

*к.т.н. Аверин Г. А.,
Корецкая Е. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ВЛИЯНИЕ ПРОЧНЫХ ПОРОДНЫХ СЛОЁВ В КРОВЛЕ ВЫНИМАЕМОГО ПЛАСТА НА МАКСИМАЛЬНЫЕ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В статье приведены результаты моделирования ведением очистных работ, направленные на определение максимальных оседаний земной поверхности, при наличии крепких породных «мостов» различной мощности в основной кровле, по мере формирования мульды сдвижения.

***Ключевые слова:** математическое моделирование, метод конечных элементов, оседание земной толщи, прочные породные слои.*

Постановка проблемы. Актуальность. Отработка угольных пластов сопровождается появлением в подработанной толще пород зон нарушений сплошности, которые приводят к сдвигению горного массива и образованию оседаний земной поверхности. Для разработки эффективных мероприятий по охране объектов, находящихся на подрабатываемой территории, важно с высокой точностью прогнозировать деформации земной поверхности, являющихся основными аналитическими параметрами при принятии решения о том или ином способе охраны.

Известный нормативный документ [1] позволяет определить величину максимальных оседаний при учёте глубины разработки, литологии месторождения, мощности и угла падения вынимаемого пласта и прочих факторов. Несмотря на широкое использование данного документа в маркшейдерской практике, он обладает существенными недостатками.

Во-первых, величина оседаний определяется для сформировавшейся мульды сдвижения. На стадии формирования мульды расчётные значения оседаний превышают фактические значения [2].

Во-вторых, на процесс сдвижения влияет стратиграфия породного массива. При этом важно учитывать все слои, включая маломощные прослойки и мощные слои с низкими и высокими прочностными характеристиками [3]. В ряде работ при соз-

дании расчётных схем исследователи пренебрегают маломощными породными слоями [4], или массив горных пород представляется в виде анизотропной среды с регулярной слоистостью [5]. Многие задачи геомеханики решаются как в линейной, так и в нелинейной постановке [6, 7]. Влияние крепких породных слоёв на процесс сдвижения остается малоизученным вопросом в маркшейдерском деле, что не даёт верного представления о процессе оседания горного массива и приводит к ошибочным результатам при их прогнозировании.

Устранение перечисленных недостатков возможно при использовании численного моделирования, одним из которых является метод конечных элементов, позволяющий решать сложные геомеханические задачи с помощью современных программных комплексов и полном учёте исходной информации о горно-геологических и горнотехнических условиях разработки.

Цель работы – разработать достоверную численную модель подрабатываемого горного массива методом конечных элементов и определить с её помощью величину максимальных оседаний земной поверхности в процессе формирования мульды сдвижения при $D/H \leq 1$ (где D – ширина выработанного пространства, а H – глубина разработки) с варьированием мощности крепких породных слоёв от 10 до 100 м.

Основной материал.

Была разработана численная модель с помощью программного комплекса «Лира-9.6», позволяющая моделировать модели процесса оседания земной поверхности при её подработке 8 западной лавой шахты «им. М. В. Фрунзе» ш/у «Ясиновское» ООО ДТЭК «Ровенькиантрацит», обраба-

тывающей пласт h_8 на глубине 980 м. Мощность угольного пласта крепостью $f = 2$ в среднем составляет 1,5 м. Угол падения на участке нивелирования колеблется от 5 до 14 градусов. Кровля пласта представлена слоями показанными на рисунке 1.

