

УДК 622.831.325.3

Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА ПАРАМЕТРЫ ГАЗОВОГО КОЛЛЕКТОРА В ЗОНЕ
СДВИЖЕНИЯ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ СВИТЫ
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Предложено газовый коллектор рассматривать как часть зоны сдвижения пород кровли и почвы отрабатываемого пласта, в пределах которой параметры пористости и проницаемости пород отличаются от соответствующих параметров в углепородном массиве вне зоны влияния горных выработок.

Ключевые слова: газовый коллектор, углепородный массив, геомеханические процессы, подвигание, газовая «ловушка».

Понятие газовый коллектор применяется для класса пористых и трещиноватых пород, которые могут служить ёмкостью для газа и достаточно проницаемы, чтобы отдавать под влиянием техногенных и природных процессов в углепородном массиве [1, 2]. Отдельное понятие существует для газового коллектора выработанного пространства, заполненного газом или метановоздушной смесью [3, 4].

В настоящей работе предлагается газовый коллектор рассматривать как часть зоны сдвижения пород кровли и почвы отрабатываемого пласта, в пределах которой параметры пористости и проницаемости пород отличаются от соответствующих параметров в углепородном массиве вне зоны влияния горных выработок.

Следует различать объём газового коллектора и объём газа в газовом коллекторе. Объём газового коллектора рассматривается как часть зоны сдвижения, в пределах которой под влиянием техногенных процессов происходит изменение природного состояния пород и флюидов. Объём

газа в газовом коллекторе определяется с учётом давления газа и эффективной пористости.

Понятие эффективной пористости широко используется в нефтяной геологии, как совокупность пор занятых нефтью. Принимается как аксиома, что объём пор, через которые происходит при определённом давлении и температуре движение жидкостей или газов меньше общей пористости.

В углепородном массиве в зоне сдвижения при наличии расщепления пород по контактам, а также в зонах обрушения и трещинообразования эффективная пористость может существенно превышать общую пористость в породном образце. Поэтому исследование геомеханических и газодинамических процессов должны проводиться комплексно, с учётом динамики флюидов и трещинообразования.

К динамическим характеристикам газового коллектора отнесены скорость фильтрации и дебит газа при изменении проницаемости углепородного массива под влиянием техногенных и геомеханических процессов.

В настоящее время предложено несколько геометрических схем сдвижения горных пород под влиянием очистного выработанного пространства свиты угольных пластов [5—9 и др.]. Авторы некоторых схем рассматривают сдвижение только подработанных пород кровли. Такой подход не соответствует действительности, так как на шахтах известны случаи интенсивного пучения пород почвы отработываемого пласта и выделения из них метана [10].

Влияние геомеханических процессов на параметры газового коллектора происходит посредством изменения пространственного распределения областей сжатия и растяжения горных пород в зоне сдвижения. При наличии растягивающих деформаций увеличивается пористость и проницаемость пород, уменьшается давление флюидов. Соответственно в этой зоне происходит накопление флюидов и их миграция в сторону участков с пониженным давлением. При наличии зон сжимающих деформаций происходит, наоборот, уменьшение пористости пород и снижение интенсивности фильтрации флюидов, увеличение давления воды и газа, в этом случае возможно формирование газовых «ловушек».

Границы зон сжатия и растяжения, соответственно и границы газового коллектора, при движущемся очистном забое не являются постоянными и перемещаются во времени и пространстве. Однако при наличии в зоне сдвижения нескольких зон сжатия и растяжения возможно образование газовых «ловушек», из которых при движении очистного забоя и изменении напряжённо-деформированного состояния происходит залповое выделение газа.

Для определения параметров газового коллектора разработан и реализован в виде комплекса компьютерных программ алгоритм, включающий:

- граничные условия зоны сдвижения, регламентированные «Правилами охраны...» (ВНИМИ) [11];
- закономерности деформирования горных пород при периодическом обрушении пород кровли и пучения пород почвы;
- неравномерность подвигания нескольких очистных забоев при отработке свиты пластов;
- литологию углепородной толщи;
- зависимости прочности и деформационных характеристик пород от их напряжённо-деформированного состояния.

