

УДК 622.83

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СДВИЖЕНИЙ ГОРНОГО МАССИВА НАД ОДИНОЧНОЙ ЛАВОЙ

Сахно И. Г.

(ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

Грищенко Н. Н., Голубев Ф. М.

(УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

У статті підкреслено необхідність вдосконалення способів прогнозу зрушень земної поверхні, за рахунок розробки та розвитку геомеханічних моделей, що дають можливість враховувати конкретну гірничо-технологічну ситуацію. Приведена методика будування моделі зрушень масиву над виробленим простором лави, основана на нелінійному рішенні методом кінцевих елементів. Приведено приклад розрахунку зрушень для умов шахти «Красно-лиманская».

In article emphasized the need for improved methods of forecasting changes the earth's surface, due to the design and development of geomechanical models enable to take into account the specific situation of mining and technology. Present methods of building model changes produced an array of space lava, based on nonlinear finite element solution. The examples of calculating changes to the mine "Krasno-Limanskaya."

Своевременный и правильный выбор мер охраны зданий и сооружений земной поверхности при их подработке определяется прогнозом сдвижений. Поэтому повышение надежности прогнозирования деформаций земной поверхности является одной из актуальнейших научно-практических задач для Донбасса, как региона с развитой и постоянно растущей сетью подземных выработок.

В настоящее время расчет сдвижений и деформаций земной поверхности производится согласно Правилам [1] по методу типовых кривых, основанному на данных натурных замеров сдвижений земной поверхности. Однако динамика развития сдвижений земной поверхности определяется изменением напряженно-деформированного состояния горного массива под действием технологических процессов подземных горных работ. Поэтому достоверные методы прогноза должны учитывать реальный механизм развития сдвижений в массиве и его особенности при конкретных параметрах технологических схем.

При исследовании геомеханических процессов широкое распространение нашли методы физического и математического моделирования.

Методы физического моделирования, реализуемые в основном на эквивалентных моделях, позволяют получать достаточно качественную картину сдвижений и разрушений в породной толще. Однако реализация этих методов связана с большой трудоемкостью изготовления моделей, их тарировки, значительными затратами времени и относительно небольшим количеством получаемой информации.

Математическое моделирование, реализуемое с помощью аналитических и численных методов, является одним из основных современных инструментов, позволяющих исследовать напряженно-деформированное состояние породного массива при решении различных задач геомеханики, который позволяет получать качественные характеристики и количественные зависимости. В геомеханике в последнее время широко используются численные методы моделирования: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод граничных элементов, метод дискретных элементов, комбинированные методы. При этом лидирующее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ). Метод был впервые применён на ЭВМ в 1944 году Дж. Аргирисом. Основной вклад в развитие МКЭ в геомеханике сделали О. К. Зенкевич [2-4], Б. З. Амусин [5], Ж. С. Ержанов [6], А. Б. Фадеев [7].

При моделировании процессов сдвижений необходимо учитывать тот факт, что корректное их описание не может быть до-

стигнуто с помощью решения линейных упругих задач. Кроме того, большинство геомеханических процессов нелинейны по своей природе. Решение задач с нелинейностями в МКЭ проводится, как правило, итерационными методами Ньютона-Рафсона и Ньютона-Канторовича. При этом матрица жесткости уточняется на каждой итерации с помощью секущей линеаризации.

Рассмотрим задачу сдвижений породного массива и земной поверхности при отработке одиночной лавы на пласте пологого падения. Пласт условно принимаем горизонтальным, мощностью 2,0 метра. Структурный разрез пород принят для условий шахты «Краснолиманская». Моделируется отработка лавы длиной 200 м на глубине 760 м. В качестве рабочей принята гипотеза геостатики. Решение будем проводить с помощью МКЭ в объемной постановке. Геометрические размеры модели 1400×1000×100 м.

Применительно к нашей задаче для моделирования поведения грунтов и горных пород вызывает интерес упругопластическая модель, использующая уравнение состояния Друкера-Прагера, применение которой позволяет получить более точное приближение к реальным результатам [8].

Граничные условия модели. Согласно принятым при моделировании правилам в соответствии с принципом суперпозиции сил нижняя плоскость модели закрепляется от вертикальных перемещений, боковые грани от перемещений в соответствующих направлениях. Верхняя грань модели свободна. К модели не прилагаются никакие дополнительные нагрузки. Дается инерция $9,81 \text{ м/с}^2$.

