

УДК 622.831

А.В. Дягилева, В.А. Гоголин, И.А. Ермакова

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ СЛОЖНОЙ
СТРУКТУРЫ ПРИ ОЧИСТНОЙ ВЫЕМКЕ**

Представлены результаты математического моделирования методом конечных элементов напряженного состояния угольных пластов с прослойкой при очистной выемке. Установлено влияние толщины прослойки, глубины разработки, длины выработанного пространства, коэффициента бокового распора на параметры горного давления.

Ключевые слова: напряженное состояние, метод конечных элементов, структура угольных пластов.

При очистной выемке угольных пластов актуальной задачей является анализ и прогноз напряженного состояния массива горных пород. Поставленная задача решалась многими учеными с использованием аналитических методов. В качестве основных допущений при использовании аналитических методов решения таких задач нужно отметить следующие:

- массив горных пород является линейно-деформированной (упругой) средой;
- угольный пласт считается однородным как по структуре, так и по деформационным характеристикам;
- напряженно-деформированное состояние вмещающих пород и угольного пласта находится аналитически на основе метода Н.И. Мухелишвили для упругой среды [1].

Авторами известных математических моделей являются: С.Г. Михлин (жесткий пласт) [2], Г.И. Баренблатт, С.А. Христианович (плавный прогиб кровли с жестким пластом) [3], А.М. Линьков (пластическая деформация пласта в краевой зоне) [4], И.В. Бак-

лашов (оценка устойчивости пород кровли) [5], В.Е. Миренков, В.А. Шутов (полигональные выработки и ослабления пород) [6], В.А. Гоголин, Ю.А. Рыжков (выемка с закладкой и учет запредельного деформирования угля) [7], В.А. Гоголин, А.В. Дягилева, Т.И. Кургузкина (полуэмпирические модели опорного давления) [8,9]. Имеется также много исследований по экспериментально-аналитическому методу расчета напряженно-деформированного состояния горных пород (Г.И. Грицко, Б.В. Власенко [10]).

Анализ ранее выполненных различными авторами исследований показал, что структура пласта не изучалась как фактор влияния на напряженное состояние пласта, что связано с ограниченностью области применения аналитических методов.

Альтернативой аналитическим методам являются численные, которые позволяют учитывать неоднородность параметров изучаемого пласта и в целом массива, сложность геометрической формы рассматриваемых элементов. При этом важным вопросом

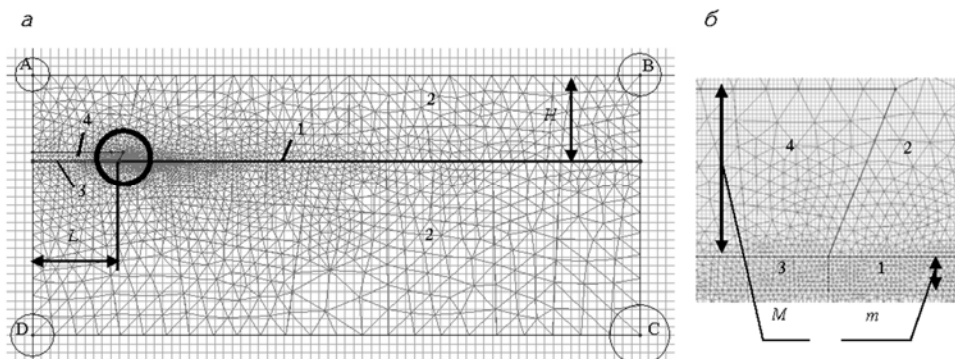


Рис. 1. Расчетная область с сеткой конечных элементов (а); область забоя в масштабе (б): 1 – пласт угля; 2 – породы почвы и кровли; 3 – зона обрушенных пород; 4 – выработанное пространство; H – глубина разработки; L – длина половины выработанного пространства; m – мощность пласта; M – высота обрушения

является разработка адекватной модели для численных расчетов напряженного состояния угольных пластов.

Большой интерес представляет поведение параметров горного давления в случаях включений в пласт прослоек. Такие ситуации часто встречаются на практике, однако их изучение возможно или экспериментальными способами, что является затруднительным в силу разных причин, или с использованием численного моделирования, что и было сделано в работе.

В настоящей работе для моделирования напряженного состояния угольных пластов использовался метод конечных элементов (МКЭ), реализованный в программе ELCUT-Professional, версия 5.8. Программа разработана производственным кооперативом «ТОР» и имеет широкий диапазон применения.

Первоначально было проанализировано напряженное состояние пласта однородной структуры. Расчетная область ABCD представляет прямоугольник, включающий пласт 1, породы почвы и кровли 2, а также зону

обрушенных пород 3 над выработанным пространством 4 (рис. 1). При решении рассматривается половина выработанного пространства с прилегающей областью, то есть ребро AD является вертикальной осью симметрии. В данном случае решается задача плоской деформации.

Граничные условия в расчетной области были заданы следующим образом.