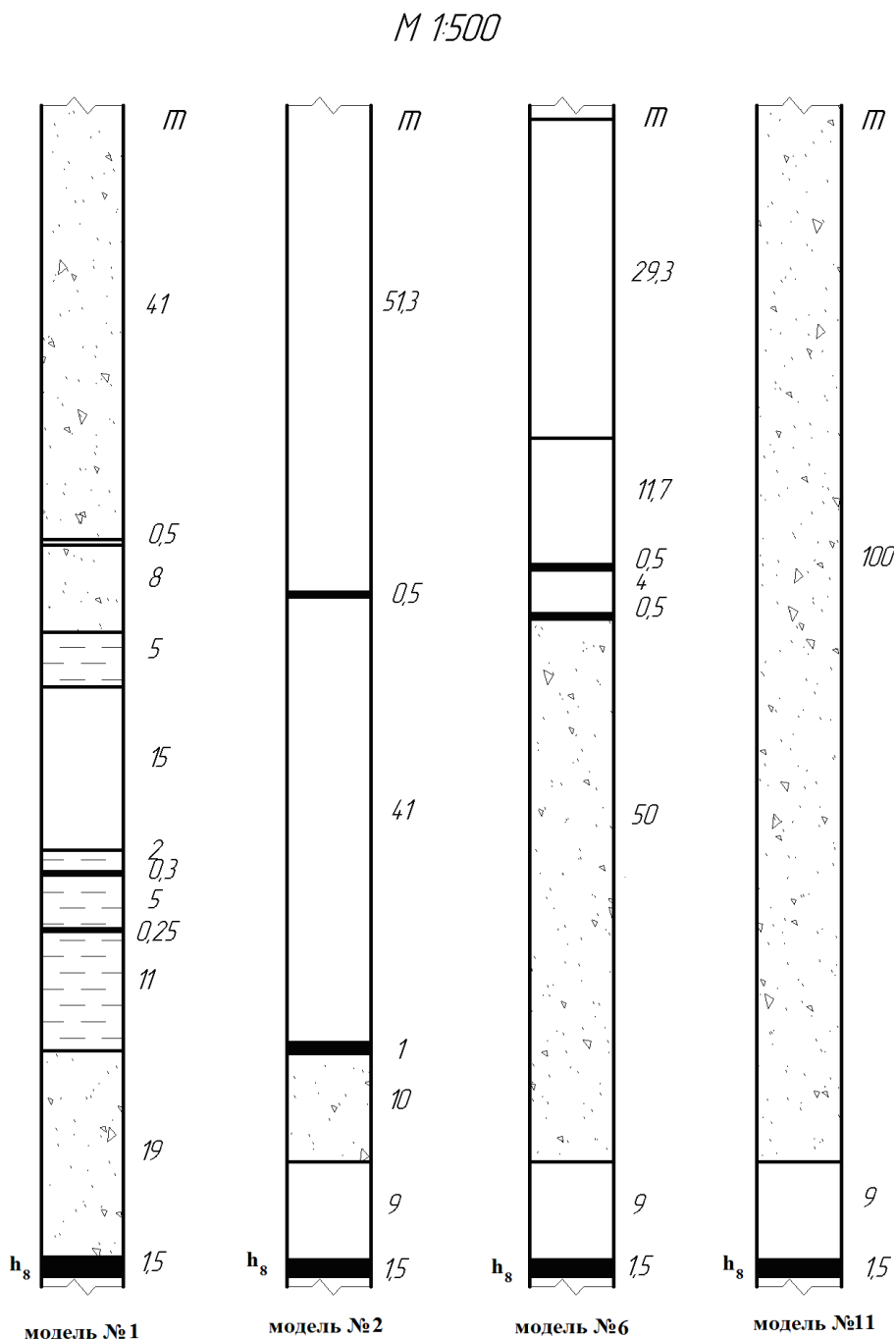


Рисунок 1 – Стратиграфические колонки пород кровли разработанных расчётных схем, (модели № 1, № 2, № 6, № 11)

В расчетной схеме модели № 1 учтены все слои и прослойки горных пород, слагающих массив, в соответствии с данными стратиграфических колонок, построенных на базе разведочных скважин, расположенных на территории шахты «им. М. В. Фрунзе».

Моделирование процесса отработки выемочного столба лавой № 8 западной проведено в несколько этапов по мере выемки угольного пласта до отработки, при подвигании лавы на 250 м от разрезной печи ($D/H = 0,255$); 400 м ($D/H = 0,41$); 550 м ($D/H = 0,561$); 730 м ($D/H = 0,744$) и 910 м ($D/H = 0,928$). Такой выбор шагов обусловлен величиной подвигания очистного забоя между двумя соседними датами проведения маркшейдерских замеров оседаний земной поверхности.

Обрушенные породы моделировались в нелинейной постановке при использовании деформационных свойств разрушенных пород [2].

На каждом шаге моделирования, соответствующем конкретной дате фактических замеров, определялась максимальная величина оседания земной поверхности и сравнивалась с аналогичной фактической величиной (см. рис. 2).

