

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВАЛЬЦА ДОРОЖНОГО КАТКА С УПЛОТНЯЕМЫМ ГРУНТОМ

*Шишкин Е.А., Смоляков А.А.*

*Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск*

**Ключевые слова:** дорожный каток, вибрационный валец, уплотнение грунта, контактная сила, частота вибрации, амплитуда вибрации, технологии интеллектуального уплотнения.

**Аннотация.** Технологии непрерывного контроля уплотнения (ССС – Continuous Compaction Control) или интеллектуального уплотнения (IC – Intelligent Compaction) начали развиваться в 70-х годах в Европе, когда во время полевых испытаний было обнаружено, что поведение вибрирующего вальца дорожного катка изменяется по мере увеличения жесткости уплотняемого материала. Такие технологии не могут измерять плотность непосредственно, но предоставляют информацию о жесткости в виде показателя степени уплотнения. Изучение динамики вибрационного вальца на упругих грунтах имеет большое значение для повышения эффективности уплотнения. Для изучения динамики процесса уплотнения вибрационным катком в среде Simulink была создана модель взаимодействия вальца с грунтом. Она позволяет смоделировать основные режимы работы катка. В процессе уплотнения жесткость грунта увеличивается и вибрационный валец дорожного катка переходит из режима непрерывного контакта с грунтом в режим двойного прыжка. Это подтверждается результатами, полученными в процессе моделирования.

## MODELING OF INTERACTION BETWEEN ROAD ROLLER VIBRATING DRUM AND SOIL BEING COMPACTED

*Shishkin E.A., Smolyakov A.A.*

*Pacific National University, Khabarovsk*

**Keywords:** road roller, vibrating drum, soil compaction, contact force, vibrating frequency, vibrating amplitude, Intelligent Compaction technologies.

**Abstract.** The development of Continuous Compaction Control technologies or Intelligent Compaction technologies started in 70s in Europe, when during field tests it was discovered that behavior of vibrating roller drum is changing with increasing the stiffness of material being compacted. These technologies cannot measure soil density directly, but provide information about soil stiffness in form of Intelligent Compaction Measurement Value. It is very important to study the dynamics of vibrating drum on elastic subgrades for improving the compaction efficiency. To study the dynamics of compaction process with a vibrating roller, a drum – soil interaction model was developed using Simulink software. This model allows to simulate the main operating modes of road roller. Soil stiffness is increasing during compaction process and operating mode of road roller vibrating drum changes from continuous contact to double jump mode. This is confirmed by the results obtained during the modeling process.

### Введение

Технологии непрерывного контроля уплотнения предоставляют информацию о жесткости уплотняемого материала в виде значения показателя степени уплотнения, называемого интеллектуальным значением измерения уплотнения (ICMV – Intelligent Compaction Measurement Value). Три ведущие системы интеллектуального уплотнения для работы с вибрационными катками, представленные на рынке, – Compactometer, Terrameter и система ACE с четырьмя связанными с ними показателями – CMV, OMEGA,  $E_{vib}$  и  $k_B$  – различаются по процедурам оценки сигнала ускорения вибрационного вальца и определения показателя степени уплотнения. Различные алгоритмы определения показателей степени уплотнения основаны либо на эмпирически найденных корреляциях, либо на механических соображениях (например, диаграмма "сила-смещение") [1]. Для использования этих показателей как инструмента контроля качества необходимо установить взаимосвязь между результатами точечных испытаний на месте и значениями, полученными с помощью технологий непрерывного контроля [2]. Современные зарубежные стандарты предъявляют требование, согласно которому коэффициент корреляции должен быть не менее 0,7.

С момента внедрения технологий непрерывного контроля уплотнения проводятся исследования по корреляции значений измерений с помощью вальца с различными точечными испытаниями на месте. Эта взаимосвязь является сложной, поскольку на корреляции влияют не только параметры работы катка (например, размер катка, амплитуда и частота вибрации, скорость катка), но и почвенные условия (например, тип почвы, содержание влаги, толщина и жесткость подстилающего слоя).

