

УДК 622.833

*д.т.н. Клишин Н.К.,  
к.т.н. Склепович К.З.,  
Пронь П.А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ ВЫРАБОТКИ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ**

*Досліджені напруження, деформації, порушення у подошві підготовчої виробки при вирішенні задач МСЕ для лінійно та нелінійно деформованих масивів.*

**Ключові слова:** *подошва виробки, МСЕ, напруження, деформації.*

*Исследованы напряжения, деформации, разрушения в почве подготовительной выработки при решении задач МКЭ для линейно и нелинейно деформированных массивов.*

**Ключевые слова:** *почва выработки, МКЭ, напряжения, деформации.*

Состояние подготовительных выработок во многом определяет безопасность и эффективность работы участков и шахты. Обеспечение устойчивости выработок – это ручная и трудоёмкая работа. На шахтах Донбасса трудоёмкость работ 80-85 чел.–см. на 1000т добытого угля. На глубоких горизонтах эксплуатируется 60% выработок, в том числе на глубинах 1000-1300 м – 14% [1]. В этих условиях более половины объёма работ приходится на ликвидацию последствий пучения почвы.

Особенно актуальна задача предотвращения пучения почвы в примыкающих к лавам выработках, в которых пучащие и сильно пучащие почвы составляют 79%, что в 2,9 раза больше, чем в основных выработках [2].

Для её решения необходимо исследовать напряженно-деформированное состояние массива горных пород вокруг выработок и его изменение под воздействием способов, средств предотвращения пучения почв, обосновать параметры воздействия на почву.

Пучение почвы подготовительной выработки – упруговязкопластическое деформирование породы, увеличение объёма пород вследствие образования микротрещин и разрушение пород. В работе [3] дано обоснование подхода и физической модели для изучения пучения почвы на

основе гипотезы о потере упругопластической устойчивости породного массива в окрестности одиночной выработки. Выделены четыре области: I – упругого деформирования; II – пластического деформирования; III – пучения почвы; IV – затухающего или незатухающего пучения.

В области упругого деформирования (I область) смещения и скорости смещения меньше на порядок, чем во II зоне и на два порядка, чем в III зоне, но в ней возможно вязкое деформирование и разрушение пород, что способствует развитию пластических и псевдопластических деформаций, пучению пород.

В связи с тем, что реальная зависимость между напряжениями и деформациями горных пород является криволинейной, необходимо массив горных пород в I области рассматривать как нелинейно-деформируемый.

Цель работы – исследовать напряженно-деформированное состояние почвы подготовительной выработки, подверженной влиянию лавы.

Метод исследования – моделирование массива горных пород методом конечных элементов.

Горно-геологические условия отработки пласта: мощность 1,25 м, в кровле – аргиллит мощностью 5,75 м, прочностью 30 МПа, выше известняк мощностью 2,5 м, прочностью 98 МПа. В почве расположен аргиллит мощностью 0,75 м, прочностью на сжатие 60 МПа, ниже которого алевролит мощностью 1,4 м, прочностью 50 МПа, а затем песчаник мощностью 5 м и прочностью 80 МПа. Угол падения пласта  $5^{\circ}$ . Глубина заложения выработки – 680 м.

Горнотехнические условия: система разработки – столбовая, длина лавы 200 м, ширина выработки 4,0 м, высота – 3 м, подрывка пород – верхняя.

Размеры модели: длина – 961 м; ширина – 1064 м; высота – 914 м, приняты с учетом влияния очистного забоя. Модель состоит из 45696 изопараметрических шести и восьмиугольных универсальных конечных элементов, размеры которых от  $0,25 \times 0,25 \times 0,25$  м у выработок и до  $100 \times 200 \times 100$  м у границ модели. На узлы граничных поверхностей модели наложены связи, ограничивающие их перемещения [4].

Решены задачи для линейно и нелинейно деформированных массивов. Область нелинейно деформированных участков массива пород вокруг выработки установили: в стенках выработки по результатам решения задач для линейно-деформируемого массива, а в кровле и в почве выработки – на основании расчетов по методике, изложенной в стандарте [5], которые равны высоте свода расслоившихся пород, приведенных в таблице 1.

