

Б.Б. Тогизбаева, З.К. Сансызбаева

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РУДНОЙ МАССЫ

THE ANALYSIS OF THE TENSELY-STRAINED CONDITION OF ORE MASS

Исследование напряженно-деформированного состояния рудной массы проводилось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. При построении имитационной модели системы «бункер-рудная масса» был использован конечный элемент тетраэдр solid92.

Ключевые слова: Напряженно-деформированное состояние, бункер, выгрузка, образование сводов, сводообразующий размер отверстия.

The research of the intense deformed condition of ore mass was conducted by the method of final elements in the program ANSYS complex. At the creation of imitating model of system «the bunker-ore mass» a final element SOLID92 tetrahedron was used.

Keywords: Tensely-strained condition, the bunker, arch formation, unloading, arch formative size of the hole.

ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Анализ напряженно-деформированного состояния рудной массы в подвижном составе производится с использованием программного комплекса ANSYS. При этом необходимо решить следующие задачи:

- разработка модели объекта исследования;
- построение конечно-элементной сетки;
- расчет напряженно-деформированного состояния рудной массы;
- определение функциональной зависимости напряжений σ_x^{\max} , σ_y^{\max} , σ_{xy}^{\max} , перемещений u_x и u_y от значения модуля Юнга;
- обработка полученных результатов;

- обобщение данных и выводы.

В качестве объекта исследования предложено:

- рудная масса в бункере с щелевым выпускным отверстием.

Модель нагружается распределенной нагрузкой $q = 45$ МПа в вертикальной плоскости.

Для анализа зависимости напряжения и перемещения от модуля упругости необходимо провести несколько экспериментов с разными значениями модуля упругости E_6 .

База конечных элементов ANSYS содержит более 100 видов конечных элементов, каждый из которых определяет применимость элемента к той или иной области расчетов (прочностной, тепловой анализ, движение жидкости и т. п.), характерную форму элемента (линейную, плоскую, в виде бруска и т. д.), а также двумерность или трехмерность элемента как геометрического тела. Для поставленных задач был выбран элемент SOLID92.

SOLID92 – это усложненная версия двумерного, трехузлового элемента. Усовершенствование элемента обеспечивает более точные результаты исследований со смешанной автоматической сеткой. Также данный конечный элемент поддерживает неправильные формы без искажений точности [1].

Исследование напряженно-деформированного состояния рудной массы проводилось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. При построении имитационной модели системы «бункер-рудная масса» был использован конечный элемент тетраэдр SOLID92.

При выполнении условия непрерывности перемещений с математической точки зрения метод конечных элементов эквивалентен методу Ритца. Расчет по МКЭ проводится в следующей последовательности:

1. Разбиение сплошной среды тела на конечные элементы и назначение узлов, в которых определяются перемещения.
2. Выбор зависимости перемещения внутри каждого элемента через перемещения узлов. С помощью этой зависимости определяются деформации и напряжения через узловые перемещения.
3. Построение матрицы жесткости элементов и составление системы линейных алгебраических уравнений равновесия.
4. Решение системы алгебраических уравнений.
5. Определение компонентов напряженно-деформированного состояния тела.

Количество конечных элементов 8870. Граничные условия: грани расчетной модели жестко закреплены, т.е. перемещение по осям координат равны нулю. Максимальные напряжения возникают в нижней части образующегося купола. Максимальные напряжения на рисунках обозначены MX, минимальные – MN. Значения напряжений приведены в правой части рисунка

Поскольку рудная масса сопротивляется разрушению при растяжении значительно слабее, чем при сжатии, то очевидно, что разрушение свода будет формироваться и распространяться в зоне растягивающих напряжений.

