
Математика

УДК 004.94:624.132.3

Компьютерное моделирование контактного взаимодействия индентора с грунтом при внедрении с вращением

М.Х. АБДУЛКАДЕР

При проектировании современных землеройных машин одной из актуальных задач является необходимость расчетов контактного взаимодействия деформируемых твердых тел с грунтом. Однако данный параметр зависит от большого количества факторов, которые не всегда поддаются учету. В работе с применением программы ABAQUS рассмотрено внедрение индентора с шаровидной формой с его одновременным вращением относительно нормали к поверхностям соприкасающихся тел. Выполнено сравнение напряжений, получающихся при расчетах для упругой модели деформирования грунта и с применением модели Друкера-Прагера.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, конечно-элементное моделирование, индентор, модель Друкера-Прагера, ABAQUS.

When designing modern earthmoving machines, one of the urgent tasks is the need to calculate the contact interaction of deformable solids with soil. However, this parameter depends on a large number of factors that are not always accountable. In the work using the ABAQUS program, the implementation of an indenter with a spherical shape with its simultaneous rotation relative to the normal to the surfaces of the contacting bodies is considered. The stresses obtained in the calculations for the elastic model of soil deformation and using the Drucker-Prager model are compared.

Keywords: contact interaction, finite element modeling, indenter, Drucker-Prager model, ABAQUS.

Запросы современной техники, связанные с созданием конструкций, обладающих прочностной надежностью при малой материалоемкости, приводят к необходимости разработки методов расчетов на прочность с учетом контактных деформаций. На базе уточнения физических и механических представлений о механизмах разрушения твердых тел в течение последних трех десятилетий был сформирован раздел механики деформируемого твердого тела, получивший название механики разрушения. Проектирование таких технических объектов, как землеройные машины, предполагает учет особенностей напряженно-деформированного состояния грунта в результате взаимодействия с рабочими органами машин. Поэтому в последнее время были предприняты попытки численно смоделировать процесс разрушения грунтов и дальнейшего деформирования разрушаемого слоя. Сложность компьютерного моделирования деформаций грунтов связана с их упругопластическими свойствами [1]. В данном случае она дополняется необходимостью решения динамической контактной задачи.

Основным способом решения таких задач является метод конечных элементов. С его использованием в статье [2] рассмотрено взаимодействие сферы с локальными неоднородностями различной формы, решение выполнено в осесимметричной постановке. В работах [3], [4], [5] было проведено исследование взаимодействия с почвой сельскохозяйственных орудий. В статье [6] представлено исследование разрушения твердых пород дисковым резцом. В диссертации [7], сравнивая результаты теоретических расчетов и экспериментов, автором было показано, что расширенная модель Друкера-Прагера адекватно описывает процесс деформации грунта при его взаимодействии с режущим инструментом. В работе [8] выполнено моделирование взаимодействия шин с грунтом. В работе [9] рассматривается динамическая модель внедрения жесткой гладкой сферы в однородное упругопластическое упрочняемое твердое тело. Во всех ранее рассмотренных работах анализировалось внедрение тел в грунт

для случая их поступательного перемещения. Целью представленной работы является сравнение напряженно-деформированного состояния грунта, получаемого на основе упругой и упругопластической моделей, для случая винтового движения индентора.

Модель Друкера-Прагера. Для решений на основе критерия прочности Друкера-Прагера [10] уравнение поверхности текучести (рисунок 1) имеет следующий вид:

$$\sqrt{J_2} + \beta I_1 - \sigma_y = 0, \quad (1)$$

где J_2 – второй инвариант девиаторной части тензора напряжений; β , σ_y – константы материала;

$$\beta = \frac{2 \sin(\varphi)}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}; \quad \sigma_y = \frac{6c \cos(\varphi)}{\sqrt{3}(3 - \sin(\varphi))}, \quad (2)$$

где I_1 – первый инвариант тензора напряжений; φ – угол внутреннего трения; c – напряжение когезии между частицами материала.

