

Моделирование процесса резания объема грунта в программном комплексе Abaqus

¹ГАНЮКОВ Александр Анатольевич, PhD, старший преподаватель, sgn2002@mail.ru,

^{1*}АЛТЫНБАЕВ Асет Жанатович, докторант, altynbaev.aset@gmail.com,

¹ДЮСЕНБАЕВ Ермек Шуиншибекулы, докторант, yermek_dyssenbaev@mail.ru,

¹НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Казахстан, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Целью исследования является разработка алгоритма моделирования процесса резания бесконечного объема грунта фрезой с плоским резцом в программном комплексе Abaqus. Дана гипотеза о существовании энергии и объема сопротивления резанию. Приведен анализ распространения ударных волн в объеме грунта. Построена модель резания грунта фрезой различного диаметра. Определены граничные условия для модели объема грунта. Определены граничные условия для вращающейся фрезы с линейной подачей. Использована пластичная модель Дрюкера-Прагера с возможностью разрушения элементов при достижении критических значений. Определены напряжения в грунте при ударе резца о поверхность грунта. Получены подтверждения гипотезы о существовании энергии и объема сопротивления резанию. Даны рекомендации для моделирования процесса резания в программном комплексе Abaqus.

Ключевые слова: транспортная техника, теория резания грунта, землеройные машины, силы резания грунта, энергия резания, пластичная модель Дрюкера-Прагера, стена в грунте, программный комплекс Abaqus.

Введение

Процесс строительства – это постоянный и непрекращающийся процесс, который нуждается в точных расчетах. В зависимости от этапа строительства и региона применяются различные землеройные машины. Зачастую подготовительные работы производятся в ограниченных условиях города или промышленной зоны, при высоком уровне грунтовых вод, не останавливая производства. Исследованиями нагружения рабочих органов занимались ранее советские, российские и казахстанские ученые: В.П. Горячкин [3], Н.Г. Домбровский [4], Ю.А. Ветров [2], А.Н. Зеленин [5], А.С. Кадыров [1], Р.А. Кабашев [6], С.Н. Нураков [7] и др. Подход этих авторов к изучению нагружения рабочего органа был с точки зрения действия режущей силы на резец. А также исследования были сделаны в однофазной среде.

В монографии Кадырова А.С. разработаны и исследованы математические модели движения рабочих органов землеройных машин в глинистом растворе; разработана и исследована математическая модель оптимизации показателей назначения траншейных машин.

По результатам исследований нагружения криволинейного элемента конструкции Кадыровым А.С. и др. установлены силы сопротивления движению плоской пластинки, гладкого цилиндра

и реальных рабочих органов в глинистом растворе для различных режимов течения раствора (бингамовский, псевдоламинарный, турбулентный) были составлены математические модели движения фрезерных рабочих органов в глинистом тиксотропном растворе.

Ю.А. Ветров рассматривал сопротивление резанию грунтов как совокупность сопротивлений, зависящих от площади поперечного сечения среза и от режущего периметра. Рассмотрены силы резания простым острым ножом, зависящие от угла резания и толщины среза грунта, и сложным ножом. Сила резания сложным ножом исследовалась как система простых ножей, которые взаимодействуют друг с другом.

Моделированием экстремальных деформаций и взаимодействия структуры грунта для глубоководных задач с помощью ПК Abaqus занимался Н. Мавродонтис. В его исследованиях представлена модель эксплуатации якоря при погружении в морское дно. В отличие от модели Н. Стромбла, эта модель рассчитана с учетом динамики процесса в ограниченном объеме. Для моделирования процесса погружения якоря была использована техника SPH моделирования, которая не предполагает моделирования бесконечного объема. В качестве материальной модели была выбрана модель Кулона-Мора.