Результаты многочисленных исследований подтвердили способность технологий непрерывного контроля определять жесткость уплотняемого материала с необходимой точностью, однако, эти результаты также показали наличие определенных факторов, негативно влияющих на точность определения степени уплотнения. Одно из ограничений современных технологий непрерывного контроля уплотнения заключается в том, что расчетная жесткость грунта, обеспечиваемая вибрационными катками (12-15 тонн), является составной мерой жесткости грунта на глубине 1,0-1,2 м. Это значительно больше, чем слой уплотняемого материала, толщина которого обычно составляет 15-30 см [3]. Поэтому на значения измерений влияют свойства нижележащих слоев. Когда почва достигает определенного состояния уплотнения, появляются гармоники высокого порядка. Эти гармоники не учитываются при расчете показателя  $CMV$  на более поздних стадиях уплотнения, что в итоге приводит к ошибкам [2, 4]. Наконец, показатели степени уплотнения не учитывают параметры влажности уплотняемого материала. Ввиду упрощения и ограничения количества переменных, затруднения определения влажности в реальном времени, параметр влажности часто исключается при расчетах показателя степени уплотнения [5]. Проведены исследования, оценивающие влияние свойств уплотняемого грунта на регрессионные зависимости [6]. По результатам исследований, изменение влажности оказывает большее влияние на корреляцию между традиционными точечными испытаниями и измерениями системы контроля уплотнения, однако метод непрерывного определения содержания влаги в грунте все еще нуждается в дальнейших исследованиях.

Моделирование взаимодействия вибрационного вальца дорожного катка с уплотняемым материалом является одним из способов изучения динамики процесса уплотнения. Оно позволяет регулировать основные параметры системы взаимодействия и внедрять новые параметры, которые могут быть использованы при расчете новых показателей степени уплотнения.

### **Модель взаимодействия вибрирующего вальца с грунтом**

Динамически возбуждаемый валец катка и подстилающий грунт образуют колебательную систему взаимодействия с изменяющимися условиями контакта. В зависимости от параметров катка (размеры вальца, масса вальца, нагрузка на ось, момент дебаланса и т.д.), рабочих настроек (частота возбуждения, амплитуда возбуждения, скорость движения катка) и жесткости почвы (гранулометрический состав, форма зерен, содержание воды, плотность подстилающего слоя и т.д.) могут наблюдаться различные режимы работы системы взаимодействия. Если валец остается в постоянном контакте с почвой, то он работает в режиме непрерывного контакта. Если валец теряет контакт с почвой из-за динамического возбуждения, различают следующие режимы работы: периодический отрыв, двойной прыжок, качание и хаос [7]. Частичный отрыв с периодической потерей контакта при каждом обороте дебаланса является желательным режимом работы, поскольку он позволяет эффективно уплотнять без чрезмерной нагрузки на уплотнительное оборудование и оператора [1].

Исследования грунтовых катков привели к появлению широкого спектра моделей, характеризующих упруго-пластические свойства грунтов. В простейшей форме взаимодействие вальца и грунта характеризуется моделью с двумя степенями свободы, изображенной на рисунке 1, где грунт при уплотнении представлен эквивалентной жесткостью  $k$  и вязким демпфированием  $c$ . Многочисленные исследования подтверждают, что эта модель достаточно адекватно отражает поведение грунта при уплотнении [8-11].

Силовые характеристики грунта меняются при многократном уплотнении, поскольку при каждом проходе вибрационного катка изменяется плотность и напряженно-

деформированные свойства элементов грунта. Грунт во время уплотнения может испытывать упругую и упруго-пластическую деформацию. Деформационные характеристики грунта во время данного прохода в процессе уплотнения часто описываются индикаторной диаграммой, изображенной на рисунке 2, представляющей силу контакта с грунтом  $F_c$  как функцию вертикального смещения вальца.

