

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 656.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_86

ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛУПРОСТРАНСТВА «ГРУНТ» В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ «ШИНА-ГРУНТ»

Н.С. Вольская

ORCID: 0000-0003-0655-2677 e-mail: volskayans@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
*Москва, Россия***И.В. Басманов**

ORCID: 0000-0001-6997-8144 e-mail: basmanov.i.v@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия

Рассмотрены новые возможности по проведению виртуальных имитационных испытаний в области оценки опорно-тяговой проходимости транспортных машин. Предложен метод, позволяющий в динамической постановке оценивать взаимодействие шины колеса транспортного средства с искусственным грунтом. Приведен пример расчетной визуализированной имитации «ударного взаимодействия» сброшенного штампа с искусственным грунтом. Это первый этап проведения эксперимента, имитирующий динамику вертикального погружения движущегося колеса в грунт. На втором этапе эксперимента активное колесо совершает прямолинейное движение, при этом визуализируется динамика изменения компрессионных сил в полупространстве грунт. Результаты компьютерного эксперимента подтвердили физическую картину взаимодействия штампа с деформируемым опорным основанием в лабораторных условиях.

Новый подход к рассмотрению контактной задачи «шина-грунт» в динамической визуализированной постановке упрощает решение задачи по оценке эффективности взаимодействия колесного движителя с различными типами грунтов.

Ключевые слова: динамический процесс, шина-грунт, напряженно-деформированное состояние грунта, искусственный грунт, штамп, пятно контакта шины.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Вольская, Н.С. Динамический метод оценки напряженно-деформированного состояния полупространства «грунт» в контактных задачах «шина – грунт» / Н.С. Вольская, И.В. Басманова // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2022. №1. С. 86-96. DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_86

DYNAMIC METHOD FOR ESTIMATING THE STRESS-STRAIN STATE OF THE «SOIL» HALF-SPACE IN CONTACT PROBLEMS «TIRE-SOIL»

N.S. Volskaya

ORCID: 0000-0003-0655-2677 e-mail: volskayans@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

I.V. Basmanov

ORCID: 0000-0001-6997-8144 e-mail: basmanov.i.v@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Abstract. New possibilities for conducting of virtual simulation tests in the field of assessing a support-traction cross-country capability of transport vehicles are considered. Method is proposed that allows to evaluate, in a dynamic formulation, the interaction of a vehicle wheel tire with artificial soil. Example of a calculated visualized simulation of the «impact interaction» of a downthrown die with artificial soil, is given. The first stage of the experiment simulates the dynamics of vertical immersion of a moving wheel into the soil. At the second stage of the experiment, the active wheel performs a rectilinear motion, while the dynamics of changes in compression forces in the soil half-space is visualized. Results of the computational experiment confirmed the physical picture of the die interaction with the deformable support base in the laboratory.

A new approach to consideration of the «tire-soil» contact problem in a dynamic visualized formulation simplifies the solution of the problem for evaluation of effectiveness of interaction of a wheeled running gear with various types of soils.

Key words: dynamic process, tire-soil, stress-strain state of the soil, artificial soil, die, tire contact spot.

FOR CITATION: N.S. Volskaya, I.V. Basmanov. Dynamic method for estimating the stress-strain state of the «soil» half-space in contact problems «tire-soil». Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2022. №1. С. 86-96.
DOI: 10.46960/1816-210X_2022_1_86

Введение

Проблему прогнозирования эффективности движения колесных машин (КМ) в общей постановке принято рассматривать с помощью комплексной системы «водитель – автомобиль – дорога». При оценке опорно-тяговой проходимости и сопротивления качению колес КМ в ней можно выделить отдельную задачу расчета и прогнозирования напряженно-деформированного состояния дороги, а точнее – грунта (в некоторых исследованиях используют понятие «деформируемая опорная поверхность» – ДОП). Целями прогнозирования напряженно-деформированного состояния ДОП являются расчет глубины колеи под каждым колесом машины и ограничение напряжения сдвига в пятне контакта от допустимого по величине крутящего момента. Они решаются с помощью совокупности практических (экспериментальных) и теоретических методов специалистами разных областей знаний. С одной стороны, теоретические основы прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния полупространства грунт в зависимости от его типа и под действием многофакторных нагрузок отражены в технической литературе и исследованиях по механике грунтов [1]. С другой стороны, в большом количестве исследований ученых автомобилистов по результатам полевых и лабораторных испытаний [2-15] в различных дорожно-грунтовых условиях разработаны эмпирические зависимости по расчету параметров колеи (например, глубины колеи z). Прогнозирование z позволяет рассчитывать затраты мощности на сопротивление качению движителя КМ. И в первом и во втором случаях на результаты расчета и натурального эксперимента влияют деформационные параметры грунта: физико-механические и консистенция.

Эмпирические зависимости по расчету параметров колеи (второй подход) часто содержат в себе неясные по физическому смыслу коэффициенты. Использовать и систематизировать результаты огромного количества грунтовых экспериментов и исследований практически невозможно. Положение усугубляется тем, что в качестве опорной поверхности для КМ выступают различные типы грунтов (в том числе разные виды почв), на деформирующееся состояние которых влияют климатические условия, географическое положение и время года. К ДОП также относят снежный покров. Как уже отмечалось [16], помочь упростить вышеперечисленные исследования может применение методов имитационного моделирования. Их главным преимуществом может стать возможность визуализации самого процесса

деформирования конкретного типа грунта колесом или имитатором его пятна контакта с грунтом – штампом. Рассмотрим возможности применения таких методов.

