Министерство образования и науки Российской Федерации Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Институт прикладной математики и механики

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

_____ А.М. Кривцов

«___»____20__г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА НА ПОВЕРХНОСТЬ МАРСА

по направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»

по образовательной программе

01.04.03_03 «Механика и цифровое производство»

Выполнил

студент гр.23642/2

Руководитель

Д.ф.-м.н., профессор

Д.В.Богданов

Е.А.Иванова

Санкт-Петербург 2018

РЕФЕРАТ

На 33 с., 27 рисунков, 11 формул, 6 таблиц, 2 графика

ANSYS, ДРУКЕР-ПРАГЕР, МАРС-6, СКИАПАРЕЛЛИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАДЕНИЯ, МОДЕЛЬ ПОЧВЫ, МКЭ

В данной работе рассмотрено моделирование падения спускаемых аппаратов "Скиапарелли" и "Марс-6". Методы моделирования почвы в программном комплексе Ansys. Эксперимент по проверке характеристик почвы в задаче с динамической постановкой. Сравнены результаты моделирования с реальной деформацией почвы.

THE ABSTRACT

33 pages, 27 pictures, 11 equations, 6 tables, 2 graphics

ANSYS, DRUCKER-PRAGER, MARS-6, SCHIAPARELLI, DROP SIMULATION, SOIL MODEL, FEM

In this work model operation of falling of «Skiaparelli» and «Mars-6» landers are considered. Methods of model operation of the soil in the Ansys program complex. An experiment on verification of characteristics of the soil in a task with dynamic statement. Results of model operation are compared to actual deformation of the soil.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5
1. Литературный обзор7
1.1 Обзор неудачных посадок спускаемых аппаратов7
1.1.1 Спускаемый аппарата «Скиапарелли»7
1.1.2 Спускаемый аппарат «Марс – 6»9
1.2 Метод конечных элементов 12
1.2.1 Реологические модели, используемые для моделирования
процессов деформирования почвы13
1.2.2 Реологическая модель Друкера-Прагера 14
1.2.3 Дополнительные уравнения 16
2. Экспериментальная часть 19
2.1 Экспериментальное исследование кембрийской глины 19
2.2 Математическая модель эксперимента
2.3 Сравнение результатов эксперимента и математической модели 22
3.3 Расчетная часть 24
3.1 Моделирование падение СА «Скиапарелли» 24
3.2 Моделирование падения СА «Марс-6»
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

введение

Развитие космической сферы в последние десятилетия требует развития не только понимания процессов полета, запуска космических аппаратов, но и условия их посадки.

Одной из особенностей процесса посадки являются характеристики грунта, на который будет совершена посадка. Правильный учет всех параметров, их физико-механических свойств имеет значение при выборе места посадки космического аппарата. Сделав правильный выбор, можно с большой вероятностью говорить об успешной посадке.

Однако, бывают случаи «неудачного» приземления аппаратов. Приземление особенно проблематично, если это другая планета, и нет точных координат падения. В таких ситуациях основная задача состоит в понимании, мог ли так упасть и оставить такие следы данный космический аппарат. Или все же это падение метеоритов.

Для решения такой задачи, находясь за много тысяч километров от места падения, и имея только данные по фото, целесообразно пользоваться методами математического моделирования. В частности использовать пакеты, работающие на методе конечных элементов (МКЭ). Данные пакеты позволяют моделировать падения тел с возможностью варьирования параметров. Однако, моделирование процессов, связанных с поведением почвы в динамической постановке на данный момент недостаточно изучено.

В связи с этим основной целью работы является разработка конечноэлементной модели процесса падения спускаемого аппарата с целью определения размеров кратера, которые могут быть использованы при поиске «Марс – 6».

Для достижения целей, указанных выше, целесообразно решить задачи:

1) Выбрать модель грунта для конечно-элементной модели;

- Исследовать параметры материала при динамической постановке (сравнить экспериментальные результаты с результатами конечноэлементной модели);
- 3) Произвести тестовый расчет с моделью «Скиапарелли»;
- 4) Произвести расчет с моделью «Марс 6», с варьированием угла атаки;
- 5) Оценить результаты конечно-элементного моделирования.