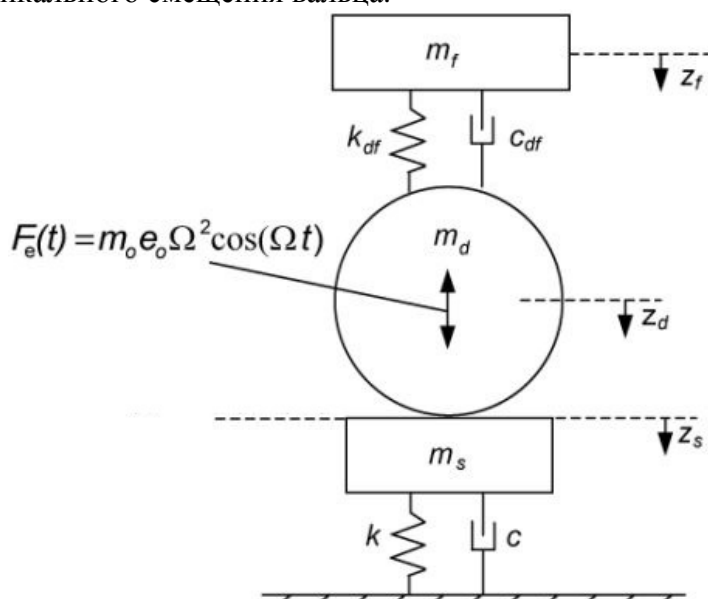


Рис. 1. Модель взаимодействия вибрирующего вальца с грунтом

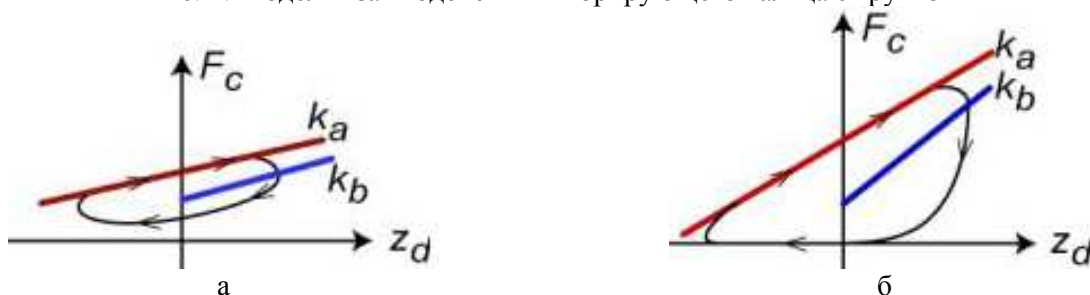


Рис. 2. График зависимости смещения от контактной силы: а) режим постоянного контакта; б) режим частичной потери контакта

Контактная сила определяется в соответствии с уравнением:

$$F_c = F_e(t) \cos(\Omega t) + (m_d + m_f)g - m_d \ddot{z}_d - m_f \ddot{z}_f, \quad (1)$$

где  $F_e(t)$  – вертикальная (в направлении  $z$ ) составляющая силы возбуждения, создаваемой эксцентриковой массой внутри вибрационного вальца,  $\Omega$  – частота возбуждения вибрации, вызываемой эксцентриковой массой,  $m_f$  и  $m_d$  – масса рамы и вальца соответственно,  $g$  – ускорение под действием силы тяжести,  $\ddot{z}_f$  и  $\ddot{z}_d$  – ускорения рамы и вальца соответственно.

График зависимости смещения от контактной силы можно получить путем двукратного интегрирования сигнала ускорения [12].

### Моделирование в среде Simulink

Для исследования динамики вибрационного вальца в среде Simulink была создана двухмассовая модель взаимодействия катка с уплотняемым материалом, представленная на рисунке 3, в соответствии с уравнением контактной силы (1). Путем изменения рабочих параметров можно регулировать величину контактной силы и моделировать основные режимы работы вибрационного катка: непрерывный контакт, частичный отрыв и двойной прыжок.

На рисунке 4 изображена динамика вибрирующего вальца в режиме периодического отрыва. Ноль по оси ординат – это поверхность уплотняемого грунта. Диаграмма «сила – смещение» представлена на рисунке 5. На этой диаграмме видно, что контактная сила периодически равна нулю: в этот момент и происходит отрыв вальца от грунта.