Рисунок 1 – Виды землеройных машин Liebherr

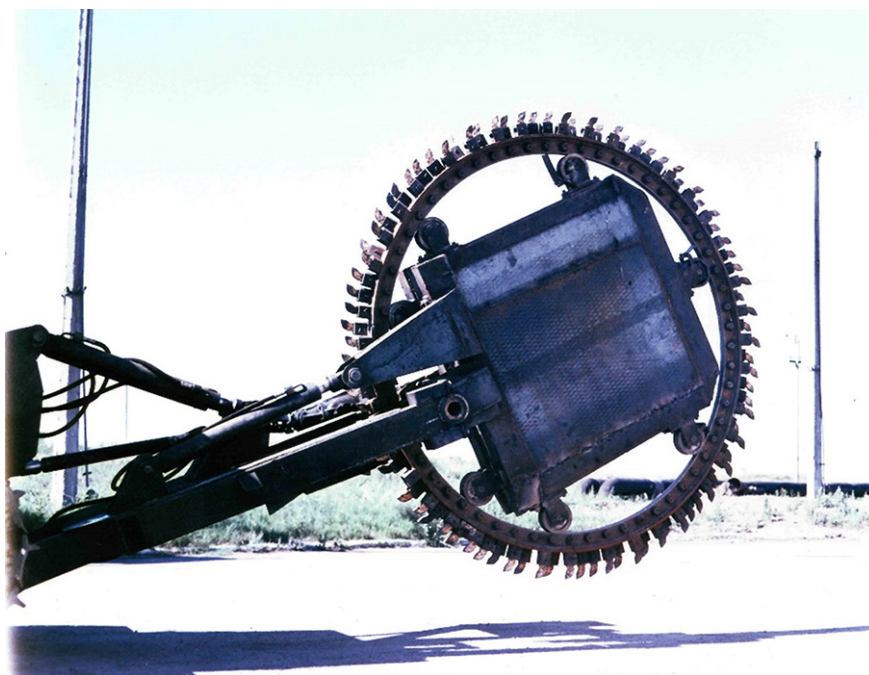


Рисунок 2 – Щелерез ЩФ-2000

Исследования нагружения рабочего органа землеройной машины в ПК Abaqus в статическом или динамическом состояниях не производились, что делает наши исследования актуальными. Эти исследования позволят точнее подбирать режим эксплуатации землеройной машины, эффективнее ее эксплуатировать, что также даст положительный экономический эффект.

Профессор Кадыров А.С., руководитель нашей группы, предположил, что существует некоторый объем, который оказывает сопротивление резанию. Для эффективной разработки грунта

необходимо, чтобы энергия массы объема грунта была меньше энергии резания. Это новый взгляд на теорию резания грунтов.

Для исследования было решено использовать конечно-элементную модель в ПК Abaqus, т.к. эта программа дает достоверный результат и позволяет исследовать множество вариаций форм резца.

Целью исследования являлось построение конечно-элементной модели получения распределения напряжений в конечном объеме грунта, распространения ударных волн в конечном объ-

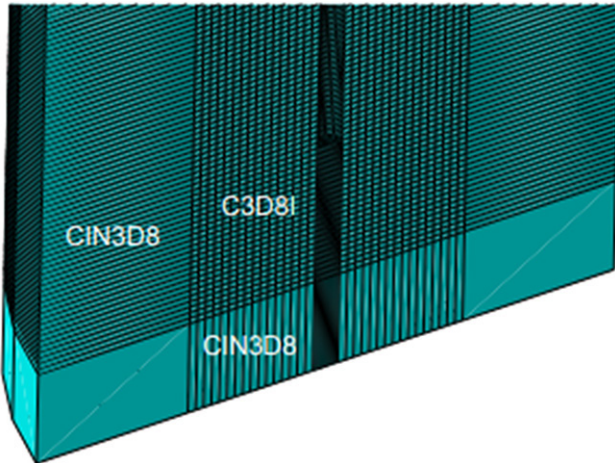


Рисунок 3 – Способ построения сетки для моделирования бесконечного объема

еме грунта, определение объема грунта, участвовавшего в сопротивлении резанию. Для достижения цели был использован метод конечных элементов в ПК Abaqus, а также решены следующие задачи:

- Построена топологическая модель рабочего органа землеройной машины и бесконечного объема грунта.
- Определены граничные условия для бесконечного объема грунта.
- Определены граничные условия и условия движения для рабочего органа землеройной машины.
- Задана пластичная модель Дрюкера-Прагера для определения свойств грунта.
- Заданы динамические условия расчета задачи в ПК Abaqus.
- Заданы параметры для вывода в численном и графических форматах деформации грунта, критерия Мизеса, баланса энергий, сил.

Материалы и методы

Для решения поставленных задач была построена модель в программном комплексе Abaqus, т.к. он обладает большим количеством инструментов и техник для построения моделей с помощью метода конечных элементов. Модель основывается на контактном взаимодействии абсолютно твердого тела и бесконечного объема с материальными свойствами грунта. Для построения модели была использована техника с использованием Лагранж-элементов, т.к. она позволяет построить модель в бесконечном объеме.

В качестве модели был взят вращающийся рабочий орган землеройной машины с зубьями, который в процессе резания опускается вертикально в грунт.

Рабочий орган землеройной машины моделировался как абсолютно твердое тело, т.к. его деформации по сравнению с грунтами малы. Для этого использовался инструмент *RIGID BODY, в него входят элементы типа R3D4, топологически описывающие рабочий орган, объединенные в набор элементов с относительной точкой на оси вращения рабочего органа. Размер элементов в данном случае не имеет значения, т.к. деформации равны 0.

