

УДК 622.831

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ ДАВЛЕНИЯ НА КРЕПЬ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

**Хохотва А.И.** (ГХК «Донуголь», г. Донецк, Украина),  
**Назимко В.В., Сажнев В.П.** (ДонНТУ, г. Донецк, Украина),  
**Пожитько И.И.** (АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», г. Донецк,  
Украина)

*Встановлено, що на стадії активних зрушень та розвитку зони непружних деформацій навколо підготовчої виробки на фоні зростання гірського тиску відбувається збільшення його розкиду у просторі та часі, причому зони підвищеного тиску можуть мігрувати у просторі та часі незалежно від попереднього розподілу тиску.*

*During active movement surrounding rock mass and formation of loosening zone around tunnel, ground pressure redistributes in such a way that its variance in space and in time increases. This process might be followed by migration high stressed zones.*

Обеспечение экономической подземной добычи угля на шахтах Украины неразрывно связано с решением проблемы устойчивости подготовительных выработок. Несмотря на то, что исследования этой проблемы начаты еще несколько столетий назад, ее удовлетворительное решение пока не получено. Одной из главных задач, связанных с устойчивостью подготовительных выработок и тоннелей является прогноз нагрузки на крепь этих выработок. Указанная задача решалась экспериментальными [1-4], аналитическими [5] методами, хотя до сих пор ряд важных механизмов перераспределения давления на крепь подготовительной выработки остается плохо изученным. В частности недостаточно исследованы процессы перераспределения давления на крепь в пространстве и времени.



В данной статье описаны результаты анализа данных эксперимента, проведенного ранее в натуральных условиях шахты им. Абакумова [3]. Целью исследований является установление механизма перераспределения горного давления окружающих пород на крепь протяженной подготовительной выработки с учетом пространственного эффекта и стохастических процессов, протекающих в массиве.

Эксперимент по измерению давления на крепь проводился в обходной полевой выработке сечением в свету  $10,2 \text{ м}^2$  на горизонте 204 м, которая была пройдена по слабым аргиллитам, имеющим крепость  $f=2$  по шкале проф. Протоdjяконова. Экспериментальный участок был оборудован шестью замерными станциями, расстояние между которыми изменялось от 0,29 до 0,81 м. Станции представляли собой металлические жесткие арки с обратным сводом из сдвоенных двутавровых балок №20а (рис. 1). Общая длина замерной секции составляла 3 м, что было близко к ширине выработки. Это дает основание для

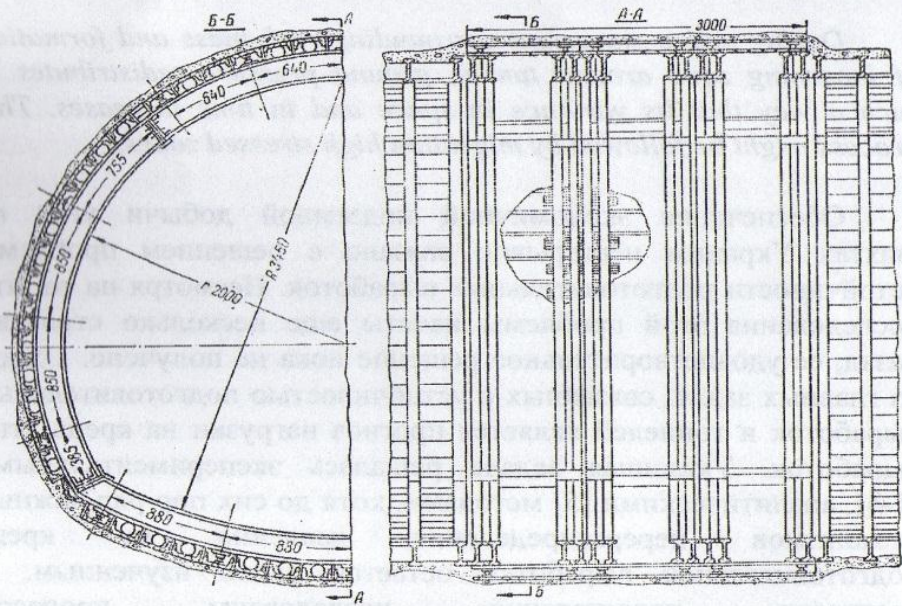


Рис. 1. Схема наблюдательной станции [3]

рассмотрения влияния пространственного эффекта на распределение горного давления.