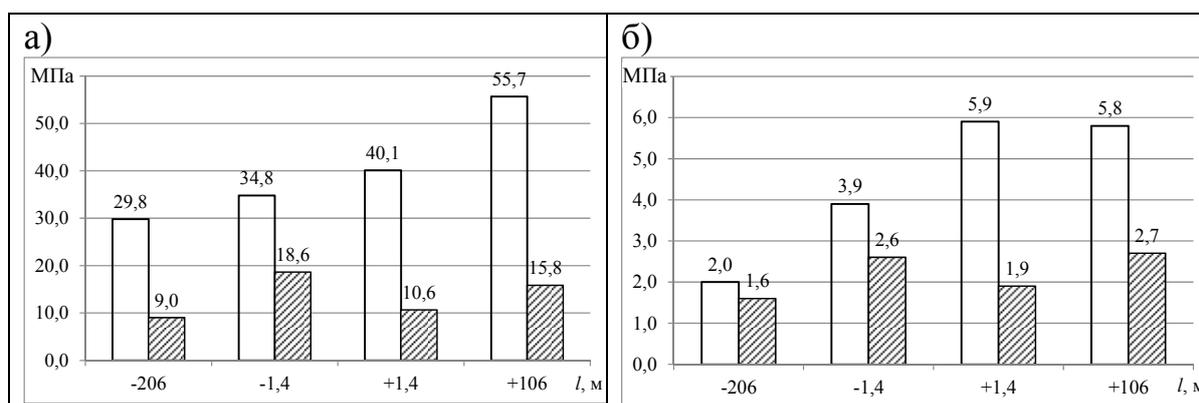
Таблица 1 – Результаты расчета смещений пород в выработке

Способ охраны выработки	Смещение пород, мм			Высота свода расслоения в кровле, мм
	кровли	почвы	общее	
Поддержание путем проведения в массиве	453	665	1118	1046
Поддержание впереди лавы и погашение за лавой	1057	1645	2702	3353
Поддержание выработки за лавой	1489	2349	3838	6206

Решено 8 задач МКЭ для объемных моделей линейно- и нелинейно деформированных массивов. Детальный анализ напряжений, деформаций в массиве выполнен по четырем сечениям на расстояниях: впереди лавы – 19,6 и 1,4 м; за лавой на расстояниях 1,4 и 106 м.

Результаты решения задач представлены в виде диаграмм распределения вертикальных и горизонтальных напряжений в боках выработки на рисунке 1 и в таблице 2 для кровли.

В боках выработки в линейно упругом массиве вертикальные напряжения увеличиваются в 3-4 раза, а в нелинейно деформируемом – в 2 раза впереди лавы и в 1,5 раза за лавой. Горизонтальные напряжения на порядок меньше вертикальных и существенно отличны для различных типов массивов.



а – вертикальные; б – горизонтальные;  
 □ – линейно деформируемый массив;  
 ▨ – нелинейно деформируемый массив;  
 l – расстояние до забоя лавы: – впереди лавы; + за лавой.

Рисунок 1 – Максимальные напряжения в боках выработки

В таблице 2 приведены данные о напряжениях и о размерах зон напряжений в кровле выработки для четырех сечений на различных расстояниях от лавы. Все сжимающие напряжения в кровле на первых трех участках значительно больше, чем обусловлены весом пород в пределах свода расслоения. Максимальные напряжения в линейно деформируемом массиве на 30-50% больше, чем в нелинейно деформируемом. Еще большая разница для горизонтальных напряжений (от 90 до 300%).

