

УДК 656.1

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_81

ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСА С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО ВНЕШНЕЙ МЕХАНИКИ

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**Я.Ю. Левенков**

ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ru

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Россия**Г.Ю. Ястребов**

ORCID: 0000-0001-8300-8371 e-mail: g.yastreboff@yandex.ru

Рубцовский индустриальный институт (филиал)
Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова
Рубцовск, Россия

Представлен оригинальный подход к решению задачи прогнозирования состояния грунтового пространства «в» и «под» пятном контакта колеса с опорной поверхностью во время его прямолинейного движения. Цель исследований – визуализация процесса потери несущей способности грунта под действием катящегося автомобильного колеса. Рассмотрен случай качения колеса по деформируемому несвязанному грунту типа песок. Колесо нагружено вертикальной осевой нагрузкой и крутящим моментом. Грунт имитируется DEM элементами. Описаны этапы решения поставленной задачи, базирующиеся на методе конечных элементов и проведенных грунтовых испытаниях с помощью штампов. Параметры штампов соответствуют реальным размерам пятна контакта шин с грунтом. По результатам штамповых испытаний определены физико-механические характеристики грунта в соответствии с теорией механики грунтов.

Выявлена возможность визуализации процесса формирования динамической картины изменения несущей способности грунта под колесным движителем, что позволяет прогнозировать результаты взаимодействия шины колеса с грунтом и оптимизировать параметры колесного движителя еще на стадии его проектирования.

Ключевые слова: прогнозирование, штамповые испытания, физико-механические параметры грунта, внешняя механика колеса, моделирование.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. 81-89.

DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_81

ELEMENTS OF THE METHODOLOGY FOR PREDICTING THE EFFECTIVENESS OF WHEEL MOVEMENT USING SIMULATION OF ITS EXTERNAL MECHANICS

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

Y.Y. Levenkov

ORCID: 0000-0001-6556-3232 e-mail: levenkov_yy@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

G.Y. Yastrebov

ORCID:0000-0001-8300-8371 e-mail: g.yastreboff@yandex.ru

Rubtsovsk Industrial Institute (branch)
Altai State Technical University named after I.I. Polzunova
Рубцовск, Россия

Abstract. In this paper we present an original approach to solving the problem of predicting the state of the ground half-space «in» and «under» the contact spot of the wheel, with the support surface during its rectilinear motion. The purpose of the research is to visualize the process of loss of bearing capacity of the soil under the action of a rolling automobile wheel. The case of rolling a wheel on deformable unbound soil of the sand type is considered. The wheel is loaded with vertical axial load and torque. The soil is imitated by DEM elements. The stages of solving the problem are described, based on the finite element method and conducted ground tests using stamps. Parameters of the stamps correspond to the actual dimensions of the tire contact spot with the ground. According to the results of stamp tests, the physical and mechanical characteristics of the soil were determined in accordance with the theory of soil mechanics.

The possibility of visualizing the process of forming a dynamic picture of changes in the bearing capacity of the soil under the wheel propeller has been revealed, which makes it possible to predict the results of the interaction of the wheel tire with the ground and optimize the parameters of the wheel propeller at the stage of its design.

Key words: forecasting, stamp tests, physical and mechanical parameters of the soil, external mechanics of the wheel, modelling.

FOR CITATION: Volskaya N.S. Basmanov I.V. Levenkov Y.Y. Yastrebov G.Y. Elements of the methodology for predicting the effectiveness of wheel movement using simulation of its external mechanics. Transaction of NNSTU n.a. R.E. Alekseeva. 2021. № 4. Pp. 81-89. DOI: 10.46960/1816-210X_2021_4_81

Введение

Прогнозирование и оценка опорно-цепных свойств колесных машин (КМ) развиваются с момента создания первых автомобилей. Одной из сложнейших теоретических проблем этого направления исследований эксплуатационных свойств КМ остается практическое решение контактной задачи «шина-грунт». Сложность ее решения, в первую очередь, определяется изменением физико-механических свойств в широких интервалах численных значений и самим многообразием типа и неоднородности, по которому осуществляется движение в течение жизненного цикла внедорожного транспортного средства (ТС). По различным

вопросам этой научной темы и связанным с ней задачам проведено огромное количество исследований [1-18]. Известны этапы и научный инструментарий, позволяющий продвигать качество и точность ее решения. Новым инструментом, позволяющим исследователям непосредственно внедриться в решение проблемы внешней механики колеса, являются программные пакеты с расширенными возможностями DEM элементов. В качестве примера такого исследования можно привести диссертацию W.C. Smith [2].

