

УДК 622.281

## ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ЗОН ПОВЫШЕННОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ РАЗВИТИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ

Бабенко Е.В. (УкрНИИМИ НАНУ, г. Донецк, Украина)

*Математичним моделюванням уточнено закономірності еволюції зон підвищеного гірського тиску. Встановлено три типу зон ПГТ: зони з рівнем концентрації напружень понад 3, що формуються в ціликах під впливом суперпозиції опорного тиску від крайових частин вугільного пласта; зони ПГТ з рівнем концентрації 1,6, які виникають в раніш сформованих регіональних зонах розвантаження під дією незворотних зрушень масиву при певній черговості відпрацювання суміжних запасів; та зони відновлення геостатичного тиску гірського масиву по досягненні повної підробки земної поверхні.*

*Computer simulation has been used to investigate abutment zone evolution due to gobs expanding. It is established three types of the abutment zones, namely abutment zone that increases rock pressure in coal pillars over 3 times comparing to stress state in situ, an abutment zone in previously formed distressing area that generates stress concentration by factor 1,6, and zone, where in situ stress is recovered due to expanding gob sizes over critical value.*

Развитие горных работ на угольных шахтах Украины достигло такого масштаба, при котором массово проявляется взаимодействие очистных и подготовительных работ. Одним из наиболее негативных проявлений этого процесса являются зоны наложения повышенного горного давления (зоны ПГД), которые оказывают отрицательное воздействие на устойчивость подготовительных выработок. Прогноз и количественная оценка зон ПГД

остається актуальною задачею.

В практиці розрахунок параметрів зон ПГД ведеться з допомогою емпіричної упрощеної методики [1]. По суті, визначається лише розмір зони ПГД в плані на рівень площини, в якій ведеться прогноз, наприклад на рівні отримуваного вугільного пласта або горизонту розташування полевих магістральних виробок. При побудові зон приймається допущення, на основі якого довжина зони опорного тиску розраховується во всіх випадках по залежності, яка прийнятна тільки для одиночної лави. Разом з тим довжина зони опорного тиску залежить від розміру сплошного виробаного простору і його конфігурації, що не враховується існуючими емпіричними методиками. Крім того, часто цікавить не тільки розмір зони ПГД, але і величина концентрації гірського тиску в цій зоні. В зв'язі з цим в даній роботі розглядається альтернативний метод розрахунок параметрів зон ПГД, який, на думку автора, позбавлений вищевказаних недоліків.

Геомеханічна модель для розрахунок тривимірного розподілу напружень в масиві побудована наступним чином. Закономерності перерозподілу напружено-деформованого стану досліджувалося з допомогою комп'ютерного моделювання, в тому числі просторовий розподіл гірського тиску.

Представимо товщу гірських порід як товсту плиту, опираючись на неоднорідне підґрунтя 3 і прогинаючись під власною вагою  $q$  (рис. 1).

Плита опирається на масив, жорсткість якого 3 залежить від наявності виробаних просторів і вилученої потужності  $m$  пластів. Позиціями 1 і 2 вказано раніше виробане простор і те, яке формується примикаючою діючою лавою.

На земній поверхні в процесі обробки лав 4 формується мульда сдвіжень земної поверхні 5. Розподіл напружень і деформацій в товстій плиті визначається при допомозі тривимірних моделей. Замінивши товсту плиту тонкою, можна вибрати такі еквівалентні величини

жесткости основания и деформационных параметров плиты, при которых некоторые параметры напряженно-деформированного состояния будут соответствовать фактическим. С помощью такой модели можно с высокой достоверностью прогнозировать прогибы, напряжения и пространственное распределение горного давления в породных слоях в пределах высоты подрабатываемой толщи.