Для калибровки математической модели использовались результаты натуральных наблюдений сдвижений реперов, установленных на земной поверхности, в скважинах, на контуре выработок.

При построении математической модели по сравнению с теорией послойного обрушения подработываемых породных слоёв принят алгоритм деления углепородного массива на породные плиты пропорционально цилиндрической жёсткости породных слоёв [12]

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (1)$$

где D — цилиндрическая жёсткость породного слоя; E — модуль упругости пород в слое; ν — коэффициент Пуассона пород в слое.

Согласно формуле (1) в подработываемой толще формируются пакеты породных слоёв в виде породных плит. Если цилиндрическая жёсткость верхней плиты меньше чем жёсткость нижней плиты, то происходит слияние плит. В этом случае вероятность

миграции метана по контактам этих соседних плит весьма низкая. При жёсткости верхней плиты больше жёсткости нижней плиты между ними по напластованию формируется трещина. Как правило, трещина возникает в слабом слое, в том числе в подрабатываемом пласте-спутнике. Соответственно по трещине происходит миграция метана из этого пласта и вмещающих пород.

Возможность дезинтеграции подрабатываемых пород кровли на породные плиты доказана фундаментальными теоретическими исследованиями С.Г. Авершина, А.А. Борисова, Г.Н. Кузнецова и др. и подтверждена результатами шахтных исследований, например [13].

При прогибе отдельных породных плит в верхней части возникают сжимающие горизонтальные напряжения и деформации, а в нижней — растягивающие, что также приводит к неравномерности фильтрационных свойств пород.

Вычисленные по разработанному алгоритму метода конечных элементов деформации растяжения, сжатия или их сочетания по разным осям координат использованы для определения величины пористости и трещинной проницаемости и границ зон сдвига пород с разными фильтрационными параметрами, в том числе газовые «ловушки».

Для этого рассмотрены следующие сочетания главных относительных деформаций (таблица):

- все деформации растягивающие, то есть

$$\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 > 0; \varepsilon_3 > 0, \quad (2)$$

где $\varepsilon_1; \varepsilon_2; \varepsilon_3$ — главные относительные деформации;

- все деформации сжимающие, то есть

$$\varepsilon_1 < 0; \varepsilon_2 < 0; \varepsilon_3 < 0; \quad (3)$$

- сочетания относительных деформаций разных знаков.

Для иллюстрации результатов определения границ зон сжатия и растяжения пород, а также газового коллектора на рис. 1 приведены графики относительных вертикальных деформаций.

Посредством наложения и анализа изолиний установлено, что условия максимальной фильтрации во всех направлениях возникают только в зонах обрушения и разломов в пределах $0,23L$, где L — длина выработанного пространства. В остальном объёме зоны сдвига возможны условия фильтрации, указанные в строках 2 — 8 табл. 1.

Кроме деформаций разработанный вариант метода конечных элементов позволяет определять остаточную прочность угля и пород в зоне сдвига горных пород. На рисунке 2 приведены графики распределения отношения остаточной прочности пород к исходной. Как следует из графиков, зона границы зоны частично разрушенных пород кровли находится на расстоянии $0,7L$, а в почве пласта — $0,3L$, где L — длина выработанного пространства. Для других горно-геологических условий эти величины могут отличаться.

Разработанная методика выделения зон с характерными условиями фильтрации использована для установления закономерностей формирования газового коллектора под влиянием движущегося очистного забоя.