Расхождение между ними не превышает 7%. Исходя из чего следует, что созданная модель достаточно точно прогнозирует оседания и её можно использовать для дальнейших исследований, направленных на изучение влияния мощности крепкого породного слоя-«моста», залегающего в основной кровле обрабатываемого пласта. В модели № 1 суммарная мощность крепких слоев песчаника равна 68 метрам (см. табл. 1). В последующих десяти моделях мощность песчаника изменяется от 10 м до 100 м. В таблице 1 приведены данные для моделей № 2, № 6 и № 11, в которых мощность песчаника составляет 10, 50 и 100 м соответственно.

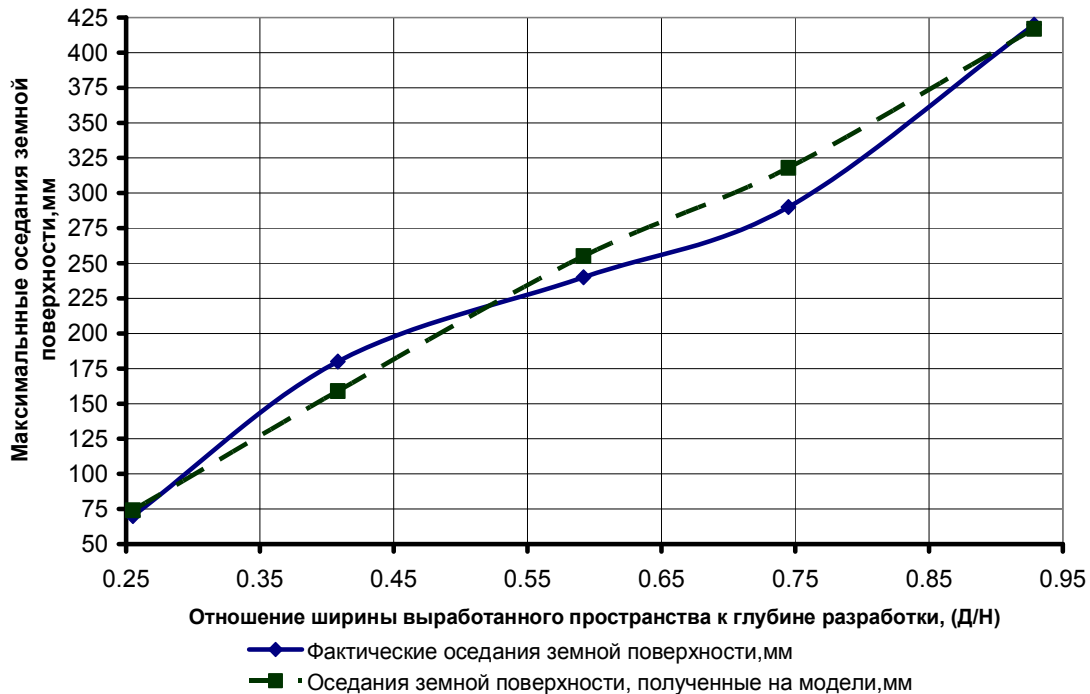


Рисунок 2 – Максимальные оседания земной поверхности при различной ширине выработанного пространства к глубине разработки (D/H), 1 – фактические; 2 – полученные на математической модели

Таблица 1 – Общая характеристика угольных пластов рабочей мощности

| Модели | Кровля на 110 м выше обрабатываемого пласта h_8 | | | | | | | | | | | |
|--------|---|--------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|--------------------|----------------------|
| | уголь | | | песчаник | | | аргиллит | | | алевролит | | |
| | Сумма мощностей всех пластов | Количество пластов | Процентное отношение | Сумма мощностей всех пластов | Количество пластов | Процентное отношение | Сумма мощностей всех пластов | Количество пластов | Процентное отношение | Сумма мощностей всех пластов | Количество пластов | Процентное отношение |
| №1 | 1,05 | 3 | 1 | 68 | 3 | 63 | 15 | 1 | 14 | 23 | 4 | 22 |
| №2 | 1,5 | 2 | 1,3 | 10 | 1 | 8,9 | 101,3 | 3 | 89,8 | - | - | - |
| №6 | 1,25 | 3 | 1,1 | 50 | 1 | 45,9 | 38,3 | 2 | 35,1 | 19,5 | 3 | 17,9 |
| №11 | - | - | - | 100 | 1 | 92 | 9 | 1 | 8 | - | - | - |

