

Таблица 1

Вид покрытия	Сметная стоимость (100 м <sup>2</sup> ) грн.	Трудоемкость (100 м <sup>2</sup> ) чел.-час.	Эксплуатационные затраты
Чердачное (асбестоцементные листы)	36310,3	428	ремонт 1 раз в 50 лет
Совмещенное (рулонное)	41355,6	228	ремонт 1 – 2 раза в 5 лет

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Подводя итоги, отметим, что правильно сделанная чердачная крыша не только станет украшением нового дома, но и предоставит возможность рационально использовать все жилое пространство здания. При этом владельцу не понадобится расходовать лишние средства на обустройство и утепление, в последствии - многочисленные ремонты жилья. Должным образом утепленная крыша позволит добиться существенной экономии в отоплении, сделает дом по настоящему уютным и комфортным, без дополнительных затрат.

Современная архитектура скатных крыш, безусловно, интересна в своем многообразии и сложности решений, иногда поражая виртуозностью творческой мысли создателя и гармоничным сочетанием крыши со всем строением.

В дальнейших исследованиях планируется провести анализ эксплуатационных качеств различных материалов кровель, применяемых для крутонаклонных покрытий зданий и сооружений

#### Список литературы

1. А.И. Гармаш, И П Слипченко, М.Ф. Сокол. Ремонт кровель зданий и сооружений- К.; Будівельник, 1984 - 10с.
2. А.М. Кисина, Л.Л. Ладжжинская, С.Н. Попченко, В.Н. Трофимов – Новые гидроизоляционные и кровельные материалы и их долговечность,- М.; Энергия, 1980 -80с.
3. О.Т.Павлюк, И.П. Слипченко «Производство кровельных работ» К . Будівельник, 1980 – 122с.
4. В.А. Роганский, А.И. Костриц « Эксплуатационная надежность зданий « - Л. Стройиздат Ленинградское отделение 1983 -280 с.
5. ДБН Д 1.1.-1-2000 «Практика формирования отношений в строительстве».
6. Технические описания кровельных материалов.
7. ДБН В.2.6-14-97 «Покрытия здания и сооружений».
8. Битумно- полимерные кровельные и гидроизоляционные материалы. Обзорная информация ВНИИЭСМ-М.,1980. Серия 6. вып.1 - 44с.
9. Общие производственные нормы расхода материалов в строительстве. Сборник 09. Кровельные работы. Минстрой СССР-М., Стройиздат 1986 -56с.
10. Рекомендации по эксплуатации и ремонту кровель из рулонных материалов . ЦНИИПромзданий –м., Стройиздат. 1986 -41с.

Рукопись поступила в редакцию 07.03.14

УДК 622.831

Р.И. МАНУЙЛЕНКО, канд. техн. наук, И.А. ТУРБОР, аспирант  
Институт прикладной математики и механики НАН Украины  
Институт физики горных процессов НАН Украины

### РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ МАССИВА ПРИ ВЫЕМКЕ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Проведено исследование состояния породного массива с разрабатываемым угольным пластом. Назад пластическую задачу о напряженном состоянии краевой части угля и упругую задачу о состоянии окружающих пород. Предложена методика определения газонасыщенности пласта.

**Актуальность проблемы.** Метан угольных предприятий является важным энергоресурсом. Промышленное производство позволит снизить зависимость от импортируемых ресурсов и повысить безопасность работ в шахтах. Различные модели описывают содержание и движение

ние метана в породном массиве. Однако, на данный момент многие ученые считают, что движение метана в угле и в породах связано с напряженным состоянием пород.

Шахты вырабатывают угольные пласты, расположенные на глубине более 1000 м. Высокие темпы движения лавы создают условия для динамических явлений.

Давление пород определяет формирование и процессы развития в массиве и динамические явления при добыче полезных ископаемых [1-3].

Термодинамическая гипотеза связана с тем, что в исходном состоянии есть исходные элементы, которые при определенных условиях трансформируются в молекулу метана.

Такое формирование происходит в гиперсреде при высоком давлении и выделении энергии. Эта гипотеза всесторонне исследована М.М. Андреевым [1-3].

**Анализ исследований и публикаций.** Натурные наблюдения исследователей позволили установить, что в окрестности выработанного пространства угленосного массива формируются свод разгрузки и зона техногенных трещин.

Свойства угленосного массива разнообразны и изменчивы в каждом месте ведения горных работ.

Это связано не только с изменчивостью в широком диапазоне мощности тех или иных пластов, разгружаемых горными работами от геостатического давления, но также с непостоянством их физико-химических и, прежде всего, прочностных свойств.