Для задания свойств грунта объему пространства использовалась эластично-пластичная модель Дрюкера-Прагера. Эта модель позволяет определить в Abaqus характеристики горных пород, гранулированных грунтов, материалы, прочность которых зависит от давления. Для этого использовали при расчете параметры:

- плотность (*DENSITY),
- модуль Юнга, коэффициент Пуассона (*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC 5000., 0.3),
- угол внутреннего трения, коэффициент напряжения потока при трехосном растяжении к напряжению потока при трехосном сжатии, угол

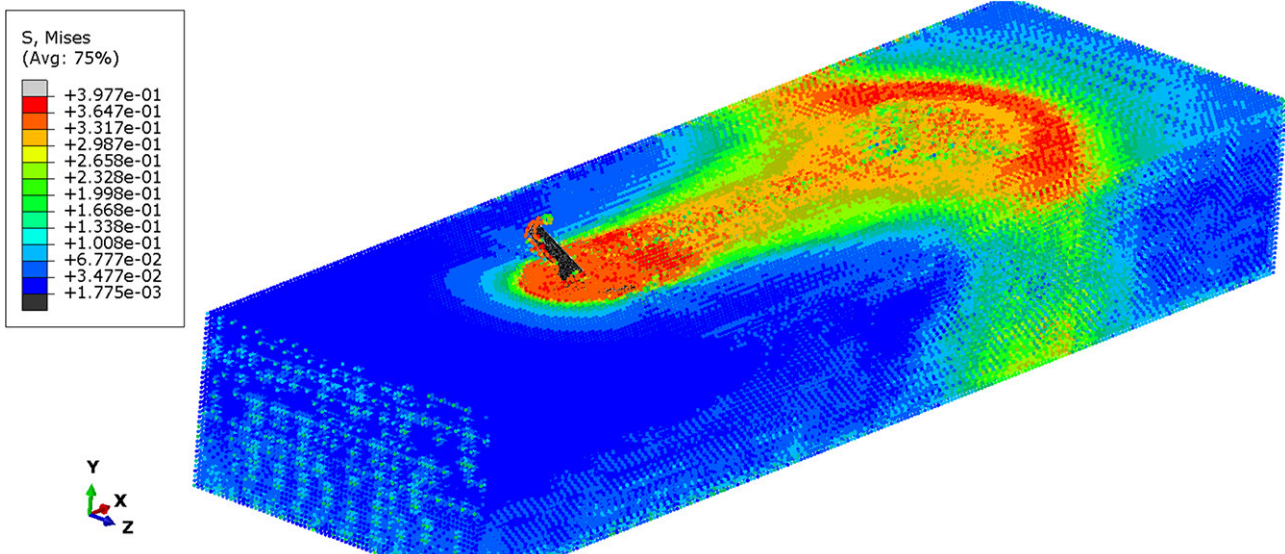
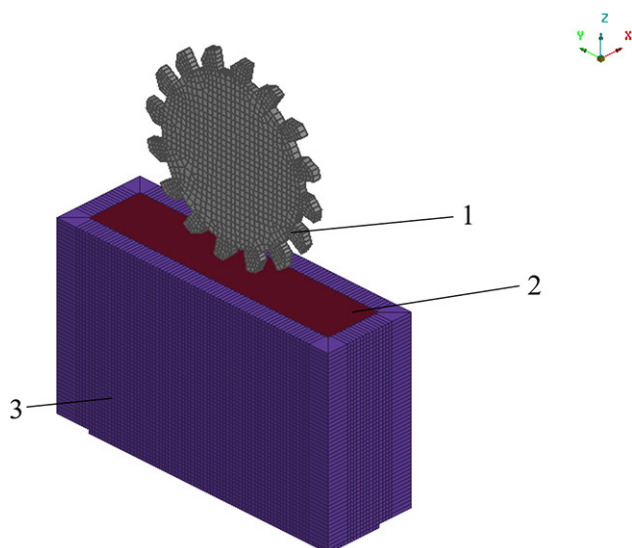


Рисунок 4 – Градиент напряжений с применением SPH-анализа



Рисунок 5 – Резание грунта дисковой фрезой



1 – рабочий орган землеройной машины; 2 – конечный объем грунта; 3 – бесконечный объем грунта

Рисунок 6 – Модель резания бесконечного объема грунта

расширения (*DRUCKER PRAGER 40.,0.8,20.).

Для корректной работы модели необходимо было задать упрочнение для модели Дрюкера-Прагера. Это задавалось при помощи инструмента *DRUCKER PRAGER HARDENING. В нем задаются значения предел текучести и абсолютное значение пластической деформации.