1. Литературный обзор

1.1 Обзор неудачных посадок спускаемых аппаратов

1.1.1 Спускаемый аппарата «Скиапарелли»

«Скиапарелли» - спускаемый аппарат, созданный Европейским космическим агентством и российской госкорпорацией Роскосмос. Разрабатывался в рамках программы «Экзомарс» по исследованию Марса. Основной задачей аппарата была отработка методик входа в атмосферу Марса, снижения, а так же посадки.

Запуск «Скиапарелли» состоялся 14 марта 2016 года. Запуск осуществлялся с космодрома Байконур. Полет к орбите красной планеты длился семь месяцев.

«Скиапарелли» вошел в атмосферу Марса 19 октября 2016 года на скорости 21000 км/ч. Далее, в течение нескольких минут торможение проходило за счет трения о плотные слои атмосферы – аэродинамическое торможение. Когда высота достигла 11 км над поверхностью, а скорость снизилась до 1700 км/ч, аппарат выпустил парашют для дальнейшего торможения.

Планируемое место посадки – плато Меридиана, район в котором ранее производилась посадки марсохода «Оппортьюнити» в 2004 году. Данный район посадки был выбран не случайно: во-первых, относительно гладкая равнина, эллипс, с размерами 100 на 15 км; во-вторых, параметры почвы данной области известны и изучены для прогнозирования посадки. На рис. 1 представлен план процедуры посадки.

Однако данная процедура пошла не по плану. На высоте 3.7 км инерциальная измерительная система дает сбой, и передает отрицательные значение высоты – как если бы аппарат находился на поверхности. Этого было достаточно, чтобы аппарат отстрелил парашют. Далее на несколько секунд были включены тормозные двигатели (по плану должны были работать порядка 30 секунд, и снизить скорость более чем на 200 км/ч) и ряд «наземных» приборов.



Рисунок 1.Предполагаемая процедура посадки СА "Скиапарелли"

Согласно отчету Европейского космического агентства (ЕКА), аппарат свободно падал с высоты 2-4 км и набрал высокую скорость. В момент столкновения с поверхностью скорость составляла более 300 км/ч. Данные о размере кратера были получены со снимков HIRISE. По данным ЕКА размер кратера около 3 м в диаметре и около 0,5 м в глубине.



Рисунок 2. Кратер от падения "Скиапарелли"

1.1.2 Спускаемый аппарат «Марс – 6»

«Марс-6» - советская автоматическая межпланетная станция, которая была запущена в 1973 году, 5 августа. Данная станция относится к серии М-73 программы «Марс-6». Основной целью программы было изучение красной планеты.

«Марс-6» полноценная самостоятельная станция. В ее состав входил как орбитальный аппарат, служащий для исследования орбиты, так и спускаемый аппарат, целью которого было изучение самой планеты.

Спускаемый аппарат в свою очередь тоже состоял из следующих «компонентов»:

- марсианская станция, автоматическая (форма сферическая, яйцеобразная);
- тормозной (аэродинамический) щит;
- контейнер, вмещающий в себе парашют и двигатели мягкой посадки;

Массовые характеристики: общая масса космического аппарата 3880 кг; масса спускаемого аппарата, входящего в атмосферу красной планеты – 844 кг; масса марсианской станции после посадки – 355 кг.

12 марта 1974 года при входе в атмосферу Марса скорость составляла 5600 м/с (20160 км/ч). Угол входа – 11.7°. Первоначальное торможение осуществлялось при помощи аэродинамического щита. Торможение щитом длилось 2.5 мин. При достижении скорости 600 м/с (2160 км/ч) был выпущен парашют. Снижение при помощи парашюта происходило в течение 151.6 секунды. Далее была получена телеметрия, подтверждающая выдачу команды на включение двигателей мягкой посадки. Новые сигналы со спускаемого аппарата предполагалось получить через 143 секунды, однако этого не произошло. Планируемый район посадки – низменная часть Эритрейского моря. На рис. 3 показано оборудование для спуска «Марс-6».