Замерные рамы состояли из двух боковых, верхнего и нижнего элементов, жестко связанных между собою лобовыми замками, причем арки были стянуты продольными балками из швеллера №16а. Другими словами конструкция замерной секции из шести станций представляла собой достаточно жесткую систему, которая позволила измерить распределение давления на крепь с высокой надежностью и точностью. На каждой раме было закреплено по 16 кольцевых динамометров, как показано на рис. 1–2. Всего было установлено 96 динамометров через 0,6–0,8 м по периметру и через 0,3–0,7 м вдоль оси выработки, что позволило охватить измерениями общую площадь около  $40 \text{ м}^2$ , что достаточно представительно с точки зрения определения закономерностей пространственного распределения горного давления.

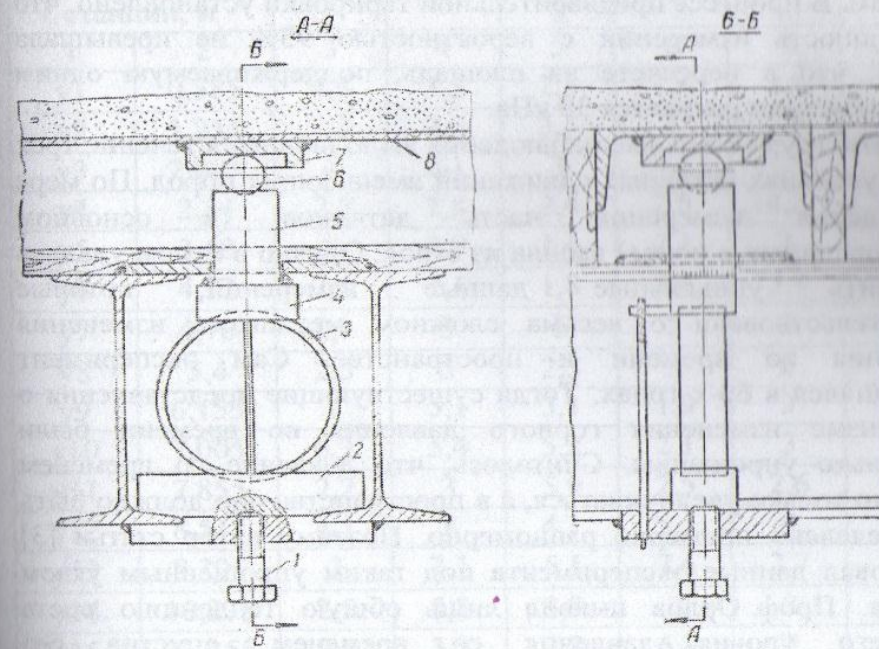


Рис. 2. Конструкция датчика давления и схема его установки [3]



Динамометры были выполнены в виде чувствительного элемента в виде кольца от шарикоподшипника. Кольцо заглублено в верхнюю и нижнюю опору и имеет возможность деформироваться вдоль нормали к контуру выработки. Давление пород передавалось через стальной шарик и плоскую чашку, приваренную к специальной затяжке, которая контактирует с горной породой через слой мелкой породы, глины и песка.

Перед установкой измерительных станций проводились тщательные подготовительные работы по выравниванию зоны контакта затяжки с окружающими породами. Пробелы между динамометрами закладывали так называемыми ложными динамометрами, а также деревянными брусками и досками. Это обеспечило снижение перекосов, неоднородностей контакта, что гарантировало низкую погрешность измерений. В процессе проведения наблюдений измеряли деформации колец с помощью индикаторов часового типа, обеспечивающих точность до 0,01 мм. В процессе предварительной тарировки установлено, что погрешность измерений с вероятностью 95% не превышала  $\pm 2$  кН, что в пересчете на площадь, поддерживаемую одним динамометром равняется 30 кПа.

Инструментальные наблюдения выполнялись в течение трех лет в условиях активных сдвижений вмещающих пород. По мере проведения измерений часть датчиков (в основном установленных в почве) вышла из строя. Однако в целом удалось получить уникальные данные измерений, которые свидетельствовали о весьма сложном механизме изменения давления во времени и пространстве. Сам эксперимент выполнялся в 60-х годах. Тогда существующие представления о механизме изменения горного давления во времени были несколько упрощены. Считалось, что давление со временем должно только увеличиваться, а в пространстве оно должно быть распределено примерно равномерно. Поэтому автор статьи [3] трактовал данные эксперимента под таким упрощенным углом зрения. Проф. Орлов выявил лишь общую тенденцию роста среднего уровня давления со временем, опустив без комментариев факт крайне неравномерного распределения

давления в пространстве, а также его сильную флуктуацию во времени как в сторону увеличения, так и уменьшения. Вместе с тем эти флуктуации в несколько раз превосходили ошибку измерений и никак не могут быть объяснены только погрешностями замеров.