Модель резания грунта предполагает разрушение целостности объема. В Abaqus для этого использовались *DAMAGE INITIATION и *DAMAGE EVOLUTION. Эти параметры позволяют отделять элементы друг от друга, значения напряжений в которых достигли критических резания и были разрушены. В этой модели для определения на-

чала разрушения использовался критерий на основе деформации вязкого разрушения.

Для определения развития повреждений и дальнейшего разрушения применялся критерий *DAMAGE EVOLUTION. Этот тип позволяет задать экспоненциальную зависимость смягчения реакции напряжений после начала повреждения элемента.

Abaqus необходимо использовать параметр ELEMENT DELETION для удаления элементов. Он задается с указанием набора элементов, для которых он справедлив. В этой модели он применялся к наборам элементов, описывающих конечный объем грунта.

В модели использовались 3 типа элементов:

1. R3D4 – для абсолютно-твердого тела.

2. C3D8R – для элементов, описывающих разрушаемую часть грунта.

3. CIN3D8 – для элементов, описывающих бесконечную часть объема грунта.

Размер элемента для абсолютно твердого тела не играет роли, он не будет оказывать влияния на величину шага расчета. Размер элемента для описания грунта был выбран 20 мм, т.к. он будет определять величину шага расчета.

Для расчета минимального размера элемента в Abaqus использовались формулы:

$$\Delta t = \frac{L_{\min}}{c_d},$$

где Δt – приращение времени; $L_{\min}$ – минимальный размер элемента конечного объема грунта; c_d – дилатационная скорость волны в элементе.

$$c_d = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}},$$

где λ и 2μ – коэффициенты Ламье; ρ – плотность материала.

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 + \lambda)(1 - 2\nu)},$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)},$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона.

Отсюда получаем, что размер элемента должен быть не менее 10 мм.

Для определения перемещения, скорости и ограничения перемещений использовался параметр *BOUNDARY.

Для задания вращения и перемещения рабочего органа применялся тип TYPE=VELOCITY. Этот тип граничных условий определяет скорость движения для указанных степеней свободы и набора узлов. Для него задавались значения перемещения на 200 мм/с вертикально вниз и 500 об/с вокруг оси OX.

Характер действия скорости определялся амплитудой *AMPLITUDE. Она имела линейный профиль с постоянным значением 1. Это означает что в течение всего времени процесса моделируемый рабочий орган будет двигаться и вращаться с заданными скоростями

Для предотвращения движения по остальным степеням свободы рабочий орган был ограничен при помощи граничного условия тип TYPE=DISPLACEMENT. Этот тип граничных условий определяет перемещение для указанных степеней свободы и набора узлов. Для ограничения перемещений задавались значения перемещения

0 по осям OX, OY и поворота вокруг OY, OZ.

Объем моделируемого грунта был зафиксирован на узлах внешней стороны бесконечных элементов. Это было сделано согласно требованиям моделирования бесконечных моделей в Abaqus. Для этого использовался тип TYPE=DISPLACEMENT. Для набора узлов внешней стороны бесконечных элементов применялись значения жесткого закрепления по всем направлениям (ENCASTRE).

Для задания взаимодействия между рабочим органом и грунтом используется инструмент *CONTACT PAIR. Этот инструмент описывает характер взаимодействия компонентов модели между собой. В настройках контакта задаются наборы элементов или узлов. Эти наборы определяют поверхность для взаимодействия.

В контактной паре для поверхностей выбираются 2 типа:

1. Ведущая поверхность (MASTER) – в этой модели это рабочий орган землеройной машины, т.к. он не имеет деформации и он жестче, чем грунт. Для Ведомой поверхности в контактной паре использован набор элементов поверхности рабочего органа.

2. Ведомая поверхность (SLAVE) – грунт, т.к. он разрушается в результате взаимодействия с Ведущей поверхностью. Для этой поверхности использован набор узлов, описывающих конечный объем грунта.