Остановимся на самом методе имитации внешней механики пневматического колеса – визуализации напряженно-деформированного состояния ДОП. В нашей работе [16] предложен принцип визуального имитирования динамического взаимодействия прямолинейно движущегося колеса с грунтовым полупространством. Целью исследования в этой задаче является визуальный анализ картины изменения в первую очередь поля напряжений, характера смещения пятна контакта колеса (при его качении по ДОП) в полупространстве грунт и характера послойного разрушения искусственного грунта «в» и «под» пятном контакта шины с ДОП. Этот расчетный визуализированный имитационный эксперимент начат с попытки рассмотрения с помощью динамического воздействия на поверхность искусственно созданного грунта штампом, площадь и форма которого, пропорционально связаны с площадью пятна контакта шины с грунтом. Отметим, что такого рода натурные испытания проводились ранее, результаты их проведения изложены в работе [17]. Целью этих экспериментов были оценка демпфирующих и жесткостных свойств грунта. В качестве результата определялись: затраты мощности на качение колеса; по отдельности – влияния сопротивлений грунта и колеса на эффективное качение в рассматриваемых дорожно-грунтовых условиях.

Выбор режима нагружения деформирующейся опорной поверхности

В механике деформируемых сред (к которым относятся грунты и почвы земной поверхности, в нашем случае ДОП) приняты следующие основные виды испытаний с учетом временного режима [1]:

- при постоянной нагрузке;
- при постоянной деформации;
- при ступенчатой нагрузке;
- с постоянной скоростью нагружения;
- с постоянной скоростью деформации;
- циклическая нагрузка;
- ударная нагрузка;
- вибрация.

Все вышеперечисленные виды нагружения ДОП от колес ТС характерны и могут быть рассмотрены для случаев установившегося и неустановившегося движения КМ на местности. Необходимо отметить, что практически во всех современных методиках [2,4,10,11], рассматриваются процессы взаимодействия в контактной задаче «шина-грунт» в статической постановке. Отличие предлагаемых методик заключается в проведении виртуальных экспериментов в динамической постановке, расчетное время компьютерной симуляции процесса не превышает 10 секунд.

Первым основным вопросом нашего исследования является имитация силового взаимодействия колеса с грунтом с учетом скорости движения колеса. Поэтому сначала рассматриваем вертикальное сжатие грунта под движущимся вертикально вниз штампом, а затем колесом. Имитация заключается в вертикальном сбросе штампов различной: массы, конфигурации, высоты сброса. Высота сброса штампа h , как правило варьируется в интервале от 0, 2...1,0 м. В зависимости от конкретно взятого числового значения высоты h имитируются разные значения скорости при контакте штампа, а затем шины с грунтом - от 0 до 10 км/ч.

В дальнейшем предполагается сравнение результатов аналогичных полевых или лабораторных испытаний на конкретном оригинальном грунте с результатами испытаний его искусственного аналога в компьютерном эксперименте в программном комплексе на базе DEM элементов. В качестве общих измерителей рассматриваем напряженно-деформированное состояние полупространства грунт в момент контакта с ним падающего штампа.

Эту динамическую («ударную») нагрузку можно охарактеризовать малым временем воздействия значительных сил, в результате которых телу, на которое оказывается воздействие (полупространству – грунт) сообщается конечное приращение количества движения. «Удар можно рассматривать как циклическую нагрузку с большой амплитудой и малым временем нагружения». Графически разновидности циклических нагрузок можно представить на рисунке 1 [17], к выбранному виду имитации взаимодействия штампа (пятна контакта шины) с грунтом можно отнести случай, представленный на рис. 1, с).

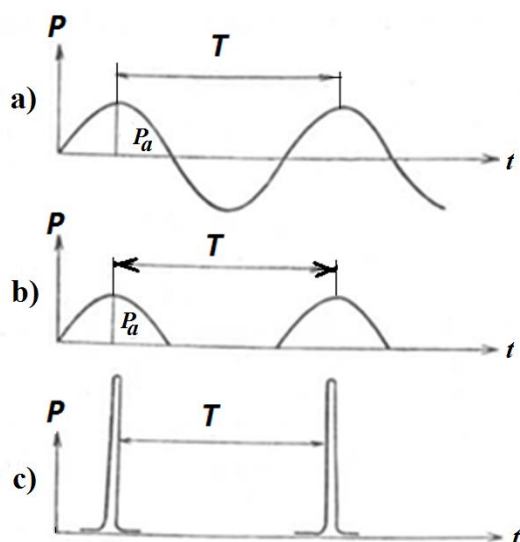


Рис. 1. Циклические нагрузки:

a) синусоидальная нагрузка; b) пульсирующая синусоидальная нагрузка; c) ударная нагрузка

Fig. 1. Cyclic loads:

a) sinusoidal load; b) pulsating sinusoidal load; c) shock load

Сила, действующая при ударе, может быть определена по теореме импульсов для системы материальных точек [18] (1):

$$\Delta(mv) = F \cdot \Delta t = I, \tag{1}$$

где m – масса колеса (штампа), v – скорость колеса (штампа), mv - количество движения, $I = F \cdot \Delta t$ – импульс силы, [Н·с].

