

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

Д.С. Тесленко, В.В. Беляков, В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕРРАМЕХАНИКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Выполнить обзор использования метода конечных элементов для решения задач взаимодействия машины и местности (террамеханики).

Методология: Обзор и анализ информационных источников.

Результаты и область их применения: В данной статье рассмотрены методы моделирования взаимодействия колеса и грунта при помощи метода конечных элементов, приведён краткий обзор работ по данной теме. Настоящее исследование является отправной точкой для дальнейшего исследования террамеханики снега.

Выводы: Метод конечных элементов с успехом применяется в террамеханике. Для его использования с целью моделирования движения машины по снегу необходимо создать математические модели, адекватно описывающие механические характеристики снега. Полученные результаты можно будет использовать для проектирования более эффективных транспортных средств.

Ключевые слова: снег; взаимодействие колеса и грунта; модель грунта; метод конечных элементов.

Несмотря на постоянное улучшение качества дорожного покрытия и расширение дорожной сети, в настоящее время проблематика движения транспортных средств по бездорожью остаётся по-прежнему актуальной. Прежде всего это касается военной техники, автономных автоматических аппаратов для исследования других планет, а также сельскохозяйственных машин и вездеходов для освоения труднодоступных областей. С расширением географии добычи полезных ископаемых, в частности, нефти и газа в Сибири, последнее применение видится особенно важным для России. Именно поэтому в нашей стране проектированию машин высокой проходимости всегда уделялось значительное внимание.

Одна из локальных задач повышения проходимости транспортно-технологических машин – оптимизация взаимодействия движителя и корпуса машины с грунтом. Решением этой задачи занимается террамеханика (в отечественных публикациях вместо термина «террамеханическая система» используется «система машина-местность») [1]. Эта достаточно молодая прикладная наука развивается с начала XX века. В 1962 году на первой международной конференции по механике грунтов в Турине было основано Международное сообщество систем International Society for Terrain-Vehicle Systems (ISTVS) – зарегистрированная в Северной Каролине, США образовательная, некоммерческая, неполитическая организация, которая ставит своей целью улучшение и распространение знаний о механике вездеходных транспортных средств и машин. С 1964 года ISTVS начинает издавать ежегодник «Journal of Terramechanics», выходящий обычно в нескольких частях.

За более чем полвека своего развития террамеханика достаточно быстро развивалась, совершенствуя свой математический аппарат и методы описания грунта. В настоящий момент господствуют два основных метода описания грунта – нелинейно-упругий и упруго-пластический [2]. Первый основывается на нелинейных зависимостях между напряжениями и деформациями. При этом напряжения и деформации принимаются единичными во всех точках

грунтового массива как при нагружении, так и разгрузке. При этом пластические деформации учитываются в сумме с упругими путем применения эмпирических зависимостей «напряжение - полная (упругая + пластическая) деформация». К уравнениям физически нелинейной теории упругости классические методы интегрирования, развитые в линейной теории упругости, неприменимы. При решении задач физически нелинейной теории упругости прибегают к методу последовательных приближений (итераций). Решение нелинейной задачи при этом сводится к решению последовательности линейных задач, каждая из которых является некоторой отдельной задачей линейной теории упругости. Этот способ получил название метода упругих решений. В целом нелинейно-упругие решения (решения в рамках деформационной теории пластичности) позволяют получить достаточно достоверные по сравнению с линейными решениями результаты. Однако эти решения не позволяют учесть в расчетах траекторию нагружения, появление несоосности тензоров напряжений и деформаций и нарушение подобия напряженного и деформированного состояний, характерных для сложных траекторий нагружения грунтов. Таким образом, применение нелинейно-упругих решений к грунтовым массивам ограничивается случаями простых или близких к ним траекторий нагружения, как это делается в работах [3–7].

Альтернативный (упругопластический) подход к решению задач механики грунтов основывается на раздельном описании упругих и пластических деформаций различными физическими зависимостями. В этом подходе можно выделить различные варианты упругопластических решений. Однако в основе большинства из них лежит использование теории пластического течения. В соответствии с представлениями теории пластического течения для упругопластических решений механики грунтов характерно использование дифференциальных зависимостей между напряжениями и деформациями (пластическими и полными) и процедуры последовательного (шагового) нагружения грунтовых массивов согласно очередности приложения и изменения внешних нагрузок, каждая из которых представляется определенным числом ступеней (шагов).

