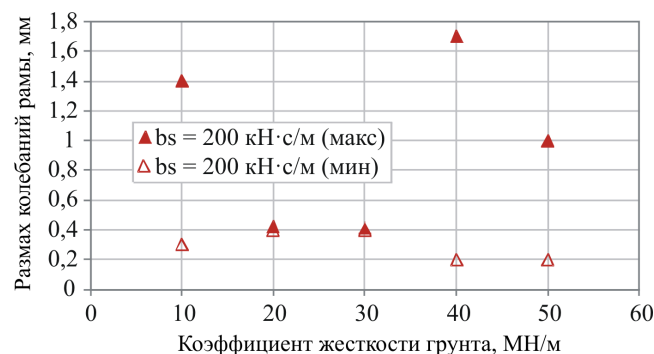


Рис. 6. Расчетные значения размаха вертикальных колебаний рамы виброплиты Zitrek CNP 20

Fig. 6. The calculated values of the vertical oscillation span of the frame of the the Zitrek CNP 20 vibratory plate

Таблица 1/Table 1

Значения независимых параметров вычислительного эксперимента

Values of independent parameters of the computational experiment

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение	Шаг изменения	Количество значений
Масса виброплиты m , кг	50	750	100	8
Коэффициент упругого сопротивления грунта k_s , МН/м	30	120	30	4
Коэффициент вязкого сопротивления грунта b_s , кН·с/м	100	300	100	3

3. Результаты экспериментов

В процессе вычислительного эксперимента для соответствующих значений факторов рассчитывались значения угловой скорости колебаний ω , вынуждающего усилия P , значения коэффициентов k_f и b_f амортизаторов виброплиты, значения масс m_d , m_f и m_s . Затем производился расчет по программе MATLAB Simulink, в результате которого формировались осциллограммы перемещения основания виброплиты и грунта, а также осциллограмма изменения силы реакции грунта F_s . Продолжительность расчета составляла 10 с. Для исключения влияния переходных процессов анализ осциллограмм проводился в интервале времени от 9,5 до 10 с.

В зависимости от сочетания значений факторов моделью реализуются различные режимы работы [31] виброплиты: режим постоянного контакта с грунтом (continuous contact) (рис. 7), режим частичного отрыва от грунта (partial uplift) (рис. 8), режим двойного прыж-

ка (double jump) (рис. 9), а также более сложные режимы колебаний с кратностью более 1 (рис. 10).

На осциллограммах силы реакции грунта выбирались характерные циклы нагружения, для которых определялись время нагружения грунта (увеличения значений F_s) t_1 , время разгрузки (уменьшения значений F_s) t_2 , а также максимальное значение силы реакции грунта F_s^{max} . Поскольку на значение деформаций грунта наибольшее значение оказывают действующие напряжения [32], то при анализе осциллограмм выделялись характерные воздействия с максимальными пиковыми значениями F_s , для которых и рассчитывались значения t_1 , t_2 и F_s^{max} .

После определения по осциллограммам численных значений времени нагружения грунта t_1 , времени разгрузки грунта t_2 , а также максимального значения силы реакции грунта F_s^{max} производилась статистическая обработка полученных результатов в программе STATISTICA для получения регрессионных зависимостей t_1 , t_2 и F_s^{max} (табл. 2). В табл. 2. применяются следующие единицы измерения параметров: t_1 , мс; t_2 , мс; F_s^{max} , Н; k_s , МН/м; b_s , кН·с/м.

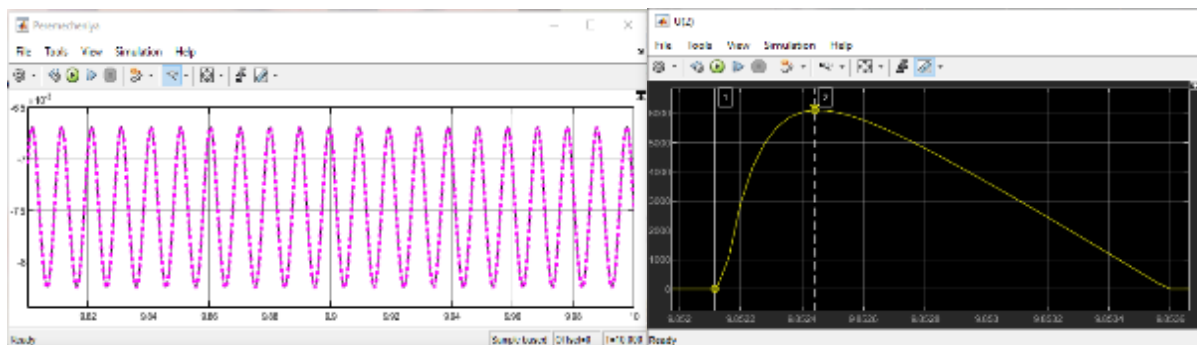


Рис. 7. Осциллограммы перемещений основания виброплиты и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения ($k_s = 30$ МН/м, $b_s = 300$ кН·с/м, $m_d = 25$ кг, $m_f = 25$ кг, $m_s = 5$ кг, $\omega = 641$ рад/с, $P = 8962$ Н, $k_f = 2,11$ МН/м, $b_f = 3,29$ кН·с/м, режим постоянного контакта с грунтом (continuous contact))