Такая схема моделирования имеет минимум допущений и достаточно полно отражает моделируемый процесс.

Для адекватности результатов модели необходимо, чтобы при имитации процессов после отработки пласта лавой над ней образовались те же геомеханические зоны, что и в натуре. Проведем анализ существующих представлений о формировании сдвижений над одиночной лавой.

Профессор Казаковский Д. А. излагает процесс сдвижения в толще горных пород следующим образом. «При выемке пологопадающих и наклонных угольных пластов с обрушением кровли в сдвигающемся массиве можно выделить три основные зоны:

зону беспорядочного обрушения пород, зону прогиба пород с разрывом сплошности, зону прогиба без разрыва сплошности» [9]. Схема соответствующая данному представлению приведена на рисунке 1.

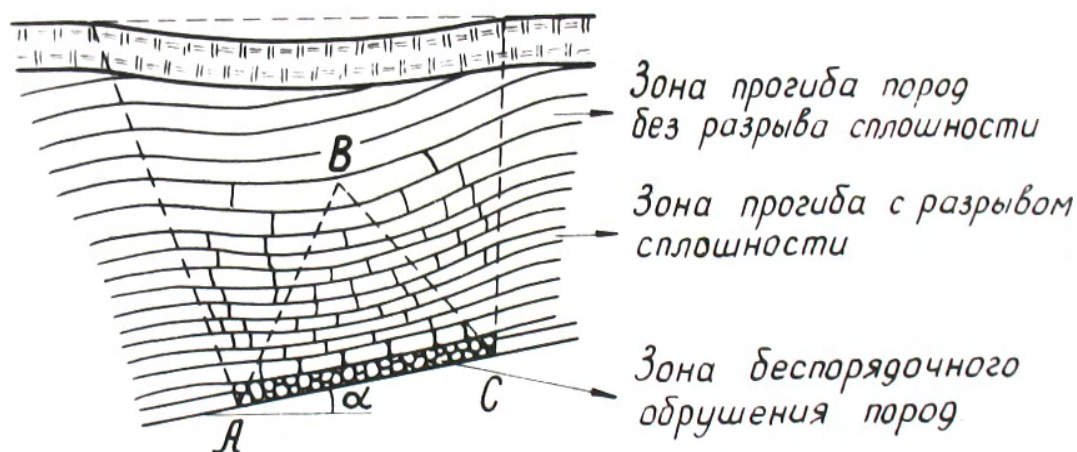


Рис. 1. Схема сдвижений горных пород на разрезе вкrest простирания пласта по Казаковскому Д. А.

Согласно гипотезе Г. Н. Кузнецова при управлении кровлей полным обрушением над выработанным пространством образуется две зоны: первая, непосредственно прилегающая к выработанному пространству – зона беспорядочного обрушения пород, вторая – зона упорядоченного обрушения. Во второй зоне блоки слоев образуют многозвенную шарнирную систему.

На рисунке 2 представлена схема сдвижений толщи пород вокруг отрабатываемой лавы предложенная Зорей Н. М. и Музафаровым Ф. И., где 1 – линия максимальных оседаний; 2 – граница зоны опорного давления; 3 – линия максимальных давлений; θ – угол максимального оседания пород; I – зона обрушенных и уплотненных пород; II – зона полных сдвижений; III – зона наибольших прогибов слоев с возможным образованием полостей и раскрытых трещин; IV – зона плавного прогиба без нарушения сплошности слоев; V – зона опорных давлений в кровле пласта; VI – зона прогиба прилегающих пород к наносам и нано-

сов с образованием мульды сдвижения на поверхности земли, VII – зона разгрузки, VIII – зона поднятия толщи горных пород, прилегающих к земной поверхности [10].