Модель упруго-идеальнопластической среды использовалась при решении различных задач механики грунтов и, в частности, нашла эффективное применение при решении смешанной задачи теорий упругости и пластичности грунтов. Решение смешанной задачи [2, 3] должно удовлетворять в областях допредельного (упругого) и предельного напряженных состояний грунта одним и тем же уравнениям равновесия, геометрическим соотношениям, но различным в этих областях физическим уравнениям и условию предельного равновесия в пластической области. При этом в процессе решения должна быть найдена упругопластическая граница, разделяющая области упругого и предельного равновесия. В такой постановке смешанная задача может быть решена только численно при помощи компьютера с использованием процедуры шагового нагружения. Весьма удобным при этом является метод конечных элементов (МКЭ). При применении МКЭ можно легко проследить за развитием пластической области по конечным элементам, грунт которых перешел в предельное состояние.

Одной из первых работ, использовавших МКЭ для решения задачи взаимодействия колеса с почвой, была [8]. В данной работе исследовалось смещение частиц почвы под давлением абсолютно жесткого колеса. Постановка задачи предполагала плоское решение задачи, при этом глубина погружения колеса в грунт не превышала 0,2 диаметра колеса. В работе использовался нелинейно-упругая модель среды. Грунт представлялся как массив треугольных элементов (рис. 1).

Использование МКЭ в данной работе показало достаточно высокую точность при моделировании движения по грунту без проскальзывания. Благодаря методу были получены картины деформирования грунта колесом, а также траектории движения частиц грунта, достаточно точно совпадающие с результатами эксперимента. В более поздних работах, таких, как [9], исследовались более сложные случаи, такие как объёмная постановка задачи с близким к реальному профилю колеса, учётом давления воздуха в шине, учётом проскальзывания. Это позволило получить более адекватную картину распределения удельных нагрузок в грунте (рис. 2).

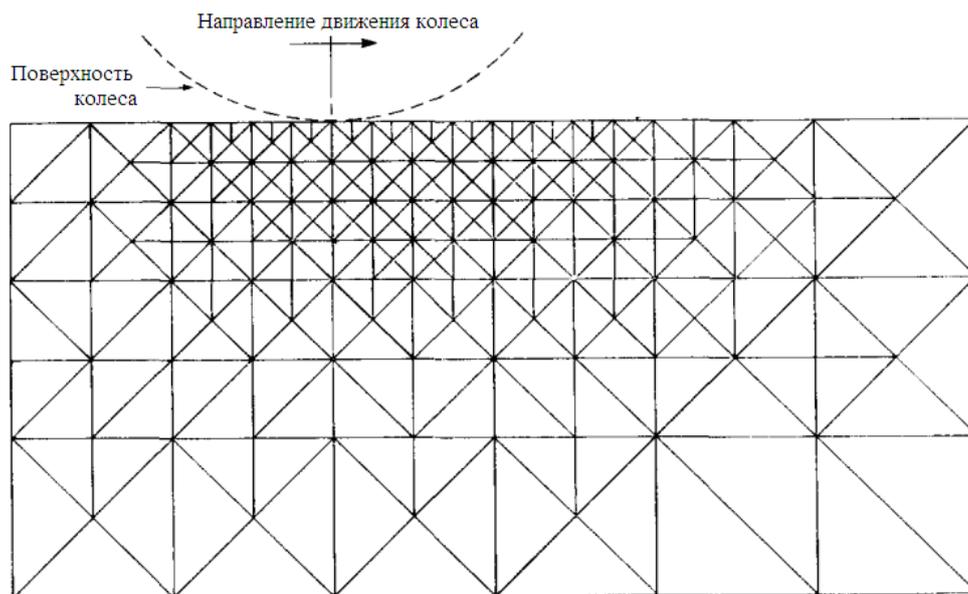


Рис. 1. Разбиение грунта на конечные элементы [8]