Таким образом, чтобы упростить процесс имитационного моделирования, в первую очередь, деформационных свойств реальных грунтов, посредством физико-механических характеристик механики грунтов E , φ_0 , c_0 применяется вышеуказанный способ сбрасывания с высоты h круглых штампов, площадь и вес которых соответствуют инициализации реакции заданного внешнего давления на грунт, эквивалентного давлению в пятне контакта «шина-грунт». Поэтому, с помощью зависимости (2), задавшись площадью штампа, равновеликой пятну контакта реальной шины, варьируя весом и высотой сброса h , можно с помощью компьютерного эксперимента провести валидацию известного искусственного грунта по характеру возникшего поля напряжений в грунте в результате удара штампа о его поверхность (2).

$$I = m(v - v_0) = mv = P \sqrt{\frac{2h}{g}} = m\sqrt{2gh}. \tag{2}$$

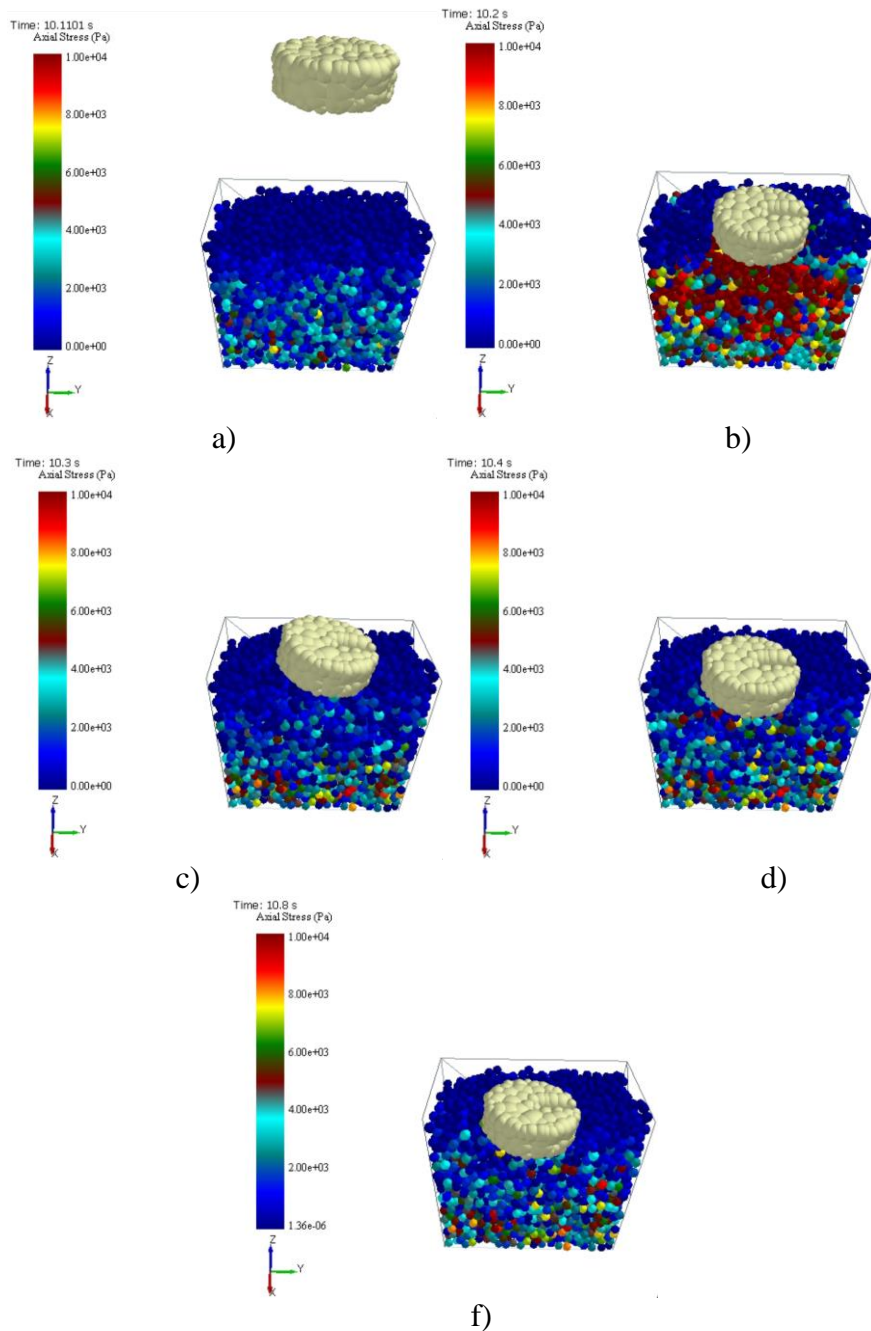


Рис. 2. Кинограмма расчетного эксперимента по оценке ударного воздействия штампа (аналога колеса КМ) на поверхность искусственного грунта (песок):