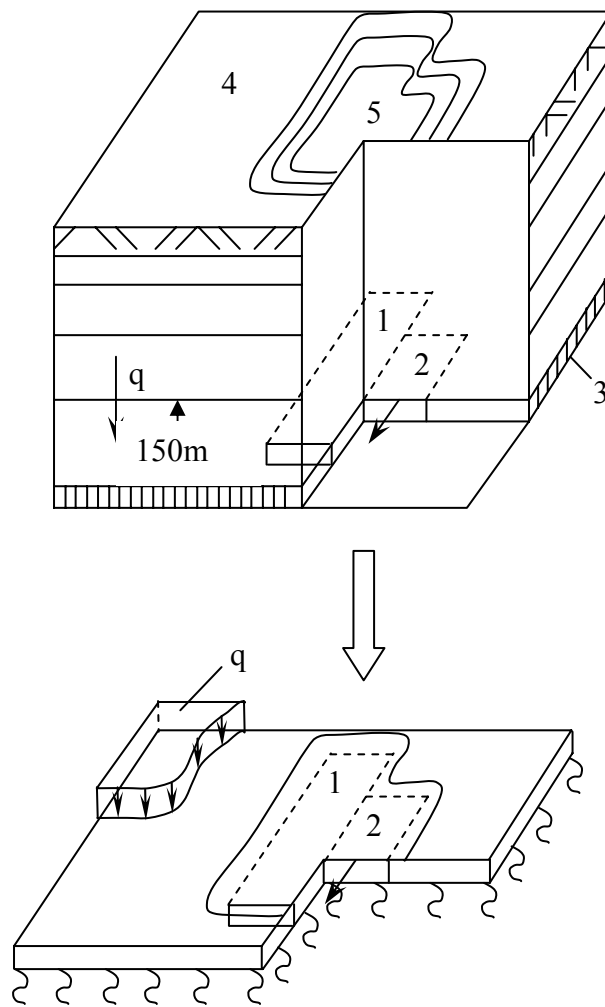


Рис. 1. Расчетная схема для определения напряженно-деформированного состояния подрабатываемой толщи горных пород:

- 1 – ранее выработанное пространство;
- 2 – действующая лава;
- 3 – основание;
- 4 – земная поверхность;
- 5 – мульда

Задача о прогибе плиты-слоя над выработанными пространствами решается путем численного дифференцирования уравнения в частных производных методом конечных разностей.

$$\frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} = \frac{q}{D} - \frac{K \omega}{D}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – прогибы точек плиты;

$q$  – нормальная к срединной плоскости и распределенная по поверхности плиты пригрузка;

$K$  – коэффициент жесткости основания, изменяющийся в зависимости от наличия или отсутствия выработанного пространства;

$D$  – цилиндрическая жесткость плиты;

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

где  $h$  – мощность плиты;

$E$  – приведенный модуль деформации слоистого массива;

$\mu$  – коэффициент Пуассона вмещающих пород.

В итоге получают опускания подработанной толщи на уровне верхней границы основной кровли пласта.

Для учета механических свойств всех слоев, составляющих толщу, их величины приводились к срединной плоскости плиты-слоя по следующей зависимости:

$$E = \frac{\sum p_i E_i}{\sum p_i}, \quad (3)$$

где  $E_i$  – модуль деформации  $i$ -го слоя;

$p_i$  – вес влияния  $i$ -го слоя, который находится по формуле

$$p_i = \frac{h_i}{y_i}, \quad (4)$$

где  $h_i$  – мощность  $i$ -го слоя;

$y_i$  – расстояние от центра тяжести  $i$ -го слоя до срединной плоскости.

Зависимость, упомянутая выше, позволила учесть свойства всех слоев подработанной толщи. Данная модель учитывает

также релаксацию напряжений и ползучесть пород, слагающих подрабатываемый массив. Это является существенным преимуществом выбранной модели, поскольку динамические процессы проявлений сдвижения горных пород являются выраженными неравновесными физическими процессами и существенно зависят от времени.

Процесс формирования и видоизменения зон ПГД наиболее характерен для шахт, отрабатывающих свиту сближенных пластов. Покажем это на примере шахты им. Героев космоса, которая отрабатывает два сближенных пласта. На рис. 2 показана одна из проектных планировок развития очистных работ, которая рассматривалась в 2000 году. Анализ указанной проектной планировки весьма полезен, поскольку наглядно иллюстрирует типичные проблемы угольных шахт, которые возникают в результате образования зон ПГД даже в том случае, когда для поддержания магистральных выработок используются региональные зоны разгрузки.

Горные работы ведутся на двух пластах: нижнем  $c_{10}^B$  и верхнем  $c_{11}$ . Пласты имеют мощность 0,7-0,9 м с локальным её понижением на незначительных площадях до 0,6 м и повышением до 0,95-1,0 м. Расстояние между ними составляет до 19-20 м, что позволяет охарактеризовать их как сближенные. Таким образом, горные работы, проводимые на одном пласте, оказывают непосредственное влияние на соседний пласт. Запасы шахтного поля подготовлены для отработки погоризонтным способом. Магистральные штреки, показанные на рис. 2 пунктирными линиями, поддерживаются в региональной зоне разгрузки, которая сформирована первоочередной отработкой специальных разгрузочных лав на обоих пластах. В верхней части шахтного поля сохраняется наклонное расположение выемочных столбов, примерно под  $45^\circ$  к ориентации разгрузочной лавы. Выемка угля в нижней части горизонта планировалась столбами по восстанию под углом примерно  $75-80^\circ$  к разгрузочной лаве.

На момент 1996 года очистные работы по пласту  $c_{10}^B$  в западной части шахтного поля были закончены лавами 1040 и 1014.

По верхнему пласту  $c_{11}$  очистные работы опережали работы нижнего пласта. Так, в верхней части уклонного поля отработана лава 1144. Её отработка завершена в конце 1998 года. В нижней части блока крайней на момент рассмотрения была лава 1118, отработка которой завершена в июле 1999 года.