Теория и практические возможности контактной задачи «шина-грунт»

Контактная задача «шина-грунт» осложнена неясными вопросами двух взаимодействующих механических систем. С одной стороны, это, как правило, пневматическая шина. Она находится в напряженно-деформированном состоянии от действующих на нее внешних сил и подводимого момента. С другой стороны – деформируемое опорное основание, часто с крайне неоднородным составом и, соответственно, неоднородными физико-механическими свойствами и видом грунта (в том числе, снега). Рассмотрение взаимодействия этих двух систем крайне сложно. Чаще всего исследователи проводят эксперименты на грунте по своим методикам с разной постановкой целей и сопутствующих им задач.

Основной причиной разных подходов и разработки разных математических моделей, с помощью которых исследователи пытаются разрешить проблему прогнозирования и конкретной оценки взаимодействия и взаимовлияния шины на грунт и наоборот, грунта на шину, на наш взгляд, является упрощенный подход автомобилиста-исследователя к учету напряженно-деформированного состояния конкретного грунта под каждым из колес КМ. Возможно, если за основу взять все разработанные положения теории механики грунтов и в качестве основы всех экспериментов и теоретического обоснования принять именно ее измерители, решение задач, стоящих перед исследователями-автомобилистами, значительно продвинулось бы вперед. В [3] подробно рассмотрены этапы эволюции подходов к решению основных задач опорно-тяговой проходимости:

- прогнозирование потерь на сопротивление качению колесного движителя;
- оптимизацию распределения крутящих моментов по колесам движителя КМ с учетом реальных возможностей по коэффициенту сцепления.

До недавнего времени казалось, что единственно возможным является применение расчетного метода, основанного на МКЭ. Так Я.Ю. Левенковым [4, 5] была решена задача моделирования взаимодействия пневматической шины (реализована возможность регулирования давления воздуха в шине) с твердым неровным основанием. В наших работах было положено начало исследованием процессов взаимодействия непосредственно в пятне контакта механической системы «шина-грунт» (рассмотрение внешней механики колеса). В последующих исследованиях [5] была рассмотрена задача по определению формы пятна контакта системы «шина-грунт», ее геометрические параметры (определены взаимные деформации шины и грунта), соответственно, глубина колеи при прогнозировании эффективности движения транспортного средства (ТС).

Задача была решена В.А. Курдюком [6], также был применен программный комплекс ANSYS/LS-Dyna. Приведем пример результатов ее решения в графическом виде. Для связанных и несвязанных типов грунта были предложены различные способы построения аппроксимирующей сетки конечных элементов. В общем случае грунт представлен набором упруго-вязко-пластичных тел, соединенных между собой одноосными элементами (рис. 1). Между телами установлен зазор, на 2-3 порядка меньший характерных размеров этих тел, а на их сопряженных поверхностях заданы условия контактного взаимодействия с трением. На рис. 2 и 3 приведены графические результаты расчетов.