Рисунок 3. Тормозное оборудование "Марс-6"

Точной причины неудачной посадки неизвестно. Вот некоторые из предполагаемых версий:

- превышение амплитуды колебаний спускаемого аппарата под действием бури на Марсе;
- отказ радиокомплекса.

В настоящий момент точное место падения неизвестно. В последние несколько лет группа энтузиастов пытается найти следы падения «Марс-6» по фото сделанные камерой HiRise. В 2013 году они уже нашли другой космический аппарат «Марс-3». Он успешно сел на красную планету в 1971 году, но проработал всего 14 секунд, не успев передать место своего приземления. На рис. 3 представлен найденный «Марс-3». На рис. 4 камерой HiRise, представлены участки, которые сняты В районе предполагаемого падения «Марс-6». Данная работа призвана помочь в поисках «Mapc-6».



Рисунок 4. "Марс-3"



Рисунок 5. Участки Марса, снятые камерой HiRise

1.2 Метод конечных элементов

В последние несколько десятилетий математическое моделирование процессов является актуальным. При помощи математической модели мы можем получить результаты тех исследований, которые бы требовали больших финансовых затрат, либо составляли технические сложности. Одна из таких задач – моделирование пластических деформаций материалов. Данные таких исследований дают огромную, иногда единственную возможность в изучении параметров процессов деформаций. Для математического моделирования пластических деформаций сплошных сред в основном применяют метод конечных элементов (МКЭ). Как же работает метод конечных элементов? Вся область, в которой хотим найти решение дифференциальных уравнений в частных производных, разбивается на конечное количество элементов. В каждом элементе выбирается аппроксимирующая функция. Значения функции в узлах, а также на границе каждого элемента является решением задачи и заранее неизвестны. Из условия равенства значений на границах соседних элементов выбираются коэффициенты аппроксимирующих функций. Далее составляется система линейных алгебраических уравнений. Число уравнений соответствует числу неизвестных в узлах, на которых ищется решение.

В настоящий момент существует много программных комплексов, которые работают на основе метода конечных элементов. Вот некоторые из наиболее популярных МКЭ пакетов: ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, LS-Dyna и т.д. Некоторые системы автоматизированного проектирования (САПР), такие как: SolidWorks, CATIA, NX и т.д. тоже вступили в «гонку» МКЭ. Однако в указанных САПР пакетах присутствуют только простейшие модели материалов, и позволяют решить только простейшие задачи.

В настоящей работе используется программный комплекс Ansys. ANSYS — универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматизированных

инженерных расчётов (САПР, или САЕ) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей.

1.2.1 Реологические модели, используемые для моделирования процессов деформирования почвы

Правильность результатов математической модели зависит не только от программы для расчета конечно-элементной модели, но в основном от используемой модели материала и граничных, начальных условий.

В программах на основе МКЭ реологическая модель материала представляет собой набор определенных математических уравнений, которые описывают поведение, структуру среды. Так же в исходные математические уравнения входит ряд параметров необходимых для более точного описания реологической модели.

При аналитических исследованиях параметров упруго-пластических сред, в данном случае почвы, наиболее часто используют реологические модели материалов Мора-Кулона, Друкера-Прагера и т.д.

Одной из самых простых и приемлемых моделей для описания реологии упруго-пластической среды является модель Мора-Кулона. Ввиду своей простоты данная модель получила широкое распространение, однако, данная модель исключает из расчета главное промежуточное напряжение σ_2 . Исключение этого напряжения противоречит результатам экспериментов. Наличие углов на поверхности текучести усложняет численное решение задач. Данных недостатков не имеет модель Друкера-Прагера. Поверхность текучести не имеет углов, и представляет собой конус. Для расчетов в данной работе была выбрана модель Друкера-Прагера.