Fig. 7. Oscillograms of the displacement of the of the base of the vibrating plate and the soil, as well as the soil reaction forces for a characteristic loading cycle ($k_s = 30$ MN/m, $b_s = 300$ kN·s/m, $m_d = 25$ kg, $m_f = 25$ kg, $m_s = 5$ kg, $\omega = 641$ rad/s, $P = 8962$ N, $k_f = 2.11$ MN/m, $b_f = 3.29$ kN·s/m (continuous contact))

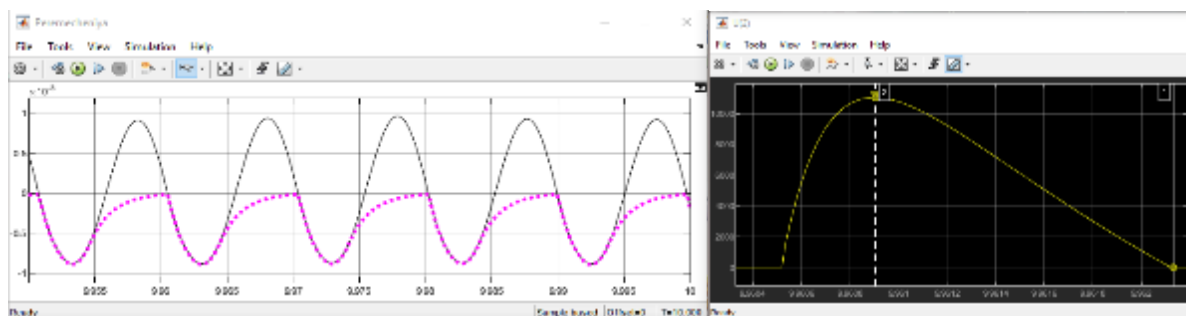


Рис. 8. Осциллограммы перемещений основания виброплиты и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения ($k_s = 120$ МН/м, $b_s = 200$ кН·с/м, $m_d = 25$ кг, $m_f = 25$ кг, $m_s = 5$ кг, $\omega = 641$ рад/с, $P = 8962$ Н, $k_f = 2,11$ МН/м, $b_f = 3,29$ кН·с/м, режим частичного отрыва от грунта (partial uplift))

Fig. 8. Oscillograms of the displacement of the of the base of the vibrating plate and the soil, as well as the soil reaction forces for a characteristic loading cycle ($k_s = 120$ MN/m, $b_s = 200$ kN·s/m, $m_d = 25$ kg, $m_f = 25$ kg, $m_s = 5$ kg, $\omega = 641$ rad/s, $P = 8962$ N, $k_f = 2.11$ MN/m, $b_f = 3.29$ kN·s/m (partial uplift))

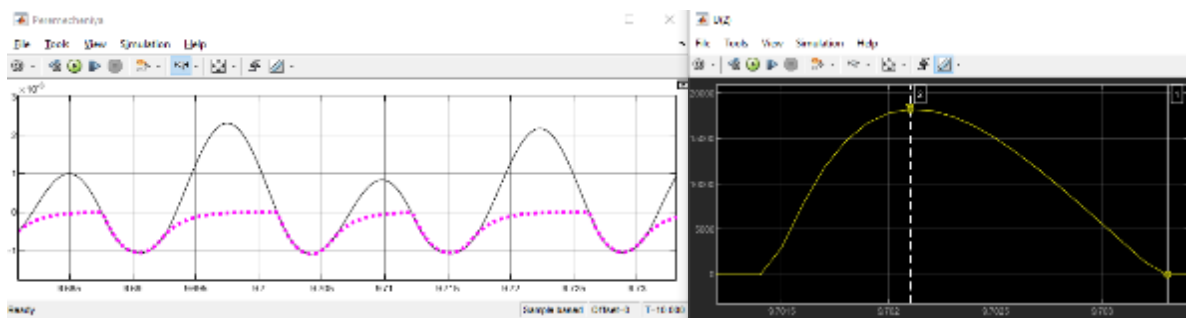


Рис. 9. Осциллограммы перемещений основания виброплиты и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения ($k_s = 120$ МН/м, $b_s = 200$ кН·с/м, $m_d = 75$ кг, $m_f = 75$ кг, $m_s = 15$ кг, $\omega = 506$ рад/с, $P = 23378$ Н, $k_f = 2,11$ МН/м, $b_f = 4,17$ кН·с/м, режим двойного прыжка (double jump))

Fig. 9. Oscillograms of the displacement of the of the base of the vibrating plate and the soil, as well as the soil reaction forces for a characteristic loading cycle ($k_s = 120$ MN/m, $b_s = 200$ kN·s/m, $m_d = 75$ kg, $m_f = 75$ kg, $m_s = 15$ kg, $\omega = 506$ rad/s, $P = 23378$ N, $k_f = 2.11$ MN/m, $b_f = 4.17$ kN·s/m (double jump))