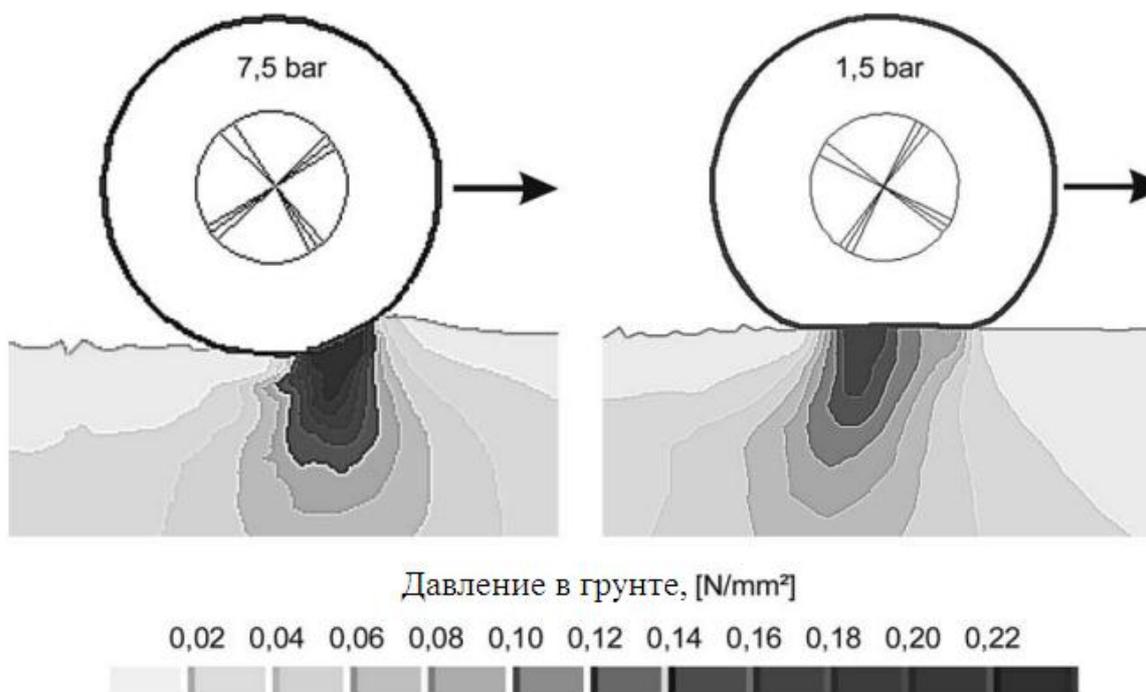


Рис. 2 Картина распределения давления в грунте в зависимости от различного давления в шине при качении по песку [9]

При качении колеса по криволинейной траектории, а также для шин с развитыми боковыми грунтозацепами будет наблюдаться также экскавационно-бульдозерный эффект, подробно рассмотренный в [3, 5, 6]. В работе [10] рассматривается методика моделирования данного эффекта с целью улучшения экологических показателей транспорта и уменьшения вредного влияния движителя на грунт, предотвращения разрушения его верхнего слоя. Для моделирования используется многоцелевой конечно-элементный комплекс для инженерного анализа ABAQUS. Грунт в этом случае моделируется на основе пластического материала с подстройкой параметров под реальные механические свойства грунта. При этом для грунтов без внутреннего трения результаты получаются весьма достоверными, для фрикционных же грунтов результаты несколько отличаются от экспериментальных. Проблема решалась до-

бавлением пластической несжимаемости материала. Объёмная картина образования колеи весьма точно соответствовала реальной (рис. 3).