В ходе моделирования оседания земной поверхности в процессе формирования мульды сдвижения были получены максимальные оседания (рис. 3а), зависящие так же от мощности прочных породных слоёв в кровле пласта (рис. 3б). Для аппроксимации полученных результатов рассмотрена модель линейной множественной регрессии вида:

$$\Delta\eta = a_0 + a_1 \cdot M + a_2 \cdot D/H, \quad \text{мм} \quad (1)$$

где $\Delta\eta$ – величина оседания земной поверхности, м;

M – мощность песчаника в основной кровле, м;

D/H – ширины выработанного пространства, м;

H – глубина разработки, м;

a_0, a_1, a_2 – свободные коэффициенты.

Коэффициенты уравнения (1) находились методом наименьших квадратов при решении системы уравнений:

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum M + a_2 \sum \frac{D}{H} = \sum \eta, \\ a_0 \sum M + a_1 \sum M^2 + a_2 \sum M \cdot \frac{D}{H} = \sum M \cdot \eta, \\ a_0 \sum \frac{D}{H} + a_1 \sum M \frac{D}{H} + a_2 \sum \left(\frac{D}{H}\right)^2 = \sum \frac{D}{H} \cdot \eta \end{cases} \quad (2)$$

В ходе решения системы нормальных уравнений, определены коэффициенты уравнения регрессии (1):

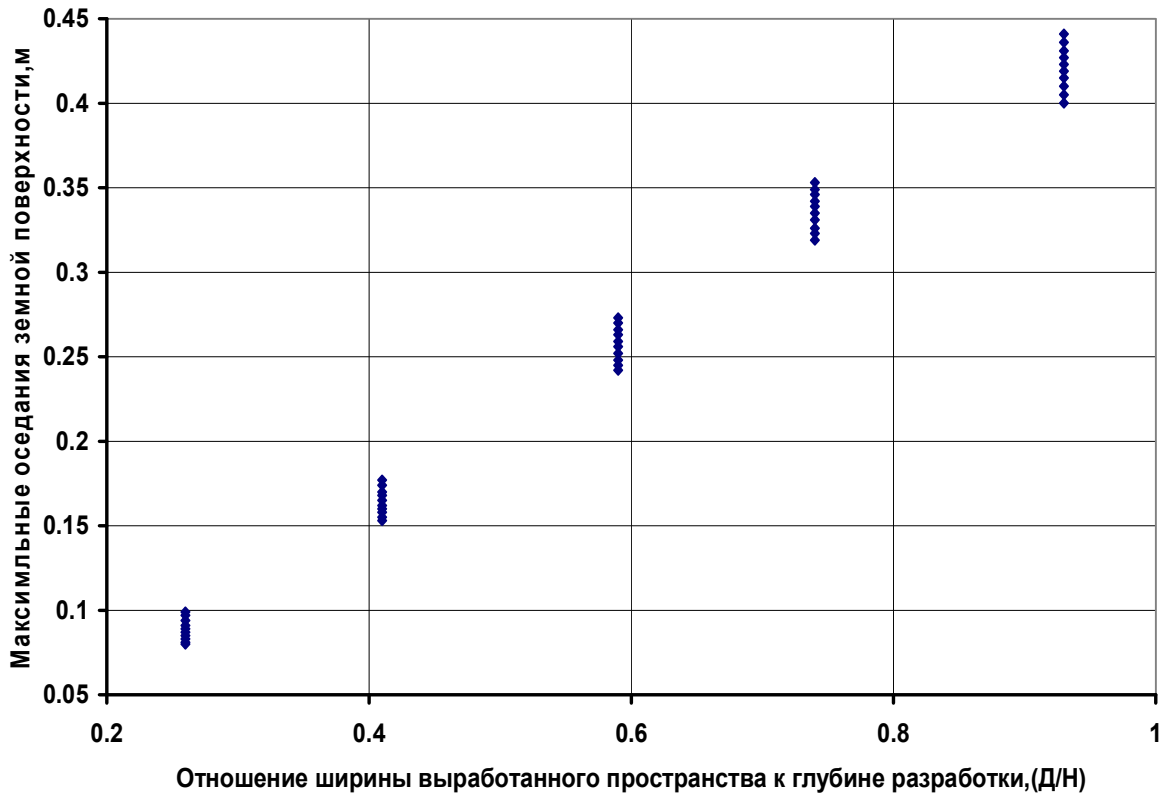
$$\Delta\eta = -0,02149 - 3,31 \cdot 10^{-4} \cdot M + 0,5 \cdot D/H, \quad \text{м} \quad (3)$$