- a) штамп поднят над грунтом на заданную высоту h ; б) зафиксированный момент динамического соприкосновения штампа с поверхностью неуплотненного грунта ($\Delta t = 0,2$ с); в) зафиксировано упругое взаимодействие грунта и штампа (с момента падения штампа прошло $\Delta t = 0,4$ с);
 д) штамп второй раз входит в контакт с грунтом ($\Delta t = 0,6$ с);
 ф) статика– штамп лежит на искусственном грунте ($\Delta t = 0,8$ с)

Fig. 2. Record of the computational experiment to assess the die impact (analogous to KM wheel) on the surface of artificial soil (sand):

- a) the die is raised above the ground to a given height h ; б) the fixed moment of dynamic contact of the die with the surface of the uncompacted soil ($\Delta t = 0.2s$); в) elastic interaction of the soil and the die (It has passed the moment of the die fall $\Delta t = 0.4s$) is fixed;
 д) the die comes into contact with the soil for the second time ($\Delta t = 0.6s$);
 ф) statics– the stamp is put on artificial soil ($\Delta t = 0.8s$)

Цель и алгоритмы проведения расчетного и грунтового экспериментов

Рассмотрим реализацию компьютерного варианта эксперимента с помощью среды искусственного грунта, сгенерированного на базе DEM элементов. Кинограмма расчетного эксперимента представлена на рис. 2. Алгоритм эксперимента следующий:

- штамп поднят над грунтом на заданную высоту h (рис. 2а), прошло 10 с реального времени – штамп падает вертикально вниз, начальная скорость равна нулю;
- штамп движется в свободном падении, фиксируется момент динамического соприкосновения штампа с поверхностью грунта ($\Delta t = 0,2$ с, рис. 2б).

В грунтовом объеме фиксируется напряженно-деформированное состояние от динамического воздействия штампа. Анализ распределения напряжений в подштамповой фигуре показывает неоднородное уплотнение искусственного грунта перед сбросом штампа. Картина напряжений визуализирует естественный динамический процесс во времени, происходящий в грунте. Таким образом, по результатам компьютерного эксперимента можно сделать выводы по зонам распределения напряжений и их численных значений:

- зафиксировано упругое взаимодействие грунта и штампа – штамп приподнялся над грунтом (с момента падения штампа прошло $\Delta t = 0,4$ сек рис. 2с) – динамический процесс;
- штамп второй раз входит в контакт с грунтом ($\Delta t = 0,6$ сек рис. 2д) – динамический процесс;
- статическое взаимовлияние невелико – штамп лежит на искусственном грунте ($\Delta t = 0,8$ сек рис. 2ф).

Целью такого компьютерного расчетного эксперимента, прежде всего, является верификация ранее проведенных полевых и лабораторных исследований с возможностью расчетной имитации тех же грунтовых условий при расчете опорно-тяговой проходимости КМ с визуализацией напряженно-деформированного состояния ДОП. В связи с задачами, поставленными в исследовании, была проведена серия пробных установочных опытов в лаборатории кафедры по сбросу штампов на грунт типа песок. На глубине 50 мм закладывался датчик для оценки компрессионных сил и давлений. Результаты экспериментов представлены в табл. 1. На рис. 3 представлен график ударного взаимодействия штампа диаметром 220 мм, сброшенного с высоты 0,6 м. Зафиксированные значения давлений в грунте соответствуют ожидаемым численным значениям.

Таблица 1.

Результаты расчетного эксперимента

Table 1.

Results of the computational experiment

Масса штампа, кг	Диаметр штампа, мм	Высота сброса, мм	Зафиксированные значения давления на глубине 50 мм, кПа
16,85	395	0	0,029
16,85	395	250	0,4325
4,53	220	0	0,0588
4,53	220	400	1,176
4,53	220	600	5,88