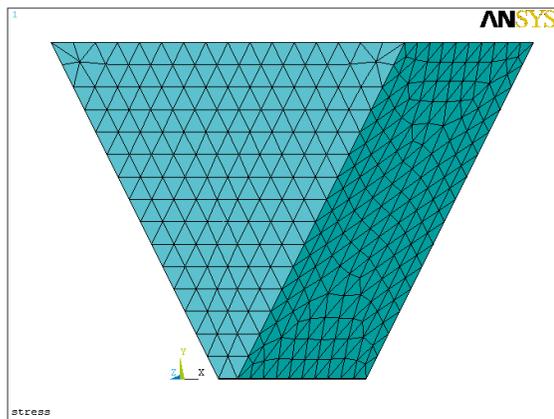


Рис. 1
Конечно-элементная модель бункера

Для моделирования условий контакта, задавались коэффициенты трения между рудной массой и стенкой бункера.

Анализ результатов моделирования позволил изучить закономерности изменения напряженно-деформированного состояния рудной массы, что затруднительно получить при аналитическом исследовании, а также позволил установить зоны образования сводов [2; 3].

Используя прямоугольную систему координат и обозначая координаты точки через (x, y, z) смещения через (u, v, w) , деформации через $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$, а напряжения через $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$, можно записать соотношения между смещениями и деформациями в виде

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z};$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}.$$

(1)

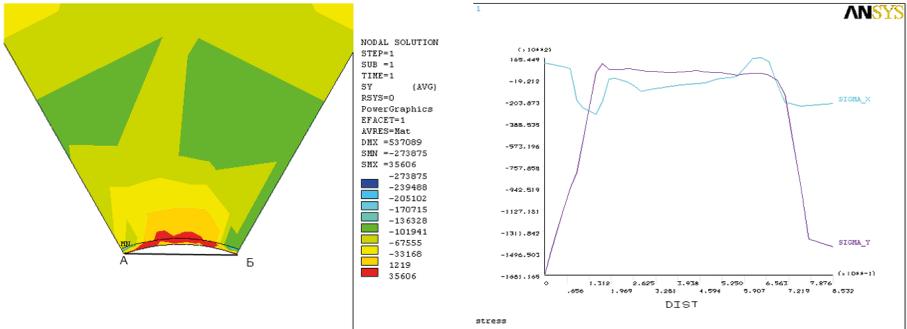


Рис. 2

Изменение напряжения рудной массы в выпускном отверстии по линии АБ

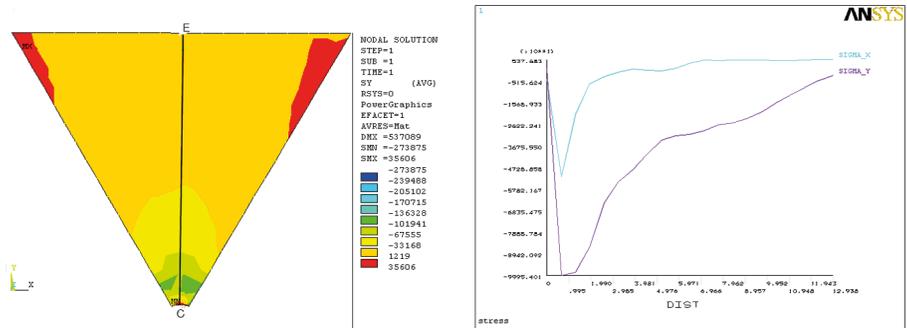


Рис. 3

Значения напряжений в опасном сечении

Связь между напряжениями и деформациями можно выразить следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= d_{11}\varepsilon_x + d_{12}\varepsilon_y + d_{13}\varepsilon_z; \\ \sigma_y &= d_{21}\varepsilon_x + d_{22}\varepsilon_y + d_{23}\varepsilon_z; \\ \sigma_z &= d_{31}\varepsilon_x + d_{32}\varepsilon_y + d_{33}\varepsilon_z; \\ \tau_{xy} &= d_{44}\gamma_{yx}; \quad \tau_{yz} = d_{55}\gamma_{yz}; \quad \tau_{zx} = d_{66}\gamma_{zx}, \end{aligned}$$

причем

$$\begin{aligned} d_{11} &= d_{22} = d_{33} = E(1-\nu) / \{(1+\nu)(1-2\nu)\}; \\ d_{12} &= d_{13} = d_{23} = E\nu / \{(1+\nu)(1-2\nu)\}; \\ d_{44} &= d_{55} = d_{66} = E / \{2(1+\nu)\}; \\ d_{11} &= d_{22}, \end{aligned}$$

где E и ν соответственно модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона.