Убедимся в этом, проанализировав диаграммы распределений давления по контуру наблюдательных станций с течением времени. В табл. 1–3 приведены примеры показаний датчиков, а также разности давлений в соседних датчиках.

Таблица 1  
Показания датчиков на наблюдательных станциях на первом году эксперимента (одна единица давления равна 30 кПа)

Номер датчика и его положение вдоль периметра станции, м	Положение станции вдоль оси экспериментального участка выработки, м						
	0	0,81	1,1	1,91	2,2	3,01	
1	2	3	4	5	6	7	8
y1	0,385	4,6	3,5	2,8	1,8	2,8	3,4
y2	1,235	2,5	2,5	3,5	3	2,9	3,1
y3	2,085	4	2,1	3	4,1	3,3	2,5
y4	2,84	2,7	2,8	2,4	2,5	4,3	2,6
y5	3,48	2	2,9	1,4	2,1	3	2,9
y6	4,12	2,1	2,1	1,8	4,6	5,9	3
y7	4,76	2,1	3	5	5	3	2,6
y8	5,4	2,3	5	2,5	3	6	3,1
y9	6,155	7	5,1	3,1	1,9	3	2,6
y10	7,005	6,2	5,4	5,2	2,1	3	5
y11	7,855	2,2	3	5,9	2,5	2,6	2,3
y12	8,515	4,1	8	4,1	5,5	4	4
y13	9,395	2	7,1	5,1	7,6	2,7	2,5
y14	10,275	2,5	5,8	3,8	2	2	7,8
y15	11,155	9,2	3,5	3,8	6,8	2	6,5
y16	12,035	5,2	6,5	5,7	3	2	4



Таблица 2

Разница показаний соседних датчиков вдоль периметра на наблюдательных станциях на первом году эксперимента

Номер датчика и его положение вдоль периметра станции, м		Положение станции вдоль оси экспериментального участка выработки, м					
		0	0,81	1,1	1,91	2,2	3,01
y1	0,385	2,1	1	-0,7	-1,2	-0,1	0,3
y2	1,235	-1,5	0,4	0,5	-1,1	-0,4	0,6
y3	2,085	1,3	-0,7	0,6	1,6	-1	-0,1
y4	2,84	0,7	-0,1	1	0,4	1,3	-0,3
y5	3,48	-0,1	0,8	-0,4	-2,5	-2,9	-0,1
y6	4,12	0	-0,9	-3,2	-0,4	2,9	0,4
y7	4,76	-0,2	-2	2,5	2	-3	-0,5
y8	5,4	-4,7	-0,1	-0,6	1,1	3	0,5
y9	6,155	0,8	-0,3	-2,1	-0,2	0	-2,4
y10	7,005	4	2,4	-0,7	-0,4	0,4	2,7
y11	7,855	-1,9	-5	1,8	-3	-1,4	-1,7
y12	8,515	2,1	0,9	-1	-2,1	1,3	1,5
y13	9,395	-0,5	1,3	1,3	5,6	0,7	-5,3
y14	10,275	-6,7	2,3	0	-4,8	0	1,3
y15	11,155	4	-3	-1,9	3,8	0	2,5

На рис. 3–5 приведены данные наблюдений отдельно по каждой станции. Номера на внешнем обводе диаграммы соответствуют номерам датчиков и их примерному положению по контуру выработки. Сплошная линия отражает распределение давления после первого года наблюдений, штрих-пунктирная после второго и пунктирная после третьего соответственно.