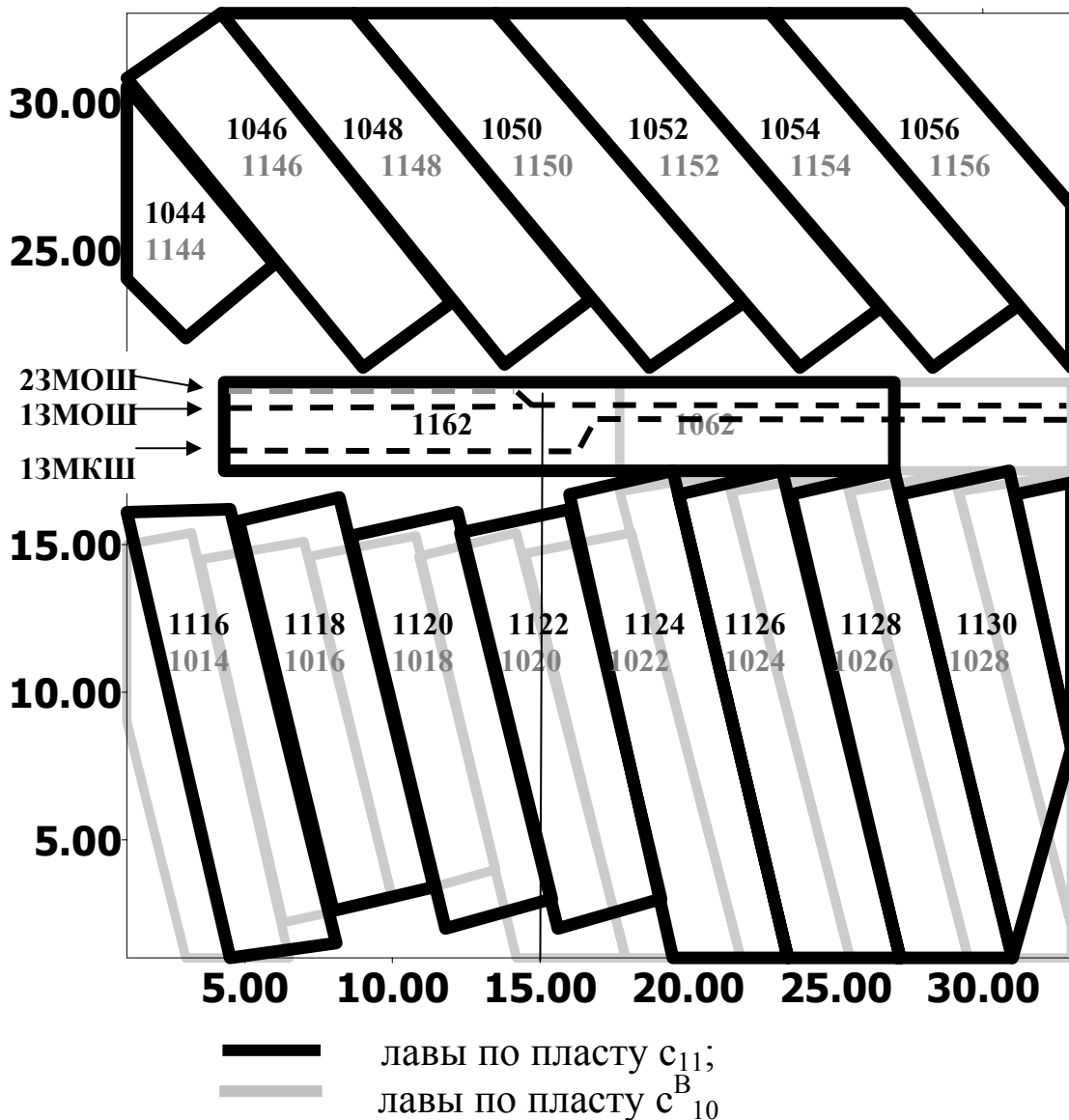


Рис. 2. Планировка развития горных работ с образованием сложной конфигурации сплошного выработанного пространства (на примере ш. им. Героев космоса)

Выемочный столб лавы 1062 несколько смещён по отношению к столбу лавы 1162. Так, дальний от стволов край расположен непосредственно на границе. Отработка лавы

произведена по столбовой системе: от дальней границы в сторону центральной части шахтного поля. Лава 1062 была остановлена на расстоянии примерно 700-750 м от крайней отработанной в западной части шахтного поля лавы. Таким образом, лавы 1162 и 1062 своими выемочными столбами перекрывают друг друга и образуют сплошную зону региональной разгрузки, протянувшуюся от существующей на данный момент границы очистных работ вплоть до границы блока №2.

В верхней части шахтного поля очистные работы проводятся таким образом, что лавы по верхнему и нижнему пластам располагаются в створе одна над другой. В нижней части шахтного поля выемочные поля лав смещены один относительно другого. При этом бортовой штрек отработываемой лавы нижнего пласта располагается под средней частью выработанного пространства отработанной ранее лавы верхнего пласта.