Для предотвращения проскальзывания при

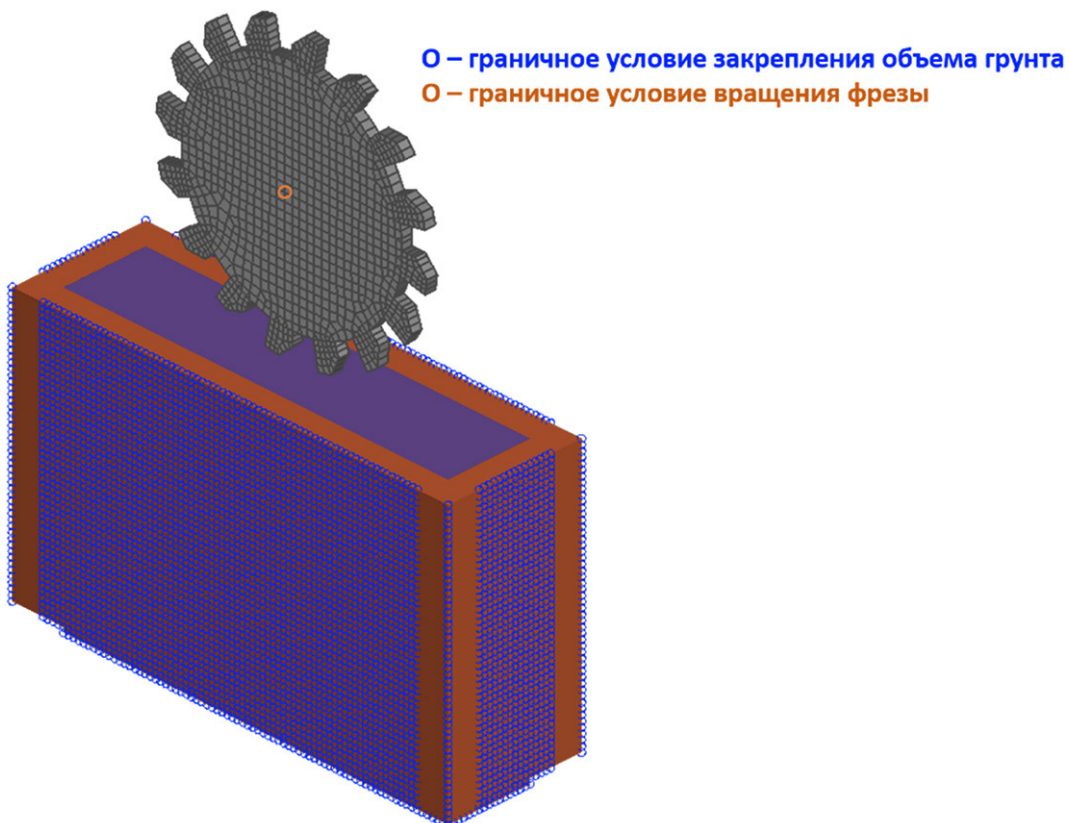


Рисунок 7 – Граничные условия в Abaqus-модели

взаимодействии был задан коэффициент трения 0,3 при помощи инструмента *FRICTION.

ПК Abaqus обладает большим количеством видов расчетов в зависимости от поставленной задачи. В нашем случае мы использовали явный динамический расчет (*DYNAMIC, EXPLICIT). Он применяется для динамического анализа перемещений и напряжений с использованием явного интегрирования. Процедура явного интегрирования подразумевает разделение процесса на множество малых интервалов времени, а также требует меньшего количества расчетных ресурсов для осуществления расчетов. Интервал деления времени процесса определялся автоматически и мог оперативно меняться программой в процессе счета в зависимости от минимального размера элемента, определяющего конечный объем грунта.

Для поддержания стабильного значения приращения времени применялся оператор изменения массы элемента (*VARIABLE MASS SCALING). Он изменяет плотность материала в деформированном элементе в зависимости от заданного значения приращения времени, тем самым выполняя условие равновесия и сохраняя эффективность расчетов.

При настройке модели задавались ключевые слова для получения данных об энергиях, деформациях, напряжениях, разрушениях грунта, перемещениях рабочего органа. Визуализация напряжений, деформаций, перемещений, разрушений (*OUTPUT, FIELD) обеспечивалась использованием необходимых ключевых слов и интервала вывода результатов для элементов, контакта и узлов (EVF, LE, PEEQ, S, DMICRT, SDEG, STATUS, SDV, UT). Вывод напряжений, деформаций, энергий в

графическом виде (*OUTPUT, HISTORY) обеспечивался заданием ключевых слов и интервала вывода результатов для элементов и узлов (ALLAE, ALLCD, ALLCW, ALLDC, ALLDMD, ALLFD, ALLIE, ALLKE, ALLMW, ALLPD, ALLPW, ALLSE, ALLVD, ALLWK, ETOTAL, CF, RF, RM, S, PRESS, PEEQ).

Результаты

В результате моделирования была построена модель резания грунта фрезой с плоским резцом, разрушающая бесконечный объем грунта. В процессе симуляции резания видны ударные нагрузки, передаваемые фрезой грунту.

Из рисунка 5 видно что при резании напряжения распространяются не только в плоскости резания, но и по нормали к этой плоскости. Таким образом, распространение напряжений в моделируемом объеме грунта позволяют определить объем сопротивления резанию.

Ударные нагрузки особенно хорошо видны на графике напряжений. Каждый скачок напряжений отражает удар резца об поверхность грунта. В процессе резания грунта напряжения в грунте начинают распространяться по всему объему грунта, это видно из растущих значений напряжений в элементах, находящихся вне плоскости резания.