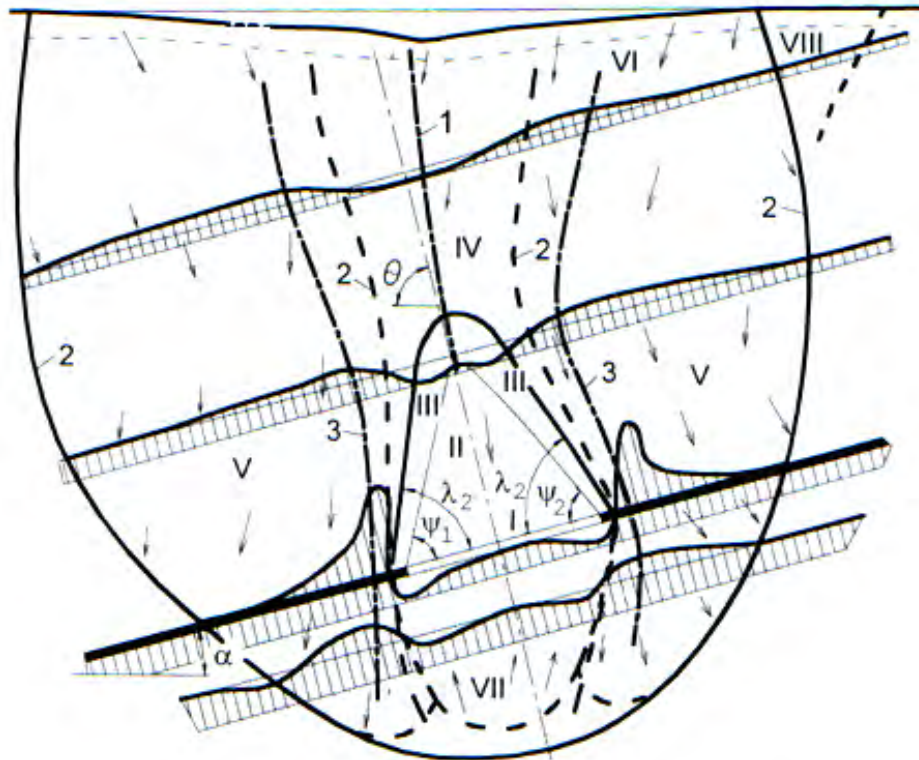


Рис. 2. Схема сдвижения толщи горных пород

Высота зоны I колеблется от 2 до 6 мощностей пласта. Эта зона имеет 2 системы трещин. Высота зоны II колеблется в пределах 0,6 – 0,8 от длины лавы. В этой зоне образуются углы полных сдвижений пород – ψ_1 и ψ_2 , которые примерно равны 60 – 70°. Размеры зоны II зависят от площади и формы выработанного пространства и глубины разработки. Кроме того, указанные размеры определяются структурным строением пород и их характеристиками. Высота зоны III равна высоте зоны II.

Подобную схему развития деформаций предлагает и А. А. Борисов (рис. 3).