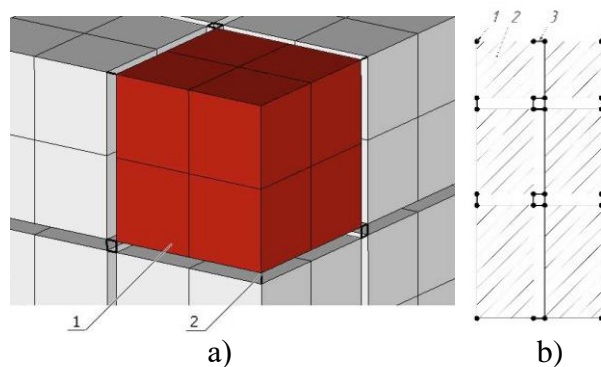


Рис. 1. Имитация грунта с помощью метода КЭ:

a) сетка КЭ (1 – элементарное тело грунта; 2 – одноосный элемент связности); b) схема построения сетки конечных элементов (1 – узлы сетки, 2 – единичные тела, 3 – одноосные элементы связности)

Fig. 1. Soil simulation using the CE method:

a) CE grid (1 – an elementary body of soil; 2 – a uniaxial element of connectivity);
b) a scheme for constructing a grid of finite elements
(1 – grid nodes, 2 – single bodies, 3 – uniaxial elements of connectivity)

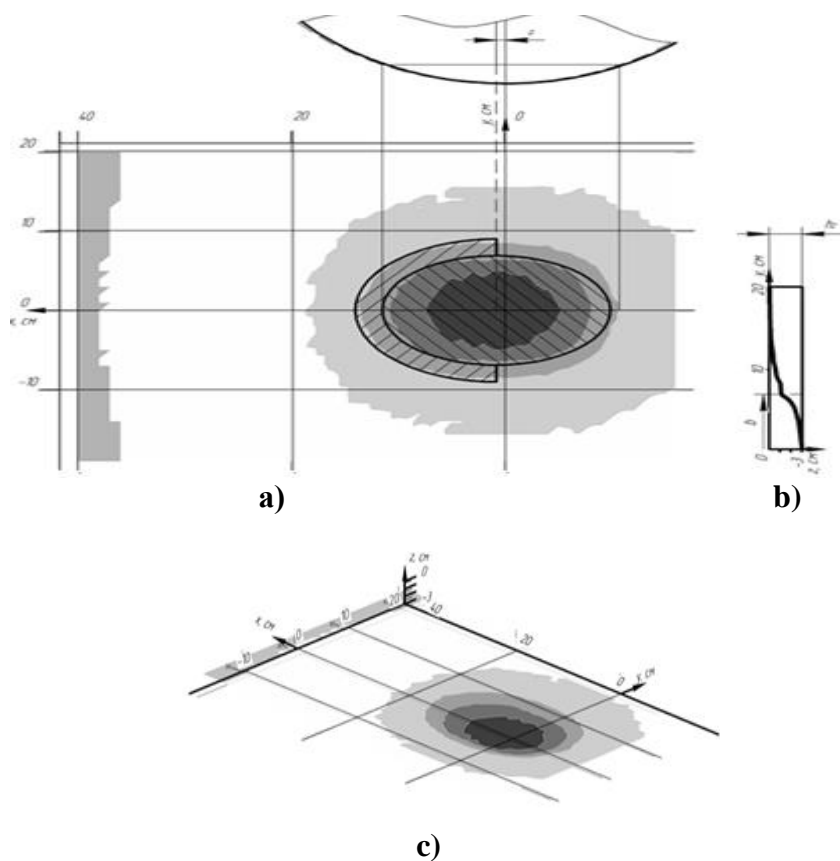


Рис. 2. Расчетная геометрия пятна контакта шины с грунтом типа «песок»:

a) проекция пятна контакта на горизонтальную плоскость; b) график профиля колеи в сечении вертикальной плоскостью, проходящей через ось колеса; c) объемная картина пятна контакта

Fig. 2. The calculated geometry of the tire contact spot with the «sand» type soil:

a) projection of the contact patch onto the horizontal plane; b) a graph of the track profile in section by a vertical plane passing through the wheel axis; c) three-dimensional picture of the contact spot