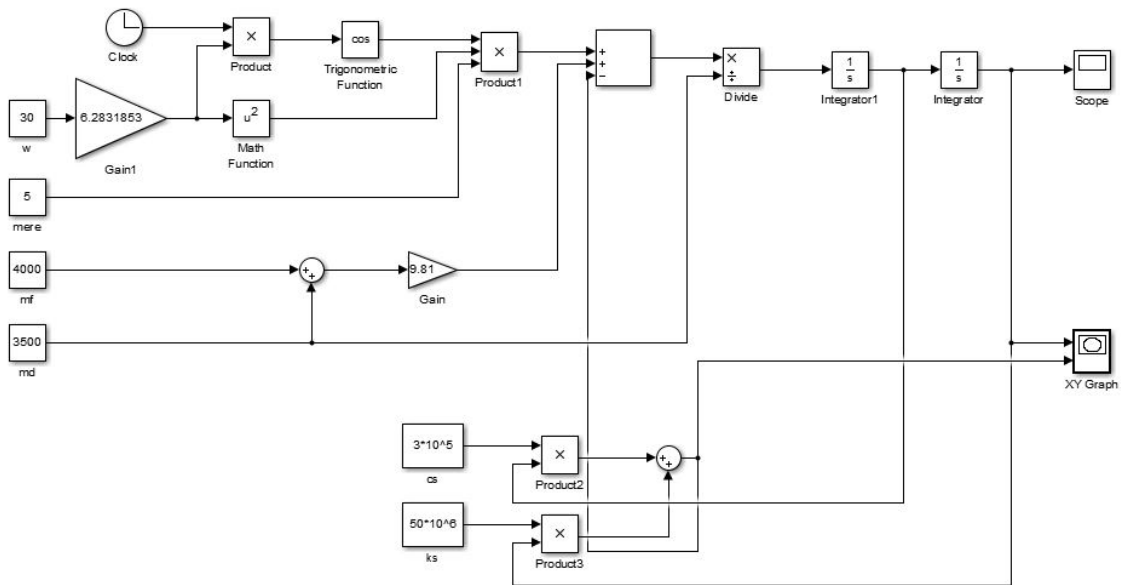


Рис. 3. Схема взаимодействия вальца с грунтом в среде Simulink

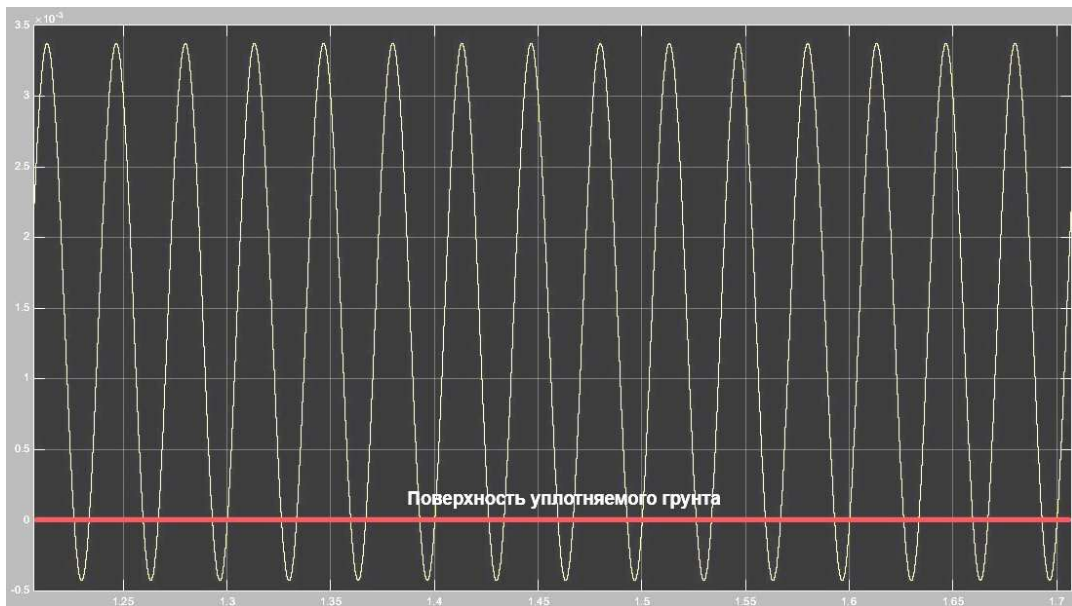


Рис. 4. График зависимости контактной силы  $F_c$  от времени, полученный при моделировании в Simulink

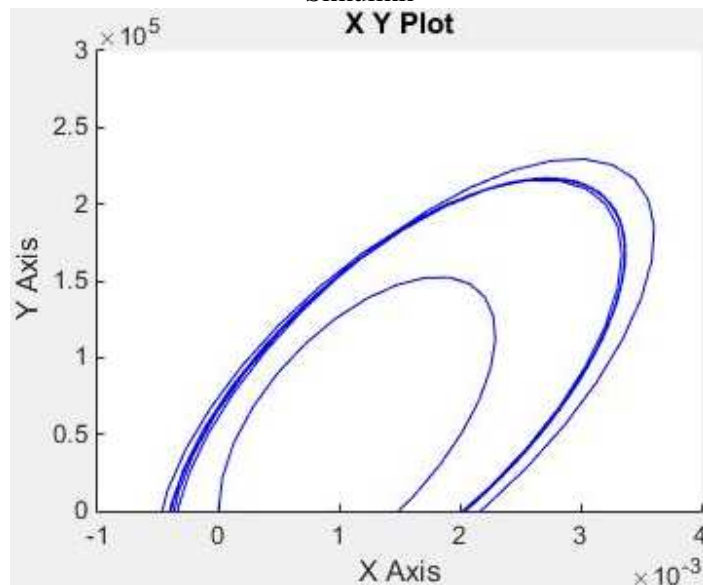


Рис. 5. Диаграмма «сила – смещение», полученная при моделировании в Simulink

## Результаты моделирования

Графики зависимостей, построенные с помощью данных, полученных по результатам моделирования, представлены на рисунках 6-8. На рисунках 6,а; 7,а; 8,а видно, что величина контактной силы и смещения вальца всегда положительны. Это говорит о том, что валец находится в непрерывном контакте с грунтом. Графики 6,б; 7,б; 8,б свидетельствуют о периодической потере контакта вальца с грунтом, так как величина контактной силы и смещение периодически равны нулю. Динамика вальца в режиме двойного прыжка представлена графиками 6,в; 7,в; 8,в. Пики на кривой контактной силы означают переход валец в режим двойного прыжка.