В целом на шахте практикуется нисходящая система отработки пластов. Т. е. сначала отработываются лавы на верхнем пласте, а затем на нижнем. Такой же порядок отработки будет задан при моделировании развития горных работ.

Одной из наиболее острых проблем на шахте является поддержание эксплуатационного состояния магистральных выработок. Опыт развития горных работ на шахтах объединения показал, что даже в случае охраны магистральных выработок в региональных зонах разгрузки, проблема обеспечения их устойчивости остается нерешенной. В данной статье рассматривается один из возможных вариантов развития горных работ. В его основе лежат следующие основные принципы. Зона региональной разгрузки со стороны верхней части шахтного поля охраняется целиками угля. С нижней стороны от разгрузочных лав уголь извлекается полностью. Очистные забои здесь подходят на минимальное расстояние к зоне разгрузки. Минимальных размеров целики, оставленные здесь для демонтажа механизированных комплексов, будут раздавлены, и произойдет слияние выработанных пространств. Из-за увеличения зоны отработки в ней будет происходить снижение эффекта разгрузки. Это весьма типичная ситуация, которая

неизбежно создается в процессе развития очистных работ на большинстве угольных шахт.

При моделировании в данной работе задавались следующие основные исходные данные, приближенные к условиям шахты им. Героев космоса:

- глубина ведения работ примерно от 360-420 м;
- угол падения пласта  $2^\circ$ ;
- шаг разбивки расчётной сетки 50 x 50 м.

На рис. 2 серым цветом показаны предполагаемые выработанные пространства от лав по пласту  $c_{10}^B$ . Чёрным цветом - пространства от лав по пласту  $c_{11}$ . Первые две цифры номера лавы обозначают номер пласта. Как уже упоминалось, лавы в верхней части шахтного поля находятся строго одна над одной. В процессе моделирования выработанные пространства вводятся в следующем порядке:

- 1) старые выработанные пространства – лавы 1162, 1116;
- 2) лавы 1144, 1062;
- 3) лава 1118;
- 4) лавы 1120, 1146, 1016, 1044;
- 5) лавы 1122, 1148, 1018, 1046;
- 6) лавы 1124, 1150, 1020, 1048;
- 7) лавы 1126, 1152, 1022, 1050;
- 8) лавы 1128, 1154, 1024, 1052;
- 9) лавы 1130, 1156, 1026, 1054;
- 10) лавы 1132, 1028, 1056;
- 11) лава 1030;
- 12) лава 1032.

Такое деление предполагает, что лавы, расположенные в одном этапе, отрабатываются в одно время. При этом можно заметить, что лавы с номерами 11XX отрабатываются ранее соответствующих лав с номерами 10XX (например, 1150 ранее 1050). Этот порядок отработки подразумевает первоначальную отработку лав на верхнем пласте, а затем на следующем этапе на нижнем. Фактически это означает нисходящую систему отработки пластов, которая и применяется на шахте. Отставание в отработке лав по нижнему пласту принято равным одному столбу.



Результаты расчётов по всем этапам развития очистных работ представлены на рисунках 3 и 4, на которых показаны распределения коэффициента концентрации нормальной к напластованию составляющей напряжений горного давления. Напомним, что коэффициент концентрации напряжений представляет собой отношение действующих в массиве напряжений к напряжениям в нетронутом массиве. Такая форма представления горного давления является весьма удобной, позволяя наглядно следить за эволюцией зон повышенных напряжений и зон разгрузки (пониженных напряжений). Цифры на границах расчетной области обозначают узлы расчетной сетки. Расстояние между соседними узлами составляет 50 м.

Первым показан этап номер три, когда отработаны 1162-я, 1116-я, 1144-я, 1062-я и лава 1118. Фактически эта ситуация имела место на момент начала 2000 года. На первых двух этапах производился учёт уже существующих выработанных пространств, попадающих в область моделирования. Это необходимо для корректного моделирования перераспределения горного давления.

На момент проведения выработок в центральной части шахтного поля имеется зона пониженных напряжений, показанная светлыми стрелками на двух верхних распределениях рис. 3. Концентрация напряжений в зоне разгрузки не достигает 0,35 в средней части зоны и 0,3 в краевых частях. Ясно, что при размещении в таких зонах магистральных штреков, выработки будут сохранять абсолютную устойчивость независимо от прочности вмещающих пород.

По мере развития горных работ наблюдается существенное видоизменение в распределении горного давления. Так в межлавных целиках у границы региональной зоны разгрузки со стороны восстания формируются участки повышенного горного давления, концентрация которого превышает 3 (участки указаны темными стрелками на рис. 3).

В региональной зоне разгрузки после отработки 1162-й лавы концентрация напряжений повышается. В охраняемой с двух сторон целиками зоне она сохраняется в пределах 0,4 после пятого этапа моделирования и 0,45-0,5 после последнего. На

участке разгруженной зоны, охраняемом целиками с одной стороны, концентрация напряжений растёт значительней.