Установлено, что основными параметрами газового коллектора, влияющими на вероятность возникновения аварии или инцидента по газодинамическим условиям, является объём газового коллектора в зоне сдвига углепородного массива, количество метана в газовом коллекторе, фильтрационные свойства пород

Варианты сочетаний относительных деформаций ($\varepsilon_i > 0$ — растяжение, $\varepsilon_i < 0$ — сжатие) и условия фильтрации метана в зонах области сдвижения

Номер варианта	Сочетания относительных деформаций, $\varepsilon_i > 0$ — растяжение, $\varepsilon_i < 0$ — сжатие	Условия фильтрации
1	$\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 > 0; \varepsilon_3 > 0$	Максимальная фильтрация во всех направлениях
2	$\varepsilon_1 < 0; \varepsilon_2 < 0; \varepsilon_3 < 0$	Минимальная фильтрация во всех направлениях
3	$\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 < 0; \varepsilon_3 < 0$	Формирование трещин, перпендикулярных оси 1 и миграция метана в плоскости осей 2-3, возможно формирование газовой «ловушки»
4	$\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 > 0; \varepsilon_3 < 0$	Формирование трещин, перпендикулярных осям 1 и 2 и миграция метана по оси 3
5	$\varepsilon_1 < 0; \varepsilon_2 > 0; \varepsilon_3 > 0$	Формирование трещин, перпендикулярных осям 2 и 3 и миграция метана по оси 1
6	$\varepsilon_1 > 0; \varepsilon_2 < 0; \varepsilon_3 > 0$	Формирование трещин, перпендикулярных осям 1 и 3 и миграция метана по оси 2
7	$\varepsilon_1 < 0; \varepsilon_2 < 0; \varepsilon_3 > 0$	Формирование трещин, перпендикулярных оси 3 и миграция метана в плоскости осей 1-2, возможно формирование газовой «ловушки»
8	$\varepsilon_1 < 0; \varepsilon_2 > 0; \varepsilon_3 < 0$	Формирование трещин, перпендикулярных оси 2 и миграция метана в плоскости осей 1-3, возможно формирование газовой «ловушки»

в пределах газового коллектора и пространственно-временное распределение газовых скоплений («ловушек»).

При исследовании выделены следующие типы газового коллектора:

- *природный газовый коллектор*, параметры которого не зависят от параметров и пространственно-временного расположения очистных и подготовительных горных выработок и очистного выработанного пространства;

- *техногенный газовый коллектор*, параметры которого зависят от пространственно-временного расположения очистных и подготовительных выработок и очистного выработанного пространства.

Параметры природного газового коллектора устанавливаются на стадии проведения геологоразведочных работ и являются основой для расчёта параметров проветривания и дегазации угольных шахт, согласно. В пределах отдельного геологического участка или блока шахты параметры

природного газового коллектора принимаются в расчётах, как правило, постоянными, что не всегда подтверждается в процессе ведения горных работ.

Параметры техногенного газового коллектора зависят от многих технологических факторов и режимов отработки свиты угольных пластов и существенно меняются в пределах отдельного выемочного участка, что подтверждается неравномерностью метановыделения при движении очистного забоя.

Предлагается изменение пористости пород под влиянием техногенных процессов оценивать как отношение объёмов конечных элементов

$$p = \frac{V_T - V_H}{V_{\Pi}} 100\% , \quad (4)$$

где p — изменение пористости пород, %; V_T — объём конечного элемента в зоне сдвижения, м^3 ; V_H — объём ко-