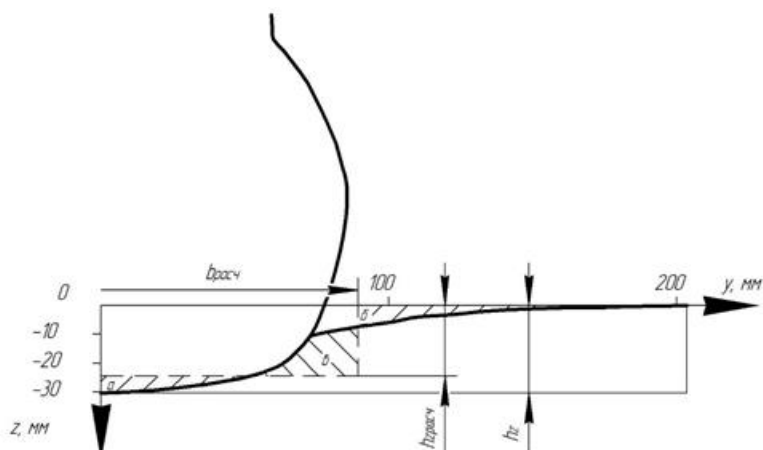


Рис. 3. Геометрия формы пятна контакта в поперечной плоскости

Fig. 3. Geometry of the contact spot shape in the transverse plane

Валидация расчетов с ранее проведенным грунтовым экспериментом имеет 95 % [6]. Особо отметим следующие положительные основные моменты результатов этого исследования и его недостатки:

- решение задачи проведено на базе физико-механических характеристик механики грунтов (E – модуль деформации, φ_0 – угол внутреннего трения, c_0 – коэффициент внутреннего сцепления);
- решение проводилось как контактная задача «шина-грунт», т.е. учитывались нелинейные характеристики по упругим и демпфирующим свойствам как шины, так и грунта;
- задача решена в статической постановке, на ее решение было затрачено несколько суток.

На рис. 4 представлен заключительный результат контактной задачи «шина-грунт».

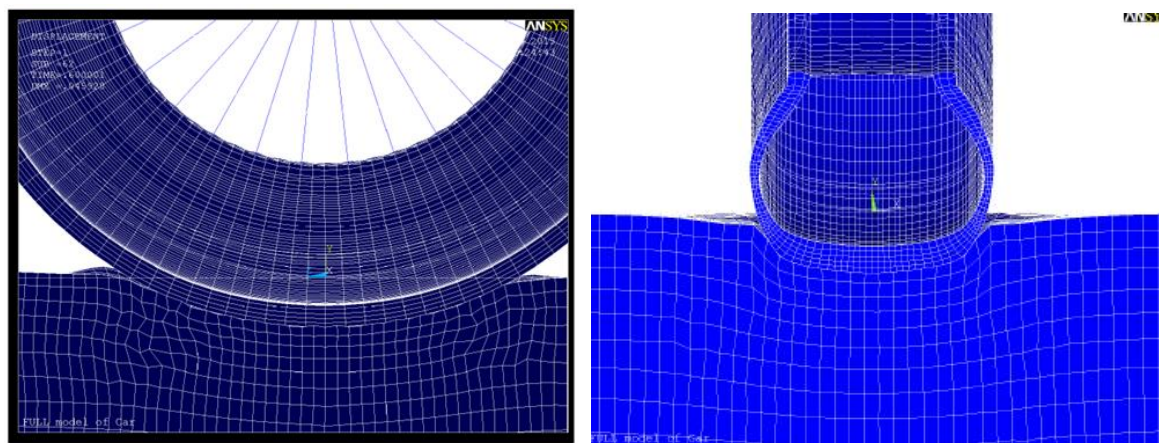


Рис. 4. Определение формы колеи

Fig. 4. Determining the shape of the track

Решение рассмотренной задачи базировалось на основе глубоких экспериментальных исследований Г.Ю. Ястребова [7] по оценке несущей способности связанного и несвязанного грунтов под колесом ТС. Несущая способность грунта определялась по результатам штамповых испытаний. Валидация результатов проведена при параллельном испытании колесных ТС в тех же грунтовых условиях, что и штамповые испытания.

На рис. 5 представлены результаты эксперимента по оценке несущей способности грунта типа «песок». По разработанной методике [7, 8] определены конкретные числовые значения независимых параметров грунта – E , φ_0 , c_0 , которые в последствии были использованы при решении задачи в программном комплексе ANSYS/LS-Dyna и при симуляции процесса с помощью DEM элементов.