Выводы

Построена топологическая модель рабочего органа землеройной машины и бесконечного объема грунта. Определены граничные условия для бесконечного объема грунта. Определены граничные условия и условия движения для рабочего органа землеройной машины. Задана пластич-

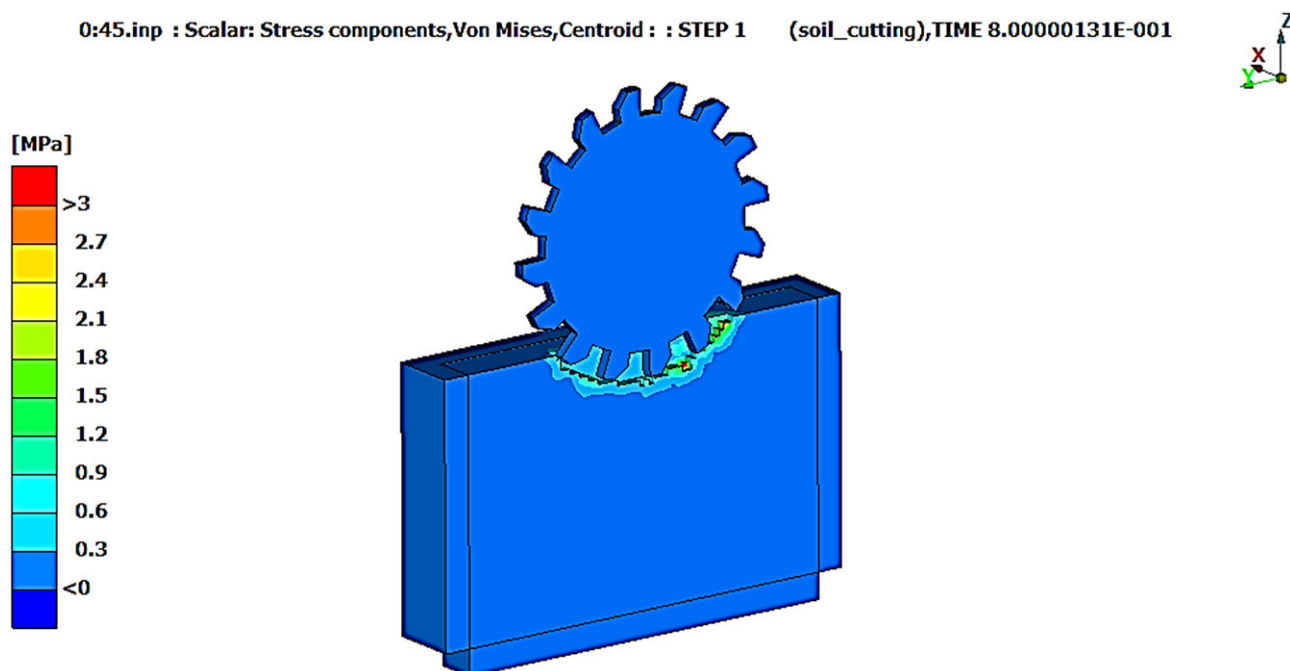


Рисунок 8 – Градиенты напряжений в конечном объеме грунта

ная модель Дрюкера-Прагера для определения свойств грунта. Заданы динамические условия расчета задачи в ПК Abaqus. Заданы параметры для вывода в численном и графических форматах деформации грунта, критерия Мизеса, баланса энергий, сил.

Полученные градиенты распространения напряжений позволяют определить объем и энер-

гию сопротивления резанию.

Полученная модель послужит основой для дальнейшего изучения резания грунтов с различными условиями: резание под слоем глинистого раствора, резание, варьирование материала. На основе этой модели будет построена модель для определения объема сопротивляющегося резанию грунта и определению энергии этого объема.