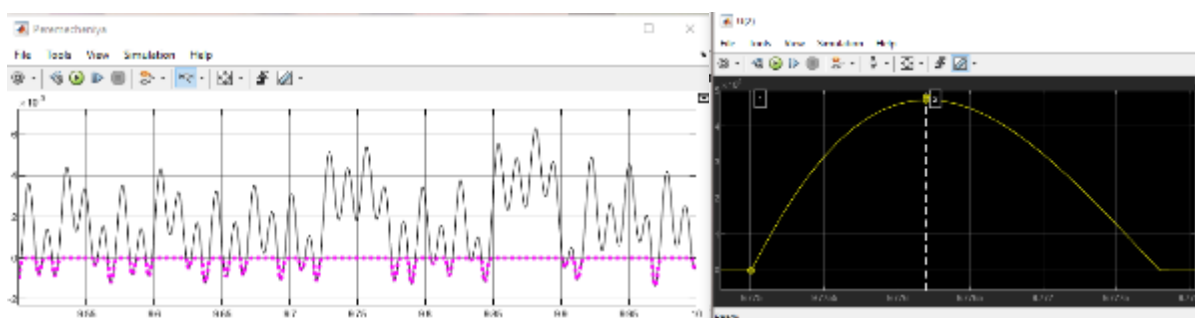


Рис. 10. Осциллограммы перемещений основания виброплиты и грунта, а также силы реакции грунта для характерного цикла нагружения ($k_s = 120$ МН/м, $b_s = 100$ кН·с/м, $m_d = 125$ кг, $m_f = 125$ кг, $m_s = 25$ кг, $\omega = 454$ рад/с, $P = 35651$ Н, $k_f = 2.12$ МН/м, $b_f = 4,67$ кН·с/м, сложный режим колебаний с кратностью более 1)

Fig. 10. Oscillograms of the displacement of the of the base of the vibrating plate and the soil, as well as the soil reaction forces for a characteristic loading cycle ($k_s = 120$ MN/m, $b_s = 100$ kN·s/m, $m_d = 125$ kg, $m_f = 125$ kg, $m_s = 25$ kg, $\omega = 454$ rad/s, $P = 35651$ N, $k_f = 2.10$ MN/m, $b_f = 4.67$ kN·s/m (complex oscillation mode with a multiplicity of more than 1))

Таблица 2/Table 2

Регрессионные зависимости для расчета значений t_1 , t_2 и F_s^{max} при уплотнении грунта виброплитами

Regression dependencies for calculating t_1 , t_2 и F_s^{max} values when compacting soil with vibrating plates

№ п/п	Вид зависимости	Значение R
1	$t_1 = 0,128 + 64,208 \cdot m^{0,76} \cdot k_s^{-0,259} \cdot b_s^{-0,285}$	0,94
2	$t_2 = 0,78 + 2,92 \cdot m^{0,496} \cdot k_s^{-0,21} \cdot b_s^{0,044}$	0,855
3	$F_s^{max} = -2227 + 0,883 \cdot m^{0,751} \cdot k_s^{0,464} \cdot b_s^{-0,136}$	0,958

На рис. 11–13 представлены некоторые графики влияния параметров m и k_s на значения t_1 , t_2 и F_s^{max} , полученные на основании обработки осциллограмм программы MATLAB Simulink и на основании регрессионных зависимостей (табл. 2).

4. Обсуждение результатов

Анализ результатов вычислительного эксперимента показывает, что при увеличении массы виброплиты время

нагружения грунта t_1 , время разгрузки грунта t_2 , а также максимальное значение силы реакции грунта F_s^{max} увеличиваются, что соответствует существующим представлениям. Влияние коэффициента упругого сопротивления грунта на значения t_1 , t_2 и F_s^{max} более сложное. С увеличением k_s значения t_1 и t_2 уменьшаются, а значения F_s^{max} возрастают. Наблюдается также незначительное уменьшение значений t_1 , t_2 и F_s^{max} при увеличении значений коэффициента упругого сопротивления грунта b_s .

Характерным являются более высокие значения времени разгрузки грунта t_2 , по сравнению с временем нагружения t_1 , при всех сочетаниях исходных данных. В среднем рассчитанное по уравнениям регрессии (см. табл. 2) соотношение t_1/t_2 составляет $t_1/t_2 = 0,63$. При этом наибольшее влияние на соотношение t_1/t_2 оказывает масса виброплиты (рис. 14).

Статистическая обработка в программе Statistica позволила получить регрессионную зависимость соотношения t_1 / t_2 от значений массы виброплиты m и коэффициентов упругого и вязкого сопротивления грунта k_s и b_s (при $R = 0,942$): $t_1/t_2 = 0,0253 + 40,679 \cdot m^{0,678} \cdot k_s^{-0,223} \cdot b_s^{-0,252}$.

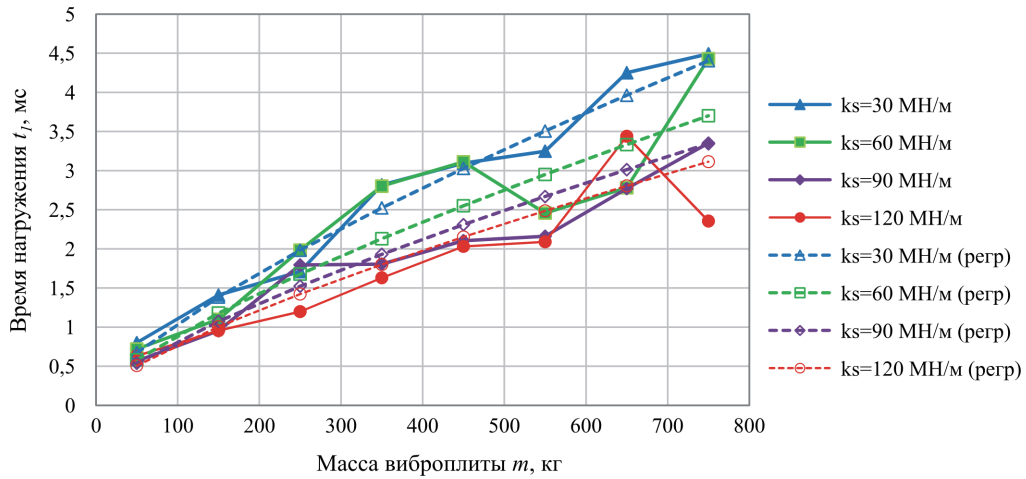


Рис. 11. Влияние массы виброплиты m и коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на значение времени нагружения грунта (t_1) при $b_s = 100$ кН·с/м