Рисунок 6. Графическое изображение поверхностей текучести а) модель Мора-Кулона; б) модель Друкера-Прагера

1.2.2 Реологическая модель Друкера-Прагера

Как говорилось выше, поверхность течения модели Друкера-Прагера не имеет углов, не изменяется в процессе прогрессивной текучести, следовательно, нет закона упрочнения. Модель Друкера-Прагера представляет собой эластично-идеально-пластичный материал.



Рисунок 7. Напряженно-деформируемое поведение материала Друкера-Прагера

Для нахождения эквивалентного напряжение для модели Друкера-Прагера используется уравнение:

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + \left[\frac{1}{2}\{s\}^T[M]\{s\}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(1)

где:

 $\sigma_{\rm m}$ – главное (гидростатическое) напряжение = $\frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z);$

 $\{s\}$ – вектор девиаторных напряжений = $\{\sigma\}$ – $\sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$;

β-константа материала;

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Данное уравнение является модификацией критерия текучести по Мизесу, учитывающая влияние компонента гидростатического напряжения: чем выше гидростатическое давление (всестороннее давление), тем выше предел текучести.

β – константа материала, которая задается уравнением:

$$\beta = \frac{2\,Sin\varphi}{\sqrt{3}(3-Sin\varphi)}\tag{2}$$

ф – угол внутреннего трения материала (почвы).

Предел текучести материала находится из уравнения:

$$\sigma_y = \frac{6c \, Cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - Sin\varphi)} \tag{3}$$

с – сцепление материала (почвы)

Критерий текучести задается выражением:

$$F = 3\beta\sigma_m + [\frac{1}{2}\{s\}^T [M]\{s\}]^{\frac{1}{2}} - \sigma_y = 0$$
(4)

1.2.3 Дополнительные уравнения

В данной работе рассматривается динамическая постановка задачи, соответственно, уравнений для определения всей системы недостаточно. Так как удар о поверхность происходит очень быстро (менее 1 сек), был использован метод явной динамики.

Уравнения с частными производными, решаемые в явном анализе динамики, выражают сохранение массы, импульса и энергии в Лагранжевых координатах. Они вместе с материальной моделью и набором начальных и граничных условий определяют полное решение задачи.

Для Лагранжевых формулировок, доступных в настоящее время в явной системе динамики, сетка перемещается и искажается с материалом, который она моделирует, и сохранение массы автоматически выполняется. Плотность в любой момент можно определить по текущему объему зоны и ее начальной массе:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V} \tag{5}$$

Уравнения в частных производных, выражающие сохранение импульса, связывают ускорение с тензором напряжений:

$$\rho \ddot{x} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \ddot{y} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \ddot{z} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}$$
(6)

Закон сохранения энергии выражается через:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz} \dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx} \dot{\epsilon}_{zx})$$
(7)

Эти уравнения решаются явно для каждого элемента модели на основе входных значений в конце предыдущего временного шага. Малые приращения времени используются для обеспечения стабильности и точности решения. Заметим, что в явной динамике мы не ищем какой-либо формы равновесия; мы просто берем результаты из предыдущей точки времени, чтобы предсказать результаты в следующей точке времени. Итерация не требуется.

В правильно поставленной задаче явного моделирования динамики масса, импульс и энергия должны быть сохранены. Обеспечивается только сохранение массы и импульса. Энергия накапливается со временем, и ее сохранение проверяется во время решения. Обратная связь по качеству решения обеспечивается с помощью сводок по сохранению импульса и энергии.

Чтобы сэкономить на времени расчета, и так как невозможно рассмотреть сетку размером с планету, необходимо ограничить сетку граничным условием, которое позволяет бегущим волнам проходить через него, не отражая энергию и волну обратно в систему.



Для одномерной волны в направлении Х:

$$dp - \rho c \, du = 0, \frac{dx}{dt} = -c \tag{8}$$

где:

рс – акустический импеданс (ρ – локальная плотность, с – локальная скорость звука;

dp – изменение давления по нормали к волне;

du – изменение скорости по нормали к волне.