Так в центральной части после пятого этапа она составляет до 0,4-0,42. После десятого - до 0,7, после двенадцатого - до 0,9. В краевой части под защитой целика напряжения в итоге достигают 0,65-0,7. Со стороны примыкающих лав (у границы по падению) зона разгрузки исчезает полностью и замещается выраженной областью ПГД.

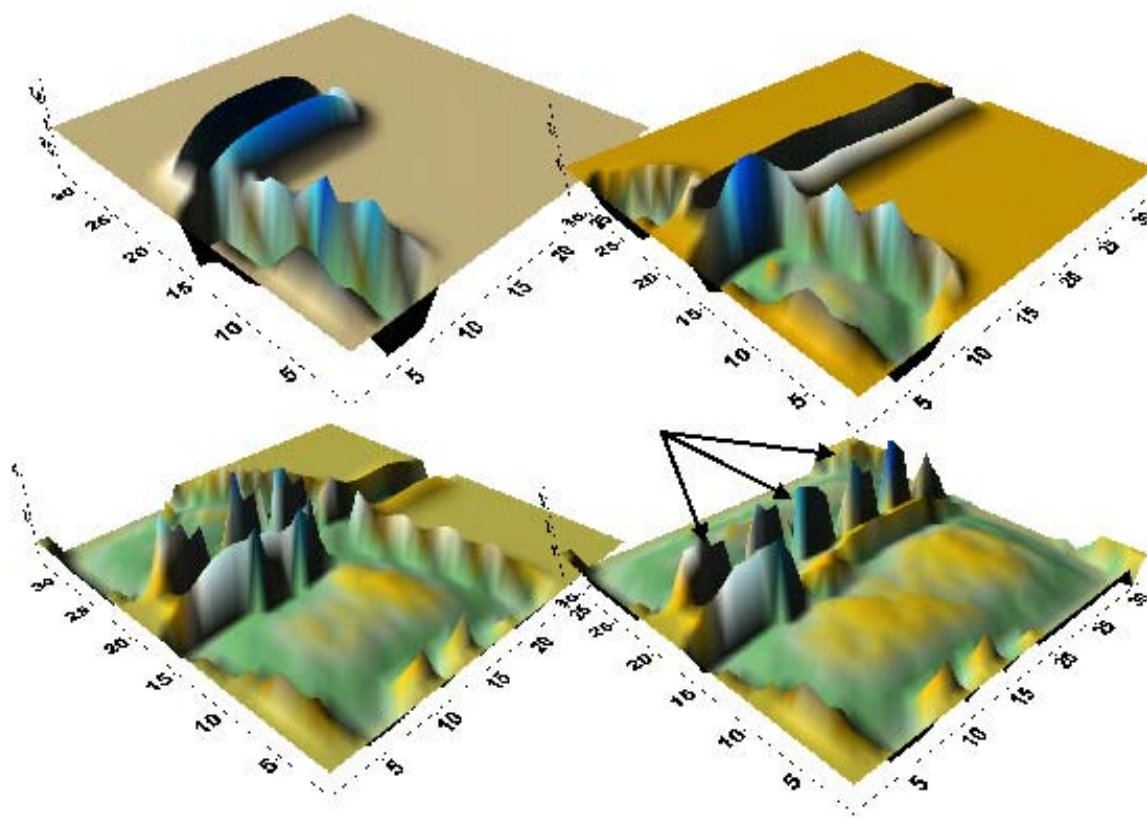


Рис. 3. Динамика перераспределения горного давления в процессе развития очистных работ по двум сближенным пластам на третьем, пятом, девятом и двенадцатом этапах развития

В зоне двукратной подработки массива концентрация напряжений изменяется от 0,55 до 1,1 (в средней части). Со стороны падения напряжения достигают 1,5 геостатического уровня, т.е. превышают напряжения в нетронутом массиве. Концентрация напряжений в охранных угольных целиках

достигает от 1,6 до 3,5 в зависимости от конфигурации и времени формирования целика.

Выработанные пространства по мере отработки лав объединяются, и в них постепенно происходит полное или частичное восстановление горного давления. Это является следствием достижения условий полной подработки земной поверхности. В верхней части горизонта концентрация горного давления на последнем этапе достигает 0,8. В нижней части она несколько выше, и составляет до 1,15.

На рисунке 4 показана карта распределения зон ПГД. Характерно, что зоны ПГД формируются не только в целиках (1), но и в ранее разгруженной зоне (2), а также в средней части сплошного выработанного пространства (3).