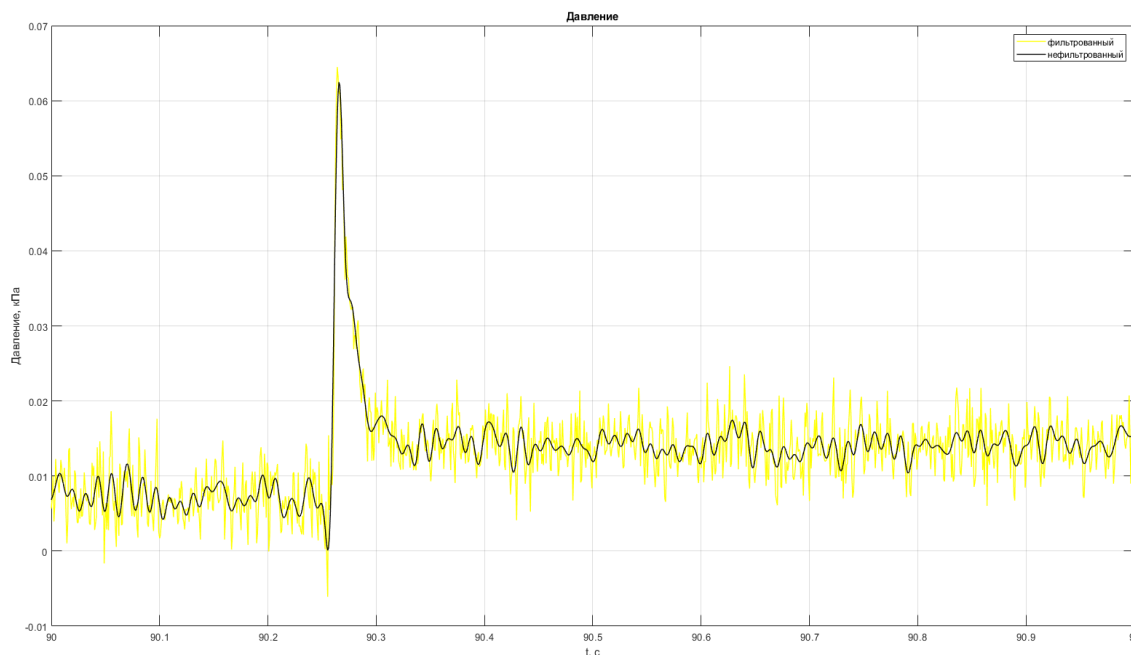


Рис. 3. График определения ударного взаимодействия штампа с грунтом типа «песок»

Fig. 3. Graph for determining of impact interaction of the stamp with the soil of «sand» type

Выводы по результатам пробной серии экспериментов:

- цель проведения испытаний достигнута, динамический метод сброса штампа и выбранная чувствительность манометра позволяют оценить изменения импульса силы при ударном контакте штампа с горизонтальной поверхностью грунта во всем диапазоне изменения высоты сброса от h 0,6 м до 1 м и выше;
- необходимо проведение более тонкого эксперимента с четкой фиксацией высоты сброса штампа и возможности варьирования типа грунта в небольших объемах. Для этого разрабатывается специальная стендовая установка.

Пример применения метода визуализации динамического процесса взаимодействия шины с грунтом типа «песок»

В качестве примера рассмотрим принцип решения задачи «визуализация процесса динамического взаимодействия шины с искусственным грунтом сухой песок». Кинограмма процесса представлена на рис. 4. Целью этого расчетного эксперимента являлась визуализация процесса взаимодействия протектора конкретного жесткого колеса с ДОП. На рис. 4б,с, д можно наблюдать как трансформируется распределение компрессионных сил в полупространстве грунт под колесом. По рис. 4д можно определить глубину погружения колеса в грунт (высоту колеи), т.е. найти z ($\sim 0,12$ м) для грунта типа песок при качении жесткого колеса массой 52 кг, нагруженного вертикальной осевой нагрузкой 1000 Н и крутящим моментом 200 Н·м. При симуляции этого процесса были заданы численные значения параметров грунта типа песок.

На рис. 5 представлено динамическое взаимодействие того же жесткого колеса (реализован протектор колеса для квадроцикла Kenda Bear Claw 25x8-12) с искусственным грунтом (сухой песок, элемент $d = 5$ мм), с теми же силовыми характеристиками режима качения. Отличие в симуляциях заключается в попытке сокращения времени, необходимым для расчета задачи.