Так как предполагается, что никакая энергия волны не возвращается назад в направлении х, ошибка в применении вышеупомянутого условия на нехарактерном направлении является в целом небольшой, и это применено на передающую границу в форме:

$$p = p_{ref} + \left[u_N - u_{ref}\right] \left[\rho c\right]_{ref}$$

$$\tag{9}$$

где:

u_N - компонента средней скорости, нормальной к границе;

ρс_{ref} – является импедансом материала;

u_{ref} – скорость, устанавливаемая на граничное условие;

Для первоначально постоянной структуры при нулевом давлении справочные значения обычно устанавливаются к нулю. В этом случае мы имеем:

$$p = [\rho c]_{ref} u_N \tag{10}$$

Уравнение 10 точно описывает поведение упруго-продольной волны, распространяющейся в бесконечной среде.

2. Экспериментальная часть

2.1 Экспериментальное исследование кембрийской глины

Главная задача данной работы – определение размеров кратера, оставленного космическим аппаратом после падения. Основной проблемой является определение параметров почвы. В настоящий момент достаточно мало информации относительно использования параметров почвы, таких как угол внутреннего трения и сцепления в динамической постановке задачи. С целью проверки корректности параметров был проведен эксперимент.

Цель эксперимента: проверить корректность использования параметров почвы, полученных в лабораторных испытаниях в математическом моделировании.



Установка, использованная при проведении эксперимента:

Рисунок 9. Схема экспериментальной установки

В эксперименте использовалась стеклянная колба, заполненная кембрийской глиной для лепки. Данный вид был использован, так как для него известны все физические параметры.

Свойство	Значение
Плотность, р [кг/м ³]	1500
Модуль Юнга, Е [МПа]	5
Коэффициент Пуассона, μ	0.3
Сцепление, с [кПа]	4.5
Угол внутреннего трения, ф [°]	30

Таблица 1. Физические параметры кембрийской глины

Далее в данную колбу с высоты 50 см с нулевой начальной скоростью сбрасывался металлический шар. Использовался металлический шар диаметром: 15 мм. Проводилась высокоскоростная съемка со скоростью 240 кадров/с. И измерялся «кратер», полученный в результате падения. Данные полученные из эксперимента были сравнены с математической моделью, рассчитанной в программном комплексе Ansys, Explicit Dynamics.

2.2 Математическая модель эксперимента

Для сравнения с экспериментом была построена математическая модель. Моделирование почвы производилось в Лагранжевой механике. Для описания модели материала была использована модель Друкера-Прагера со свойствами, описанными выше (табл. 1). Падающий шар представляет собой абсолютно твердое тело, для ускорения решения. Так же, для ускорения решения тело падает с высоты 10 мм, но начальная скорость уже равна 3.1 м/с. Данная скорость получена исходя из расчетов падения тела под действием силы тяжести.

$$u = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 * 9.8066 * 0.49} = 3.1 \, (\text{M/c}) \tag{11}$$



Рисунок 10. Расчетная модель с наложенной сеткой

Расчётная модель содержит 39749 элементов, размер элементов сетки почвы 3 мм.



График 1. Сходимость результатов от размера элементов



Рисунок 11. Начальные и граничные условия

Время расчета 0.1 с, с шагом 1.941*10⁻⁷ с.

2.3 Сравнение результатов эксперимента и математической модели

В ходе эксперимента были получены следующие результаты, представленные на рис.12.



Рисунок 12. Полученные результаты

слева – эксперимент, справа - математическое моделирование

Данный эксперимент был проведен 10 раз.

№ эксперимента Размер кратера, мм

1	17,9		
2	18		
3	18		
4	18,1		
5	18,2		
6	17,9		
7	18		
8	17,9		
9	18,3		
10	17,8		
Теблица 2. Розули тети сусоновимонто			

Габлица 2	2.	Результаты	эксперимента
-----------	----	------------	--------------

В ходе эксперимента получили размер кратера ~18 мм, что соответствует данным математического моделирования.

3.3 Расчетная часть

3.1 Моделирование падение СА «Скиапарелли»

В ходе над данной работой основной проблемой было – недостаток данных. Исследование грунта, проводимые на поверхности Марса, часто сильно отличаются друг от друга. В качестве тестовой предварительной задачи было выбрано моделирование падения «Скиапарелли».