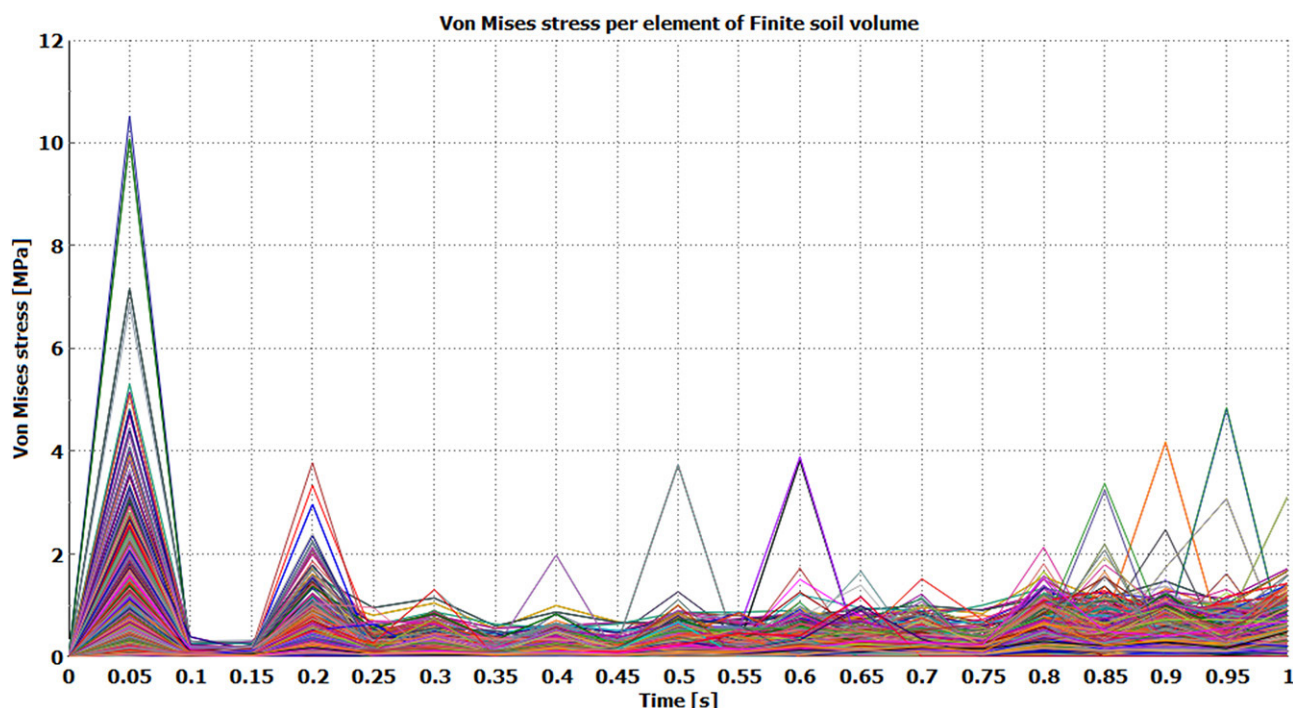


Рисунок 9 – График напряжений в элементах в процессе резания грунта

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадыров А.С., Мулдагалиев З.А., Нурмаганбетов А.С., Курмашева Б.К., Жунусбекова Ж.Ж. Теоретические основы проектирования и расчета бурильных и фрезерных землеройных машин / Под ред. Кадырова А.С. – Караганда, 2015. – 220 с.
2. Ветров Ю.А. Машины для земляных работ / Под ред. Ю. А. Ветрова. – 6-е изд., дораб. и доп. – Киев: Вища школа, 2019. – 384 с.
3. Горячкин В.П. Собрание сочинений. Т. 2. – М.: Наука, 2012. – 258 с.
4. Домбровский М.Г. Экскаваторы. – М.: Машиностроение, 2017. 320 с.
5. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 2018. – 376 с.
6. Кабашев Р.А. Грунтовые условия эксплуатации землеройной техники в Казахстане. – Алматы: КазАДИ, 2014. – 220 с.
7. Нураков С.Н., Нурсагатов С.Т. Тенденции развития конструкций фрезерных и рабочих органов // Современность, информационный мир и молодежь: Тезисы докладов международной научно – практической конференции. – Караганда: Институт актуального образования «Болашак», 2013. – С. 87-88
8. Ганюков А.А., Алтынбаев А.Ж. Анализ силовых методов расчета разрушения грунтовых сред и обоснование нового подхода к теории резания грунта // Труды университета. – Караганда: КарТУ, 2022, № 4 (89). – С. 274-279.
9. N. Stromblad. Modeling of Soil and Structure Interaction Subsea. Master's thesis in Applied Mechanics: 2014:09 – Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden, 2014. – P. 70.
10. <https://info.simuleon.com/blog/modeling-extreme-deformations-and-soil-structure-interaction-for-deep-sea-applications-with-abaqus>
11. <http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm>