Таблица 2 – Напряжения в кровле выработки

Расстояние до забоя лавы, м	Напряжения, МПа			Высота зоны при напряжениях, м		
	$\sigma_v$	$\sigma_r$	$\sigma_z$	$\sigma_v$	$\sigma_r$	$\sigma_z$
-19,6	$\frac{-5,97}{-4,50}^*$	$\frac{-8,10}{-4,39}$	$\frac{-3,0}{-0,02}$	$\frac{1,0}{0,5}$	$\frac{1,5}{3,25}$	$\frac{1,0}{0,5}^*$
-1,4	$\frac{-8,72}{-6,37}$	$\frac{-8,85}{-4,78}$	$\frac{-3,40}{-1,55}$	$\frac{1,0}{3,25}$	$\frac{2,0}{1,75}$	$\frac{1,75}{1,0}$
+1,4	$\frac{-8,03}{-5,31}$	$\frac{-11,5}{-3,74}$	$\frac{-1,45}{-1,55}$	$\frac{1,5}{3,25}$	$\frac{1,75}{0,5}$	$\frac{1,0}{1,5}$
+106	$\frac{-0,003}{-0,031}$	$\frac{-11,1}{-7,07}$	$\frac{-1,95}{-0,58}$	$\frac{3,0}{3,5}$	$\frac{2,0}{1,0}$	$\frac{0,5}{1,0}$

Примечание: \* - в числителе для линейно; а в знаменателе для нелинейно деформированного массива;

$\sigma_v$  – вертикальные напряжения;

$\sigma_r$  – горизонтальные напряжения;

$\sigma_v$  – эквивалентные напряжения.

Проанализированные выше изменения напряжений в зависимости от расстояния до забоя лавы и типа задачи обусловили распределение напряжений в почве выработки.

На рисунке 2 показано распределение вертикальных напряжений в почве пласта на расстоянии 1,4 м впереди от забоя лавы.

Образование в почве участков нелинейно деформируемого массива привело во-первых: к снижению сжимающих напряжений в почве на 20%, увеличению по глубине и ширине этого участка, во-вторых, к углублению зоны повышенных напряжений в 3 раза до 1,5 м.

На рисунке 3 приведены сведения о горизонтальных напряжениях в почве выработок. Отличия: формы и размеры зон, прилегающих к поверхности почвы различные; напряжения на одинаковом расстоянии от выработки уменьшения на 57% вне зоны влияния лавы, а на расстоянии 1,4 м впереди лавы – 3,2 МПа вместо 8,85 МПа, т.е. в 2,7 раза в нелинейно деформируемом массиве.

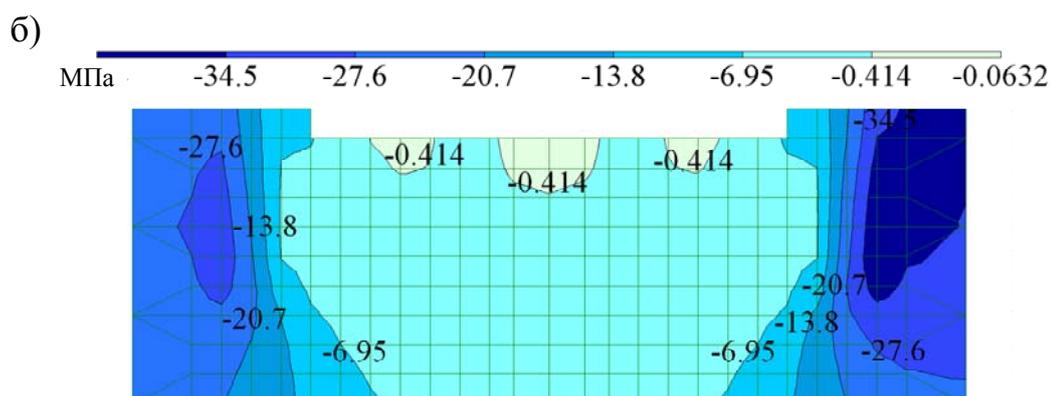
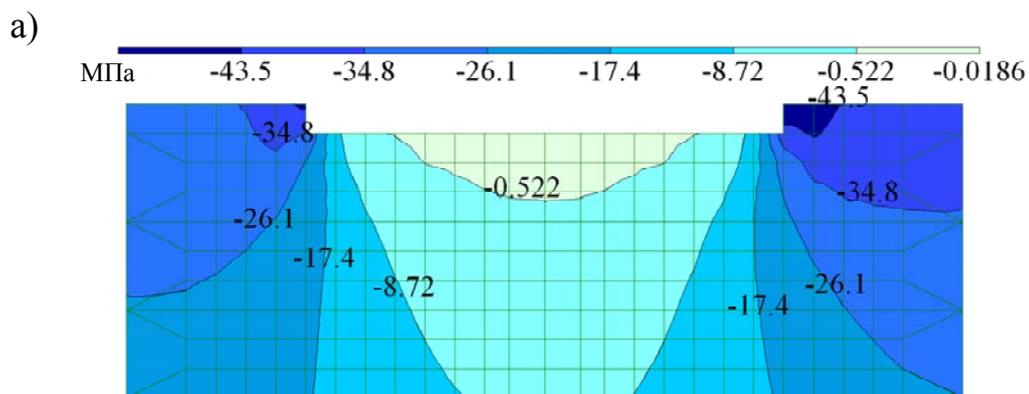