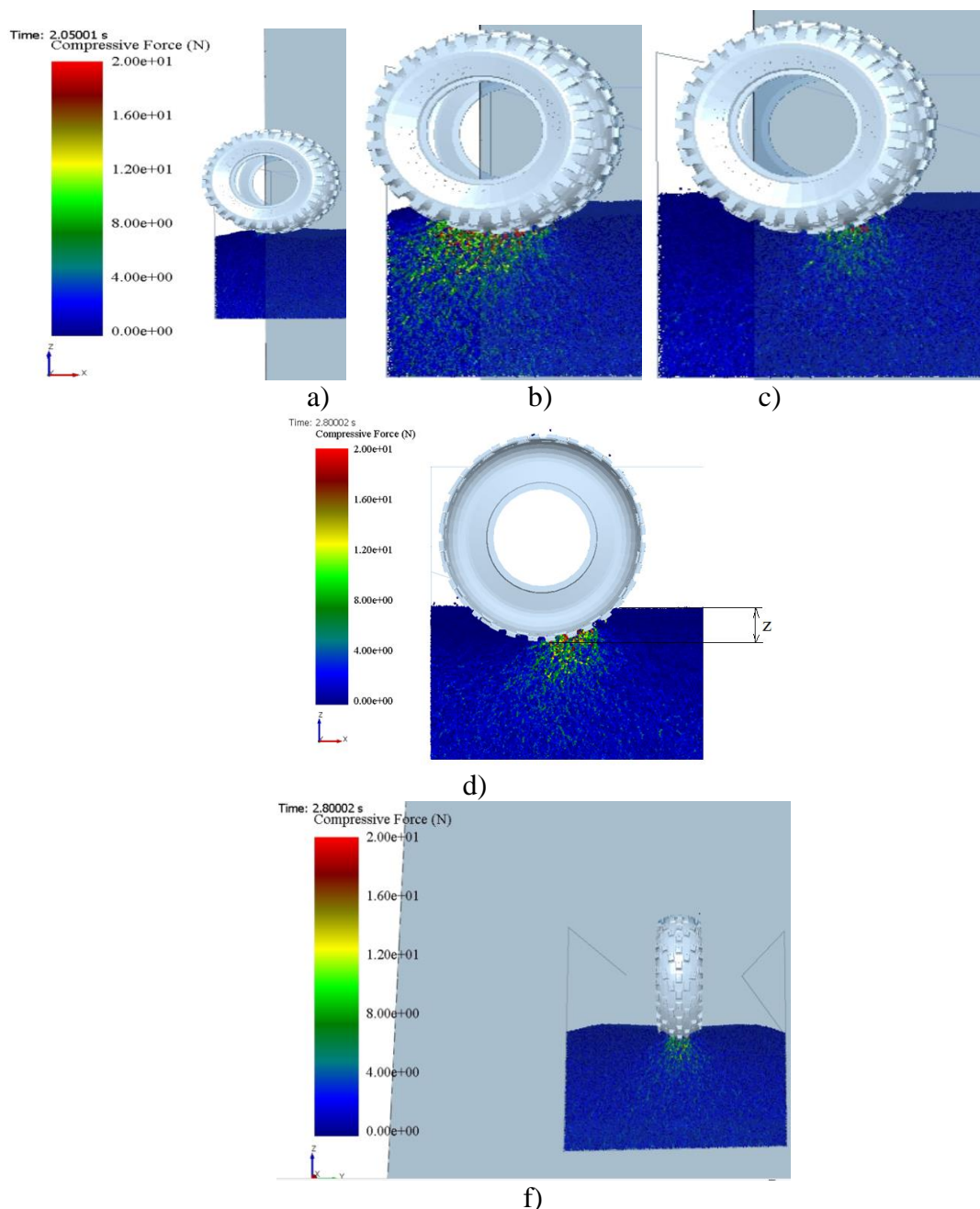


Рис. 4. Кинограмма визуализации процесса взаимодействия шины с деформируемым опорным основанием:

- a) момент вертикального сброса колеса с заданной высоты; б) динамический вертикальный контакт шины с грунтом – начальный этап образования геометрической характеристики пятна контакта «шина – грунт»; в) начало прямолинейного движения колеса и определение глубины колеи в рассматриваемых грунтовых условиях; г) динамическая визуализация процесса напряженно-деформированного состояния полупространства грунт, визуализация глубины колеи z ;
- д) поперечный разрез контакта взаимодействия шины с грунтом

Fig. 4. Record of visualization of the process of interaction of tire with deformable support base:

- a) moment of vertical throwdown of wheel from a pre-determined height; б) dynamic vertical contact of the tire with soil – the initial stage of formation of geometric characteristic of «tire-soil» contact spot; в) beginning of rectilinear movement of wheel and determination of track depth in the soil conditions under consideration; г) dynamic visualization of soil half-space stress-strain state process, visualization of depth of track z ;
- д) a cross section of contact of interaction of the tire with soil