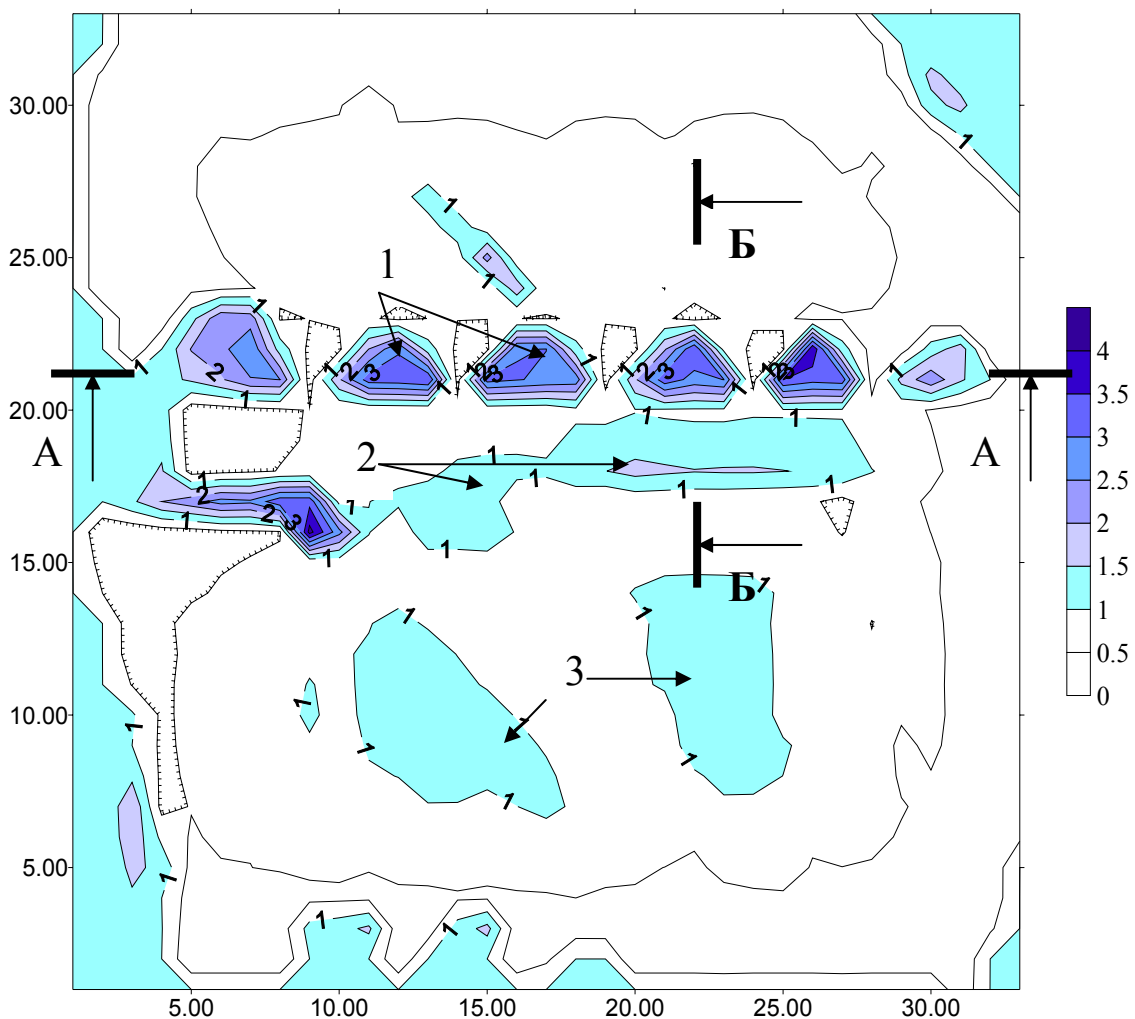


Рис. 4. Карта распределения зон ПГД на последнем этапе развития очистных работ

Механизмы формирования этих зон существенно отличаются друг от друга. Так в целиках зоны ПГД 1 генерируются под действием суперпозиции областей опорного давления от краевых участков обрабатываемых пластов. В пределах ранее разгруженной области зоны ПГД 2 возникают после бесцеликовой отработки смежных запасов в результате определенной очередности необратимых сдвижений, когда зоны полных сдвижений, отработанные ранее, испытывают активизацию и пригрузку от более поздних примыкающих выработанных пространств. Достижение условий полной подработки восстанавливает геостатический уровень напряжений, в результате чего формируются зоны ПГД 3 с незначительным уровнем концентрации напряжений. На рисунках 5 и 6 показаны эпюры распределения горного давления вдоль характерных сечений по мере развития очистных работ. Сечение А-А проведено через цепочку охранных целиков, оставленных у границы региональной зоны разгрузки со стороны восстания. Сечение Б-Б построено через поперечный разрез региональной зоны разгрузки. Со стороны восстания концентрация горного давления не превышает 1,6 до тех пор, пока не начинается отработка столбов по восстанию (этапы развития с 1 до 3). Как только начинают отработку столбов со стороны восстания, концентрация напряжений в центре формирующихся целиков треугольной формы поднимается до 3 и более, а в межцеликовом пространстве падает до 0,3 (этап 5). На этапе 7 развития очистных работ создается цепочка зон ПГД, в которых степень концентрации горного давления поднимается до уровня 3,2 - 3,6. Характерно, что со стороны нетронутого массива величина концентрации меньше, чем в целиках и составляет всего 2 единицы (указано стрелкой на кривой этапа 7).