AB – дневная поверхность, на ней вертикальные и касательные напряжения равны нулю, то есть $\sigma_{yy} = \tau_{xy} = 0$.

AD – вертикальное сечение, проходящее через середину выработанного пространства, на нем, в силу симметрии задачи перемещения вдоль оси OX $\delta_x = 0$, касательные напряжения $\tau_{xy} = 0$.

BC – вертикальное сечение, удаленное от выработанного пространства, на нем сохраняется начальное поле напряжений и приложена поверхностная сила, линейно изменяющаяся с глубиной: $f_x = -\lambda \cdot \gamma \cdot H$, где γ – удельный вес вмещающих пород,

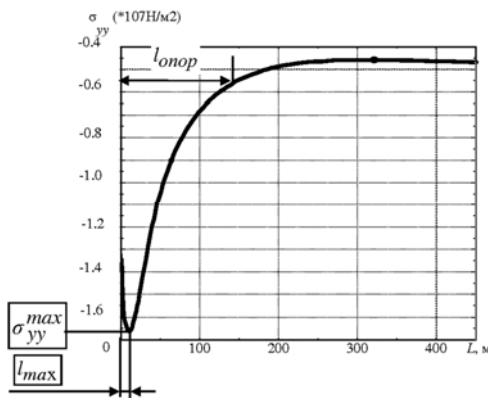


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений в кровле пласта при $H=200$ м, $L = 200$ м, $\lambda = 0,5$

$\gamma=25000$ Н/м³; H – глубина разработки, м; λ – коэффициент бокового распора.

ДС – удаленное по глубине сечение, где перемещения вдоль оси ОУ $\delta_y = const$, принимаем их равными 0; $\delta_y = 0$, $\tau_{xy} = 0$.

Расчетная область состоит из нескольких блоков, в которых были заданы следующие свойства.

Блок вмещающих пород (2, см. рис. 1) нагружен объемной силой – $\gamma=25000$ Н/м³, соответствующей весу вмещающих пород; модуль Юнга $E=10^9$ Н/м², коэффициент Пуассона $\nu=0,25$.

Пласт угля (1, см. рис. 1) нагружен объемной силой – $\gamma=14000$ Н/м³, $E=10^8$ Н/м², $\nu=0,25$.

Область выработанного пространства и обрушенных пород (3 и 4, см. рис. 1) нагружена объемной силой – $\gamma=20000$ Н/м³, $E=10^7$ Н/м², $\nu=0,25$.

Моделирование производилось при фиксированной мощности пласта $m=4$ м, при этом высота зоны обрушенных пород над выработанным пространством составляла $M=5 \cdot m=20$ м.

При решении задачи вычислялись значения вертикальных напряжений в кровле пласта при удалении от линии забоя (рис. 2), откуда находились значения следующих параметров:

- 1) максимум опорного давления σ_{yy}^{max} , Н/м²;
- 2) расстояние до максимума опорного давления от забоя l_{max} , м;
- 3) длина зоны опорного давления $l_{опор}$, м, в работе было принято что в этой зоне значения вертикальных напряжений превышают (по модулю) соответствующие напряжения в нетронутом массиве в 1,1 раза.

Значения указанных параметров были найдены для различных условий: глубина разработки изменялась в пределах от 200 м до 600 м ($H=200, 400, 600$ м), длина половины выработанного пространства – от 200 м до 600 м ($L = 200, 400, 600$ м), коэффициент бокового распора λ принимал значения от 0,5 до 1, 5 ($\lambda = 0,5; 1,0; 1,5$).

В результате множественного регрессионного анализа получены значимые уравнения регрессии, в которых все три фактора также являются значимыми.

1. Уравнение регрессии для максимума опорного давления:

$$\sigma_{yy}^{max} = -0,00188 \cdot L - 0,00658 \cdot H + 0,293333 \cdot \lambda$$

Глубина разработки H является наиболее значимым фактором, оказывающим наибольшее влияние на величину σ_{yy}^{max} . Увеличение глубины разработки H на 100 м увеличивает по модулю значение σ_{yy}^{max} на $0,658 \cdot 10^7$ Н/м². Увеличение половины длины выработанного пространства L на 100 м также увеличивает по



Рис. 3. Пласт с прослойкой: t – мощность пласта; M – высота обрушения; h – толщина прослойки

модулю σ_{yy}^{\max} на $0,188 \cdot 10^7$ Н/м². Увеличение коэффициента бокового распора λ на 0,1 уменьшает по модулю величину σ_{yy}^{\max} на $0,029 \cdot 10^7$ Н/м².

Полученные при моделировании выводы соответствуют сложившимся представлениям об изменении максимума опорного давления в зависимости от рассматриваемых факторов.

2. Уравнение регрессии для расстояния до максимума опорного давления:

$$l_{\max} = 6,44444 + 0,00842 \cdot L - 0,00336 \cdot H + 2,1 \cdot \lambda$$

Для этого параметра наиболее значимым фактором является длина выработанного пространства L . Увеличение половины длины выработанного пространства L на каждые 100 м увеличивает значение l_{\max} на 0,842 м; увеличение глубины разработки H на 100 м приводит к уменьшению l_{\max} на 0,336 м; увеличение коэффициента бокового распора λ на 0,1 приводит к увеличению l_{\max} на 0,21 м.