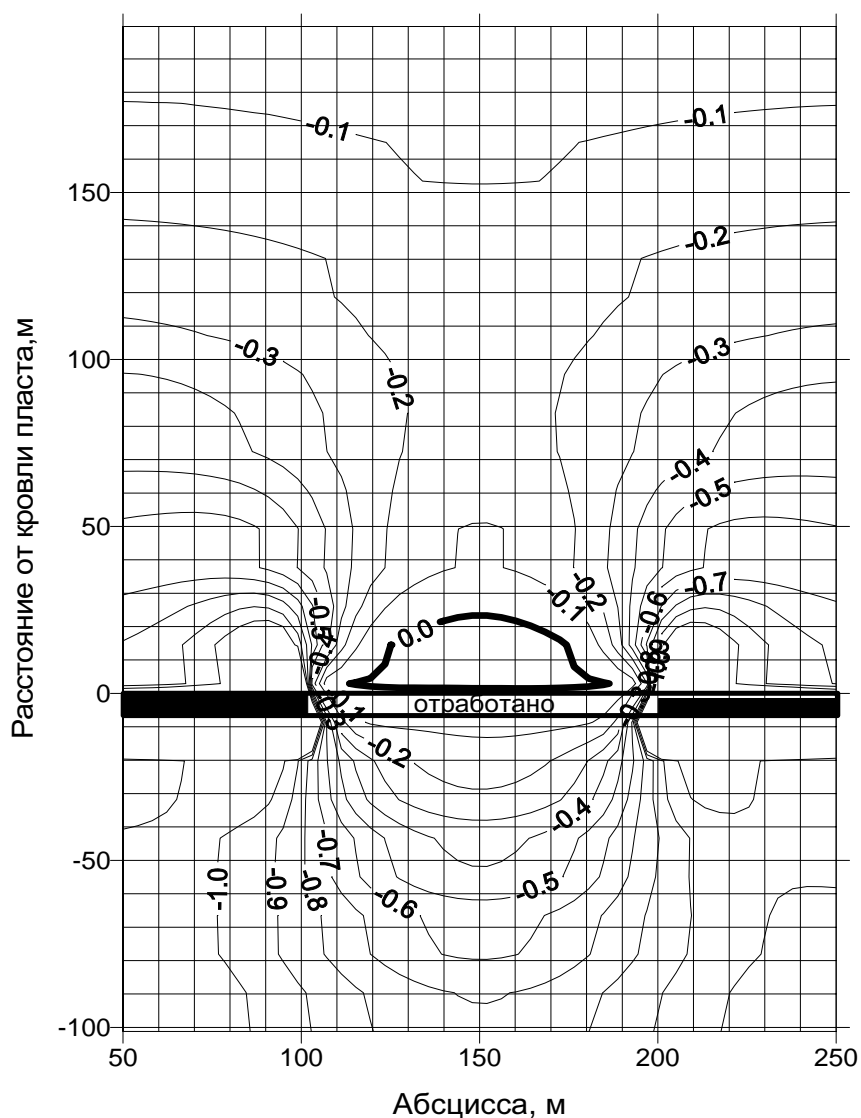


Рис. 1. Относительные вертикальные деформации, $\varepsilon \cdot 1000$, филиал «Шахта «Осинниковская» ОАО «ОУК «Южжубассуголь»

нечного элемента в нетронутом углепородном массиве, м^3 ; $V_{\text{л}}$ — объём конечного элемента в зоне полной разгрузки (в лабораторном образце породы), м^3 .

Результаты расчёта по формуле (4) приведены на рис. 3, согласно которому увеличение пористости происходит в зонах обрушения, трещин и

надработки, то есть в этих зонах возможно увеличение объёма метана и формирование газового коллектора. В остальных зонах, где происходит уменьшение пористости пород при неизменном количестве метана в породах в углепородном массиве формируются газовые «ловушки», в которых давление метана может существ-