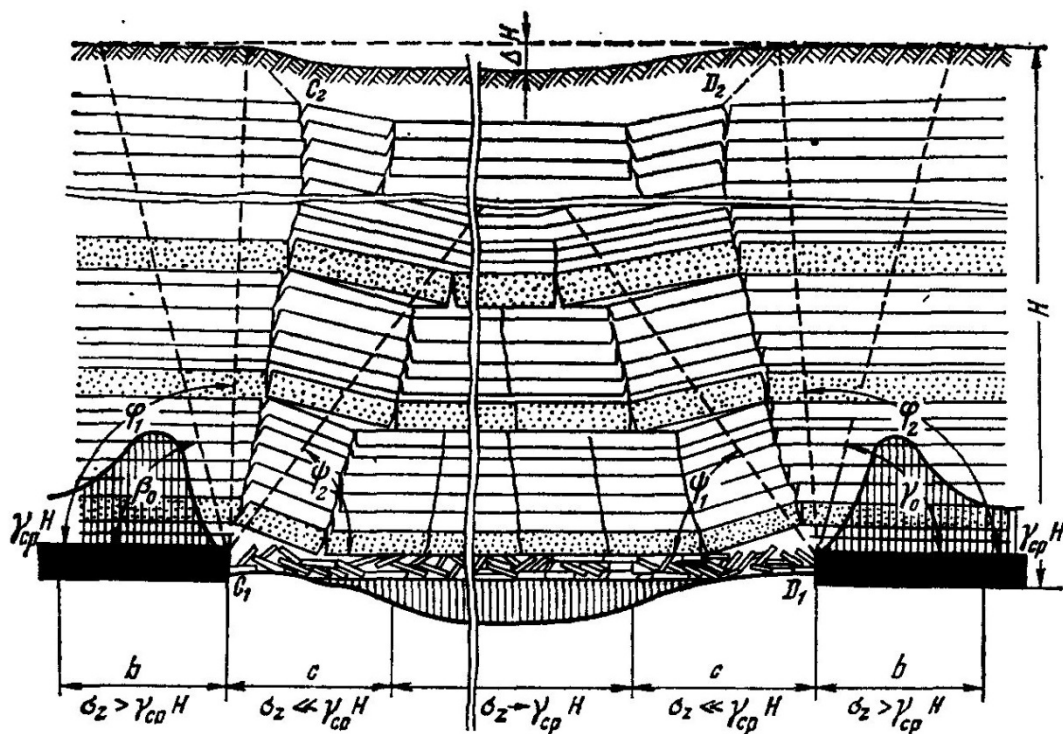


Рис. 3. Характер разрушения пород в режиме установившегося движения по А. А. Борисову [11]

Согласно его исследованиям после подработки можно выделить три зоны:

1. Зона интенсивного разрушения. Высота её может быть рассчитана по формуле

$$h = \eta \frac{h_b - h_c}{k_{cp} - 1}$$

где η – коэффициент запаса, принимается 2-3;

h_b – вынимаемая мощность пласта, м;

h_c – предел свободного опускания основной кровли, м;

k_{cp} – коэффициент разрыхления пород.

2. Зона разломов. В этой зоне породы перемещаются упорядочено.

3. Зона изгибов.

Таким образом, проведенный обзор позволяет сделать вывод, что над одиночной лавой, по мнению большинства исследователей, образуются три крупные зоны: зона беспорядочного об-

рушения пород, размеры которой от 2 до 8 мощностей вынимаемого пласта, зона упорядоченного обрушения, размеры, которой зависят от многих условий и достигают 0,6-0,8 длины лавы, зона прогибов, без разрыва сплошности.

При проведении численного моделирования для получения адекватных результатов необходимо учитывать наличие этих зон, и задавать свойства массива соответственно каждой зоне. Общая схема модели с указанными зонами приведена на рисунке 4. Распределение вертикальных смещений в модели приведено на рисунке 5, 6, горизонтальных на рисунке 7.