3. Уравнение регрессии для длины зоны опорного давления:

$$l_{\text{опор}} = 0,19694 \cdot L + 0,41556 \cdot H - 70 \cdot \lambda$$

Наиболее значимым фактором является глубина разработки H . Увеличение половины длины выработанного пространства L на каждые 100 м

увеличивает значение $l_{\text{опор}}$ на 19,694 м; увеличение глубины разработки H на 100 м обуславливает увеличение $l_{\text{опор}}$ на 41,556 м; при увеличении коэффициента бокового распора λ на 0,1 значение $l_{\text{опор}}$ уменьшается на 7 м.

Коэффициент концентрации напряжений в рассмотренных случаях принимает значения от 2,1 до 3,4.

Сопоставление результатов моделирования с имеющимися данными позволяет сделать вывод об адекватности модели и достоверности полученных результатов.

Полученная модель позволяет исследовать, каким образом влияет на напряженное состояние пласта наличие прослойки, расположенной по его центру, имеющей тот же модуль упругости, что и порода. Так как прослойка обладает большей жесткостью, чем уголь, то она названа жесткой. Схема пласта с прослойкой показана на рис. 3.

Расчеты проводились при толщине прослойки $h = 0; 0,5; 1,0; 1,5$ м. Прочие параметры задачи: глубина разработки $H = 200, 400, 600$ м, половина длины выработанного пространства $L = 200, 400, 600$ м, коэффициент бокового распора $\lambda = 0,5; 1,0; 1,5$.

Как показал анализ полученных данных, толщина жесткой прослойки h оказывает различное влияние на исследуемые параметры. Ниже приведены полученные значимые уравнения регрессии, включающие фактор h .

1. Глубина разработки $H = 200$ м.

Толщина прослойки оказывает влияние на длину зоны опорного давления:

$$l_{\text{опор}} = 168 - 0,02722L - 8,22222h, \text{ м.}$$

Из уравнения видно, что на глубине 200 м увеличение толщины прослойки приводит к уменьшению длины зоны опорного давления.

2. Глубина разработки $H=400$ м.

При такой глубине толщина прослойки оказывает влияние на расстояние до максимума опорного давления

$$l_{\text{max}} = 4,83519 + 0,01122L + 1,85556\lambda - 1,72222h, \text{ м.}$$

При увеличении толщины прослойки происходит уменьшение расстояния до максимума опорного давления.

3. Глубина разработки $H=600$ м.

Получено два значимых уравнения регрессии:

$$l_{\text{max}} = 0,01394L + 3,25833\lambda - 0,58222h, \text{ м;}$$

$$\sigma_{\text{yy}}^{\text{max}} = -3,38667 - 0,00336L + 0,5725\lambda - 0,11444h, \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Увеличение толщины жесткой прослойки приводит к уменьшению расстояния до максимума опорного давления и самого максимума опорного давления.

Таким образом, полученные зависимости для значения максимума опорного давления, расстояния до максимума опорного давления, длины зоны опорного давления позволяют учитывать наличие жесткой прослойки в пласте при различной глубине разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 708 с.
2. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом// Изв. АН СССР, ОТН, 1942. – №7-8. – С.13÷29.
3. Баренблатт Г.И. Об обрушении кровли при горных выработках/ Г.И. Баренблатт, С.А. Христианович// Изв. АН СССР, ОТН. – 1955. – №11. – С. 73÷86.
4. Линьков А.М. и др. Теория защитных пластов. М.: Недра, 1976. – 218 с.
5. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
6. Миренков В.Е. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений/ В.Е. Миренков, В.А. Шутов. – Новосибирск: Наука, 2009. – 176 с.
7. Рыжков Ю.А. Механика и технология формирования закладочных массивов/ Ю.А. Рыжков, А.Н. Волков, В.А. Гоголин. – М.: Недра, 1985. – 191 с.
8. Гоголин В.А. Аналитическая оценка распределения опорного давления/ В.А. Гоголин., Т.И. Кургузкина// Вестн. Кузбасского гос. техн. унив. – 2004. – №2. – С.14÷17.
9. К оценке влияния очистных работ на протяженность зоны опорного давления/ А.В. Дягилева [и др.]// Вестн. Кузбасского гос. техн. унив. – 2005. – №4. – С. 29÷31.
10. Прогнозирование и расчет проявлений горного давления / Г.И. Грицко [и др.] – Новосибирск: Наука, 1980. – 159 с.

ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Дягилева Анна Владимировна – кандидат технических наук, доцент,
 Гоголин Вячеслав Анатольевич – доктор технических наук, профессор,
 Ермакова Инна Алексеевна – доктор технических наук, профессор,
 Кузбасский Государственный технический университет, kuzstu@kuzstu.ru