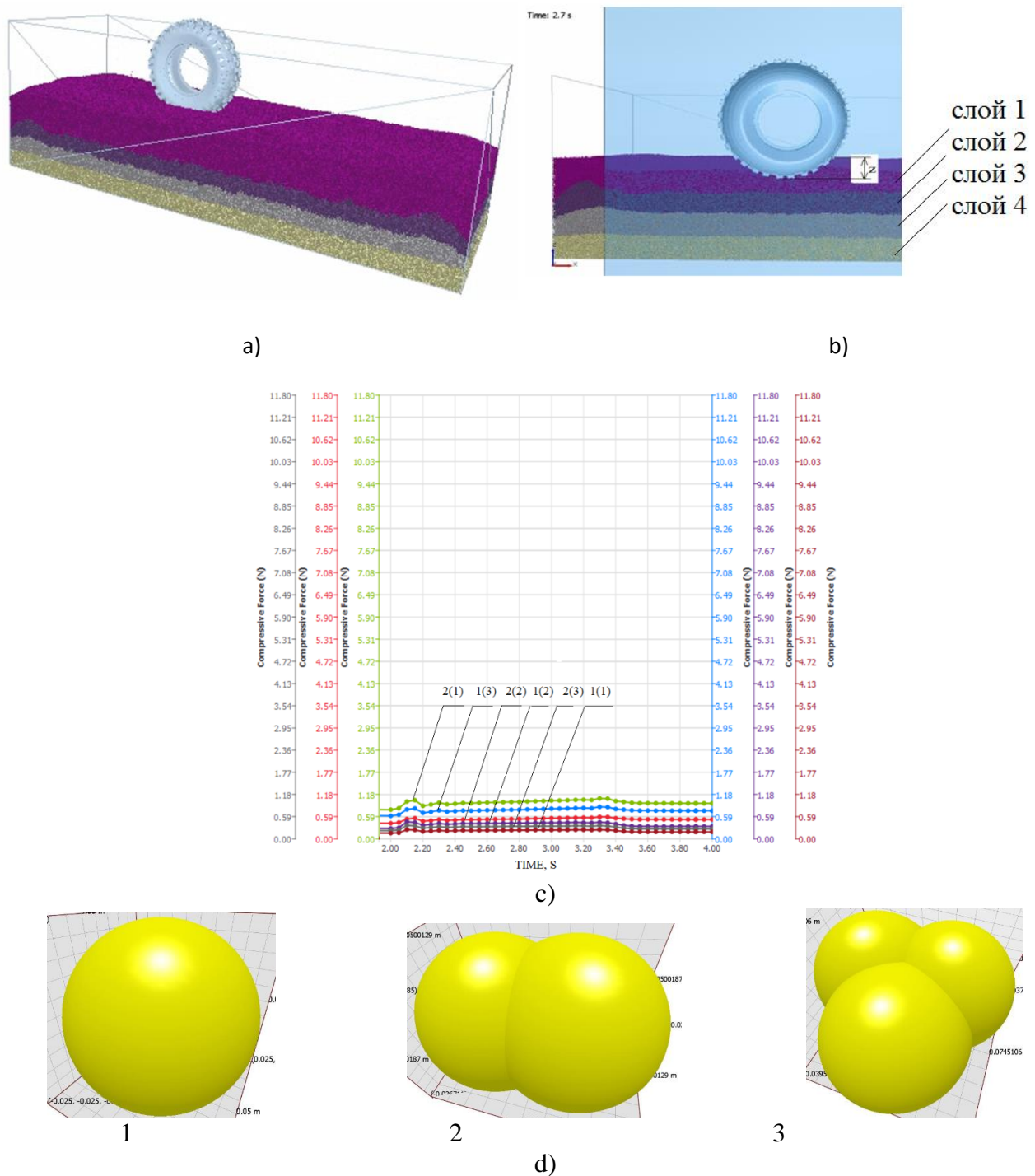


Рис. 5. Использование возможностей структуризации искусственного грунта в процессе компьютерного моделирования:

a) 3D модель активного колеса 25x8-12; б) цветное разделение грунта на слои, визуализация определения глубины колеи; с) динамика послойного изменения осредненного значения компрессионных сил в полупространстве грунт; обозначения – «номер слоя» (форма DEM элемента), например, 2(1); д) три формы частиц, образующих искусственный грунт – 1, 2, 3

Fig. 5. Use of possibilities of structuring of artificial soil in the computer modeling process:
 a) 3D model of the active wheel 25x8-12, visualization of the track depth determination; c) dynamics of layer-by-layer changes in the average value of compression forces in the soil half-space; designations – «layer number» (shape of DEM element), for example, 2(1); d) three forms of particles which form the artificial soil – 1, 2, 3

Отличие второго примера того же расчетного варианта заключается в следующем. Известно, что чем крупнее DEM элемент, тем меньше расчетное время симуляции. Часто в исследованиях фактор сокращения расчетного времени крайне важен. Нами была использована возможность послойной генерации частиц с разными значениями параметров DEM элементов (например, их размеров, в данном примере реализованы 3 варианта используемых форм каждой дискретной частицы грунта). За основу принят диаметр сферической частицы $D = 5$ мм (рис. 5d). Все полупространство грунт разделено на четыре цветных слоя (рис. 5b). Цветовое выделение зон связано с последовательно изменяющимся напряженно-деформированным состоянием грунта под колесом. Расчетные значения компрессионных сил в рассматриваемый момент времени для каждого вида с характерным размером частицы в четырех слоях искусственного грунта разные (рис. 5c). Приведены результаты расчета компрессионных сил во времени для двух верхних слоев грунта ($t = 0 \dots 2,0$ с - время формирования грунтовой массы и ее уплотнения (условно не показаны); $t = 2,0 \dots 4,0$ с – время движения колеса).

На рис. 6 представлен график изменения линейной скорости качения колеса. Средняя скорость качения в заданных условиях около 3,6 м/с.