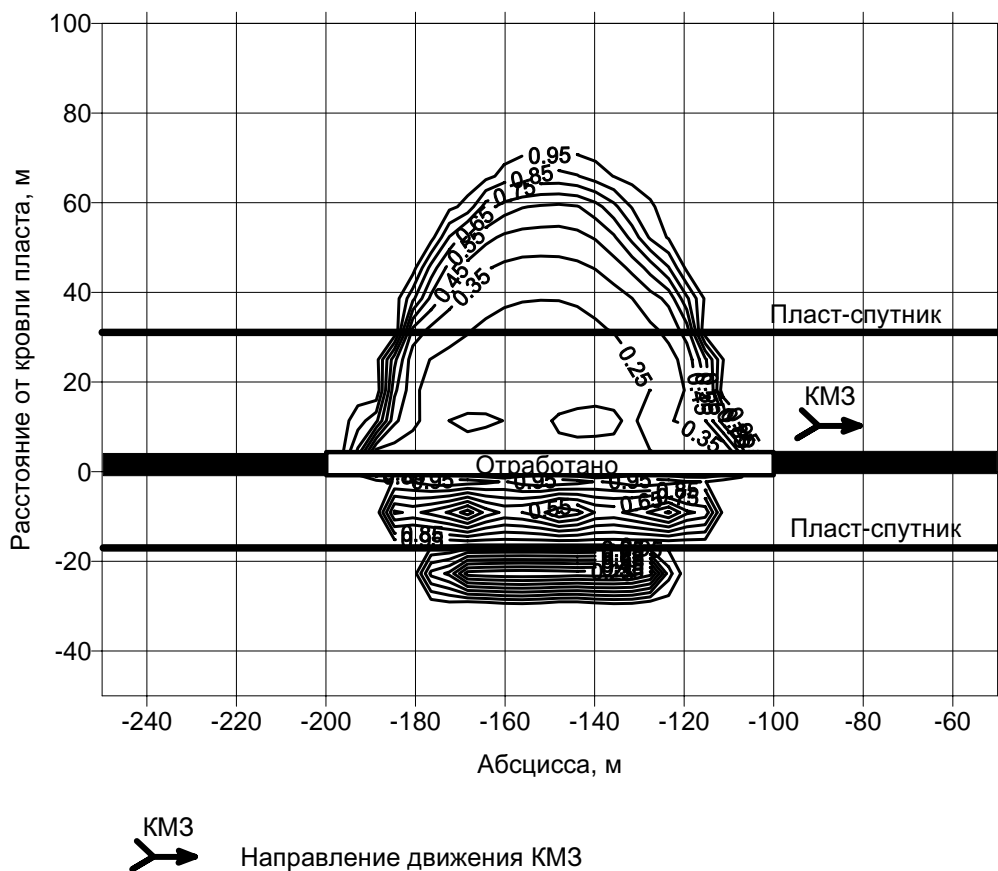


Рис. 2. Отношение остаточной прочности пород к исходной (тестовый пример)

венно превосходить природное в нетронутым массиве. При этом метан может переходить из газообразного состояния в клатратное или гидратное, а также в химически связанное с угольным массивом состояние под влиянием давления и температуры. Эти выводы подтверждаются низкой эффективностью скважинной дегазации угольных пластов в зоне опорного горного давления.

Для варианта расчётной модели, приведённой на рис. 3, приняты длина очистного выработанного пространства 200 м и длина лавы 200 м. По результатам решения трёхмерной задачи объём газового коллектора, где про-

изошло увеличение техногенной пористости пород под влиянием техногенных процессов, объём пород составил 5804839 м^3 , объём всех пор, с учётом природной и техногенной пористости, — 416207 м^3 , объём пор, возникших под влиянием техногенных процессов, — 10812 м^3 . То есть по результатам моделирования можно прогнозировать объёмы пор, которые могут быть заполнены флюидами.

Так как газовый коллектор, где произошло увеличение техногенной пористости пород под влиянием техногенных процессов, расположен в зоне обрушения и трещин, то следует ожидать, что давление метана в этом