Fig. 11. The influence of the mass of the vibrating plate m and the soil stiffness k_s on the value of the soil loading time (t_1) at $b_s = 100$ kN·s/m

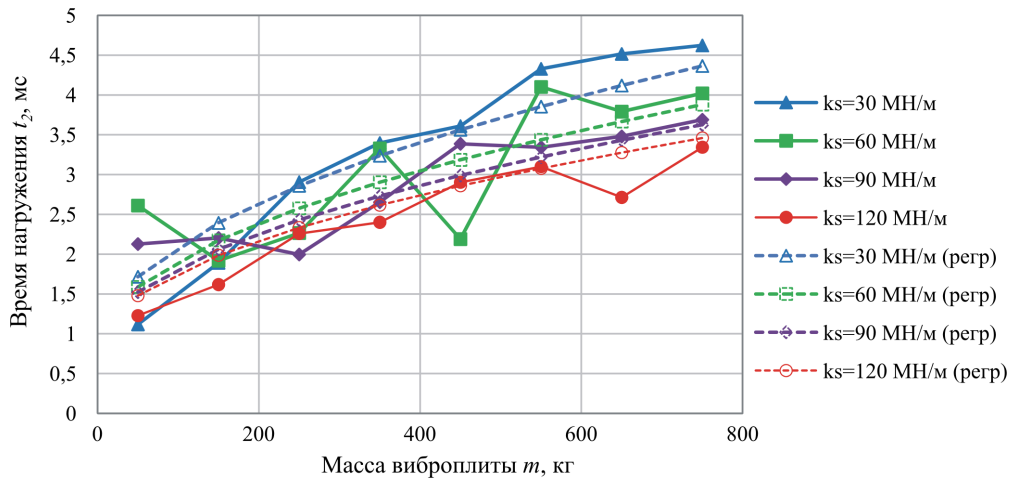


Рис. 12. Влияние массы виброплиты m и коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на значение времени разгрузки грунта (t_2) при $b_s = 200$ кН·с/м

Fig. 12. The influence of the mass of the vibrating plate m and the soil stiffness k_s on the value of the soil unloading time (t_2) at $b_s = 200$ kN·s/m

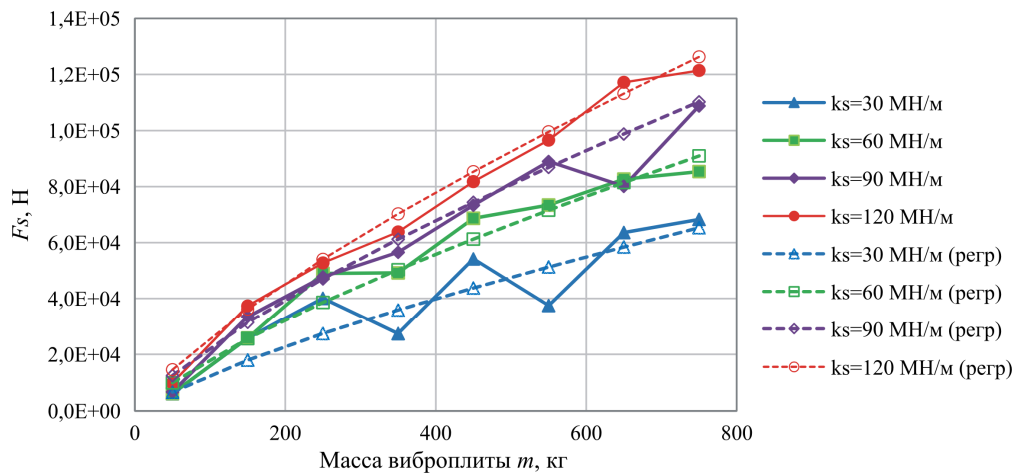


Рис. 13. Влияние массы виброплиты m и коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на значение силы реакции грунта (F_s^{max}) при $b_s = 300$ кН·с/м

Fig. 13. The influence of the mass of the vibrating plate m and the soil stiffness k_s on the value of the reaction force (F_s^{max}) at $b_s = 200$ kN·s/m