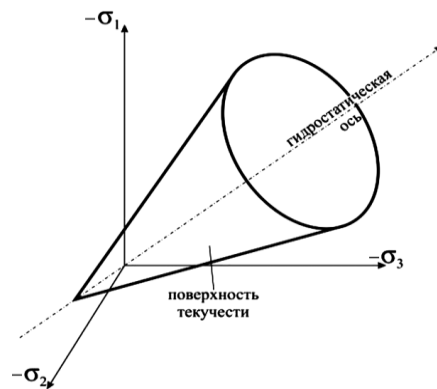


Рисунок 1 – Графическое изображение поверхности текучести в осях главных напряжений в соответствии с критерием Друкера-Прагера

Таким образом, форма поверхности текучести задается уравнением:

$$\sqrt{J_2} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sin \varphi}{(3 \pm \sin \varphi)} I_1 - \frac{2\sqrt{3}c \cos \varphi}{(3 \pm \sin \varphi)} = 0. \quad (3)$$

Значения параметров c и φ определяются в ходе испытаний [11].

Из-за сложности аналитического решения задачи о деформировании грунтов при их контактном взаимодействии с иными телами решаются в основном с использованием численных методов. Модель Друкера-Прагера реализована в программных комплексах конечно-элементного анализа.

Конечно-элементная модель. Рассматривалось вдавливание сферического металлического индентора диаметром 20 мм в деформируемое основание (рисунок 2а). Материал индентора считался линейно упругим, изотропным с модулем упругости $E_i = 2 \cdot 10^{11}$ Па и коэффициентом Пуассона $\nu_i = 0,3$. При моделировании основания использовалась модель Друкера-Прагера. Параметры материала приняты равными $c = 2,9$ МПа, $\varphi = 32^\circ$. Расчеты выполнялись для значений модуля упругости основания $E_f = 2 \cdot 10^8$ Па при коэффициенте Пуассона $\nu = 0,3$.

Для расчета напряженно-деформированного состояния использован программный комплекс ABAQUS. При создании конечно-элементной модели применен восьмиузловой конечный элемент C3D8, который использует линейную интерполяцию в каждом направлении и представляет собой элемент первого порядка. На рисунке 2б представлены конечные элементы индентора и фрагмента основания, моделирующих контактную пару.

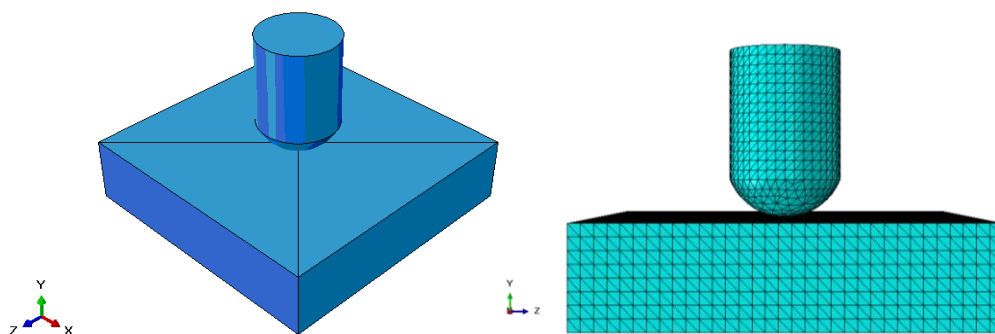


Рисунок 2 – Рассматриваемая система: а – геометрическая модель; б – сетка конечных элементов

При создании контактной пары использован контакт типа «поверхность–поверхность», которая представлена на рисунке 3. Общее число элементов модели – около 88000, и общее число узлов около 136000.