На последних этапах 10-12 заметно, что под действием релаксации горного давления концентрация напряжений в целиках постепенно снижается. Так, только что сформированные целики концентрируют напряжения в 3,3 раза, тогда как целик, образованный первым, концентрирует давление только в 2,7 раза.

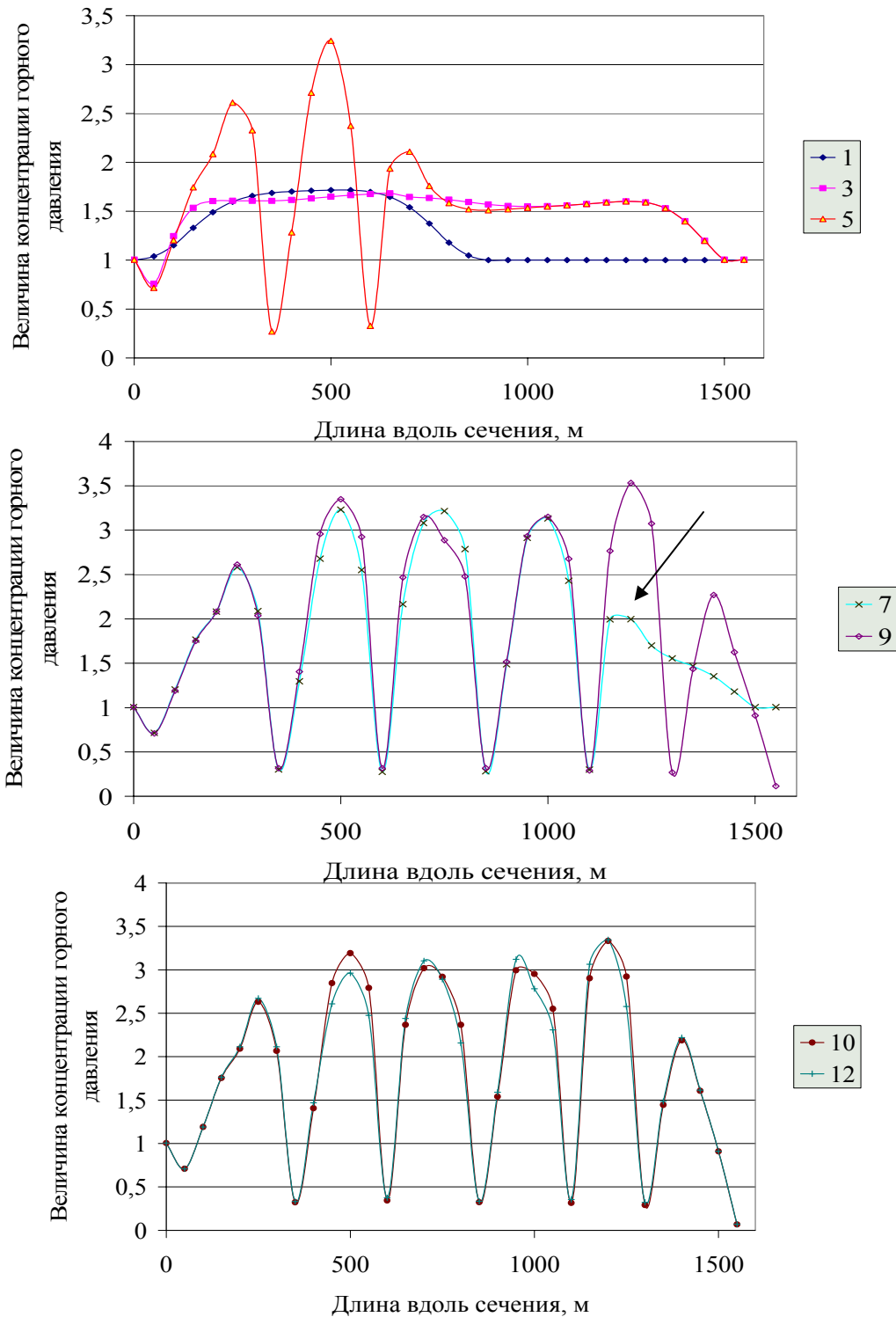


Рис. 5. Перераспределение горного давления вдоль сечения А-А

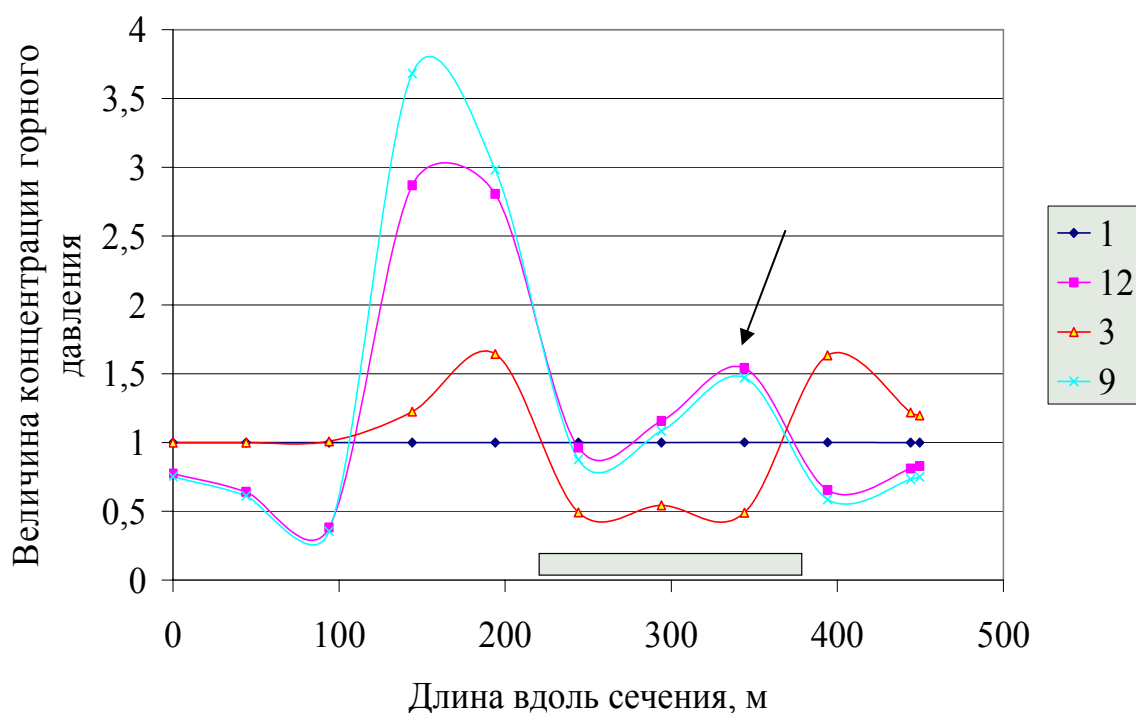


Рис. 6. Перераспределение горного давления вдоль сечения Б-Б

Рисунок 6 показывает наглядно эволюцию напряженного состояния массива в сечении региональной зоны разгрузки. Так, после формирования указанной зоны одиночной лавой, давление в ее центре не превышает 0,5 геостатического уровня, а в зонах опорного остаточного давления напряжения концентрируются до 1,6. После полного развития очистных работ напряжения в региональной зоне разгрузки увеличивают в 3,3 раза, а их концентрация по отношению к давлению в нетронутом массиве достигает 1,6, что, как показала практика, весьма негативно сказывается на устойчивости охраняемых в региональной зоне разгрузки магистральных выработках. Ширина зоны повышенного горного давления достигает 0,6-0,8 размеров первоначальной зоны региональной разгрузки. При этом полное исчезновение разгрузки отмечается со стороны примыкающих лав, выработанных по бесцеликовой отработке запасов. Разгрузка сохраняется на локальном участке региональной зоны, который граничит с охранными целиками.

Достоверность результатов компьютерного моделирования проверялась путем сопоставления расчетных величин концентрации горного давления и скоростей конвергенции на контуре подготовительных выработок, полученных с помощью шахтных инструментальных наблюдений. При сопоставлении 12 конкретных случаев установлена тесная корреляционная связь между величиной концентрации напряжений и скоростью конвергенции с надежностью 90%. При этом коэффициент вариации не превысил 26%, что вполне допустимо для практики прогноза параметров зон ПГД.