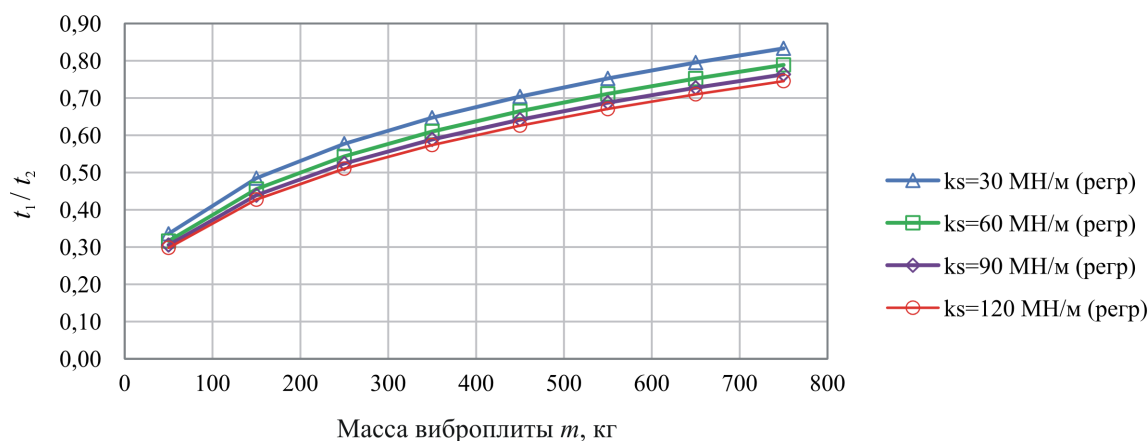


Рис. 14. Влияние массы виброплиты m и коэффициента упругого сопротивления грунта k_s на соотношение t_1/t_2 при $b_s = 200$ кН·с/м

Fig. 14. The influence of the mass of the vibrating plate m and the soil stiffness k_s on the on the ratio t_1/t_2 at $b_s = 200$ kN·s/m

Неравенство значений времени нагружения грунта t_1 , времени разгрузки грунта t_2 ($t_1 < t_2$) прослеживается и в результатах экспериментальных исследований уплотнения грунта виброплитами, выполнявшимися на кафедре «Строительные и дорожные машины» ЯГТУ в 2015 г. Аналогичная ситуация ($t_1 < t_2$) наблюдается и при уплотнении грунта вибрационными катками [33] и трамбующими машинами [34].

Заключение

Определение характера изменения (амплитудное значение, продолжительность нагружения и разгрузки) силы реакции грунта на основание виброплиты позволяет определить характер изменения напряжений на поверхности контакта основания виброплиты с уплотняемым грунтом $\sigma_0(t)$:

$$\sigma_0(t) = F_s(t) / S,$$

где S – площадь контакта основания виброплиты с уплотняемым грунтом, m^2 .

Библиографический список

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. – 2014. – № 12 (846). – С. 28–32.
2. Тюремнов И.С. Обоснование подходов для разработки методики прогнозирования технологических возможностей мобильных грунтоуплотняющих машин виброударного действия [Электронный ресурс] // Интерстроймех–2021: сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции (г. Москва, 5–7 октября 2021 г.) / редакционная коллегия: Б.Г. Ким, Е.М. Кудрявцев, Р.Р. Шарапов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, институт инженерно-экологического строительства и механизации. – Электрон. дан. и прогр. (5,5 Мб). – М.: Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. – С. 94–102. – URL: <https://mgso.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/46043/> (дата обращения: 10.10.2022).

В свою очередь, характер изменения во времени контактных напряжений является фактором, определяющим и распределение напряжений по глубине грунта и распределение деформаций (результата уплотнения) [2]. Таким образом, характер изменения силы реакции грунта является связующим звеном между техническими характеристиками виброплиты, свойствами грунтами и результатом уплотнения.

На характер колебаний основания виброплиты и верхней части виброплиты оказывают влияние упругие и вязкие характеристики амортизаторов (k_f и b_f). Ограниченное количество информации о численных значениях этих параметров для виброплит различной массы приводит к увеличению погрешности моделирования взаимодействия элементов виброплиты между собой и определению численных значений t_1 , t_2 и F_s^{max} . Следовательно, расширение базы данных о характеристиках амортизаторов, применяемых в виброплитах различных моделей, позволит повысить достоверность результатов моделирования.

3. Русаков И.Г., Харкевич А.А. Вынужденные колебания системы, ударяющейся об ограничитель // Журнал технической физики. – 1942. – Т. XII, вып. 11–12. – С. 715–721.
4. Баркан Д.Д., Шехтер О.Я. Теория поверхностного уплотнения грунтов // Применение вибрации в строительстве. – М., 1962. – С. 5–26.
5. Попов Г.Н. Выбор параметров прицепных вибрационных катков для уплотнения грунтовых оснований // Тр. ЛПИ. – 1972. – Вып. 327. – С. 114–119.
6. Дудин В.М., Попова Н.Н. Анализ расчетной схемы вибратора на упруго-вязком ограничителе // Строительные и дорожные машины: сб. научных трудов Ярославского политехнического института. – Ярославль, 1975. – С. 11–14.
7. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades / L. Liu, F. Wang, S. Sun, W. Feng, C. Guo // Shock and Vibration. – 2021. DOI: 10.1155/2021/9589230
8. Закирзаков Г.Г., Капустин М.И. Экспериментально-теоретическое определение параметров двухмассной колебательной системы // Рабочие процессы и динамика машин для

разработки, уплотнения грунтов и вибрационного формирования изделий. – Ярославль, 1986. – С. 81–86.

9. Тарасов В.Н., Бояркина И.В., Серебренников В.С. Влияние массы вертикального пригруза на амплитуду колебаний вибровальца и виброзащиту рамы дорожного катка // Строительные и дорожные машины. – 2019. – № 9. – С. 30–36.

10. Siminiati D., Hren D. Simulation on vibratory roller-soil interaction // *Advanced engineering*. – 2008. – № 2.

11. Anderegg R., von Felten and Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // *Presentation and Proceedings ASCE Geo Congress 2006*. – Atlanta, February 2006. – P. 6.

12. Бурый Г.Г. Методика обоснования режимных параметров вибрационных катков с учётом массы уплотняемого грунта в зоне активного действия вибрации // *Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции: сборник трудов международной научно-практической конференции*. – Омск, 2014. – С. 47–55.