Сравнительные графики для трех режимов работы вибрационного вальца представлены на рисунках 9-11. На графике на рисунке 9 видно, как по мере увеличения жесткости грунта увеличивается значение контактной силы. Валец из режима непрерывного контакта сначала переходит в режим периодической потери контакта, затем в режим двойного прыжка. В режиме двойного прыжка, как показано на графике на рисунке 9, происходят пропуски вибрационных циклов.

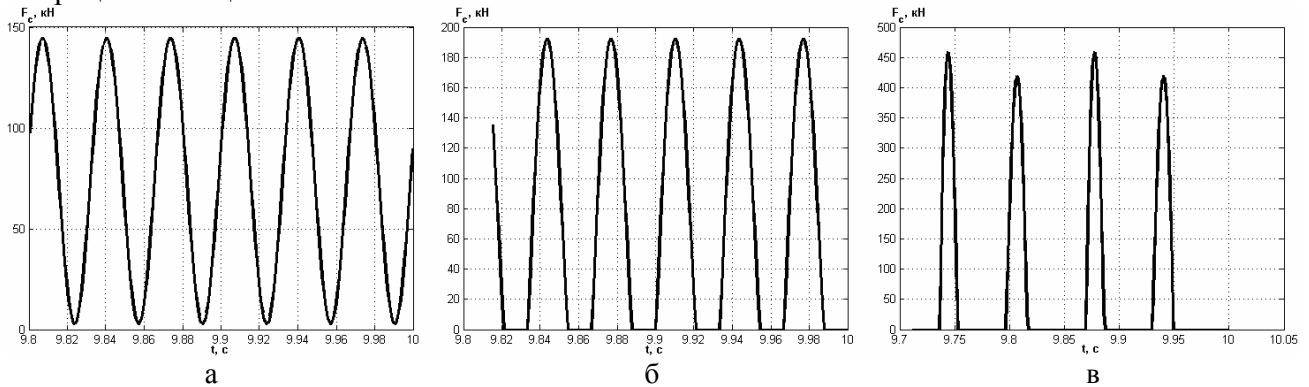


Рис. 6. Графики зависимости контактной силы от времени: а) непрерывный контакт; б) периодический отрыв; в) двойной прыжок

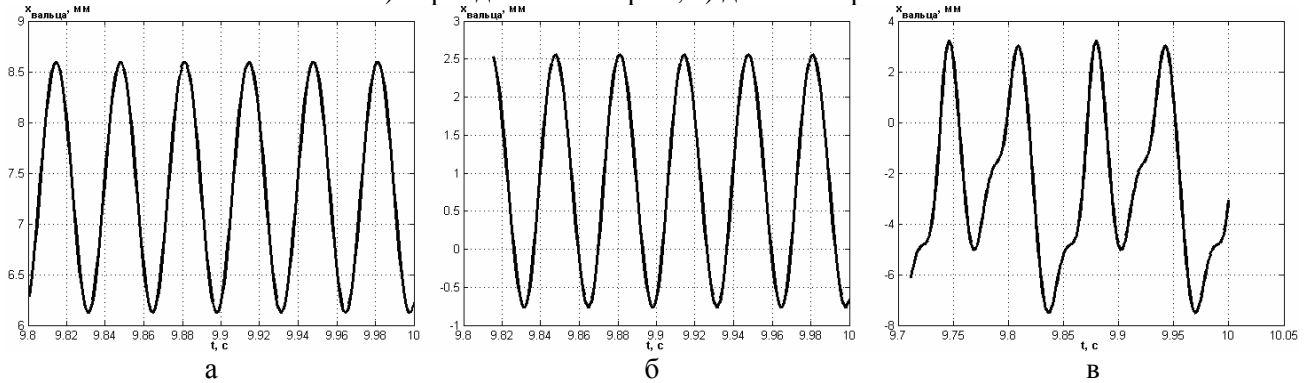


Рис. 7. Графики зависимости смещения от времени: а) непрерывный контакт; б) периодический отрыв; в) двойной прыжок