**Постановка задачи.** В данной работе исследуется напряженное состояние породного массива при разработке угольного пласта.

На основании полученных данных необходимо спрогнозировать количество метана в угольном пласте и породах.

Отношения между напряжениями и деформациями выражены в общем виде с помощью закона Гука.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = b_{11}\sigma_x + b_{12}\sigma_y + b_{16}\tau_{xy}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = b_{21}\sigma_x + b_{22}\sigma_y + b_{26}\tau_{xy} \quad (1)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = b_{61}\sigma_x + b_{62}\sigma_y + b_{66}\tau_{xy}$$

где  $b_{ij}$  - матричные коэффициенты,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$  - напряжения,  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$  - деформации,  $u, v$  - смещения пород.

Система уравнений теории упругости также включает уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

и условия совместимости деформаций

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (3)$$

Система сводится к дифференциальному уравнению в частных производных четвертого порядка.

$$b_{22} \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} - b_{26} \frac{\partial^4 U}{\partial x^3 \partial y} + (b_{12} + b_{21} + b_{66}) \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} - b_{16} \frac{\partial^4 U}{\partial x \partial y^3} + b_{11} \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \quad (4)$$

Характеристическое уравнение является алгебраическим уравнением четвертой степени с постоянными коэффициентами.

$$b_{22}\mu^4 - b_{26}\mu^3 + (b_{12} + b_{21} + b_{66})\mu^2 - b_{16}\mu + b_{11} = 0 \quad (5)$$

Корни комплексные; это доказывается на основании закона сохранения энергии [4].

Напряжения выражены как функции обобщенных комплексных переменных

$$z_j = x + \mu_j y, \quad \sigma_x = 2 \operatorname{Re}(\mu_1^2 \Phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \Phi_2'(z_2)), \quad \sigma_y = 2 \operatorname{Re}(\Phi_1'(z_1) + \Phi_2'(z_2)),$$

$$\tau_{xy} = -2 \operatorname{Re}(\mu_1 \Phi_1'(z_1) + \mu_2 \Phi_2'(z_2)),$$

$$u = 2 \operatorname{Re}(p_1 \Phi_1(z_1) + p_2 \Phi_2(z_2)) + u_0, \quad v = 2 \operatorname{Re}(q_1 \Phi_1(z_1) + q_2 \Phi_2(z_2)) + v_0. \quad (6)$$

Для ортотропных пород уравнение является биквадратным, а его корни чисто мнимые.

Задача напряженного состояния массива вблизи производства решается следующим образом.

Естественное состояние пород обусловлено их собственным весом.

$$\sigma_y^{(0)} = -\rho(H-y); \sigma_x^{(0)} = -\rho\lambda(H-y); \tau_{xy}^{(0)} = 0 \quad (7)$$

где  $\rho$  - плотность пород,  $\lambda$  - коэффициент бокового распора.

При разработке угольного пласта к начальному напряжению добавляется дополнительное поле.

$$\sigma_x = \sigma_x^{(0)} + \sigma_x^{(1)}, \sigma_y = \sigma_y^{(0)} + \sigma_y^{(1)}, \tau_{xy} = \tau_{xy}^{(0)} + \tau_{xy}^{(1)} \quad (8)$$

Граничные условия, пластическое состояние угольного пласта вблизи забоя. Краевые условия таковы. Нормальные и касательные усилия отсутствуют в свободном состоянии горных пород

$$\sigma_y = \tau_{xy} = 0, \quad -x_1 < x < x_1 \quad (9)$$

Пласт несжимаем вне зоны опорного давления.

$$v^+ = h, v^- = -h, x_n < |x|, \quad y = 0 \quad (10)$$

Угольные пласты вблизи выработанного пространства переходят в пластическое состояние под действием окружающих пород. Чтобы сформулировать граничные условия в зоне опорного давления, необходимо решить пластическую задачу определения напряжений в краевой части угольного пласта. В случае пластической анизотропии критерий пластичности был введен Мизесом[5].

$$\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4g^2} + \tau_{xy}^2 = k^2 \quad (11)$$

$g$  - параметр пластической анизотропии.

Уравнение связи напряжения и смещения

$$g^2 \frac{\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}}{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}} \quad (12)$$

уравнение жесткости

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

и уравнения равновесия добавляются к этому условию, образуя систему уравнений пластичности.

