

## НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ (SCIENTIFIC PUBLICATIONS)

**ISSN 2519-8742. Механика. Исследования и инновации. Вып. 10. Гомель, 2017**

---

УДК 621.878.2 : 539.52

*М. Х. АБДУЛКАДЕР*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь*

### **АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УПРУГОГО ТЕЛА С ГРУНТОМ**

В работе представлены результаты конечноэлементного моделирования взаимодействия отвала бульдозера с грунтом в среде программного комплекса ABAQUS. Выполнено сравнение результатов расчетов и экспериментов по определению сил сопротивления копанью отвалом бульдозера, которые проводились в Белорусско-Российском университете.

**Ключевые слова:** бульдозер, конечный элемент, резание, ABAQUS, отвал, сила сопротивления, грунт.

При проектировании машин, предназначенных для снятия слоя грунта, необходимо иметь информацию о силах, возникающих в процессе работы. Поэтому существует необходимость создания математических и компьютерных моделей, позволяющих провести расчеты различных режимов работы строительной техники.

Деформирование грунтов описывается сложными упругопластическими моделями, поэтому при проектировании строительных машин до настоящего времени применяют упрощенные методики, рассматривающие грунт как систему небольшого числа твердых тел, скользящих друг относительно друга. Так, в работе [1] приведено описание механизма стружкообразования при взаимодействии ножа с грунтом. Книга [2] посвящена проблеме отыскания наиболее целесообразных параметров процесса резания грунтов для повышения производительности и усовершенствования землеройных работ. В монографии [3] изложены методы расчета параметров взаимодействия рабо-

чего и ходового оборудования с грунтом. Целью работы [4] является определение горизонтальной составляющей сопротивления копанью грунта бульдозерным оборудованием и мощности бульдозерного агрегата.

В последние годы появились исследования, в которых для анализа взаимодействия жестких и упругих объектов с упругопластическими телами используется метод конечных элементов. В статье [5] подробно описываются методики конечноэлементного моделирования процесса обработки металлов резанием. В работе [6] выполнено моделирование взаимодействия шин с мягким грунтом. Статья [7] содержит результаты исследования разрушения твердых пород дисковым резцом. В работе [8] с использованием модели гиперпластичного материала выполнено конечноэлементное моделирование распаивания сухой песчаной почвы. В статье [9] обосновываются подходы к назначению внешних нагрузок при создании моделей роторных экскаваторов. Нами также выполнены решения ряда задач о взаимодействии инденторов разной формы с грунтом, деформирование которого описывается моделью Друкера-Прагера [10, 11].

Сложность конечноэлементного описания свойств грунтов обуславливает необходимость установления достоверности полученных результатов. Поэтому целью представленной работы является анализ точности конечноэлементного моделирования взаимодействия упругого тела с грунтом на основе сравнения с данными, полученными в ходе натурального эксперимента. В качестве исходных данных для выполнения работы взята информация [12], в которой представлены результаты экспериментов по определению характеристик отвала бульдозера специальной формы, разработанного в Белорусско-Российском университете. На рисунке 1 представлен общий вид рассматриваемой конструкции.

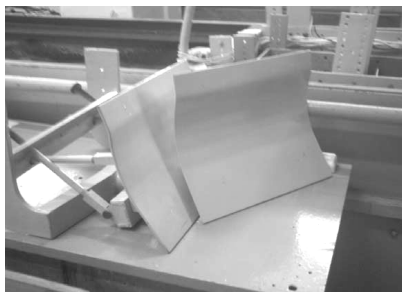


Рисунок 1 – Модель отвала с универсальной рамой [12]

Разработана конечноэлементная модель, описывающая процесс срезания грунта отвалом, показанным на рисунке 1, в среде программной системы ABAQUS [13]. Материал отвала считался упругим, изотропным, с модулем упругости  $E = 200$  ГПа и коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$ . Для материала основания использованы физические характеристики плотной глины: модуль упругости принят равным  $E_f = 600$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , плотность  $\rho = 1700$  кг/м<sup>3</sup>, когезия грунта  $c = 4$  кПа, угол внутреннего (грунта по грунту) трения  $\phi = 28^\circ$ , угол внешнего (грунта по металлу) трения  $\theta = 25^\circ$ .