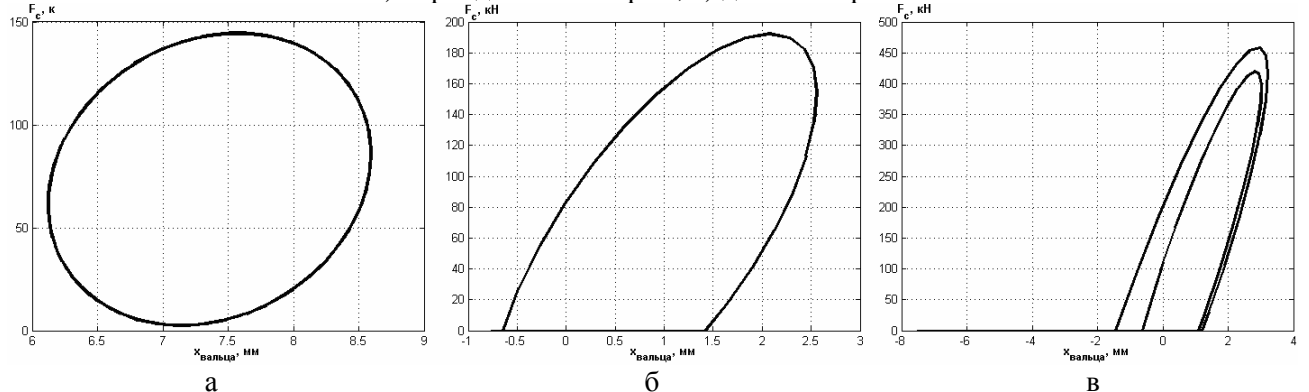


Рис. 8. Диаграммы «сила – смещение»: а) непрерывный контакт; б) периодический отрыв; в) двойной прыжок

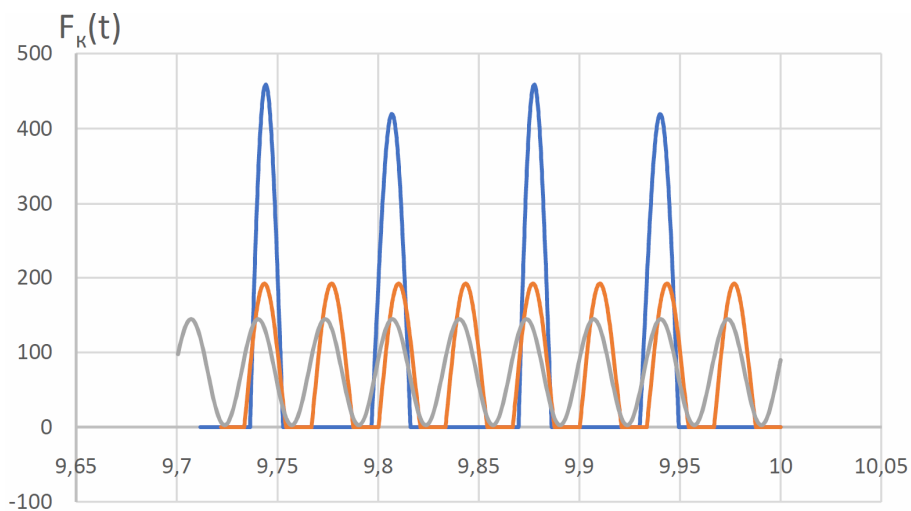


Рис. 9. Сравнительный график зависимости контактной силы от времени. Серым цветом обозначена динамика в режиме непрерывного контакта, оранжевым – в режиме периодического отрыва, синим – в режиме двойного прыжка

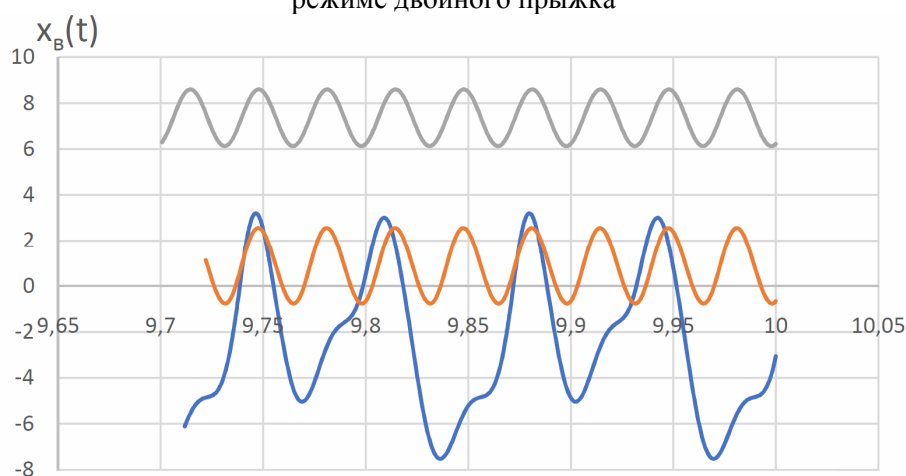


Рис. 10. Сравнительный график зависимости смещения от времени. Серым цветом обозначена динамика в режиме непрерывного контакта, оранжевым – в режиме периодического отрыва, синим – в режиме двойного прыжка