Рисунок 2 – Распределение вертикальных напряжений в почве выработки: а) линейно упругий массив; б) нелинейно упругий массив

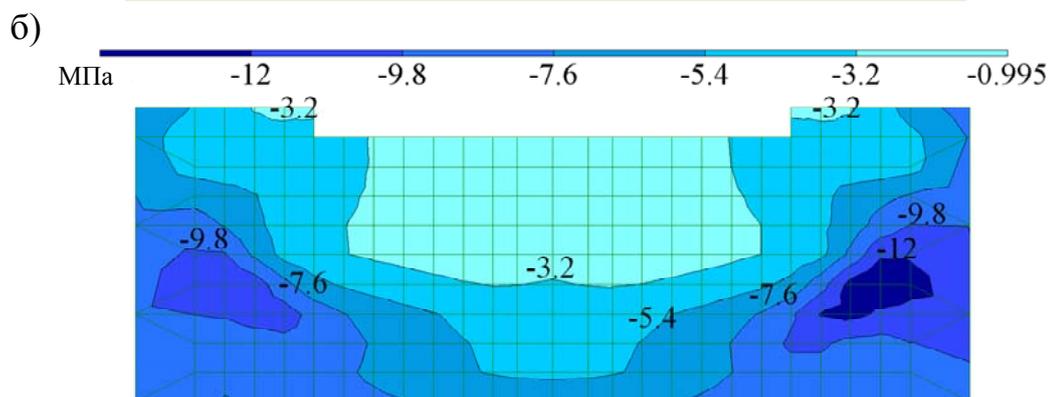
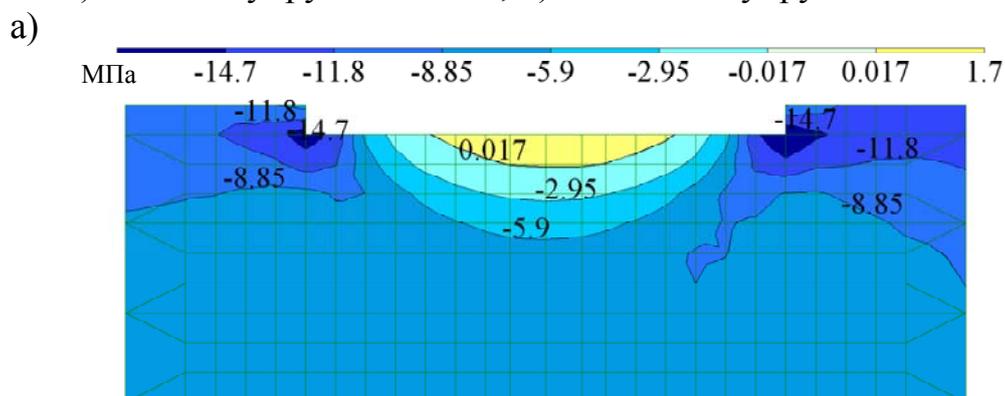
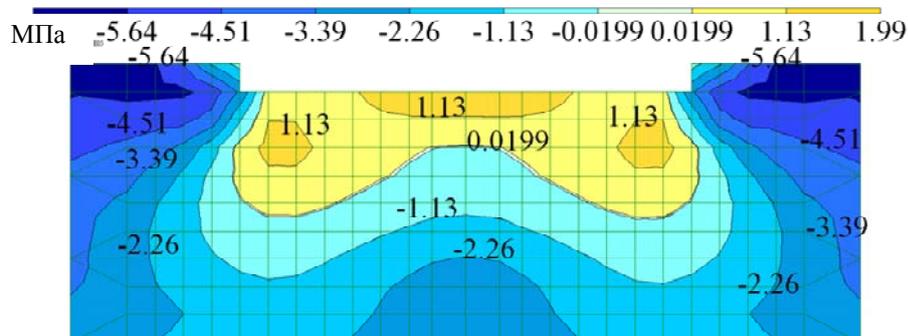