Данный пример был выбран в качестве тестового из соображений наличия большого количества данных, а также «качества» этих данных. Так как спускаемый аппарат совершил свое неудачное приземление в 2016 г, все данные актуальны и по сей день, поэтому было решено использовать данную задачу как тестовую.



Рисунок 13. Фото кратера, образованного от падения "Скиапарелли"

Для моделирования почвы использовалась модель почвы Друкера-Прагера, со свойствами:

Свойство	Значение
Плотность, р [кг/м ³]	1000 - 2000
Модуль Юнга, Е [МПа]	10 – 165

Коэффициент Пуассона, µ	0.35
Сцепление, с [КПа]	15 – 28
Угол внутреннего трения, ф [°]	15 – 21

Таблица 3. Физические параметры поверхности Марса в месте падения "Скиапарелли"

Данные в табл. 3 приведены с тем разбросом, который приведен в источниках. При расчете математической модели использовались усредненные данные.



Свойство	Значение
Диаметр, м	1.65
Высота, м	1
Масса, кг	432

Рисунок 14. Расчетная и реальная модели "Скиапаралли"

Таблица 4. Характеристики расчетной модели СА "Скиапарелли"







Рисунок 15. Расчетная сетка модели падения "Скиапарелли"

Данная сетка, моделирующая поверхность Марса, состоит из 328125 hex элементов. Размер элементов 0.2 м. Размер расчетной области по высоте выбран гораздо больше чем двум другим измерениям ввиду невозможности применения граничного условия импеданса на нижнюю грань.



Рисунок 16. Граничные и начальные условия

Для ускорения расчёта использовалась симметричная постановка задачи. Спускаемый аппарат не имеет возможности передвижения вдоль оси Z, а так не имеет вращения вокруг оси X и Y. Время расчет 0.1 с. Скорость выбрана 83 м/с исходя из данных ЕКА. Варьируемым параметром был угол атаки спускаемого аппарата к поверхности. В результате моделирования были получены следующие результаты:



Рисунок 17. Размер кратера при угле атаки 0°



Рисунок 18. Размер кратера при угле атаки 15°

3.2 Моделирование падения СА «Марс-6»

Модель падения «Марс-6» сильно схожа с моделью «Скиапарелли». В данном случае отличие заключаются в параметрах почвы:

Свойство	Значение
Плотность, р [кг/м ³]	1000 - 2000
Модуль Юнга, Е [МПа]	8 - 500
Коэффициент Пуассона, µ	0.35
Сцепление, с [КПа]	19 – 60

Угол внутреннего трения, ф [°]	5 - 35

Таблица 5. Физические свойства почвы в месте падения "Марс-6"

При расчете использовались усредненные данные из табл. 5.



Рисунок 19. Трехмерная модель "Марс-6" (без аэродинамического щита), макет "Марс-6" (с щитом)

Свойство	Значение
Диаметр, м	1.6
Высота, м	1.6
Масса, кг	355





Рисунок 20. Расчетная сетка модели падения "Марс-6"

Данная сетка, моделирующая поверхность Марса, состоит из 150000 hex элементов. Размер элементов 0,2 м. Так же, как и для модели падения



Рисунок 21. Начальные и граничные условия

Для данной модели так же используется симметричная постановка задачи. Скорость бралась такая же, как и при падении «Скиапарелли». Время расчета 0,1 с. В данной задаче варьировался не только угол атаки, но также и какой стороной падает спускаемый аппарат.

В результате были получены следующие результаты при падении «Марс-6» острой строй вниз:



Рисунок 22. Размер кратера при угле атаки 0°



Рисунок 23. Размер кратера при угле атаки 5°



Рисунок 24. Размер кратера при углу атаки 15°



Рисунок 25. Размер кратера при угле атаки 45°

Результаты при падении «Марс-6» тупой стороной вниз:

A LAND AND A				
	—— 3.3 м	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		●
	0.000	1.500	3.000 (m)	
	0.750	2.250		

Рисунок 26. Размер кратера при угле атаки 10°



Рисунок 27. Размер кратера при угле атаки 45°

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математическое моделирование поведения почвы представляет собой инструмент прогнозирования поведения тела, помещенного на нее, в данном случае, спускаемого аппарата.