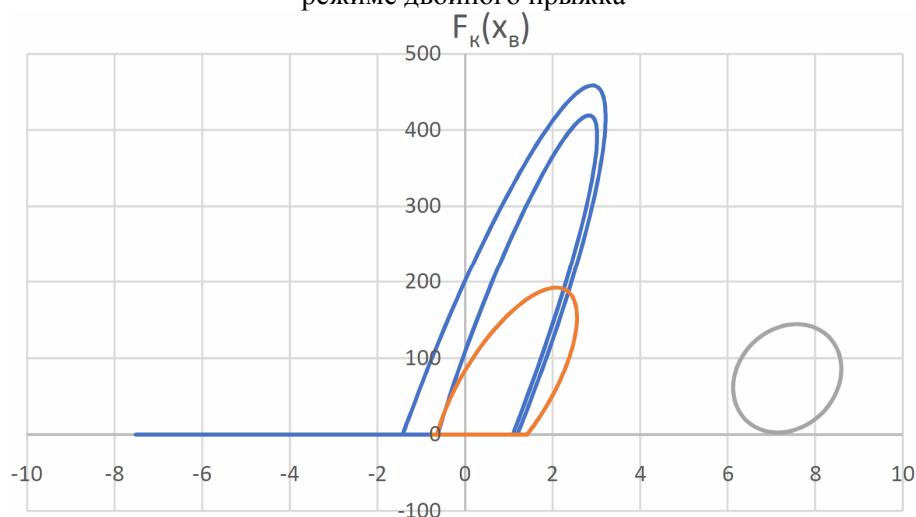


Рис. 11. Сравнение диаграмм «сила – смещение» для трех режимов работы вибрационного вальца: серым цветом обозначена динамика в режиме непрерывного контакта, оранжевым – в режиме периодического отрыва, синим – в режиме двойного прыжка

Из диаграмм «сила – смещение», представленных на рисунке 11, следует, что на начальном этапе вибрационного уплотнения величина смещения имеет максимальные значения. Это объясняется тем, что грунт еще слабо уплотнен, и валец внедряется на

большую глубину. По мере уплотнения жесткость увеличивается и валец начинает отскакивать от уплотняемого грунта, а величина смещения периодически становится отрицательной. Отрицательные значения смещения характерны для режима периодической потери контакта и режима двойного прыжка, как это можно увидеть на рисунке 10.

### **Выводы**

В данной работе выполнено моделирование взаимодействия вибрационного вальца с грунтом в среде Simulink. Исследована динамика вибрационного уплотнения для режимов непрерывного контакта, периодической потери контакта и режима двойного прыжка. Модель достаточно точно описывает динамику уплотнения, однако имеет ряд упрощений. В предлагаемой модели рассматриваются только силы, действующие на валец и грунт в вертикальном направлении, и исключены горизонтальные силы. Также не учитывается переменная ширина контакта вальца с грунтом. Среди дальнейших направлений исследований рассматривается задача введения в модель взаимодействия параметра влажности, учета переменной ширины контакта вальца с грунтом, а также исследование методов послойного определения жесткости грунта.