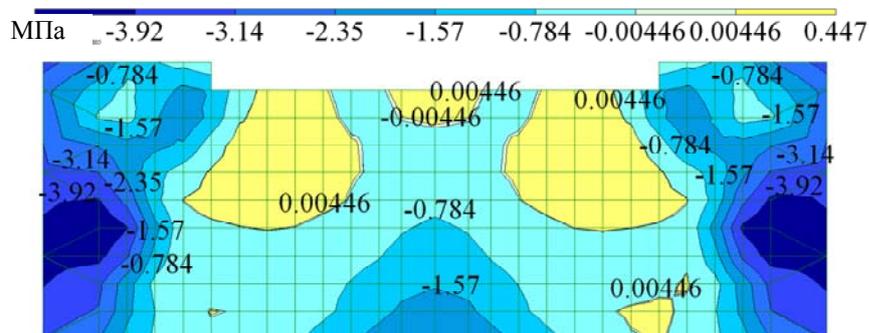
Рисунок 3 – Распределение горизонтальных напряжений в почве выработки: а) линейно упругий массив; б) нелинейно упругий массив

Совместное влияние вертикальных и горизонтальных напряжений в почве пласта изменило распределение эквивалентных напряжений, которые приведены на рисунке 4.

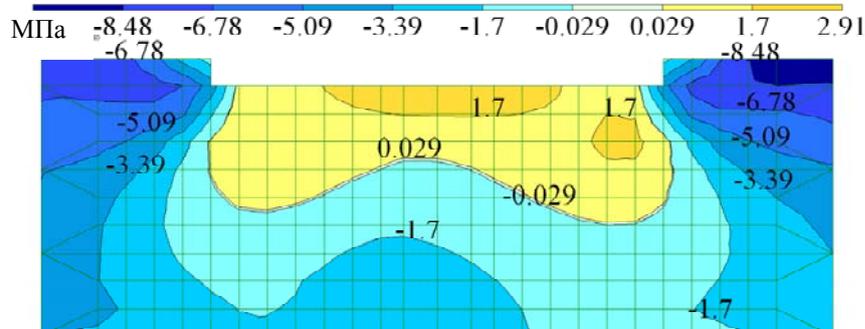
а)



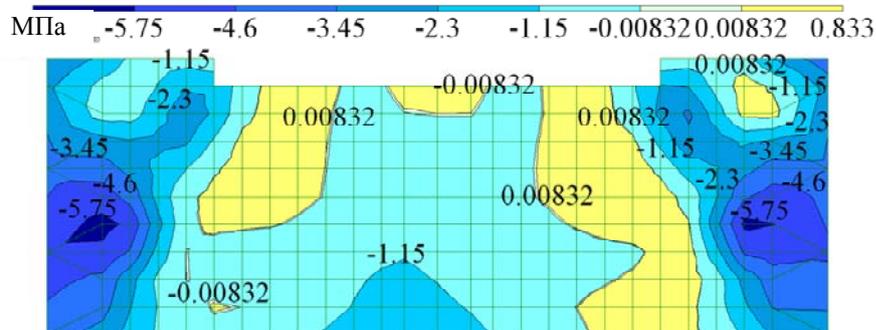
б)



в)



г)



а, в – линейно; б, г – нелинейно деформируемые массивы

Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений в почве выработки на расстояниях: а, б – 19,6 м; в, г – 1,4 м

В нелинейно деформированной почве в центре выработки образовалась зона, в которой практически нет растягивающих напряжений (0,0045 МПа, вместо 1,13 МПа в линейно деформируемом массиве); увеличились по глубине участки почвы, где действуют растягивающие напряжения.