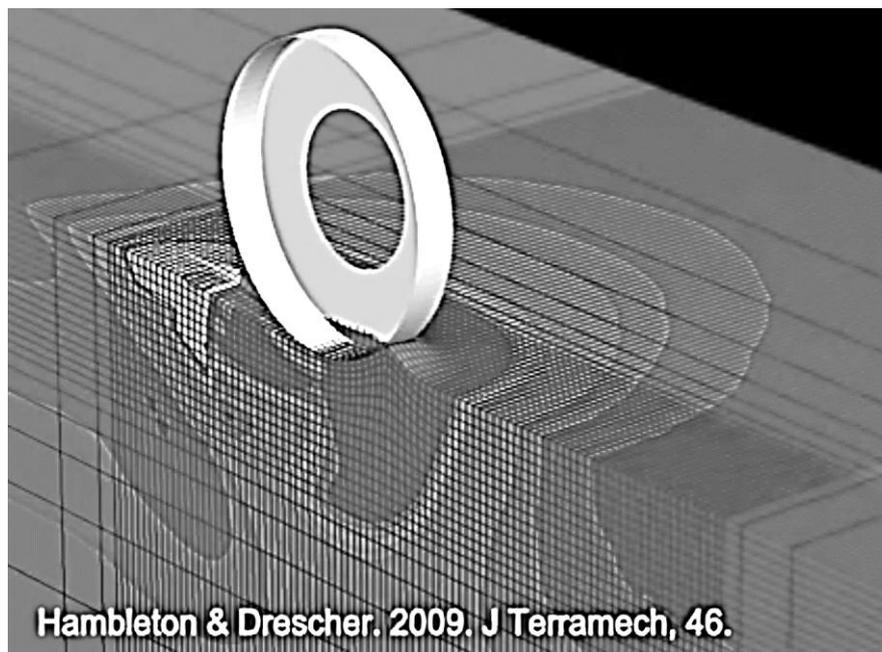


Рис. 3. Распределение напряжений в грунте во время качения колеса и образование колеи [10]



Рис. 4. Взаимодействие шины с деформируемым грунтом [11]

Современной тенденцией в области исследования движения колеса по грунту является предсказание поведения протектора шины на грунте. К примеру, в работе [11] исследуется деформация грунта под действием давления шины, представленной как система демпферов. Грунт представлен в виде модели Бузинеса-Церрути (Boussinesq-Cerruti) с определением распределения давления как функции от вертикальных и боковых сил по поверхности грунта. Модель представляет грунт в виде системы дискретных объёмов («колонн»). Деформация

каждого из этих объёмов моделируется при помощи вязко-эластичных соотношений. Это позволяет соотнести давления в грунте с изменениями в объёмной плотности грунта, что, в свою очередь, позволяет показать смещение грунта. Благодаря этой индивидуальной «подстройке» «колонн» и учёту формы и деформации шины появляется возможность достаточно достоверно учитывать боковые силы, возникающие из-за скольжения и экскавационного эффекта, что было невозможно на старых моделях, таких, как модель Беккера. В отличие от большинства эмпирических террамеханических моделей, данная модель отличается высокой адекватностью (рис. 4).

В нижегородской научной школе вездеходных машин подробно исследуется процесс взаимодействия колеса со снегом. В этой области также с успехом применяется метод конечных элементов. Так, в работе [12] анализируются различные модели снега, применяемые в расчётах сопротивления качению колеса. Вязкоэластичная модель грунта, с одноосным напряжением рассматривается в данной работе как недостаточно достоверная по причине того, что в ней не учитывается объёмное напряжённое состояние материала. В качестве модели грунта для описания снега в работе анализируются «модифицированная модель Cam Clay» и модель эластичности Друкера-Прегера.

Первая из них достаточно точно описывает траектории первичного нагружения грунта, но неприменима для разгрузки. В случае снега этот недостаток не критичен. Модель характеризуется поверхностью текучести эллипсоидной формы, изотропным механизмом упрочнения и нелинейным законом упругости. В отличие от простой формулировки этой модели, её алгоритмическая реализация более сложна и учитывает взаимовлияние модулей упругости и упрочнения, и неассоциативную форму закона упрочнения. Вторая модель характеризуется сглаженной версией поверхности текучести Мора — Кулона. Она используется для моделирования грунтов, а также пеноматериалов. В работе рассматриваются [12] также методы уточнения моделей для более точного моделирования деформирования снега колесом.

Таким образом, метод конечных элементов сегодня успешно используется для решения задач террамеханики. Возможно использовать его и для моделирования движения транспортные средств по снегу, а также решения задачи взаимодействия движителя транспортного средства, его корпуса и материала полотна пути.

В качестве начальной задачи в настоящей работе было рассмотрено прямолинейное равномерное движение прямоугольного абсолютно твёрдого объекта в материале, имитирующем снег. Для моделирования использовался программный пакет конечно-элементного анализа LS-DYNA. В пакете присутствует несколько материалов [13], предназначенных для моделирования грунта, но отсутствует материал, имеющий свойства снега. Поэтому на первом этапе был выбран наиболее близкий по свойствам универсальный разрушаемый пеноматериал, настраиваемые механические характеристики которого были приближены к снегу. В ходе моделирования были получены картины деформации (рис. 5) и распределения напряжений (рис. 6) в материале. Деформация материала в первом приближении выглядит адекватно, но не отражает реальных механических свойств снежного покрова, следовательно, данный материал в своём первоначальном виде не может применяться для моделирования движения транспортных средств по снегу.