## **ВЫВОДЫ**

В процессе эволюции напряженного состояния массива горных пород под влиянием развития очистных работ формируются зоны ПГД различной природы. Степень концентрации горного давления в целиках максимальна и превышает 3 геостатических уровня, что обусловлено суперпозицией зон опорного давления у краевых частей выработанного пространства. В региональных зонах, ранее разгруженных от горного давления, под влиянием бесцеликовой отработки смежных запасов формируются зоны ПГД, ширина которых при одностороннем примыкании смежных выработанных пространств может составлять 0,6-0,8 ширины зоны разгрузки, а величина концентрации напряжений превышает полтора геостатического уровня исходного горного давления. В средней части сплошного выработанного пространства могут возникать зоны ПГД с незначительным превышением геостатического уровня, в результате наступления условий полной подработки земной поверхности и восстановления давления веса вышележащих пород. С течением времени при неизменной форме выработанного пространства происходит постепенное уменьшение концентрации горного давления во всех зонах ПГД под действием релаксации напряжений.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. КД 12.01.01.201-98. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах / Методические указания, 1998.
2. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. – М.: Недра, 1981. – 288 с.
3. Назимко К.В. Модель сейсмічних проявів зрушень земної поверхні над очисним вибоєм, що рухається // Сборник научных трудов XV Международной научной школы «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». - Симферополь: ТНУ, 2005. – С. 23-27.