В сечении на расстоянии 1,4 м впереди лавы также видны существенные изменения в распределении эквивалентных напряжений: глубже, чем в предыдущем случае, зона растягивающих эквивалентных напряжений со стороны лавы; образовалась зона растягивающих эквивалентных напряжений под пластом на расстоянии 0,75 м от стенки.

Обобщая исследования влияния типа деформирования массива, необходимо отметить существенные изменения в величинах напряжений, формах и границах их распределения в нелинейно деформированном массиве по сравнению с линейно деформируемым, которые необходимо учитывать при исследованиях деформации, разрушений пород вокруг выработки.

На рисунке 5 приведен график изменения вертикальных деформаций ( $\epsilon_p$ ) в центре выработки, для предотвращения пучения в которой применили систему «почва - шпалы - рельсовый путь» [6] и крепь усиления – две стойки сопротивлением 0,05 МН каждая. Характер деформирования почвы по глубине ( $h$ ) сложен и зависит от свойств массива. Максимумы деформации на глубине 0,75 м приурочены к границе между первыми участками слоя независимо от типа деформирования почвы. Для нелинейно деформированного массива наблюдается второй максимум деформации на глубине 1,25 м.

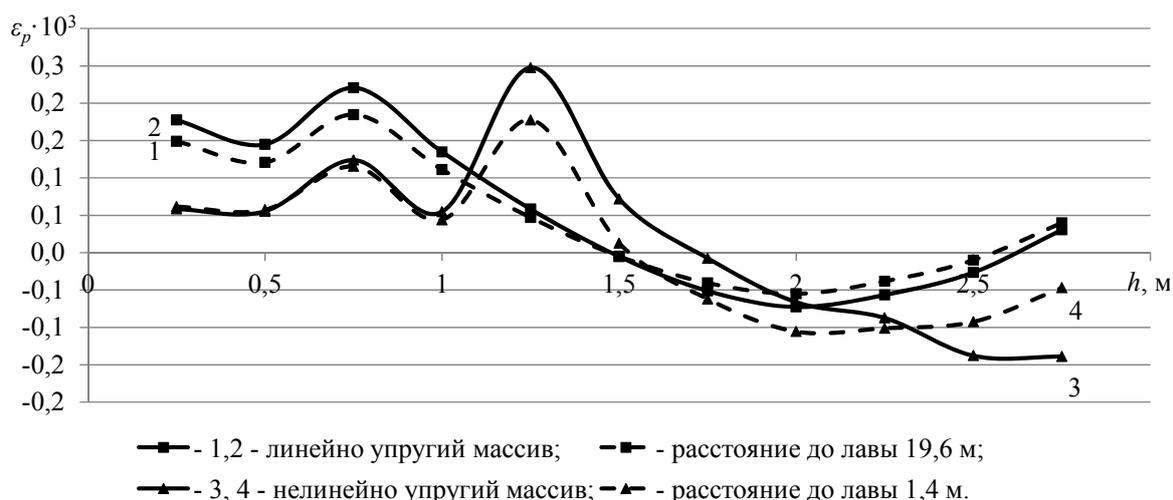


Рисунок 5 – График изменения вертикальных деформаций почвы в центре выработки

Максимальные деформации достигают значения  $0,22 \cdot 10^{-3}$  и  $0,18 \cdot 10^{-3}$  в линейно деформируемом массиве на расстояниях в зоне влияния и вне зоны влияния лавы (на глубине 0,75 м от поверхности почвы), для нелинейно деформированного массива –  $0,12 \cdot 10^{-3}$ . Нулевая деформация наблюдается на глубине 1,5 м вне зоны влияния лавы и на расстоянии 1,4 м – на глубине 1,75 м.

Деформации почвы вызывают усилия ( $N$ ) в анкерах, характер изменения которых показан на рисунке 6. В верхних двух слоях анкеры испытывают сжатие, а с глубины 2,25 м растяжение на участке закрепления в слое песчаника.