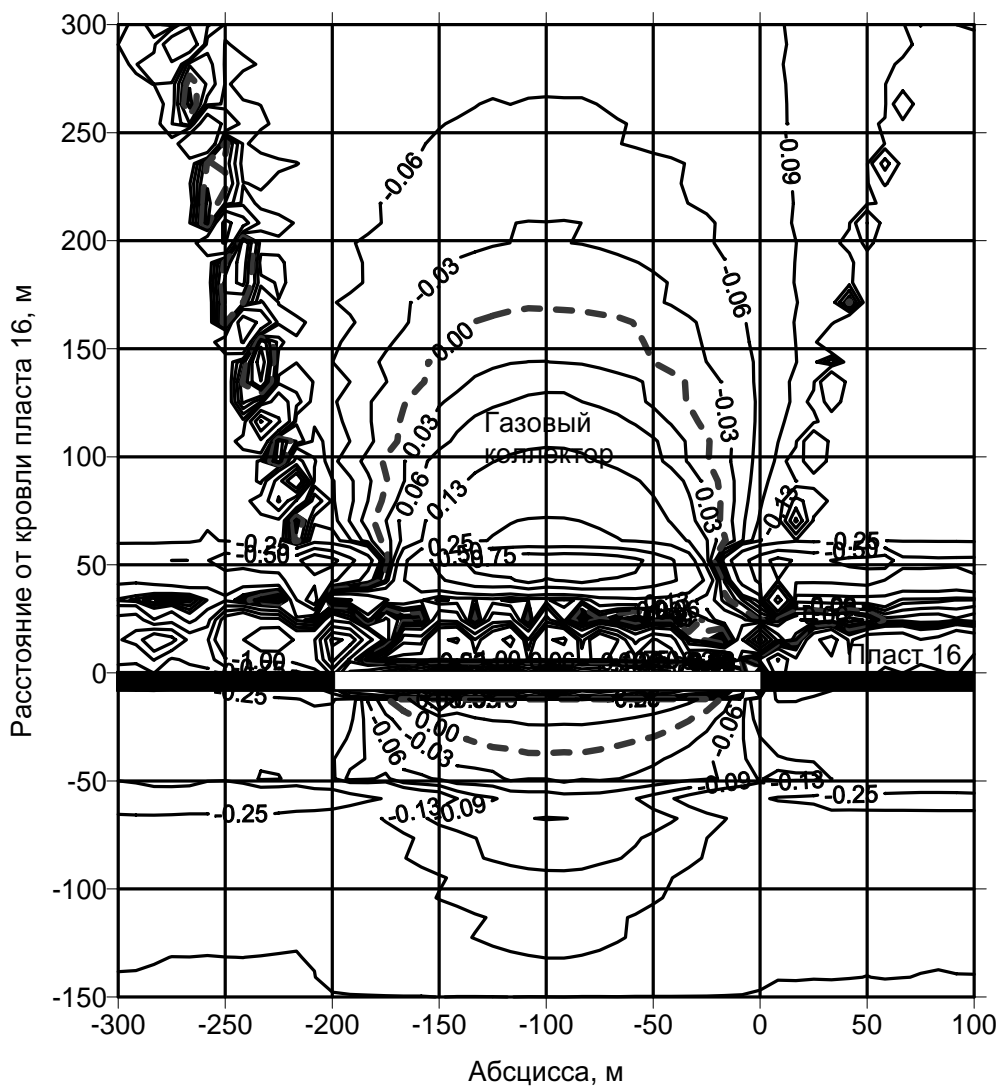


Рис. 3. Отношение разности объёмов конечных элементов в углеродном массиве и в зоне полной разгрузки массива к объёму конечных элементов в зоне полной разгрузки (в лабораторных условиях), %

коллекторе близкое к давлению шахтной атмосферы. Выравнивание давления возможно за счёт утечек воздуха и применения комбинированных схем проветривания с газоотсосом метановоздушной смеси из выработанного пространства. Так как газовый коллектор расположен выше кровли пласта, а плотность метана

ниже плотности воздуха в шахтной атмосфере, то можно принять объём метана, который может быть выделен из выработанного пространства при первичном обрушении пород кровли не менее 10812 м^3 .

Согласно рис. 3 формирование газовых «мешков» наиболее вероятно в кровле пласта на расстоянии, равном

30 кратной вынимаемой мощности пласта в зоне опорного горного давления. Причинами этого явления можно объяснить сменой знаков горизонтальных сдвижений (см. таблицу). На этой высоте в подрабатываемой толще залегают пасты нерабочей мощности 17 и 27а и, очевидно, они являются причиной интенсивного трещинообразования и горизонтальных смещений вмещающих их породных слоёв. Это подтверждает необходимость учёта полного вектора сдвижений при прогнозе параметров газораспределения в углепородном массиве в зоне влияния горных выработок.

На основе анализа и обобщения результатов исследований взаимодействия геомеханических и газодинамических процессов можно сделать следующие выводы.

1) Наличие растягивающих вертикальных напряжений и деформаций в зоне разгрузки и сжимающих горизонтальных напряжений и деформаций может привести к формированию газовых «ловушек», в пределах которых миграция газа осуществляется по напластованию или нормально породным слоям и угольным пластам в свите. В пределах газовых «ловушек» возможно «запирание» газа под большим давлением.