Рассмотренные парные коэффициенты корреляции между $\Delta\eta \div M$, и $\Delta\eta \div D/H$, соответственно равны - 0,08 и 0,996, что указывает на наличие сильной прямой связи между величиной осадки земной поверхности $\Delta\eta$ и D/H и на умеренную обратную связь оседаний $\Delta\eta$ и мощностью прочного слоя M . Межфакторная связь $M \div D/H$, отсутствует, следовательно, оба фактора информативны и их включить в модель целесообразно.

Определённые коэффициенты эластичности $E_M = -0,072$ и $E_{D/H} = 1,16$, т.е. при изменении мощности прочного породного слоя (M) на 1% оседание $\Delta\eta$ уменьшается на 0,072%; а при росте отношения D/H на 1% прирост оседаний составляет 1,16%. Фактор D/H в большей степени влияет на величину оседаний, чем M , что также подтверждено значениями парных коэффициентов корреляции. Коэффициент детерминации R^2 уравнения (3) равен 0,986. Вариация результата $\Delta\eta$ на 98,6% объясняется вариацией представленной в уравнении (3) факторов. Статистическая значимость факторов проверена по критерию Стьюдента: $t_M = 4,49 > t_{\text{табл}} = 2,02$;

$t_{D/H} = 57,35 > t_{\text{табл}} = 2,02$ Статистическая значимость полученного уравнения регрессии подтверждается F-критерием Фишера, ($F_{\text{расч}} = 1655 > F_{\text{табл}} = 3,18$).

а)



б)

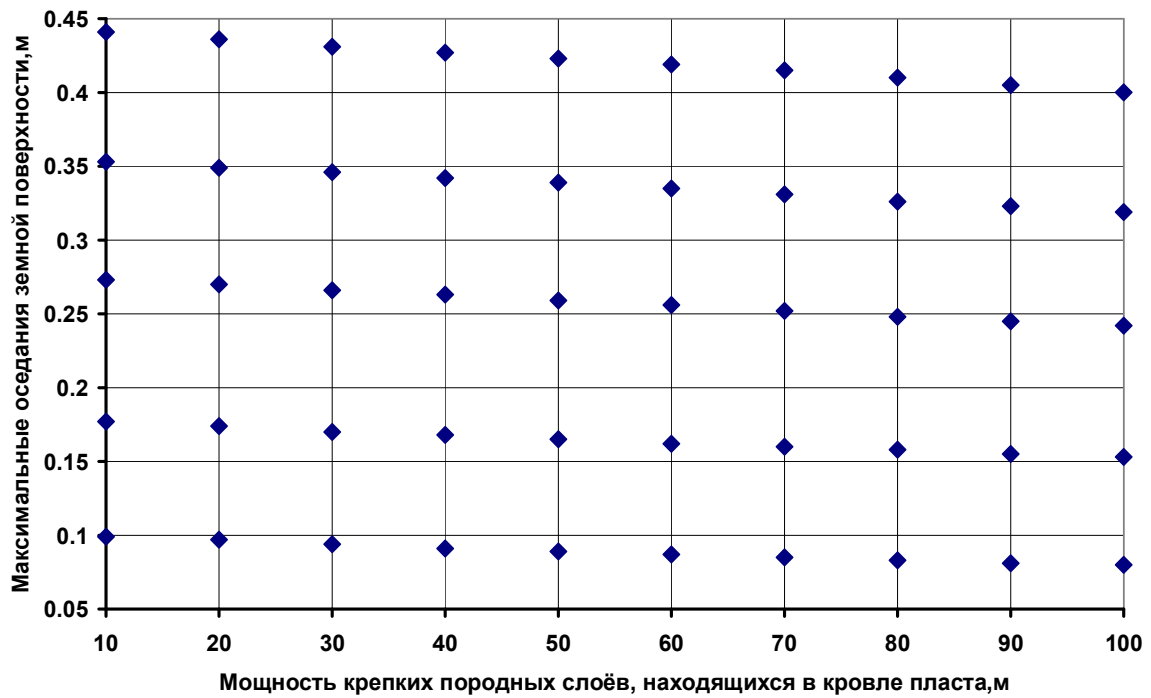


Рисунок 3 – Величины оседаний поверхности полученные в результате численного моделирования: а) - изменения ширины выработанного пространства (D) к глубине разработки (H); б) изменения мощности крепкого породного слоя

Отклонение расчётных значений оседаний земной поверхности, полученные по уравнению регрессии (3) с фактическими оседаниями, полученные путём nivelирования составило 11 мм, что приемлемо при прогнозировании величин оседания.