На рисунке 7 представлены горизонтальные деформации нелинейно деформируемой выработки, где  $B$  – ширина выработки. На участках – 1 – –0,5 м и 0,5 – 1 м (кривая 1) породы верхних элементов испытывают растяжение. В глубине массива (1,2 м от выработки) в центре выработки деформации максимальные, а в местах установки стоек – минимальные. Деформации увеличиваются по мере приближения к стенкам выработки. Горизонтальные деформации уменьшаются с увеличением расстояния от выработки и на глубине 2,75 м практически равны нулю.

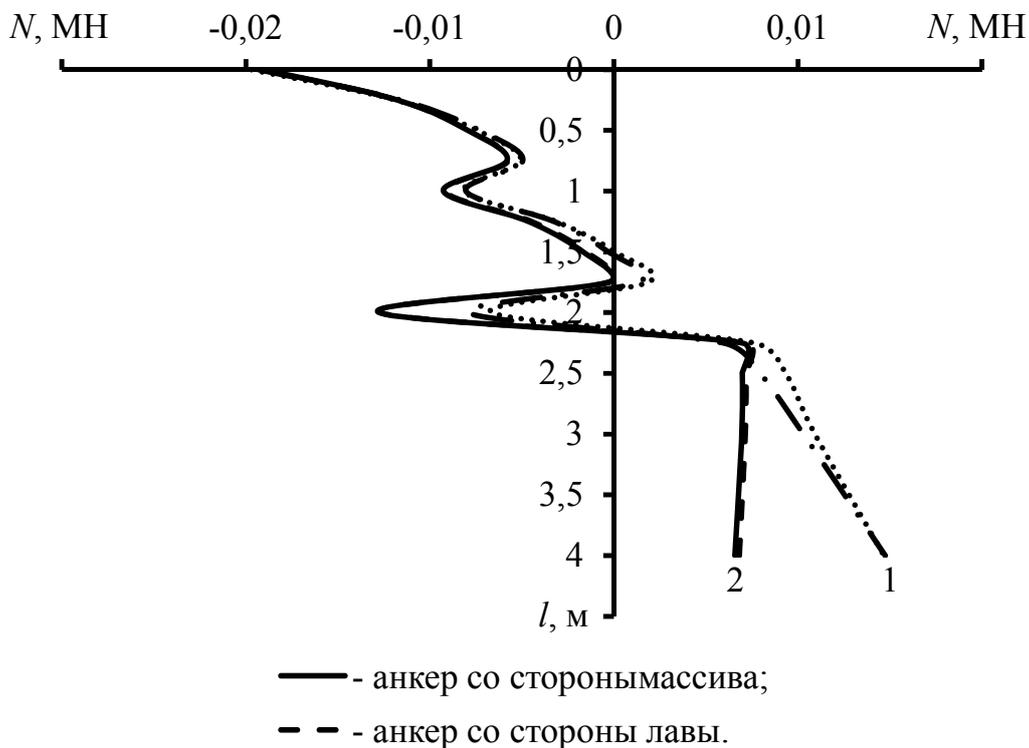


Рисунок 6 – Распределение усилий в анкерах, установленных на расстояниях: 1 и 2 – соответственно 1,4 и 19,6 м впереди лавы