### **Список литературы**

1. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. An advanced ICMV for vibratory roller compaction // *Acta Geotechnica*. 2024, vol. 19, iss. 5. doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8.
2. Тюремнов И.С., Морев А.С., Краюшкин А.С. Обоснование выбора значений коэффициентов веса показателя уплотнения для систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2020. – Т. 8, № 1. – С. 104-110. – doi.org/10.25206/2310-9793-8-1-104-110.
3. Mooney M., Facas N. Extraction of layer properties from Intelligent Compaction data // *Final Report for NCHRP Highway IDEA Project*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2013, no. 145, pp. 1-23.
4. Ma Y. Numerical simulation of Intelligent Compaction for subgrade construction // *Journal of Central South University*. 2020, no. 27, pp. 2173-2184. doi.org/10.1007/s11771-020-4439-2.
5. Chang G., Xu Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction // *Automation in Construction*. 2016, vol. 62, pp. 78-88. doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004.
6. Adam D., Brandl H. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials // *International conference on soil mechanics and foundation engineering*. – Hamburg, Germany, 1999. – P. 31-36.
7. Adam D. Continuous Compaction Control with vibrating rollers // *Environmental geotechnics*. 1997, no. 97, pp. 245-250.
8. Wolf J.P. Foundation vibration analysis using simple physical models // *Development in Geotechnical Engineering*. 1998, vol. 83, pp. 1-70.
9. Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann, K. Compaction monitoring using Intelligent soil compactors // *Proceedings of GeoCongress: Geotechnical Engineering in the Information Technology age*. – Atlanta, USA, 2006. – P. 41-46. – doi.org/10.1061/40803(187)41.
10. Lun L. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades // *Shock and vibration*. 2021, pp. 1-9. doi.org/10.1155/2021/9589230.
11. Тюремнов И.С., Морев А.С., Фурманов Д.В. Экспериментальные исследования вертикальных перемещений и ускорений колебаний вальца вибрационного катка DM-617 при уплотнении грунта // *Проблемы машиноведения: IV Международная научно-техническая конференция*. – Омск: ОмГТУ, 2020. – С. 121-128.
12. Pistol J., Hager M., Adam D., Kopf F. Theoretical and experimental investigation of Continuous Compaction Control systems // *17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic*. – Reykjavik, Iceland, 2016. – P. 25-28.

### **References**

1. Pistol J., Hager M., Kopf F., Adam D. An advanced ICMV for vibratory roller compaction // *Acta Geotechnica*. 2024, vol. 19, iss. 5. doi.org/10.1007/s11440-024-02342-8.
2. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Krayushkin A.S. Justification of chosen values of the weight coefficients of the compaction value for continuous compaction control systems for vibration rollers // *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2020, vol. 8, no. 1, pp. 104-110. doi.org/10.25206/2310-9793-8-1-104-110.
3. Mooney M., Facas N. Extraction of layer properties from Intelligent Compaction data // *Final Report for NCHRP Highway IDEA Project*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC. 2013, no. 145, pp. 1-23.
4. Ma Y. Numerical simulation of Intelligent Compaction for subgrade construction // *Journal of Central South University*. 2020, no. 27, pp. 2173-2184. doi.org/10.1007/s11771-020-4439-2.

5. Chang G., Xu Q. Adaptive quality control and acceptance of pavement material density for intelligent road construction // Automation in Construction. 2016, vol. 62, pp. 78-88. doi.org/10.1016/j.autcon.2015.11.004.
6. Adam D., Brandl H. Sophisticated continuous compaction control of soils and granular materials // International conference on soil mechanics and foundation engineering. – Hamburg, Germany, 1999. – P. 31-36.
7. Adam D. Continuous Compaction Control with vibrating rollers // Environmental geotechnics. 1997, no. 97, pp. 245-250.
8. Wolf J.P. Foundation vibration analysis using simple physical models // Development in Geotechnical Engineering. 1998, vol. 83, pp. 1-70.
9. Anderegg R., Von Felten D.A., Kaufmann, K. Compaction monitoring using Intelligent soil compactors // Proceedings of GeoCongress: Geotechnical Engineering in the Information Technology age. – Atlanta, USA, 2006. – P. 41-46. – doi.org/10.1061/40803(187)41.
10. Lun L. Nonlinear dynamics of the rigid drum for vibratory roller on elastic subgrades // Shock and vibration. 2021, pp. 1-9. doi.org/10.1155/2021/9589230.
11. Tyuremnov I.S., Morev A.S., Furmanov D.V. Experimental studies of vertical displacements and vibration accelerations of the DM-617 vibratory roller during soil compaction // Mechanical science and technology update: IV International scientific conference. – Omsk: OmSTU, 2020. – P. 121-128.
12. Pistol J., Hager M., Adam D., Kopf F. Theoretical and experimental investigation of Continuous Compaction Control systems // 17th Nordic Geotechnical Meeting Challenges in Nordic Geotechnic. – Reykjavik, Iceland, 2016. – P. 25-28.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Шишкин Евгений Алексеевич</b> – кандидат технических наук, доцент высшей школы промышленной инженерии	<b>Shishkin Evgenij Alekseevich</b> - candidate of engineering sciences, associate professor of the graduate school of industrial engineering
<b>Смоляков Александр Андреевич</b> – аспирант	<b>Smolyakov Alexander Andreevich</b> – postgraduate student
gm26578@gmail.com	

Получена 10.06.2024