При создании конечноэлементной модели применен 10-узловой тетраэдральный элемент второго порядка C3D10 (рисунок 2). Именно его рекомен-

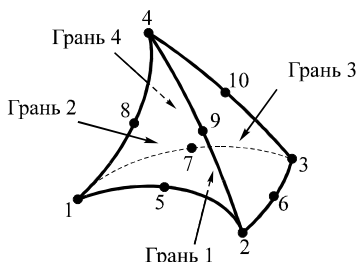


Рисунок 2 – 10-узловой конечный элемент C3D10

дуют применять при решении контактных задач в случае дискретизации контакта по типу «поверхность–поверхность» [14], который использован нами при разработке модели. На рисунке 3 приведены схемы, иллюстрирующие построение конечноэлементной модели. Общее число ее элементов оказалось равным 47791, число узлов – 60209.

В качестве граничных условий для грунта использован запрет перемещений точек его нижней грани, а для отвала задавалась постоянная скорость перемещения вдоль горизонтальной оси  $x$ . В начальный момент времени отвал касался грунта по линии, параллельной оси  $z$ .

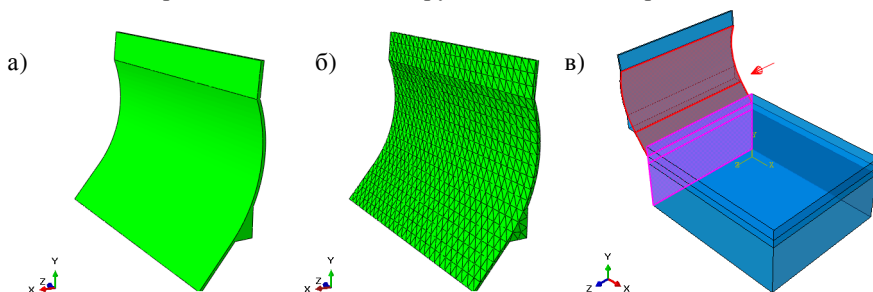


Рисунок 3 – Этапы построения конечноэлементной модели, описывающей контактное взаимодействие отвала с грунтом: *a* – геометрическая модель; *b* – сетка конечных элементов; *в* – модель контактной пары

Решение динамической задачи о взаимодействии отвала с грунтом было построено на использовании явной схемы интегрирования уравнений движения элементов модели по времени.

В результате вычислений получены значения напряжений и деформаций в грунте при разных вариантах относительного расположения отвала бульдозера и массива грунта. На рисунке 4 представлены схемы распределения напряжений  $\sigma_x$ , соответствующие разным толщинам срезаемого слоя. Анализ рисунков показывает, что при малой глубине срезаемого слоя ( $h = 2$  см) смещение отвала приводит к разрыву грунта и большим смещениям срезаемого слоя. При увеличении смещения отвала по вертикали до 3 см по-прежнему наблюдается срез материала, но увеличение толщины слоя ведет к увеличению его жесткости, поэтому следует ожидать значительное увеличение силы, необходимой для резания. Увеличение толщины срезаемого слоя до 4 см приводит к тому, что разрушение материала происходит не только на уровне низа отвала, но и в промежуточных точках. Такая ситуация может привести к снижению сил, необходимых для смещения слоя грунта.