13. Briaud Jean-Louis, Jeongbok Seo. Intelligent compaction: overview and research needs. – Texas A&M University, December, 2003. – P. 84.

14. Hashimoto T., Fujino K., Tateyama K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor // *ISARC 2016 – 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. – 2016. – С. 421–427. DOI: 10.22260/isarc2016/0051

15. Van Susante Paul J., Mooney Michael A. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling // *Journal of engineering mechanics ASCE*. – 2008. – P. 684–693.

16. Shiping Li, Chunhua Hu Study on Dynamic Model of Vibratory Roller // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – Vol. 113. – P. 012187. DOI: 10.1088/1755-1315/113/1/012187

17. Research on the correlation between vibration acceleration of roller and compaction degree of subgrade soil / Y.-W. Cao, N.-X. Liang, M. Qin, Z.-F. Lu // *ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable – Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals*. – 2010. – Vol. 382. – P. 2974–2982. DOI: 10.1061/41127(382)316

18. Шишкин Е.А., Смоляков А.А. Обоснование способа регулирования контактного усилия вибрационного вальца с уплотняемым материалом // *Системы. Методы. Технологии*. – 2022. – № 1 (53). – С. 36–42. DOI: 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42.

19. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades / L. Liu, F. Wang, S. Sun, W. Feng, C. Guo // *Shock and Vibration*. – 2021. DOI: 10.1155/2021/9589230

20. Pietzsch D., Poppy W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers // *Journal of Terramechanics*. – 1992. – Vol. 29 (6). – P. 585–597. DOI: 10.1016/0022-4898(92)90038-L

21. Shen P. Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes // *Paper presented at the Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering, ICTE*. – 2009. – 2322–2327. DOI: 10.1061/41039(345)384

22. Михеев В.В., Савельев С.В. Математическая модель уплотнения упруговязкопластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рам-

ках модифицированного подхода сосредоточенных параметров // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2017. – № 2 (54). – С. 28–36.

23. Vibration analysis and modeling of an off-road vibratory roller equipped with three different cab's isolation mounts / V. Nguyen, J. Zhang, V. Le, R. Jiao // *Shock and Vibration*. – 2018. DOI: 10.1155/2018/8527574

24. Савельев С.В., Шушубаева М.К. Использование инновационного подхода к моделированию взаимодействия рабочих органов уплотняющих машин с грунтами земляного полотна при строительстве транспортных объектов // *Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции*. – Омск, 2021. – С. 51–56.

25. Dobrescu C. The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil // *Applied System Innovation*. – 2020. – Vol. 3 (2). – P. 1–10. DOI: 10.3390/asi3020025

26. Dobrescu C. Comparative Analysis of the Voigt–Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process // *Paper presented at the Springer Proceedings in Physics*. – 2021. – Vol. 251. – P. 359–366. DOI: 10.1007/978-3-030-54136-1_36

27. Tyuremnov I.S., Morev A.S., & Furmanov D.V. On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1260 (11). DOI: 10.1088/1742-6596/1260/11/112033

28. Экспериментальные исследования уплотнения грунта виброплитой / С.С. Ефимов, И.С. Тюремнов, Д.А. Шорохов, А.С. Краюшкин // *Энергоресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 23–25 сентября 2021 года*. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 112–116.

29. Поздеев Л.В., Целищев Г.П., Цехмestрюк Г.С. Экспериментальное определение и расчёт зависимости параметров резинометаллических амортизаторов от деформации // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 317, № 2. – С. 54–58.

30. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // *Механизация строительства*. – 2014. – № 11. – С. 32–35.

31. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece, 2004*. – P. 97natio.

32. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1975. – 288 с.

33. Tyuremnov I.S., Furmanov, D.V. Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller // *Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1546 (1). DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012144

34. Экспериментальное исследование напряженного состояния поверхности грунта при уплотнении двухмассным штампом / И.С. Тюремнов, С.В. Разумов, С.В. Макаров, А.А. Морозов // *Вестник Ярославского государственного технического университета*. – Ярославль, 2000. – Вып. 3. – С. 99–103.