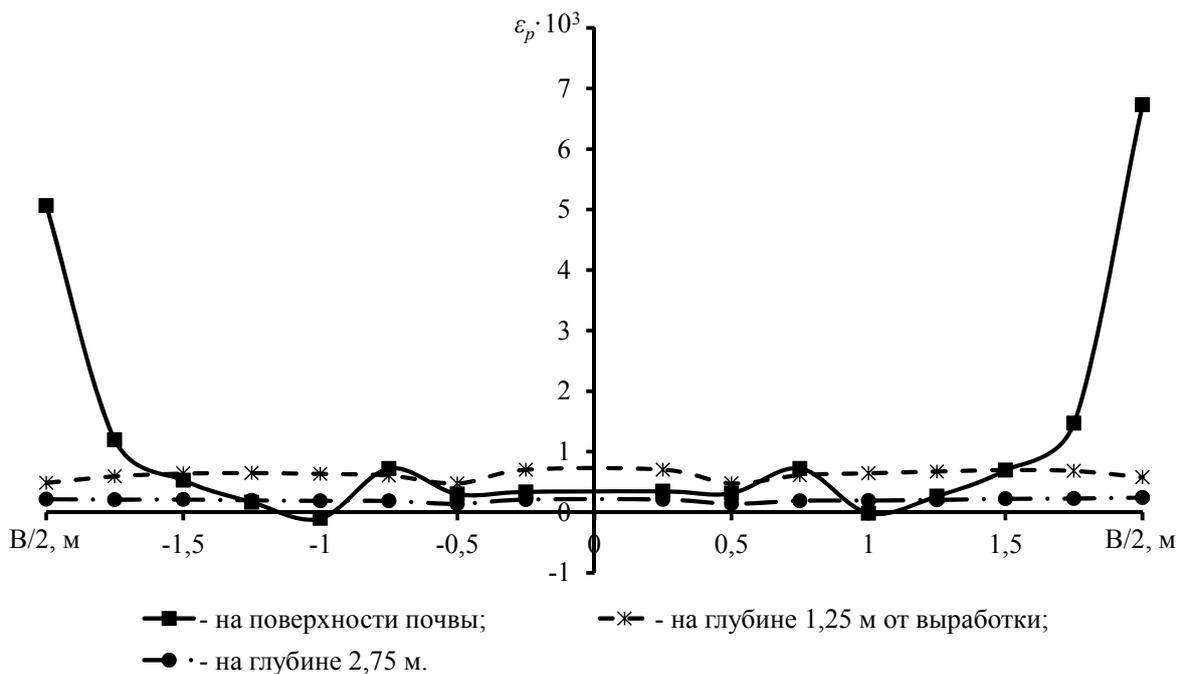


Рисунок 7 – Горизонтальные деформации нелинейно деформируемой почвы выработки на расстоянии 1,4 м от забоя лавы

Место и характер разрушения пород вокруг выработки исследованы при решении дополнительных четырех задач для нелинейно деформированного массива с пошаговым нагружением модели. В нелинейно деформируемом массиве трещины образовались в 0,3% элементов.

Складка пород в кровле разрушена двумя трещинами. В почве трещины появились первоначально на сопряжении лавы с выработкой, затем у противоположной стороны, где наблюдался их рост вглубь.

На основании выполненных исследований установлено: существенное уменьшение напряжений; увеличение области максимальных напряжений вокруг выработки; знакопеременное деформирование почвы вглубь, связанное с ним деформирование анкеров в почве; образование и развитие трещин в кровле и в почве выработки для нелинейно деформируемого массива.

На первом этапе исследования напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработки необходимо решать объемные задачи МКЭ для линейно и нелинейно деформируемого массива пород.

### **Библиографический список**

1. Байсаров А.В. Обґрунтування параметрів і розробка технології комбінованого способу підтримки виробок, що використовуються повторно: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.15.02 «Підземна розробка родовищ корисних копалин» / А.В. Байсаров. – Дніпропетровськ, 2004. – 20 с.

2. Клишин Н.К. Прогноз пучения почвы в примыкающих к лавам подготовительных выработках / Н.К. Клишин, К.З. Склепович, С.И. Касьян, П.А. Пронь // Сб. научн. трудов ДонГТУ: Алчевск, 2011, вып. 33. – С. 46-54.

3. Шашенко А.Н. Механика горных пород / А.Н. Шашенко, В.П. Пустовойтенко // підручник для ВУЗів. – К.: Новий друк, 2004. – 400 с.

4. Комиссаров С.Н. Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок / Комиссаров С.Н. – М.: Недра, 1983. – 237 с.

5. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони : СОУ 10.1.00185790.011. – [Чинний від 2007-11-09]. - К.: Мінвуглепром України, 2007. – 113 с. – (Стандарт Мінвуглепрому України).

6. Пат. 67477 Україна, МПК (2012.01) E 21 D 21/00. Спосіб запобігання здиманню підосви магістральних підготовчих виробок // Клишин Н.К., Склепович К.З., Касьян С.І., Пронь П.О.; заявник та патентовласник Донбаський держ. техн. ун-т. - № u201108636; заявл. 11.07.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. №4.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Борзыхом А.Ф.**