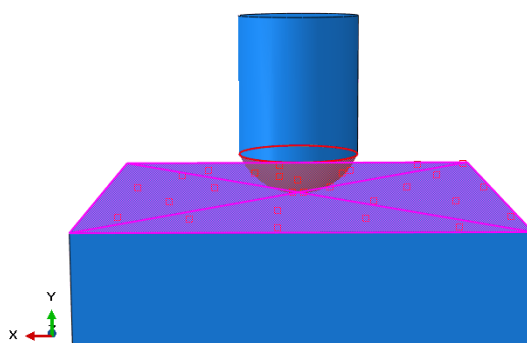


Рисунок 3 – Модель контактной пары в среде программы ABAQUS

Выполнены расчеты напряженно-деформируемого состояния для случая действия распределенного давления 5000 Па, приложенного к верхней грани геометрической модели индентора. Помимо этого индентору придавалось вращение вокруг вертикальной оси с угловой скоростью, соответствующей 60 об/мин. Такие граничные условия соответствуют винтовому движению индентора.

На рисунке 4 показаны схемы распределения эквивалентных напряжений в грунте. Они показывают, что максимальные эквивалентные напряжения в случае модели Друкера-Прагера составляют 58 МПа, а при упругой модели – 65 МПа.

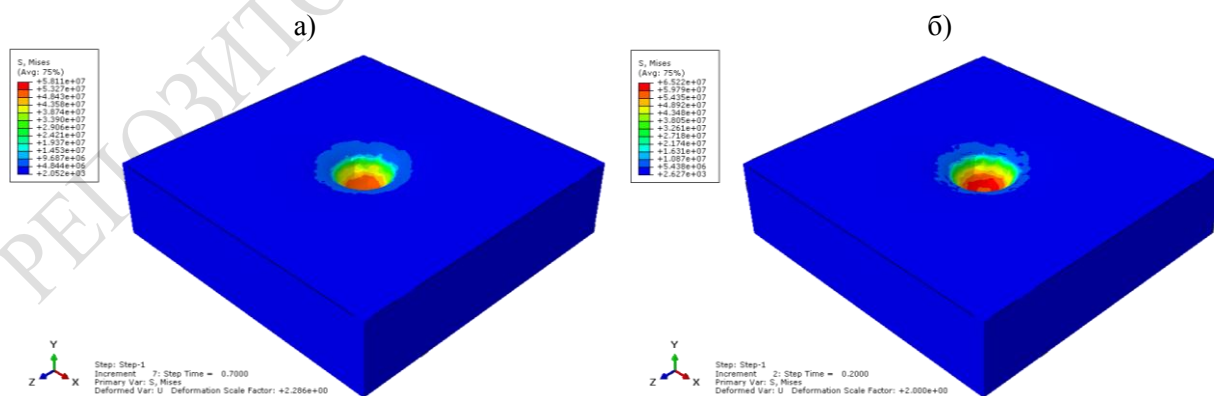


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения: а) модель Друкера-Прагера; б) упругая модель

На рисунке 5 показаны схемы распределения первых главных напряжений, из которых следует, что минимальные их значения одинаковы для обоих случаев. В то же самое время максимальные первые главные напряжения для модели Друкера-Прагера составляют 6,9 МПа, а для упругой модели – около 8 МПа.

Также результаты вычислений показали, что углубление индентора в результате совместного действия распределенного давления и сообщения индентору вращения для моделей Друкера-Прагера и упругой составило соответственно 1,05 и 0,68 мм. Такой результат обусловлен меньшей жесткостью материала по модели Друкера-Прагера и его пластическим течением.