Касательные напряжения на контакте пород удовлетворяют формуле

$$\tau_{xy} = \pm r(x) = \mp k \frac{c(x-x_0)}{\sqrt{c^2(x-x_0)^2 + g^2}} \quad (14)$$

Коэффициенты  $c$  определяются экспериментально.

Система дифференциальных уравнений пластичности имеет гиперболический тип.

В этом случае внутри угольного пласта существуют два типа характеристических линий. Значения функций определены в точках пересечения линий одного типа с линиями другого. Пластическая зона разделяется на ограниченные зоны.

Напряжения и направления линий скольжения определяются из решения начальной характеристической задачи и смешанной задачи.

Численный метод позволяет решить начальную характеристическую задачу. Зона ограничена четырьмя линиями, на двух из которых уже известны напряжения. Координаты в узловых точках определяются путем решения разностных уравнений.

Способ позволяет найти координаты точек и напряжения в них с любой точностью во всей зоне.

Смешанная задача формулируется так. Зона ограничена двумя характеристиками и линией контакта, которая не является характеристической линией. Разделим сегменты на равные части, и с них проводят характеристические линии. Координаты узлов сетки и значение параметров в узловых точках находят из разностных соотношений. На контакте параметры определяются из граничных условий. Таким образом, напряженное состояние определено в данной зоне.

Действуя аналогичным образом, во всех зонах пласта, двигаясь по линиям скольжения, можно полностью определить напряжения.

Таким образом, в неупругой зоне угольного пласта известные вертикальные напряжения и касательные напряжения. На основе найденного решения сформулируем граничные условия. Для упрощения вычислений считаем, что напряжения в каждой зоне распределены линейно по координате

$$\sigma_y = -\gamma H \left( a_k \frac{x}{h} + c_k \right), \quad x \in (x_k; x_{k+1}), y = 0; \quad \sigma_y = -\gamma H \left( -a_k \frac{x}{h} + c_k \right), \quad x \in (-x_{k+1}; -x_k), y = 0; \quad (15)$$

$$k = 1, 2, \dots, n-1$$

Влияние выработки имеет локальный характер, поэтому граничное условие

$$\Phi'_1(\infty) = \Phi'_2(\infty) = 0 \quad (16)$$

*Решение.* Решение краевой задачи дается формулой Келдыша - Седова

$$F(z) = \frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{a_k z + c_k}{2\pi i} \ln \frac{i\sqrt{z^2 - x_{k+1}^2} \sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2} - zx_k + x_{k+1}^2}{x_{k+1}(x_k - z)} - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{a_k z - c_k}{2\pi i} \ln \frac{i\sqrt{z^2 - x_{k+1}^2} \sqrt{x_{k+1}^2 - x_k^2} - zx_k - x_{k+1}^2}{x_{k+1}(-x_k - z)}$$

$$\Phi'_1(z_1) = \frac{\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} F(z_1); \quad \Phi'_2(z_2) = \frac{\mu_1}{\mu_1 - \mu_2} F(z_2) \quad (17)$$

На рис. 1 показаны изолинии вертикальных напряжений в породах песчанистого сланца.

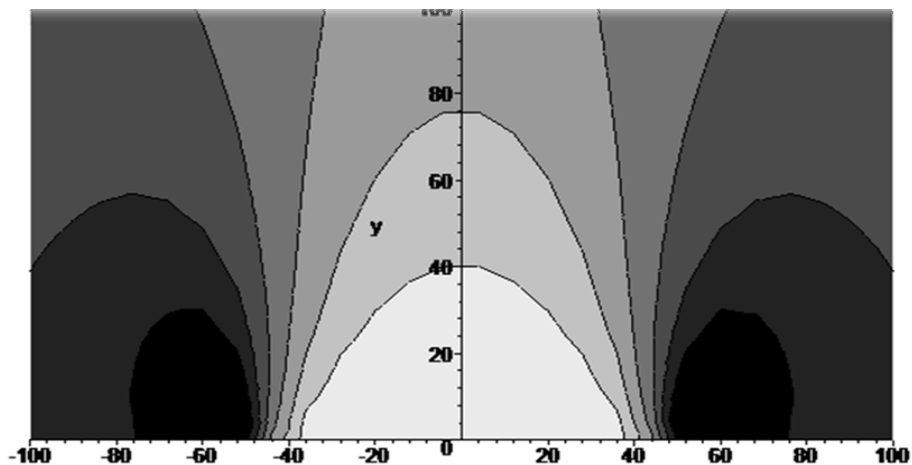


Рис. 1. Изолинии вертикальных напряжений в породах вблизи угольного пласта

Напряженное состояние напрямую влияет на распределение метана в угольном пласте и окружающих породах. Промышленный метаморфизм угольного пласта характеризуется тремя этапами:

повышение давления от геостатического давления до максимального значения;

снижение до значения исходного давления;

разгрузка угольного пласта, где напряжение является меньше по абсолютной величине, чем значение геостатического напряжения

*Распределение метана.* С увеличением напряжения сжатия в углеродных связях между атомами нарушаются, но потоки жидкости и газа отсутствуют.