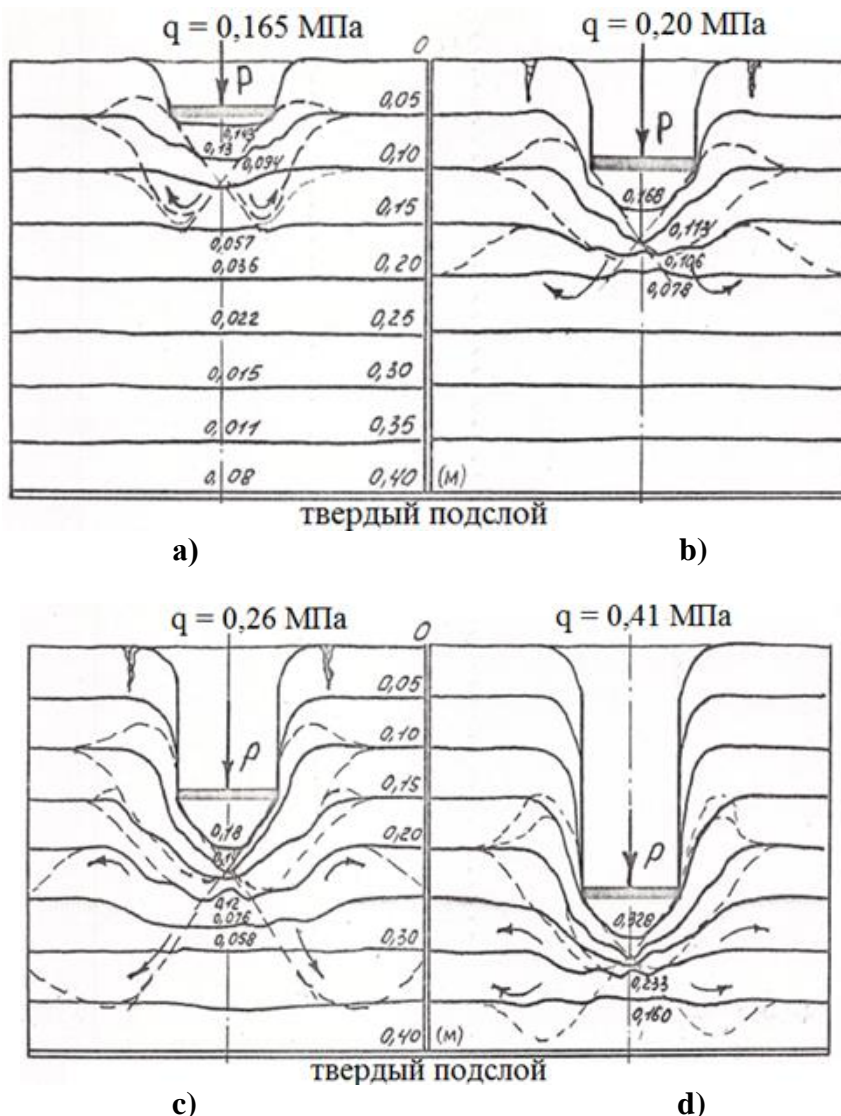


Рис. 5. Деформация песчаного грунта при вертикальной пенетрации
(площадь штампа 100 cm^2 , глубина погружения штампа: а) 0,05 м; б) 0,1 м; в) 0,15 м; г) 0,25 м)

Fig. 5. Deformation of sandy soil during vertical penetration
(stamp area 100 cm^2 , stamp immersion depth: a) 0.05 m; b) 0.1 m; c) 0.15 m; d) 0.25 m)

Современные расчетные пакеты на базе DEM элементов позволяют не только уйти от необходимости конструирования математических моделей контактной задачи, но и визуализировать процесс взаимодействия этих двух механических систем (шина, полупространство грунт). Сейчас та же задача была решена в динамической постановке. На рис. 6 представлена кинограмма основных характерных этапов взаимодействия активного колеса с грунтом типа «песок» (колесо движется в режиме воздействия на него вертикальной осевой нагрузки и крутящего момента).