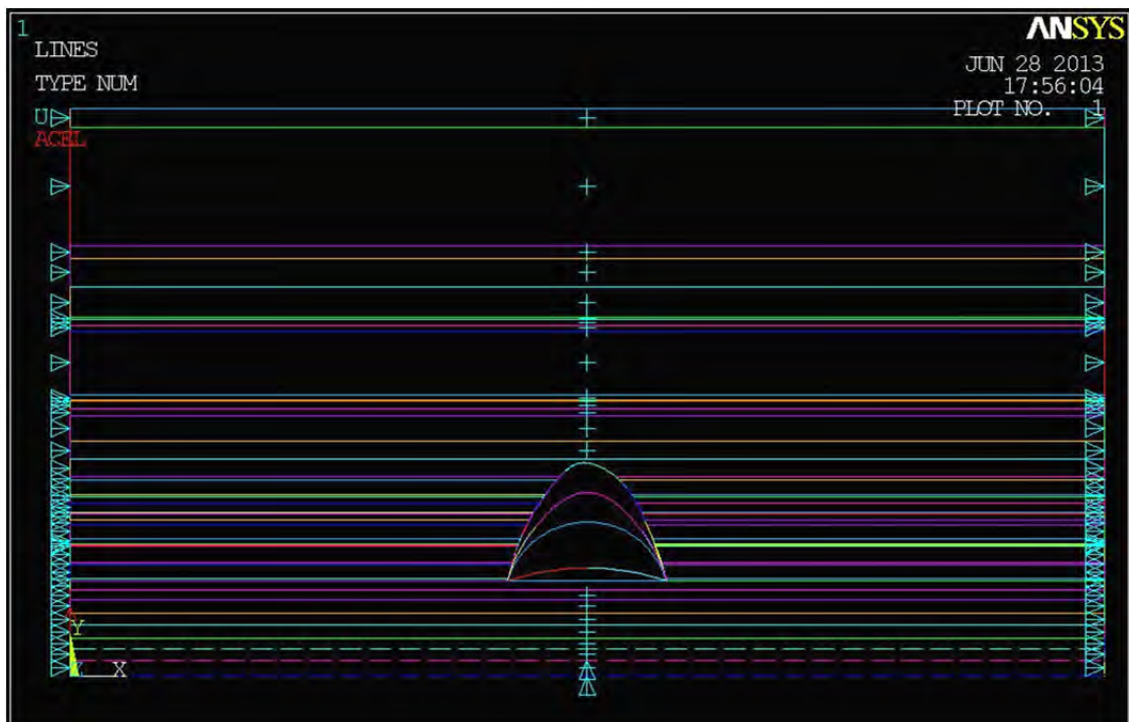


Рис. 4. Общая схема модели

Анализ результатов моделирования показывает, что максимальные вертикальные смещения поверхности составляют 1,45 м.

Построенная математическая модель является базовой для проведения дальнейших исследований, в частности для её калибровки.