References

1. Tiuremnov, I.S. Obzor rekomendatsii proizvoditelei po ispol'zovaniyu vibra-tsionnykh plit dlia uplotneniia grunta [Review of manufacturers' recommendations on the use of vibrating plates for compaction of soil] / I.S. Tiuremnov, A.A. Novichikhin, I.S. Filatov, *Mekhanizatsiia stroitel'stva*, 2014, no. 12 (846). pp. 28-32.
2. Tiuremnov I.S. Obosnovanie podkhodov dlia razrabotki metodiki prognozirovaniia tekhnologicheskikh vozmozhnostei mobil'nykh gruntouplotniaiushchikh mashin vibro-udarnogo deistviia [Substantiation of approaches for the development of methods for predicting the technological capabilities of mobile soil compacting machines of vibro-shock action] // *Interstroimekh–2021 [Elektronnyi resurs]: sbornik dokladov XXV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* (g. Moskva, 5–7 oktiabria 2021 g.) / redaktsionnaia kollegiia: B.G. Kim, E.M. Kudriavtsev, R.R. Sharapov; Ministerstvo nauki i vysshhego obrazovaniia Rossiiskoi Federatsii, Natsional'nyi issledovatel'skii Moskovskii gosudarstvennyi stroitel'nyi universitet, institut inzhenerno-ekologicheskogo stroitel'stva i mekhanizatsii. – Elektron. dan. i progr. (5,5 Mb). – Moskva: Izdatel'stvo MISI – MGSU, 2021. s. 94-102. – Rezhim dostupa: <https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/46043/>.
3. Rusakov, I.G. Vynuzhdennye kolebaniia sistemy, udariaiushcheisia ob ogranichitel' [Forced oscillations of a system hitting a limiter] / I.G. Rusakov, A.A. Kharkevich, *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki.*, vol. XII, iss. 11-12, 1942, pp. 715-721.
4. Barkan, D.D. Teoriia poverkhnostnogo uplotneniia gruntov / D.D. Barkan, O.Ia. Shekh-ter [Theory of surface compaction of soils] / D.D. Barkan, O.Ya. Shekhter, *Moscow, V kn. "Primenenie vibratsii v stroitel'stve"*, 1962. – S. 5-26.
5. Popov G.N. Vybory parametrov pritsepnykh vibratsionnykh katkov dlia uplotneniia gruntovykh osnovanii [Selection of parameters of trailed vibration rollers for compaction of soil bases] // *Tr. LPI, L., «Mashinostroenie»*, vyp. 327, 1972, pp. 114-119.
6. Dudin, V.M. Analiz raschetnoi skhemy vibratora na uprugoviazkom ogranichitele [Analysis of the design scheme of a vibrator on an elastic-viscous limiter] / V.M. Dudin, N.N. Popova, «*Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*». *Sb. nauchnykh trudov Iaroslavskogo Politekhniceskogo Instituta. - Iaroslavl'*, 1975. - s. 11-14.
7. Liu, L., Wang, F., Sun, S., Feng, W., & Guo, C. (2021). Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades. *Shock and Vibration*, 2021 doi: 10.1155/2021/9589230
8. Zakirzakov, G.G. Eksperimental'no-teoreticheskoe opredelenie parametrov dvukh-massnoi kolebatel'noi sistemy [Experimental and theoretical determination of the parameters of a two-mass oscillatory system] / G.G. Zakirzakov, M.I. Kapustin, *V kn. "Rabochie protsessy i dinamika mashin dlia razrabotki, uplotneniia gruntov i vibratsionno-go formovaniia izdelii"*. – Iaroslavl', 1986, vol. 81-86.
9. Tarasov, V.N. Vliianie massy vertikal'nogo prigruga na amplitudu kolebaniia vibroval'tsa i vibrozashchitu ramy dorozhnogo katka [The influence of the vertical load mass on the vibration amplitude of the vibrating roller and the vibration protection of the road roller frame] / V.N. Tarasov, I.V. Boiarkina, V.S. Serebrennikov, *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*, 2019, no. 9, pp. 30-36.
10. Siminiati, D. Simulation on vibratory roller-soil interaction / D. Siminiati, D. Hren, *Advanced engineering* ISSN 1846-5900, № 2. – 2008.
11. Anderegg, R. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors / A. Dominik, von Felten and K. Kaufmann, *Presentation and Proceedings ASCE Geo Congress 2006*, Atlanta, February 2006. – R. 6.
12. Buryi, G.G. Metodika obosnovaniia rezhimnykh parametrov vibratsionnykh katkov s uchedom massy uplotniaemogo grunta v zone aktivnogo deistviia vibratsii [Methodology for substantiating the operating parameters of vibration rollers, taking into account the mass of compacted soil in the zone of active vibration action] / G.G. Bu-ryi, *Sovremennye nauchnye issledovaniia: aktual'nye problemy i tendentsii: Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. – Omsk, 2014. – s. 47- 55.
13. Briaud, Jean-Louis. Intelligent compaction: overview and research needs / Jean-Louis Briaud, Jeongbok Seo / *Texas A&M University, December*, 2003. – R. 84.
14. Hashimoto, T., Fujino, K., Tateyama, K. Suggestion of the ground stiffness estimative method with the running speed of a plate compactor 2016 ISARC 2016 - 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, s. 421-427. DOI 10.22260/isarc2016/0051
15. Paul J. van Susante. Capturing Nonlinear Vibratory Roller Compactor Behavior through Lumped Parameter Modeling / Paul J. van Susante, Michael A. Mooney, *Journal of engineering mechanics ASCE*. – 2008. – R. 684-693.
16. Shiping Li, Chunhua Hu (2018) Study on Dynamic Model of Vibratory Roller / *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 113 012187. doi: 10.1088/1755-1315/113/1/012187
17. Cao, Y.-W., Liang, N.-X., Qin, M., Lu, Z.-F. (2010) Research on the correlation between vibration acceleration of roller and compaction degree of subgrade soil / ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable - *Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals*, 382, s. 2974-2982 DOI: 10.1061/41127(382)316
18. Shishkin, E.A. Obosnovanie sposoba regulirovaniia kontaktnogo usilia vibra-tsionnogo val'tsa s uplotniaemym materialom [Substantiation of the method of regulating the contact force of a vibrating roller with a compacted material] / E.A. Shishkin, A.A. Smoliakov, *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2022, no. 1 (53), pp. 36-42. – DOI 10.18324/2077-5415-2022-1-36-42.
19. Liu, L., Wang, F., Sun, S., Feng, W., & Guo, C. (2021). Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades. *Shock and Vibration*, 2021 doi: 10.1155/2021/9589230
20. Pietzsch, D., & Poppy, W. (1992). Simulation of soil compaction with vibratory rollers. *Journal of Terramechanics*, 29 (6), 585-597. doi: 10.1016/0022-4898(92)90038-L
21. Shen, P. (2009). Dynamic characteristics of the intelligent compactor model with adjustable vibration modes. *Paper presented at the Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Engineering*, ICTE 2009, 2322-2327. doi: 10.1061/41039 (345) 384
22. Mikheev V.V., Savel'ev S.V. Matematicheskaiia model' uplotneniia uprugoviazkopla-stichnoi gruntovoi sredy pri vzaimodeistvii s rabochim organom dorozhnoi ma-shiny v ramkakh modifitsirovannogo podkhoda sresredotochennykh parametrov [Mathematical model of compaction of elastic-viscous soil medium in interaction with the working body of a road tire within the framework of a modified approach of concentrated parameters]. *Vest-nik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2017, no. 2 (54), pp 28-36.
23. Nguyen, V., Zhang, J., Le, V., & Jiao, R. (2018). Vibration analysis and modeling of an off-road vibratory roller equipped