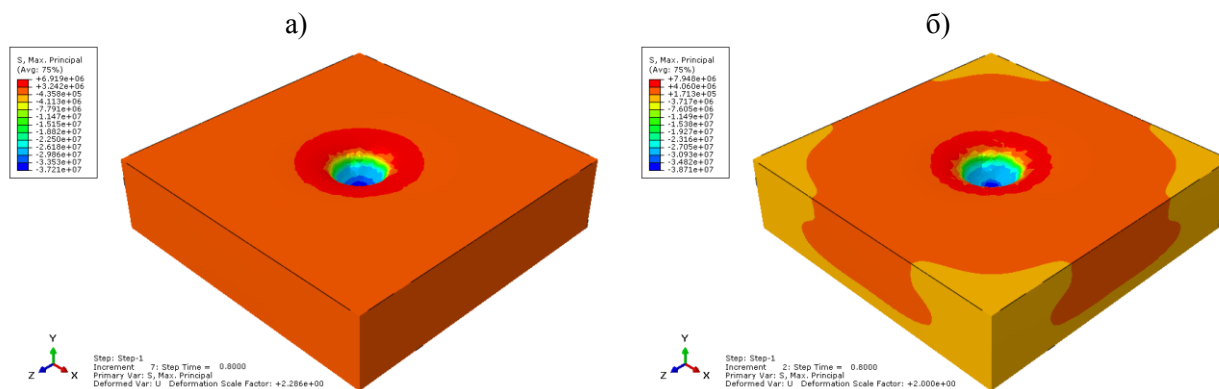


Рисунок 5 – Первые главные напряжения σ_1 : а) модель Друкера-Прагера; б) упругая модель

Таким образом, результаты исследования показывают, что учет упругопластических деформаций, которые возникают в грунте, приводит к уменьшению значений напряжений по сравнению с упругой моделью. При этом максимальные напряжения снижаются на 60–80 % и более. Полученные результаты следует принимать во внимание при разработке моделей взаимодействия рабочего инструмента строительной техники с разрушаемым и перемещаемым грунтом.

Литература

1. Березин, И.М. Определение условий пластического течения некомпактных материалов / И.М. Березин, А.Г. Залазинский // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8. – С. 19–231.
2. Георгиевский П.Ю. Нестационарное взаимодействие сферы с атмосферными температурными неоднородностями при сверхзвуковом обтекании / П.Ю. Георгиевский, В.А. Левин // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 1993. – № 4. – С. 174–183.
3. Armin, A. *Mechanics of soil-blade interaction: thesis for the degree of doctoral of philosophy* / A. Armin. – Saskatoon, 2014. – 173 p.
4. Ibrahim, A. Soil-blade orientation effect on tillage forces determined by 3D finite element models / A. Ibrahim, H. Bentaher, A. Maalej // *Spanish journal of agricultural research*. – 2014. – Vol. 12, № 4. – P. 941–951.
5. Mootaz, A.E. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis / A.E. Mootaz, R. Hamilton, J.T. Boyle // *Soil and tillage research*. – 2004. – Vol. 75, № 1. – P. 61–73.
6. Numerical analysis of dynamic response mechanism of rock by TBM disc cutter [Electronic Resource] / S. Wang, S. Yan, Z. Xu, Y. Yang // *The Electronic journal of geotechnical engineering*. – 2014. – Vol. 19. – Access mode : <http://www.ejge.com/2014/Ppr2014.901ma.pdf>. – Date of access : 15.08.2016.
7. Brown, O.F. *Finite element analysis of blade-formation interactions in excavation: thesis for the degree of Master of Science in mining engineering* / O.F. Brown. – Rolla, 2014. – 104 p.
8. Hybrid soft soil tire model (HSSTM). Part I: tire material and structure modelling: technical report / Sh. Taheri, C. Sandu, S. Taheri, D. Gorsich. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015. – 41 p.
9. Максименко, А.А. Динамическая модель упругопластического контактного взаимодействия гладких тел / А.А. Максименко, Н.В. Котенева // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 310, № 2. – С. 64–66.
10. Drucker, D.C. Soil mechanics and plastic analysis or limit design / D.C. Drucker, W. Prager // *Quarterly of applied mathematics*. – 1952. – Vol. 10, № 2. – P. 157–165.
11. Болдырев, Г.Г. Определение параметров моделей грунтов / Г.Г. Болдырев, И.Х. Идрисов, Д.Н. Валеев // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2006. – № 3. – С. 20–25.

РЕПОЗИТОРИЙ ГТУ ИМЕНИ Ф.СКОРИНЫ