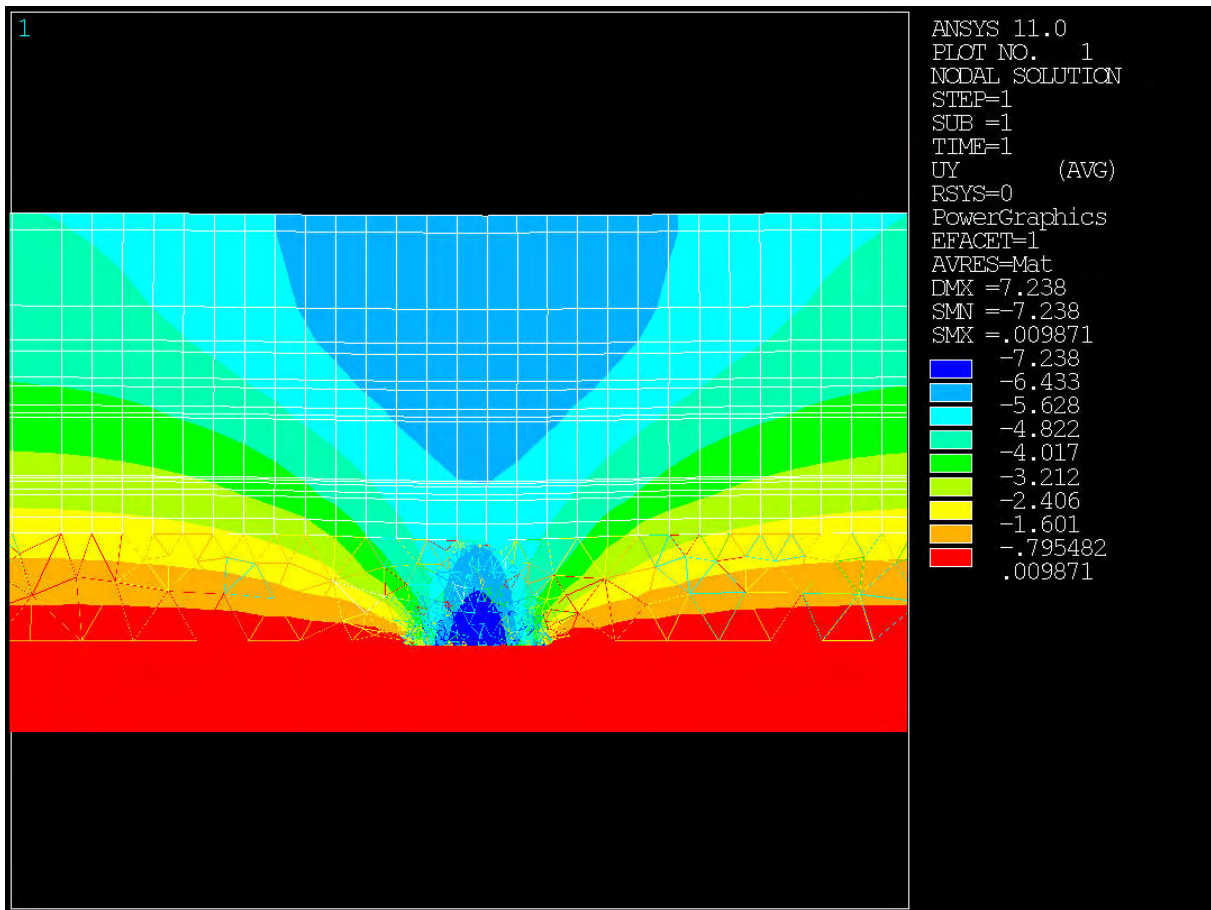


Рис. 5. Вертикальные смещения в модели

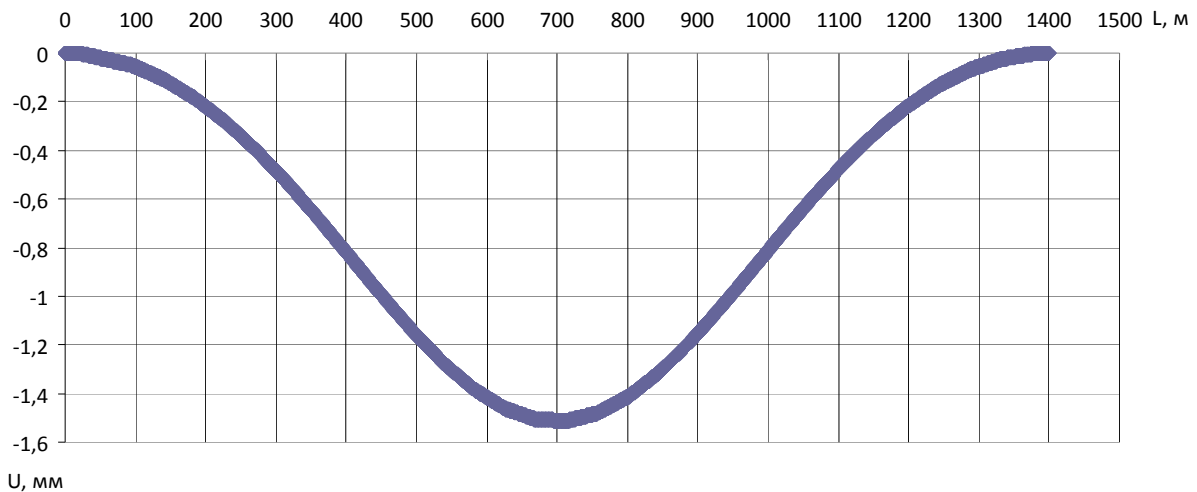


Рис. 6. Вертикальные смещения поверхности

Под калибровкой математической модели сдвижений и деформаций земной поверхности под воздействием подземных гор-

ных работ, будем считать приведение параметров этой модели в соответствии с параметрами, зафиксированными в результате натуральных наблюдений либо определенными по результатам прогноза по действующей методике, регламентированной Правилами [1].