with three different cab's isolation mounts. *Shock and Vibration*, 2018 doi: 10.1155/2018/8527574

24. Savel'ev S.V., Shushubaeva M.K. Ispol'zovanie innovatsionnogo podkhoda k mode-lirovaniu vzaimodeistviia rabochikh organov uplotniaiushchikh mashin s gruntami zemlianogo polotna pri stroitel'stve transportnykh ob'ektov [The use of an innovative approach to modeling the interaction of working bodies of sealing machines with the soils of the roadbed during the construction of transport facilities]. *V sbornike: Obra-zovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo. Sbornik materialov IV Natsio-nal'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Omsk*, 2021. pp. 51-56.

25. Dobrescu, C. (2020). The dynamic response of the vibrating compactor roller, depending on the viscoelastic properties of the soil. *Applied System Innovation*, 3 (2), 1-10. doi: 10.3390/asi3020025

26. Dobrescu, C. (2021). Comparative Analysis of the Voigt-Kelvin and Maxwell Models in the Compaction by Vibration Process. Paper presented at the Springer Proceedings in Physics, 251 359-366. doi: 10.1007/978-3-030-54136-1_36

27. Tyuremnov, I. S., Morev, A. S., & Furmanov, D. V. (2019). On the justification of the value of the apparent mass of soil in rheological modeling of the process of soil compaction by a vibrating roller. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1260 (11) doi: 10.1088/1742-6596/1260/11/112033

28. Eksperimental'nye issledovaniia uplotneniia grunta vibroplytoi [Experimental studies of soil compaction with a vibrating plate] / S.S. Efimov, I.S. Tyuremnov, D.A. Shorokhov, A.S. Kraiushkin, Energo-resursosbergaiushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoi i stroitel'noi ot-rasliakh: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Belgorod, 23–25 sentiabria 2021 goda. – Belgorod: Belgorodskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet im. V.G. Shukhova, 2021, pp. 112-116.

29. Pozdeev L.V., Tselishchev G.P., Tsekhmestriuk G.S. Eksperimental'noe opredelenie i raschet zavisimosti parametrov rezinometallicheskikh amortizatorov ot deforma-tsii [Experimental determination and calculation of dependence of parameters of rubber-metal shock absorbers on deformation]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2010. vol. 317. № 2. pp. 54-58.

30. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. Statisticheskii analiz tekhnicheskikh kharakteristik vibratsionnykh plit [Statistical analysis of the technical characteristics of vibrating plates]. *Mekhanizatsiia stroitel'stva*, 2014, № 11, s. 32-35.

31. Adam, D., and F. Kopf. (2004). "Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device)." Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece, pp. 97-100.

32. Kharkhuta, N.Ia. Prochnost', ustoichivost' i uplotnenie gruntov zemlianogo polotna avtomobil'nykh dorog [Strength, stability and compaction of soils of the roadbed] / N.Ia. Kharkhuta, Iu.M. Vasil'ev. *Moscow, Transport*, 1975. – 288 s.

33. Tyuremnov, I. S., & Furmanov, D. V. (2020). Experimental studies of stresses in soil affected by a vibratory roller. Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series, 1546 (1) doi: 10.1088/1742-6596/1546/1/012144

34. Tyuremnov I.S., Razumov S.V., Makarov S.V., Morozov A.A. Eksperimental'noe issledovanie napriazhennogo sostoiianiia poverkhnosti grunta pri uplotnenii dvukh-massnym shtampom [Experimental study of the stress state of the soil surface during compaction with a two-mass stamp]. *Vestnik Iaroslavl'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vypusk 3. Iaroslavl'*, 2000, s. 99-103.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарность. Авторы выражают благодарность ассистенту кафедры «Строительные и дорожные машины» ЯГТУ Арсению Сергеевичу Краюшкину и инженеру ЯГТУ Дмитрию Александровичу Шорохову за помощь при проведении экспериментальных исследований уплотнения грунтов виброплитой в полевых условиях, результаты которых частично приведены в данной работе. Также авторы благодарят редакторов и рецензентов данной работы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Financing. The study was not sponsored.

Acknowledgment. The authors express their gratitude to the assistant of the department "Construction and road machines" of the YaGTU Arseny Sergeevich Krayushkin and the engineer of the YaGTU Dmitry Alexandrovich Shorokhov for their help in carrying out experimental studies of soil compaction with a vibrating plate in the field, the results of which, in part, are given in this paper. The authors also thank the editors and reviewers of this work

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.