2) В подрабатываемой толще формируются пакеты породных слоёв в виде породных плит. Если цилиндрическая жёсткость верхней плиты меньше чем жёсткость нижней плиты, то происходит слияние плит. В этом случае вероятность миграции метана по контактам этих соседних плит весьма низкая. При жёсткости верхней плиты больше жёсткости нижней плиты между ними по напластованию формируется

трещина. Как правило, трещина возникает в слабом слое, в том числе в подрабатываемом пластеспутнике. Соответственно по трещине происходит миграция метана из этого пласта и вмещающих пород.

3) Влияние слоистой структуры углепородной толщи на распределение относительных деформаций по глубине залегания породных слоёв проявляется в том, что в нетронутом массиве относительные деформации существенно отличаются от средних для сплошного изотропного массива. Соответственно пористость и миграционная способность пород по глубине неравномерные. В газовом коллекторе распределение газа происходит также неравномерно в зависимости от первоначальной пористости пород и глубины залегания породных слоёв.

4) Характер распределения отношения (p , %) разности объёмов конечных элементов в углепородном массиве и в зоне полной разгрузки массива к объёму конечных элементов в зоне полной разгрузки (в лабораторных условиях), при включении в углепородный массив мягких слоёв, существенно не изменяется, однако за счёт увеличения горизонтальных смещений по сравнению со смещениями в сплошном углепородном массиве, возможно раскрытие трещин и рост пористости пород не только в зонах обрушения и трещин, но и в зоне опорного горного давления.

5) По разности объёмов газового коллектора до и после обрушения пород кровли можно прогнозировать объём метановоздушной смеси, которая выделится в виде воздушного удара в горные выработки выемочного участка, составлять 3—10 тыс. м³.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горная энциклопедия* / Гл. ред. Е.А. Козловский — М.: Сов. энциклопедия, 1987. Том 3. — 592 с.
2. *Горное дело: Терминологический словарь*/ Г.Д. Лидин, Л.Д. Воронина, Д.Р. Каплунов и др. — М.: Недра, 1990. — 694 с.
3. *Аэрология горных предприятий*/К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев. — М.: Недра, 1987. — 421 с.
4. *Пучков Л.А.* Аэродинамика подземных выработанных пространств / Л.А. Пучков. — М.: Изд-во МГТУ, 1993. — 266 с.
5. *Авершин С.Г.* Расчёт деформаций массива горных пород под влиянием подземных разработок/ С.Г. Авершин. — Л.: ВНИМИ, 1960. — 87 с.
6. *Батугин С.А.* Определение деформаций горных пород при движущемся очистном забое. Автореф. дисс. канд. техн. наук, — Прокопьевск, 1963. (СФ ВНИМИ).
7. *Павлова Л.Д.* Модель блочного обрушения пород кровли при отработке свиты угольных пластов. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Международ. конф. / Л.Д. Павлова, В.Н. Фрянов — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004.
8. *Правила* охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — С-Пб.: ВНИМИ, 1998. — 291с.
9. *Снижение* газодинамической опасности подземных горных работ/Г.Я. Полевщиков, Е.Н. Козырева, Т.А. Киряева и др. //Уголь. — 2007. — №11. С 13-16.
10. *Стекольников Г.Г.* Управление аэрогазодинамическими процессами в многосвязной комбинированной вентиляционной системе угольных шахт; Автореф. дисс. докт. техн. наук. / Институт угля и углехимии СО РАН. — Кемерово, 2000. — 47с.
11. *Правила* охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — С-Пб.: ВНИМИ, 1998. — 291 с.
12. *Власов В.З.* Балки, плиты и оболочки на упругом основании/ В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев — М.: Физматгиз, 1960. — 492 с.
13. *Сдвигение* горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР. — М.: Углетехиздат, 1958. — 250 с. **ГЛАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Павлова Л.Д. — доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной информатики,
Фрянов В.Н. — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки пластовых месторождений,
 Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, rector@sibsiu.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ			
АДЖЯН Александр Арсенович	Разработка методов использования космических изображений для оценки инженерно-геологических условий горных районов	25.00.34	к.т.н.