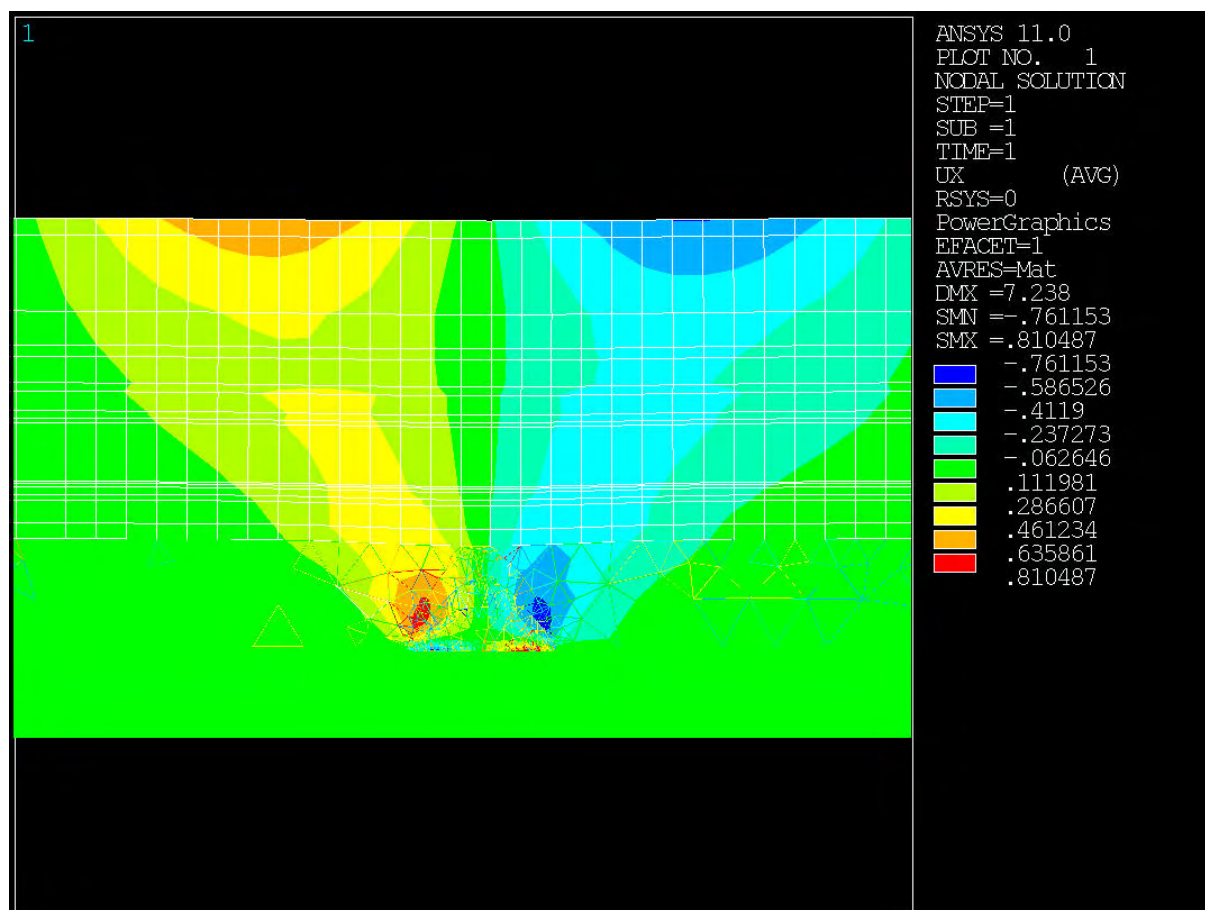


Рис. 7. Горизонтальные смещения в модели

Анализ результатов моделирования показывает, что максимальные вертикальные смещения поверхности составляют 1,45 м.

Параметрами, по которым производится калибровка математической модели, могут служить абсолютные деформации земной поверхности: оседания и горизонтальные сдвигения. Эти параметры относятся к выходным параметрам математической модели и определяют результаты её калибровки.

Достижение целей калибровки осуществляется изменением ряда других параметров математической модели – регулируемых параметров.

К числу таких параметров могут относиться: удельное сцепление слоев, угол внутреннего трения, модуль упругости пород, и др. Набор таких регулируемых деформационных и прочностных параметров, определяется исходя из степени влияния каждого из них на конечный результат калибровки. При этом диапазон изменения регулируемых параметров не должен превышать диапазон их возможных значений для задействованных в модели типов горных пород.

Алгоритм подобной многофакторной калибровки математической модели является достаточно сложным и требует проведения довольно трудоемких расчетов. Реализация данного алгоритма и исследование возможности автоматизации калибровки математической модели является целью дальнейших исследований.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом / Отраслевой стандарт. — К. : Мінпаливенерго України, 2004. — 127 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. — М. : Мир, 1975. — 539 с.
3. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. — М. : Мир, 1986. — 318 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг. — М. : Недра, 1974. — 368 с.
5. Амусин Б. З. Метод конечных элементов при решении задач геомеханики / Б. З. Амусин, А. Б. Фадеев. — М. : Недра, 1975. — 144 с.
6. Ержанов Ж. С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород / Ж. С. Ержанов, Т. Д. Каримбаев. — Алма-Ата : Наука, 1975. — 237 с.
7. Фадеев А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. — М. : Недра, 1987. — 221 с.
8. Касьян Н. Н. Моделирование структурно-неоднородных массивов горных пород с применением метода конечных элементов / Н. Н. Касьян, И. Г. Сахно, С. Г. Негрей / Науковий віс-

- ник національного гірничого університету. — 2008. — № 5. — С. 49—52.
9. Казаковский Д. А. Сдвигение земной поверхности под влиянием горных разработок, Углетехиздат, 1953.
 10. Зоря Н. М., Музафаров Ф. И. Схема механизма сдвижений толщи пород при выемке пологих пластов угля одиночной лавы // Уголь Украины. — 1966. — № 12. — С. 5—7.
 11. Борисов А. А. Механика горных пород и массивов. — М. : Недра, 1980. — 360 с.