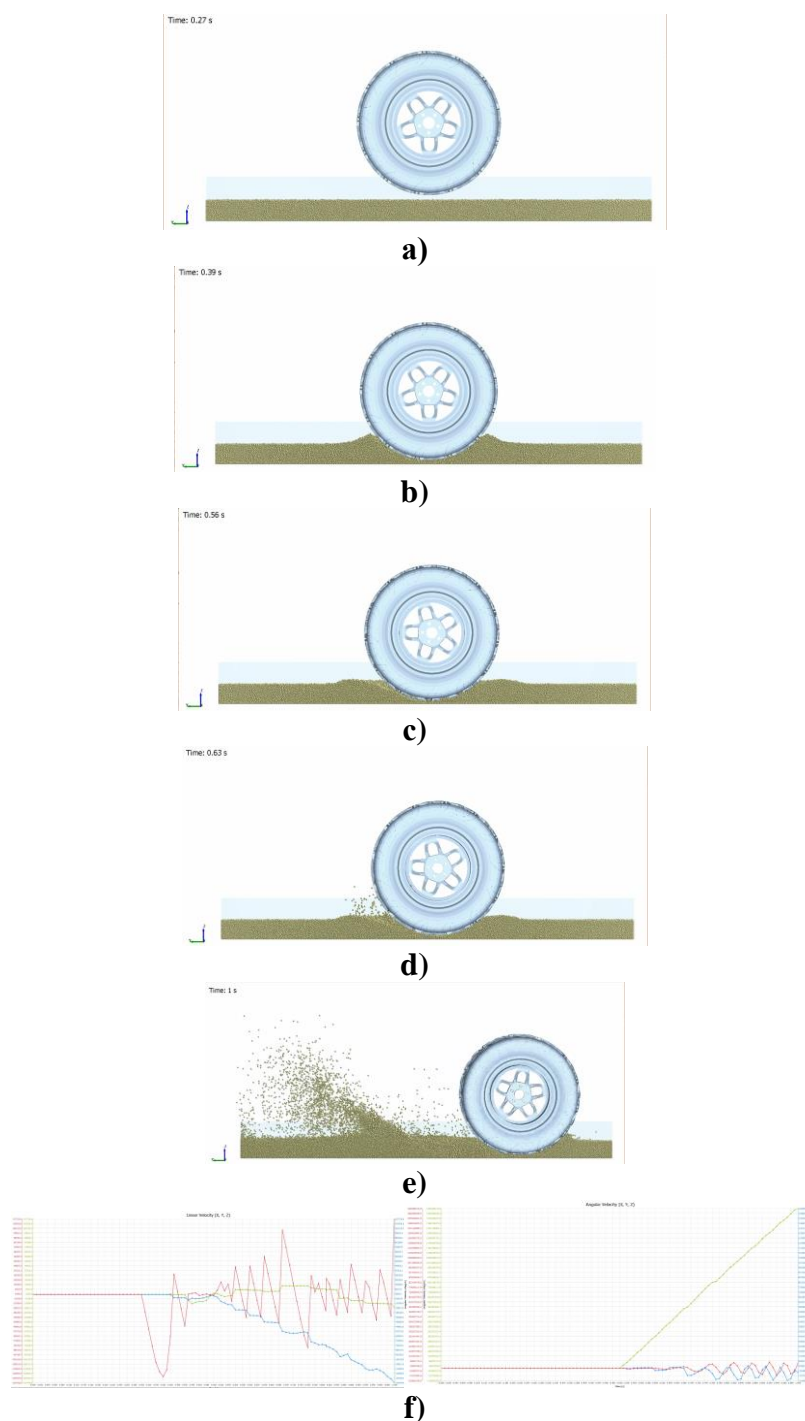


Рис. 6. Симуляция движения колеса по песчаному грунту:

- a) статическое взаимодействие колеса с грунтом под действием вертикальной силы на ось;
- b) к колесу подведен крутящий момент и действует вертикальная сила на ось;
- c) колесо катится под действием постоянного крутящего момента; d,e) качение колеса в момент превышения несущей способности грунта на уровне пятна контакта колеса с грунтом;
- f) графики изменения линейной и угловой скорости колеса по осям координат

Fig. 6. Simulation of wheel movement on sandy ground:

- a) static interaction of the wheel with the ground under the action of a vertical force on the axle;
- b) a torque is supplied to the wheel and a vertical force acts on the axle; c) the wheel rolls under the influence of constant torque; d,e) wheel rolling at the moment of exceeding the soil bearing capacity at the level of the wheel-to-ground contact patch; f) graphs of changes in the linear and angular velocity of the wheel along the coordinate axes

Выводы

1. Решение контактной задачи «шина-грунт» с привлечением возможностей DEM элементов позволяет визуализировать процесс взаимодействия двух сложных механических систем и перевести само решение в разряд динамического взаимодействия.

2. Разрабатываемый метод может позволить решать проблему оценки эффективности работы и перемещения движителей ТС без создания частных математических моделей «вертикальная нагрузка на колесо – глубина колеи», «сдвиг-реализация максимального сцепления шины с грунтом».

3. В основу разрабатываемого метода заложено исследование возможности имитационного моделирования внешней механики колеса с использованием изученных, полученных в экспериментальных исследованиях измерителей механики грунтов E, φ_0, c_0 .

Библиографический список

1. **Агейкин, Я.С.** Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. С. 232.
2. **Smith, W.C.** Modeling of Wheel-Soil Interaction for Small Ground Vehicles Operating on Granular Soil / A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in The University of Michigan, 2014. p. 148.
3. 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.
4. **Левенков, Я.Ю.** Сглаживающая способность пневматической шины при статическом и динамическом взаимодействии автомобильного колеса с твердой неровной опорной поверхностью: дис. ...канд. техн. наук 01.02.06, 05.05.03 / Я.Ю. Левенков. – М., 2013. – 131 с.
5. **Левенков, Я.Ю.** Сглаживающая способность пневматической шины автомобильного колеса при взаимодействии с твердой неровной поверхностью / Я.Ю. Левенков, Н.С. Вольская // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. №1. С. 20-26.
6. **Курдюк, В.А.** Расчетный метод моделирования деформационных свойств грунтов в задачах прогнозирования взаимодействия колесного движителя с опорной поверхностью / В.А. Курдюк, Н.С. Вольская, О.А. Русанов //Тракторы и сельхозмашины. 2015. №2. С. 12-16.
7. **Ястребов, Г.Ю.** Оценка тяговых возможностей колесных машин на грунтах с низкой несущей способностью: дис. ...канд. техн. наук 05.05.03 / Г.Ю. Ястребов. – М,1990. С.134.
8. **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.
9. **Беляков, В.В.** Подвижные комплексы мониторинга прибрежной зоны: монография / Вахидов У.Ш., Зезюлин Д.В. и др.; Нижегород гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2017. – 326 с.
10. **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.
11. **Тесленко, Д.С.** Метод выбора рациональной формы погруженных в снег элементов колесной машины с целью снижения сопротивления движению / Д.С. Тесленко, 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.
12. **Шухман, С.Б.** Метод оценки и расчета разрушающего воздействия полноприводных автомобилей на почвогрунты: учебное пособие / С.Б. Шухман, А.С. Переладов, С.Н. Коркин – М.: Агробизнес-центр, 2010. – С. 260.
13. **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.
14. **Ларин, В.В.** Теория движения полноприводных колёсных машин: учебник / В.В. Ларин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 391.

15. **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.
16. **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.
17. **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.
18. **Shoop, S.A.** Overview of cold regions mobility modeling at CRREL / S.A. Shoop, P.W. Richmond, J. Lacombe // Journal of Terramechanics, Vol. 43, Issue 1, 2006. – P. 1-26.

*Дата поступления
в редакцию: 31.08.2021*