Таблица 3

Разница показаний соседних датчиков вдоль оси выработки на наблюдательных станциях на первом году эксперимента

Номер датчика и его положение вдоль периметра станции, м		Положение станции вдоль оси экспериментального участка, м				
		0	0,81	1,1	1,91	2,2
1	2	3	4	5	6	7
Y1	0,385	1,1	0,7	1	-1	-0,6
Y2	1,235	0	-1	0,5	0,1	-0,2
Y3	2,085	1,9	-0,9	-1,1	0,8	0,8
Y4	2,84	-0,1	0,4	-0,1	-1,8	1,7
Y5	3,48	-0,9	1,5	-0,7	-0,9	0,1
Y6	4,12	0	0,3	-2,8	-1,3	2,9
Y7	4,76	-0,9	-2	0	2	0,4
Y8	5,4	-2,7	2,5	-0,5	-3	2,9
y9	6,155	1,9	2	1,2	-1,1	0,4
y10	7,005	0,8	0,2	3,1	-0,9	-2
y11	7,855	-0,8	-2,9	3,4	-0,1	0,3
y12	8,515	-3,9	3,9	-1,4	1,5	0
y13	9,395	-5,1	2	-2,5	4,9	0,2
y14	10,275	-3,3	2	1,8	0	-5,8
y15	11,155	5,7	-0,3	-3	4,8	-4,5
y16	12,035	-1,3	0,8	2,7	1	-2

Цифры на концентрических окружностях соответствуют уровням давления. Единица – 30 кПа.

Вначале проведем анализ распределений, полученных после первого года эксперимента. Заметим, что по данным [3] в течение всех трех лет наблюдений отмечались активные сдвигения пород вокруг выработки. Другими словами эксперимент проводился во время активной стадии сдвижений. Прежде всего, следует заметить, что давление по периметру каждой станции распределено весьма неравномерно. Оно изменяется от 0,5 до 10 единиц или от 15 до 300 кПа, причем разница между соседними