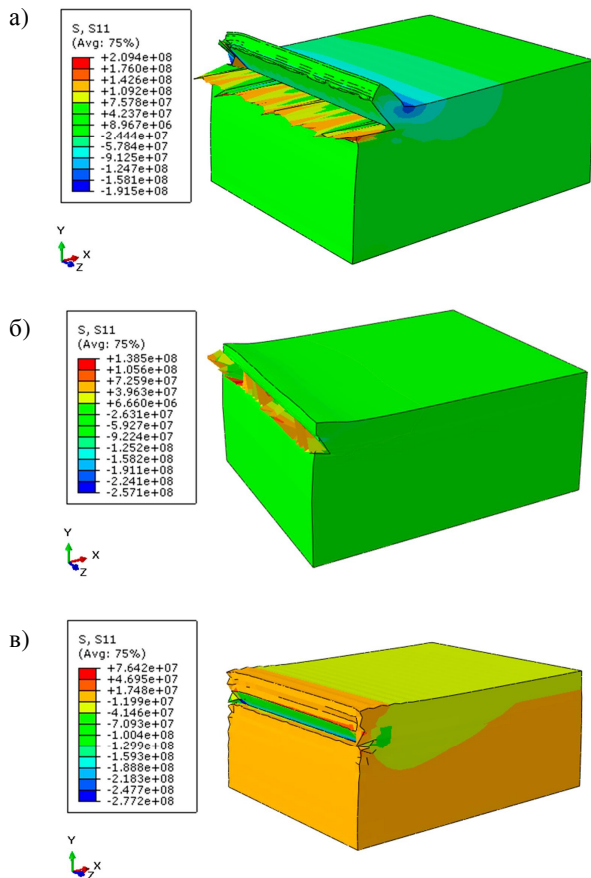


Рисунок 4 – Схемы распределения напряжений  $\sigma_x$  при толщине срезаемого слоя:  
 $a$  – 2 см;  $б$  – 3 см;  $в$  – 4 см

Приведенное описание происходящих при резании грунта процессов подтверждается экспериментально полученными в работе [12] графиками, которые представлены на рисунках 5,  $a$ ,  $б$  и  $в$ . Линия 1 на них соответствует результатам измерений. В первые 0,1 с после начала движения начинается значительное увеличение приложенной силы до того момента, пока не произойдет пластическое течение материала, приводящее к его разрыву. Внезапное разрушение внутренних связей в материале приводит к снижению напряжений, которые затем возрастают, но не так быстро. Проведенный авторами эксперимента расчет (линия 2 на названных графиках) весьма сильно расходится с результатами экспериментов. На рисунке 5,  $г$  представлены результаты расчета, выполненного нами для тех же исходных данных в

ABAQUS, которые показывают принципиальную схожесть с экспериментом. Компьютерный расчет дает завышенные значения силы резания, причем погрешность вычисления максимальной силы резания уменьшается при увеличении толщины срезаемого слоя.

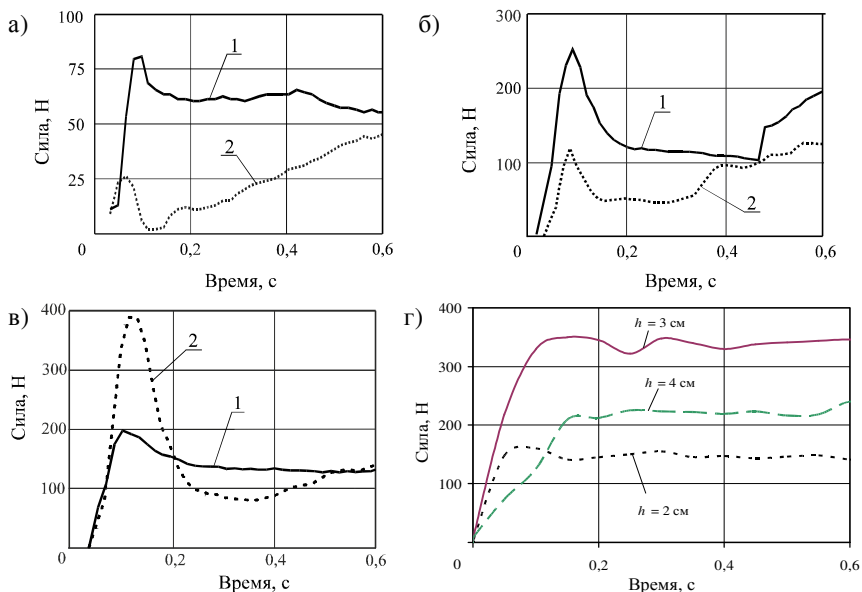


Рисунок 5 – Зависимость силы сопротивления резанию грунта от времени в соответствии с [12] для толщины слоя: а – 2 см; б – 3 см; в – 4 см и г – по результатам наших вычислений в ABAQUS