Выводы и направление дальнейших исследований:

Предложена достоверная расчётная схема математических моделей для определения максимальных оседаний земной поверхности по мере выемки угля очистными забоями при различной ширине выработанного пространства, глубины ведения очистных работ, крепких породных слоёв, и полном учёте исходной инфор-

мации о горно-геологических и горнотехнических условиях разработки.

Получена регрессионная зависимость максимальных оседаний земной поверхности при различном отношении ширины выработанного пространства к глубине разработки (D/H) и прочных мощных породных слоёв (M), залегающих выше вынимаемого пласта.

При увеличении отношения ширины выработанного пространства (D) к глубине разработки (H) угольного пласта (D/H) величина $\Delta\eta$ максимальных оседаний растёт, а при увеличении мощности крепкого породного слоя (M) он уменьшается.

Библиографический список

1. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом. Галузевий стандарт України: ГСТУ 101.00159226.001. – 2003. – Мінпаливоенерго України. – Київ. – 2004. С. – 127.
2. Аверин Г. А. Механические характеристики пород кровли / Г. А. Аверин, П. Н. Кирьязов, О. Г. Доценко // Уголь Украины, 2010. – № 4. – С. 38-40.
3. Аверин Г. А. Влияние слоистости на оседание земной поверхности / Г. А. Аверин, П. Н. Кирьязов, О. Г. Доценко // Уголь Украины, 2010. – № 10. – С. 34-35.
4. Серяков А. С. Расчет процессов разрушения в слоистом горном массиве / В. М. Серяков В. М., А. С. Ягунов. - ФТПРПИ, 1990. - № 5. – С. 28-35.
5. Гавриленко Ю. Н. Математическое моделирование сдвижения горных пород и земной поверхности в слоистом массиве методом конечных элементов // Известия Донецкого горного института. – Донецк: ДНГУ, – 1997. - № 1 (5). – С. 87-93.
6. Ларченко В. Г. Определение зависимостей параметров сдвижений и деформаций подработанной толщи пород от определяющих факторов методом конечных элементов / В. Г. Ларченко, О. А. Черных - Сб. науч. тр. ДонГТУ. - Алчевск: ДонГТУ, вып. 22. - 2006. – С. 16-24.
7. Ларченко В. Г. Исследования сдвижений и деформаций толщи горных пород методом конечных элементов / В. Г. Ларченко, О. А. Черных. - «Форум гірників-2006» // Матеріали Міжнарод. конф. - Дніпропетровськ: НГУ, 2006.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Антощенко Н. И.

Статья поступила в редакцию 27.06.13.

к.т.н. Аверін Г. О., Корецька О. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ВПЛИВ МІЦНИХ ПОРІДНИХ ШАРІВ В ПОКРІВЛІ ПЛАСТУ, ЩО ВИЙМАЄТЬСЯ НА МАКСИМАЛЬНЕ ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

У статті наведені результати моделювання, спрямовані на визначення максимальних осідань земної поверхні, викликані веденням очисних робіт, що мають в основній покрівлі міцні породні «мости» різної потужності.

Ключові слова: математичне моделювання, метод кінцевих елементів, зрушення земної товщі, породи-«мости».

Averin G.A., Koretskaja E.G. (*DonSTU, Alchevsk, Ukraine*)

**THE DEPENDENCE OF THE MAXIMUM SURFACE SUBSIDENCES FROM THICKNESS
HARD ROCK STRATUMS THAT OCCUR ABOVE THE MINING LAYER**

The results of the simulation of hollowing layer were indicated in the article. It is aimed at determining the maximum surface subsidence's, where deposited hard rock layers in the main roof.

Key words: *mathematical modeling, finite element method, settling earth strata, sturdy breed layers.*