Далее, давление в точке уменьшается. Атомы отделяются от макромолекулы.

Это приводит к фильтрации воды в угольный пласт.

Когда давление угольного пласта становится меньше по абсолютной величине, чем начальное напряжение, происходит частичное отслоение атомов углерода внутри угольного пласта.

Это приводит к увеличению газонасыщенности пласта.

Поскольку породы, согласно исследованиям М.М. Андреева [2], имеют большую проницаемость, чем уголь, большая часть метана из пласта поступает в породы.

Насыщение газа определяется по формуле

$$g(x, y, z, T) = \int_0^T (s(l_m) - s(l_0)) \frac{l_m - l_0}{l_m} \frac{H - l_0}{H} dt \quad (18)$$

$$s(H) = \sin\left(\frac{\pi H}{2 H_0}\right), l = \frac{\sigma}{\rho}$$

На рис. 2 показано прогнозируемое распределение метана на участке разгрузки угольного пласта (кривая 1), вычисленное по формуле (18), найденное по эмпирической формуле (кривая 2) и полученное экспериментально по данным метода магнитно-резонансной локализации недр (кривая 3).

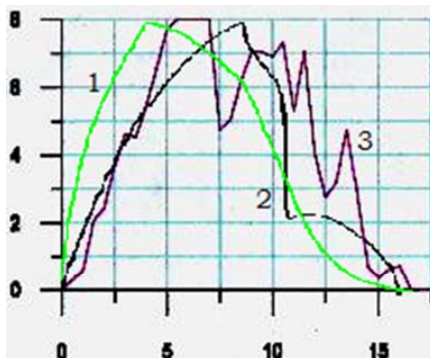


Рис. 2. Характер формирования метановых потоков

Сравнение результатов показывает, что формула (18) с высокой точностью описывает процессы формирования газовых потоков в угольном пласте.

В дальнейшем планируется исследовать фильтрацию метана в угле и породах, на основании исследований планируется предложить оптимальное расположение газодобывающих скважин

#### Список литературы

1. Андреев М.М. Критерии применения дегазации по способу и параметрам // Уголь Украины, 2000. - №8.
2. Андреев М.М. Технология управления термодинамикой угленосного массива // Уголь Украины, 2004. - №6.
3. Андреев М.М. Введение в термодинамику угленосного массива // Сб. докладов Международной науч.-техн. конференции «Форум горняков-2003». – Днепропетровск: НГАУ, 2003.
4. С.Г. Лехницкий Теория упругости анизотропного тела. – М.: Наука, 1977 – 416 с.
5. Левшин А.А., Мануйленко Р.И. Напряженно-деформированное состояние анизотропного массива горных пород // Теоретическая и прикладная механика, вып. 27.-1997.-С. 81-86.

Рукопись поступила в редакцию 07.03.14

УДК 621.313.2

В.А. ВЛАСЕНКО, ассистент, О.В. ІЛЬЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## ВПЛИВ ВЗАЄМОІНДУКЦІЇ ФАЗ ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНОГО ДВИГУНА НА ЙОГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Здійснено якісний та кількісний аналіз впливу явища взаємоіндукції фаз вентильно-індукторного двигуна на його електромеханічні характеристики на основі математичного моделювання із застосуванням програмного пакету Matlab. Розроблено рекомендації щодо ефективної схеми ввімкнення фаз обмотки вентильного індукторного двигуна.

**Ключові слова:** взаємоіндукція, вентильно-індукторний двигун, схема ввімкнення

**Актуальність роботи.** За останній час вентильно-індукторні двигуни (ВІД) набувають активного розвитку, що передбачає здійснення поглиблених досліджень складних електромагнітних та механічних процесів при їх роботі. Отримані результати теоретичних досліджень мають прикладне значення, так як дозволяють підвищити енергетичні та експлуатаційні характеристики машин. Один із мало досліджених процесів роботи ВІД обумовлений явищем взаємоіндукції, яке проявляється як вплив магнітного потоку котушки однієї фази на потікозчеплення іншої фази.