Таким образом, полученные результаты работы показывают, что компьютерное моделирование динамики взаимодействия деформируемого тела с грунтом, построенное на использовании модели Друкера – Прагера и явной схемы интегрирования уравнений движения элементов модели по времени, позволяет получить с удовлетворительной точностью значения силы резания, которые оказываются завышенными. Поэтому использованный в работе расчетный подход может быть рекомендован для проектирования новых строительных машин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Берестов, Е. И. Сопротивление грунтов резанию : [моногр.] / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр. – Могилев : Бел.-Рос. ун-т, 2008. – 179 с.
- 2 Ветров, Ю. А. Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю. А. Ветров. – Киев : Изд-во Киевского ун-та, 1965. – 123 с.
- 3 Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом / Е. И. Берестов [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 183 с.

4 **Разумов, Ю. В.** Экспериментальное и теоретическое определение сопротивления копания грунта и мощности привода бульдозера / Ю. В. Разумов, О. Ю. Улитич. – М. : МАДИ (гос. техн. ун-т), 2007. – 29 с.

5 **Корендяев, Г. К.** О конечноэлементном моделировании процесса обработки металлов. Ч. 1 / Г. К. Корендяев // Вестник научно-технического развития. – 2015. – № 2(90). – С. 14–24.

6 Hybrid soft soil tire model (HSSTM). Part I: tire material and structure modeling: Technical Report / Sh. Taheri [et al.]. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2015. – 41 p.

7 Numerical analysis of dynamic response mechanism of rock by TBM disc cutter / S. Wang [et al.] // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2014. – Vol. 19. – P. 17017–17024.

8 **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, No. 1. – P. 61–73.

9 **Hamidi, B.** Loading external digging resistance caused by the excavations with rotors / B. Hamidi, M. Bajraktari, I. Doçi // 13th International Research / Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology – TMT 2009” Proceedings, Hammamet, Tunisia, 16–21 October 2009. – Hammamet, 2009. – P. 541–544.

10 **Шимановский, А. О.** Конечно-элементное моделирование взаимодействия отвала бульдозера с глинистым грунтом / А. О. Шимановский, М. Х. Абдулкадер // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – 2016. – Вып. 94. – С.196–201.

11 **Shimanovsky, A. O.** Finite element modelling of contact interaction between spherical indenter and elastic-plastic body / A. O. Shimanovsky, M. H. Abdulkader, M. G. Kuzniatsova // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 797. – P. 307–313.

12 **Лесковец, И. В.** Влияние параметров профиля отвала бульдозера на величины сил сопротивления копания / И. В. Лесковец, Е. И. Берестов, А. П. Смоляр // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 2(47). – С. 12–22.

13 ABAQUS 6.10 Example Problems Manual. Vol. 2: Other Applications and Analyses. – Providence: Dassault Systèmes Simulia Corp., 2010. – 572 p.

14 **Бузлаев, Д.** Моделирование болтовых соединений в КЭ-комплексе SIMULIA Abaqus / Д. Бузлаев // САПР и графика. – 2015. – № 5. – С. 24–29.

*M. H. ABDULKADER*

*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

## **ANALYSIS OF THE RESULTS ACCURACY FOR FINITE-ELEMENT MODELING OF THE ELASTIC BODY-GROUND INTERACTION**

The paper presents the results of finite element modeling of the bulldozer blade-soil interaction using the ABAQUS software environment. There was made the comparison of the computational and experimental results of determining the resistance forces for digging with a bulldozer dump, which were carried out at the Belarusian-Russian University.

Получено 15.06.2017