В настоящей работе описание поведения почвы проводится на основании модели Друкера-Прагера. В результате данной работы были проведены экспериментальные исследования свойств кембрийской глины. Результаты эксперимента хорошо коррелируются с результатами КЭ модели. При эксперименте размер кратера ~18 мм, по результатам моделирования ~18 мм.

Выбранная модель позволяет исследовать почву и получать достаточно точные результаты.

Разработаны конечно-элементные модели падения тела на поверхность почвы.

Результатами решения тестовой задачи моделирования падения «Скиапарелли» стали размеры кратера. Данные размеры достаточно точно соответствуют реальным результатам, предоставленным Европейским космическим агентством. По результатам ЕКА размер кратера ~3 м. По результатам моделирования размер кратера 3-4 м (в зависимости от угла падения).

Результатами решения задачи моделирования падения «Марс-6» так же стали размеры кратера. В данной задаче результаты размера кратера составили 2,5 – 4,3 м в зависимости от угла. Полученные результаты могут помочь в поисках пропавшего «Марс-6».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Авершин С.Г. Некоторые свойства процессов сдвижения горных пород и вопросы расчета сдвижений. Л.: ВНИМИ, 1961. -№43. 3-21 с
- Барон Л.И., Глатман Л.Б., Губен- ков Е.К. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Том І. Научно-методические основы. Разрушение резцовым инструментом. – М.: Наука, 1968. – 216 с.
- Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. - 317 с
- Демидов, Н. Э., Базилевский, А. Т., & Кузьмин, Р. О. (2015). Грунт Марса: Разновидности, Структура, Состав, Физические Свойства, Буримость И Опасности Для Посадочных Аппаратов. *Астрономический Вестник*, 49(4), 243–261.
- Журавков М.А., Коновалов О.Л., Богдан С.И., Прохоров П.А., Круподеров А.В. Компьютерное моделирование в геомеханике. -Мн.: БГУ, 2008. - 443 с.
- Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. М.: Углетехиздат, 1947. -180с.
- Малышев М.В., Болдырев Г.Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): Учебное пособие. –ПГАСА; изд-во АСВ. –М., 2004. – 320 с.: ил.
- Симончик С.Г., Крунов Н.П. Справочное пособие для обработки материалов инженерно-геологических изысканий. - М: ДАР\ВОДГЕО, 2005. - 94 с.
- Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987. – 221 с.
- Arvidson, R. E. (2004). Localization and Physical Property Experiments Conducted by Opportunity at Meridiani Planum. *Science*, *306*(5702), 1730– 1733.
- 11.Bartli R.K. Stability and Failure of Sand Arches / R.K. Bartli, R. Risnes // SPEJ. April 1981. P. 236–248.

- 12.Borja R.I., Sama K.M., Sanz P.F.On the numerical integration of threeinvariant elastoplastic constitutive models. – 2003. – P. 1227-1258.
- 13.Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design.Quarterly of Applied Mathematics. 1952. v. 10. P. 157–165.
- 14.Kohnke P. ANSYS. Theory Reference. Southpointe, ANSYS, inc. 1998.
- 15.Nahm, A. L., & Schultz, R. A. (2007). Outcrop-scale physical properties of Burns Formation at Meridiani Planum, Mars. *Geophysical Research Letters*, 34(20), 1–5.
- 16.Zhang B.; Jain M.; Zhao C.; Bruhis M.; Lawcock R.; Ly K. Experimental calibration of density-dependent modified drucker-prager/cap model using an instrumented cubic die for powder compact. Powder Technology, Elsevier, v. 204, n. 1, p. 27–41, 2010.
- 17.https://cae-club.ru
- 18.https://ru.wikipedia.org
- 19.https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/ExoMars