С помощью матриц эту систему уравнений можно представить следующим образом:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (4)$$

где фигурные скобки $\{\}$ обозначают вектор – столбец, а квадратные скобки $[\]$ – матрицу, т.е.

$$[D] = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{66} \end{pmatrix} \quad \{\varepsilon\} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix}$$

(аналогично и $\{\sigma\}$).

Предполагая, что внутри отдельных элементов напряжения (а, следовательно, и деформации) постоянны, для смещений внутри элемента можно пользоваться приближенными уравнениями первого порядка

$$\begin{aligned} u &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}x; \\ v &= a_{21} + a_{22}x + a_{23}y + a_{24}x; \\ w &= a_{31} + a_{32}x + a_{33}y + a_{34}x. \end{aligned} \quad (5)$$

Обычно в качестве дополнительного общего выражения используется принцип минимума потенциальной энергии заключенный, например, в бункерах. Можно использовать и условия равновесия сил, по проще применять принцип минимума потенциальной энергии. Энергию деформации элемента можно выразить с помощью интеграла по объему одного элемента, т.е. $\iiint_V dv$ в виде

$$U = \iiint_V \frac{1}{2} (\varepsilon)^T \{\sigma\} dV \quad (6)$$

Потенциальная энергия может быть выражена через u , v , и w , т.е. в виде $\Pi(U, V, W)$. В то время как u , v , и w являются функциями, величина Π является числом. Принцип наименьшей потенциальной энергии утверждает, что «среди всевозможных u , v , w истинными являются те u , v , w при которых значение Π минимально». Это равносильно (в используемой терминологии) уравнениям равновесия сил.

Используя алгебраические преобразования, получим

$$\Pi = \frac{1}{2} \iiint_V \{u\}^T [B] \perp [D][B]\{u\} dv - \{f\}^T \{u\} = \frac{V}{2} \{u\}^T [B]^T [D][B]\{u\} - \{f\}^T \{u\} \quad (7)$$

где V – объем элемента. Считая $[B]$, $[D]$ и $\{f\}$ установленными, для нахождения $\{u\}$, при котором Π минимально, нужно определить $\{u\}$, удовлетворяющее условию обращения в нуль частных производных от Π по компонентам $\{u\}$, для чего необходимо решить совокупность уравнений:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial u_i} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial v_i} = 0; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial w_i} = 0. \quad (8)$$

Матричный множитель обычно обозначают

$$[K] = V [B]^T [D][B] \quad (9)$$

и называют матрицей жесткости. Закончив на этом предварительные вычисления, можно получить уравнение (10), которое принимает вид

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (10)$$

и имеет ту же форму, что и закон Гука (коэффициент упругости) x (величина деформации) = (нагрузка) и выражает «закон Гука для нагрузок и смещений шарниров тетраэдра».

Исследования закономерности изменения напряженно-деформированного состояния рудной массы позволили аналитически определить области образования свода в бункере и расчетные схемы для определения максимального сводообразующего размера спуска бункера при совместной работе с ленточным питателем и определения угла наклона передней и задней стенок спуска бункера.

Литература

1. Тутанов С. К. Управление состоянием массива горных пород: учеб. пособие. Караганда, 2004.
2. Тогизбаева Б. Б. Выбор основных параметров истечения рудной массы из бункеров. Караганда, 2010.
3. Тогизбаева Б. Б. Технологические показатели работы горно-транспортного оборудования. Караганда, 2012.