Abaqus бағдарламалық кешеніндегі топырақ көлемін кесу процесін модельдеу

¹ГАНЮКОВ Александр Анатольевич, PhD, аға оқытушы, sgn2002@mail.ru,

^{1*}АЛТЫНБАЕВ Әсет Жанатұлы, докторант, altynbaev.aset@gmail.com,

¹ДҮЙСЕНБАЕВ Ермек Шүйіншібекұлы, докторант, yermek_dyssenbaev@mail.ru,

¹«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Қазақстан, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Зерттеудің мақсаты – Abaqus бағдарламалық кешеніндегі тегіс кескіш кескішпен топырақтың шексіз көлемін кесу процесін модельдеу алгоритмін жасау. Кесуге тәзімділіктің энергиясы мен көлемінің болуы туралы гипотеза берілген. Топырақ көлеміндегі соққы толқындарының таралуын талдау әр түрлі диаметрлі кескішпен топырақты кесу моделін құрды. Топырақ көлемінің моделі үшін шекаралық шарттар анықталды. Сызықтық беріліс қорабы бар айналмалы кескіштің шекаралық шарттары анықталды. Кристалдық мәндерге жеткенде элементтерді бұзу мүмкіндігі бар Дрюкер-Прагердің пластикалық моделі қолданылды. Азу тістің топырақ бетіне соғуы кезінде топырақтағы кернеулер анықталады. Кесу кедергісінің энергиясы мен көлемінің болуы туралы гипотезаны растау алынды. Abaqus бағдарламалық кешенінде кесу процесін модельдеуге арналған ұсыныстар берілген.

Кілт сөздер: көлік техникасы, топырақты кесу теориясы, жер қазу машиналары, топырақты кесу күштері, кесу энергиясы, Дрюкер-Прагердің пластикалық моделі, жердегі қабырға, Abaqus бағдарламалық кешені.

Modeling the Process of Cutting the Volume of Soil in the Software Package Abaqus

¹GANYUKOV Alexandr, PhD, Senior Lecturer, sgn2002@mail.ru,

^{1*}ALTYNBAYEV Aset, Doctoral Student, altynbaev.aset@gmail.com,

¹DYUSENBAEV Ermek, Doctoral Student, yermek_dyssenbaev@mail.ru,

¹NPISC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», Kazakhstan, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

*corresponding author.

Abstract. The purpose of the study is to develop an algorithm for modeling the process of cutting an infinite volume of soil with a flat cutter in the software package Abaqus. The hypothesis of the existence of cutting resistance energy and volume is given. Analysis of shockwave propagation in soil volume is given. Model of soil cutting by milling cutter of different diameter is constructed. Boundary conditions for the model of volume of ground are determined. Boundary conditions for rotary cutter with linear feed are determined. The Drucker-Prager plastic model with the possibility of failure of elements when they reach critical values is used. Stresses in the ground when the cutter hits the ground surface are determined. Confirmation of a hypothesis about existence of energy and volume of resistance to cutting is received. Recommendations for modeling the cutting process in the software package Abaqus are given.

Keywords: transport engineering, soil cutting theory, earthmoving machines, soil cutting forces, cutting energy, Drucker-Prager plastic model, wall in soil, Abaqus software package.

REFERENCES

1. Kadyrov A.S., Muldagaliyev Z.A., Nurmaganbetov A.S., Kurmasheva B.K., Zhunusbekova Zh.Zh. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya i rascheta buril'nyh i frezernykh zemlerojnykh mashin / Pod red. Kadyrova A.S. – Karaganda, 2015. – 220 p.
2. Vetrov Yu.A. Mashiny dlya zemlyanykh rabot / Pod red. Yu.A. Vetrova. – 6-e izd., dorab. i dop. – Kiev: Vishcha shkola, 2019. – 384 p.
3. Goryachkin V.P. Sobranie sochinenij. T. 2. – Moscow: Nauka, 2012. – 258 p.
4. Dombrovskij M.G. Ekskavatory. – Moscow: Mashinostroenie, 2017. 320 p.
5. Zelenin A.N. Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami. – Moscow: Mashinostroenie, 2018. – 376 p.
6. Kabashev R.A. Gruntovye usloviya ekspluatatsii zemlerojnoj tekhniki v Kazahstane. – Almaty: KazADI, 2014. – 220 p.
7. Nurakov S.N., Nursagatov S.T. Tendencii razvitiya konstrukcij frezernykh i rabochih organov // Sovremennost', informacionnyj mir i molodezh': Tezisy dokladov mezhdunarodnoj nauchno – prakticheskoy konferencii. – Karaganda: Institut aktual'nogo obrazovaniya «Bolashak», 2013. – Pp. 87-88.
8. Ganyukov A.A., Altynbaev A.J. Analiz silovykh metodov rascheta razrusheniya gruntovih sred i obosnovanie novogo podhoda k teorii rezaniya grunta // Trudi Universiteta. – Karaganda: KarTU, 2022, No. 4 (89). – Pp. 274-279.
9. N. Stromblad. Modeling of Soil and Structure Interaction Subsea. Master's thesis in Applied Mechanics: 2014:09 – Chalmers University of Technology. Goteborg, Sweden, 2014. – P. 70.
10. <https://info.simuleon.com/blog/modeling-extreme-deformations-and-soil-structure-interaction-for-deep-sea-applications-with-abaqus>
11. [Http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm](http://130.149.89.49:2080/v6.14/books/usb/default.htm)