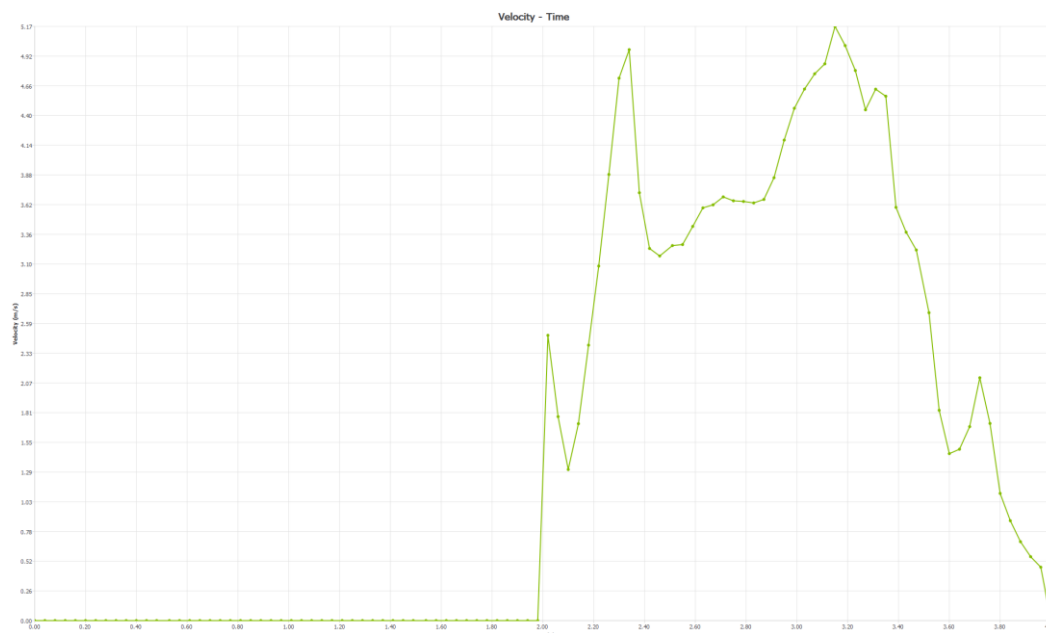


Рис. 6. График изменения линейной скорости качения колеса

Рис. 6. Graph of changes in the wheel linear rolling speed

Выводы

1. Программные пакеты, в основе которых заложена возможность визуализации физического силового контакта механических систем (шина и грунт), с помощью DEM элементов позволяют оценивать этот процесс в динамической постановке с новыми возможностями в исследовании и уточнении характеристик его протекания.
2. Разработанные алгоритмы компьютерных экспериментов могут помочь уточнить физико-механические параметры искусственных грунтов, предлагаемых разработчиками программных пакетов.
3. Представлена методика визуализации динамики «колееобразования» в полупространстве грунт под воздействием катящегося колеса.

Библиографический список

1. **Цытович, Н.А.** Механика грунтов Московский ун-т им. М.В. Ломоносова / Н.А. Цытович. – Москва, 1961. – 304 с.
2. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. **Smith, W.C.** Modeling of Wheel-Soil Interaction for Small Ground Vehicles Operating on Granular Soil / W.C. Smith // A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The University of Michigan, 2014. p. 148.
4. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность»): учебник под ред. В.В. Белякова, А.А. Куркина; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. – 447 с.
5. **Вольская, Н.С.** Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации: дис. ...д-ра техн. наук 05.05.03 / Н.С. Вольская. – М., 2008. – 370 с.
6. **Беляков, В.В.** Подвижные комплексы мониторинга прибрежной зоны: монография / В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Д.В. Зезюлин и др.; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2017. 326 с.
7. **Макаров, В.С.** Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон: дис. ...д-ра техн. наук 05.05.03 / В.С. Макаров. – М., 2017. С. 311.
8. **Тисленко, Д.С.** Метод выбора рациональной формы погруженных в снег элементов колесной машины с целью снижения сопротивления движению / Д.С. Тисленко, В.Ф. Лянг, В.В. Беляков, В.С. Макаров, С.С. Дралкин, Д.А. Мартынов, К.И. Зайцев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. №3. С. 162.
9. **Wong, J.** Prediction of Rigid Wheel Performance Based on the Analysis of Soil-Wheel Stresses, Part I and Part II. / J. Wong, A. Reece // Journal of Terramechanics, 1967, vol. 4(1): pp. 81-98, vol. 4(2): pp. 7-25.
10. **Жилейкин, М.М.** Экспериментальное определение характеристик деформируемого опорного основания в полевых условиях / М.М. Жилейкин, А.Ю. Захаров, М.В. Паньшин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2019. №1. С. 175-186.
11. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колёсных машин: учебник / В.В. Ларин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 391.
12. **Volskaya, N.S.** Mathematical model of rolling an elastic wheel over deformable support base / N.S. Volskaya, M.M. Zhileykin and A.Y. Zakharov // IASF-2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 315 (2018) 012028 doi: 10.1088/1757-899X/315/1/012028.
13. **Барахтанов, Л.В.** Моделирование взаимодействия колесной машины с грунтом / Л.В. Барахтанов, В.И. Котляренко, С.Е. Манянин, И.А. Соколов // Журнал автомобильных инженеров № 2(67), 2011. С. 26-28.
14. **Алипов, А.А.** Распределений давлений в контакте шины с дорогой / А.А. Алипов, В.В. Беляков, А.Н. Блохин, Д.В. Зезюлин // Вестник ИжГТУ, 2011, №1(49), с. 15-18.
15. **Ojeda, L.** Terrain Trafficability Characterization with a Mobile Robot / L. Ojeda, J. Borenstein, G. Witus // Proc. of the SPIE Defense and Security Conference, Unmanned Ground Vehicle Technology VII, Orlando, FL, March 28th to April 1st, 2005.
16. **Вольская, Н.С.** Элементы методики прогнозирования эффективности движения колеса с помощью имитационного моделирования его внешней механики / Н.С. Вольская, И.В. Басманов, Я.Ю. Левенков, Г.Ю. Ястребов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №4. С.
17. **Вольский, С.Г.** Исследование развития конструкций, сопротивления и сцепления колесного движителя автомобилей высокой проходимости: дис. ...канд. техн. наук 05.05.03 / С.Г. Вольский. – М., 1971. – 165 с.
18. **Яблонский, А.А.** Курс теоретической механики. Часть II / А.А. Яблонский. – М.: Динамика изд. «Высшая школа», 1964. – 375 с.

**Дата поступления
в редакцию: 28.12.2021**