

## **8 ФИЗИКА, МЕХАНИКА И МАТЕМАТИКА В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

---

УДК 539.3

### **РЕШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ О СМЕЩЕНИИ СЛОЯ ГРУНТА ЖЕСТКИМ УПРУГИМ ТЕЛОМ**

*М. Х. АБДУЛКАДЕР*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

При проектировании строительных машин необходимо иметь информацию об особенностях взаимодействия рабочих органов машин с перемещаемым грунтом. Анализ литературы показал, что процесс динамического контактного взаимодействия твердых тел с грунтом изучен недостаточно. Это объясняется сложностью моделирования упруго-пластического поведения грунта при больших деформациях. Целью представленной работы является установление напряженно-деформированного состояния грунта при его взаимодействии с твердыми телами.

В общем случае деформирование грунта описывается сложными упруго-пластическими моделями, для которых предел текучести формирует поверхность текучести, уравнение которой принимают в зависимости от критерия прочности, по которому производят расчет. Результаты исследований показали, что с высокой степенью точности описать поведение грунта позволяет модель Друкера-Прагера.

Рассматривался процесс среза грунта твердым телом, имеющим форму призмы с одной наклонной гранью. При создании конечноэлементной модели в среде программного комплекса ABAQUS применен восьмиузловой конечный элемент C3D8, который использует линейную интерполяцию в каждом направлении и представляет собой элемент первого порядка. С целью более точного определения напряжений и деформаций в месте контакта твердого тела с грунтом были введены в рассмотрение несколько объемов с разной концентрацией конечноэлементной сетки. Общее число элементов модели составило около 40000, узлов – около 45000.

Материал отвала считался линейно 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  $\nu = 0,2$ , плотность  $= 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Параметры модели Друкера-Прагера: когезия равна 2,9 МПа, угол трения равен 32°.

При создании контактной пары в обоих случаях использован контакт типа «поверхность – поверхность». Основание объема грунта было закреплено по горизонтали и вертикали. Для упругого тела задавалась постоянная скорость движения в направлении горизонтальной оси.

Были произведены расчеты напряженно-деформированного состояния основания при различных скоростях движения тела и толщинах слоя срезаемого материала. Получено, что разрушение материала инициируется не только в области острия материала, но и в средней части области контакта режущей кромки с грунтом, как это происходит и на практике.

Выполнен расчет движущих сил, которые надо приложить, чтобы обеспечить движение твердого тела с заданной скоростью. Результаты расчетов показали, что на начальной стадии движения наблюдается близкий к линейному закон изменения силы, затем градиент роста значения силы уменьшается. По истечении времени 0,1 с после начала движения сила резания достигает некоторой величины, близкой к константе. Представленные схемы демонстрируют колебательный характер изменения силы, который объясняется особенностями свойств грунта.

Рассчитаны значения максимальной силы резания в зависимости от толщины срезаемого слоя для разных скоростей движения отвала. Полученные графики показали, что увеличение скорости резания ведет к увеличению значения приложенной силы, причем увеличение скорости резания в 2 раза вызывает рост значения силы резания в 2,4–2,8 раза.

Таким образом, применение разработанной методики компьютерного моделирования контактного взаимодействия твердых тел с грунтом позволяет оптимизировать конструкции отвалов бульдозеров с целью обеспечения наибольшей эффективности их эксплуатации.

УДК 539.3

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ С ЗАГЛУБЛЕННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТЬЮ МЕТОДОМ ПРЯМЫХ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛОВ**

*А. М. АРУТЮНЯН, Ел. Л. КУЗНЕЦОВА, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ, Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ*  
*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),*  
*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (НИИ механики),*  
*Российская Федерация*

Рассматривается плоская нестационарная задача о распространении объемных возмущений в однородном линейно-упругом полупространстве, имеющем заглубленную полость произвольной геометрии и расположения с гладкой границей. Предполагается, что массовые силы в полупространстве отсутствуют. Используем прямоугольную декартову систему координат. Одна из осей направлена вдоль невозмущенной границы полупространства, вторая – вглубь полупространства.

Предполагается, что полость имеет бесконечную протяженность в направлении одной из осей, что приводит к плоской постановке задачи. Полагаем, что на контуре полости заданы перемещения, напряжения или смешанные граничные условия.

Движение упругого полупространства описывают уравнения Ламе в перемещениях. Также в постановку задачи включаются соотношения Коши и закон Гука. Полагаем, что в начальный момент времени полупространство с полостью находится в состоянии покоя, что приводит к нулевым начальным условиям.

Метод решения основан на динамической теореме взаимности [1], согласно которой работа системы сил первого состояния на перемещениях второго состояния равна работе системы сил второго состояния на перемещениях первого.

Перемещения и напряжения первого состояния являются искомыми, а в качестве перемещений и напряжений второго состояния используются фундаментальные решения (объемные функции влияния) для упругого пространства (в плоской постановке – для упругой плоскости).

С использованием этих фундаментальных решений и теоремы взаимности поставленная задача сводится к разрешающей системе двумерных интегральных уравнений, ядрами которых выступают упомянутые фундаментальные решения. Для её решения используется метод прямых граничных интегралов с дискретизацией по времени [2, 3], согласно которому контур полости и часть границы полупространства, до которой в данный момент времени доходят возмущения, аппроксимируются прямолинейными граничными элементами, на каждом из которых перемещения и напряжения в данный момент времени считаются постоянными. При этом контурные интегралы приближённо заменяются конечными суммами интегралов по этим граничным элементам. В результате на каждом временном шаге задача сводится к решению системы алгебраических уравнений, коэффициенты которой представляют собой интегралы от фундаментальных решений по граничным элементам. Решениями этой системы являются искомые перемещения и напряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-38-70024).

### **Список литературы**

- 1 **Новацкий, В.** Теория упругости / В. Новацкий. – М. : МИР, 1975. – 872 с.
- 2 **Арутюнян, А. М.** Плоская нестационарная задача о воздействии поверхностного давления на упругое полупространство с заглубленной цилиндрической полостью / А. М. Арутюнян, Ел. Л. Кузнецова, Г. В. Федотенков // Тезисы докладов IV Международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». – М. : МАИ, 2016. – С. 13–14.
- 3 **Крауч, В.** Методы граничных элементов в механике твердого тела / В. Крауч, А. Старфилд. – М. : МИР, 1987. – 328 с.