Для решения этой проблемы на следующем этапе необходимо выбрать математическую модель материала, более точно соответствующую снежному покрову, изменить её настройки для приведения в соответствие с механическими характеристиками снега. На последующих этапах исследования планируется экспериментальная отработка для сравнения результатов, полученных с помощью математической модели, с реальными данными. В ходе данных экспериментов будет исследоваться движение по снегу реальных объектов простой формы и затем – их математических моделей. Такой подход позволит, получив достаточно достоверную модель снега, использовать её в дальнейшем для расчёта сил сопротивления

движению автотранспортных средств методом моделирования при помощи конечно-элементного анализа.

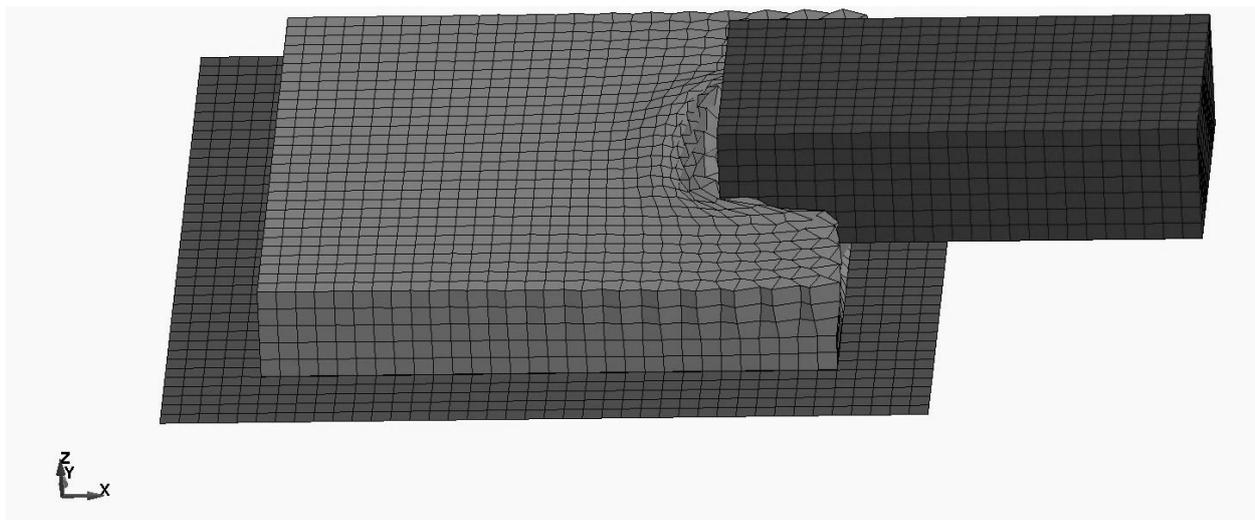


Рис. 5. Деформация имитатора снега твёрдым объектом

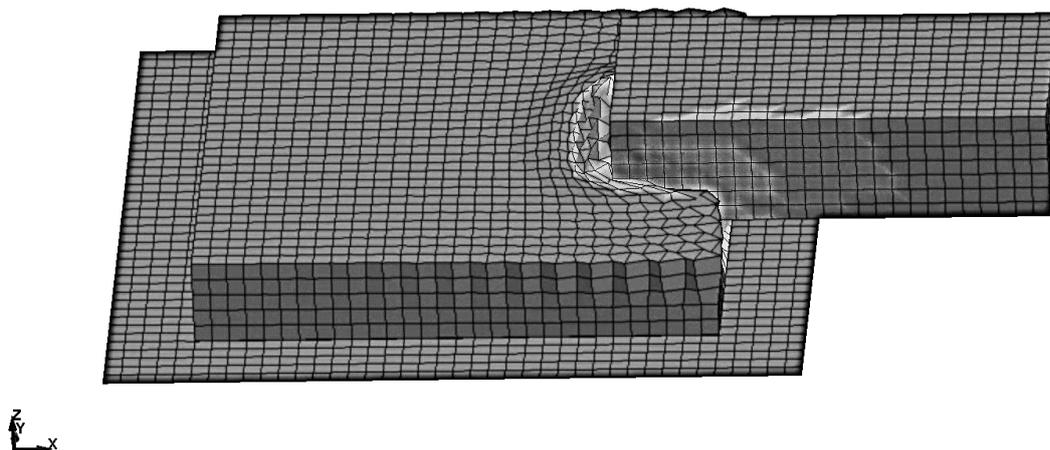


Рис. 6. Напряжения в имитаторе снега и твёрдом объекте

Следующим этапом исследований должно стать моделирование с использованием полученной модели снега взаимодействия колёсного движителя, корпуса и снежного покрова. Это позволит рассматривать образование колеи как процесс обтекания корпуса и движителя материалом дорожного полотна и проводить расчёты «динамики грунта» по аналогии аэродинамикой автотранспортных средств.

Моделирование движения колёсных машин по снегу с использованием метода конечных элементов позволит сократить затраты на проектирование корпусов транспортно-технологических машин, особенно работающих в условиях бездорожья и снежного покрова благодаря замене значительной части натуральных испытаний компьютерной симуляцией.

Библиографический список

1. **Котович, С.В.** Движители специальных транспортных средств. Часть I: учеб. пособие / С.В. Котович; МАДИ (ГТУ). – М., 2008. – 161 с.
2. **Султанов, Т. З.** Оценка динамического поведения неоднородных систем с учётом нелинейно-вязкоупругих свойств грунта / Т. З. Султанов, Д. А. Ходжаев, М. М. Мирсаидов // Инженерно-строительный журнал. 2014. №1. С. 80–118.

3. **Беляков, В.В.** Методика расчета и анализ путей повышения проходимости многоосных колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 1992. – 130 с.
4. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ... докт.тех.наук: 05.05.03. – Н. Новгород 1999. – 485 с.
5. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
6. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2010. – 259 с.
7. **Зезюлин, Д. В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2010. – 218 с.
8. **Yong, R. N.** Prediction of wheel-soil interaction and performance using the finite element method / R. N. Yong, E. A. Fattah // Journal of Terramechanics. 1976. V. 13 №4. P. 227–240.
9. **Fervers, C.W.** Improved FEM simulation model for tire–soil interaction / C.W. Fervers // Journal of Terramechanics. 2004. № 41 P. 87–100.
10. Hambleton, J.P. Modeling wheel-induced rutting in soils: Rolling / J.P. Hambleton, A. Drescher // Journal of Terramechanics. 2009. № 46.
11. **Madsen, J.** A Physics-Based Vehicle-Terrain Interaction Model for Soft Soil Off-Road Vehicle Simulations / J. Madsen, D. Negrut, A. Reid, A. Seidl, P. Ayers, G. Bozdech, J. Freeman, J. O’Kins // SAE International Journal of Commercial Vehicles. 2012. №5(1). С. 280–290.
12. **Meschke, G.** Large strain finite-element analysis of snow / G. Meschke, C. Liu, H. A. Mang // Journal of engineering mechanics –July. 1996. №122. P. 591–602.
13. LS-DYNA 960 Keyword User’s Manual // Livermore Software Technology Corporation. 2001.

*Дата поступления
в редакцию 01.12.2014*

D.S. Teslenko, V.V. Belyakov, V.S. Makarov, D.V. Zezyulin

USING FINITE-ELEMENT METHOD FOR SOLVING TERRAMECHANICS TASKS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Overview of the finite element method applied to terramechanics.

Design/methodology/approach: Review and analysis of information sources.

The results and their application area: This article describes methods for modeling the interaction of the wheel and the ground with the help of the finite element method; Is given a literature review on this topic. The present study provides a starting-point for further research in the field of snow-terrmechanics.

Conclusions: The finite element method has been successfully applied in terramechanics. To use it to simulate the movement of the machine through the snow need to create mathematical models that adequately describe the mechanical properties of snow. The results can be used to design vehicles that are more efficient.

Key words: snow, tire-soil interaction, soil model, finite element modeling.