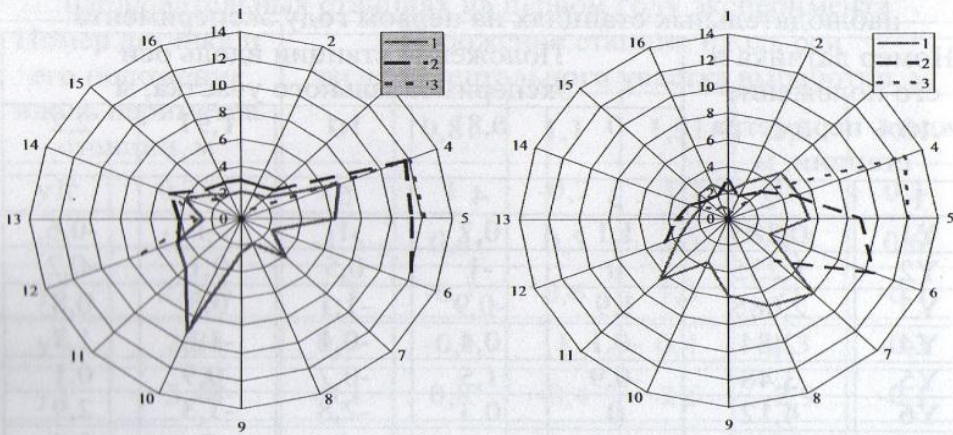


Рис. 3. Характер перераспределения давления на измерительных станциях №1 и №2

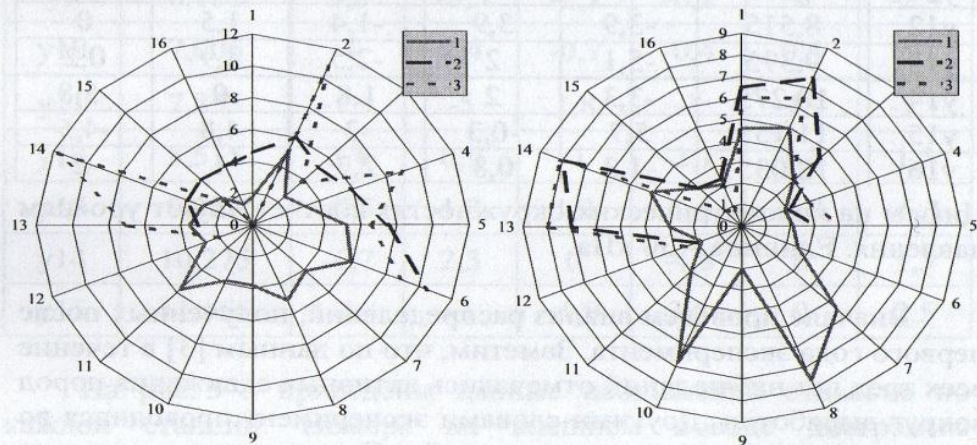


Рис. 4. Характер перераспределения давления на измерительных станциях №3 и №4

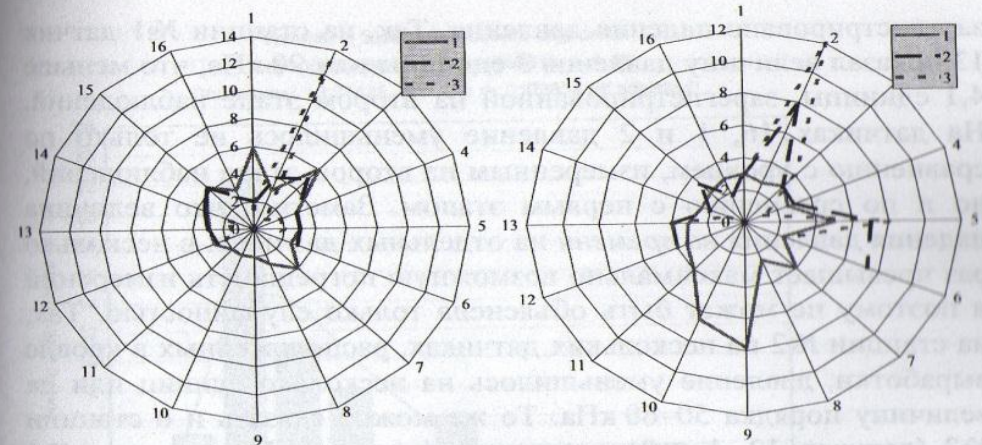


Рис. 5. Характер перераспределения давления на измерительных станциях №5 и №6

датчиками, отстоящими на расстоянии 0,7 м достигает 7 единиц или 210 кПа. Такой перепад давления в семь раз больше максимально возможной погрешности измерений и поэтому должен иметь какую-то иную причину. На станциях №1, №2 и №6 отчетливо видно преобладание давления со стороны почвы выработки и явно выраженный минимум давления в кровле. На остальных станциях высокий уровень давления наблюдается повсеместно, хотя пики давления обязательно чередуются с минимальными его значениями. Особенно эта закономерность ярко выражена по станции №4.

На втором году проведения эксперимента зарегистрировано существенное перераспределение давления, хотя нельзя утверждать однозначно о том, что оно увеличилось. Увеличение давления по всей длине периметра выработки произошло только на станциях №1 и №4. На остальных четырех станциях есть участки, где давление упало. Так, например, на станции №2 давление уменьшилось на датчиках 15, 16, 2, 3, 4 и 7.

После третьего года инструментальных наблюдений отмечена эта же особенность перераспределения давления на замерные станции. Более того, нет ни одной станции, где бы не



зарегістровано падіння тиску. Так, на станції №1 датчик 13 показав величину тиску 3 одиниці або 90 кПа, що менше 4,1 одиниці, зареєстрованої на другому етапі спостережень. На датчиках 16, 1 і 2 тиск зменшився не тільки порівняно з рівнем, виміряним на другому етапі спостережень, але й порівняно з першим етапом. Звернемо увагу, що величина падіння тиску *во времени* на окремих датчиках в декілька раз перевищує максимально можливу похибку вимірювань і тому не може бути пояснена тільки випадковістю. Так, на станції №2 на декількох датчиках, розташованих в кровлі виробки, тиск зменшився на декілька одиниць або на величину порядку 50–60 кПа. Те ж саме можна сказати і про станції №3 (датчики 12, 1 і 3), станції №4 (датчик 16), станції №5 (датчики 12-16, 3), станції №6 (датчики 16 і 4).

Кількісна статистична оцінка виявленої варіації тиску проведена шляхом знаходження розподілів і їх характеристик для абсолютних величин тиску і для їх різниці в сусідніх датчиках (див. табл. 2–3). Зокрема, було встановлено, що як по окремих станціях, так і по всьому експериментальному участку тиск розподілений за законом, який не суперечить логнормальному розподіленню. Приклади таких розподілів наведені на рис. 6.

Непротирічливість фактичного розподілу логнормальному встановлювалася з допомогою критеріїв Колмогорова-Смирнова, а також хі-квадрат. Крім того, з течією часу і розвитком активізації сдвіжень навколо пройденої виробки величини критеріїв протирічливості зменшувалися, що тільки посилює гіпотезу про логнормальне розподілення досліджуваних величин. Цей висновок збігається з раніше встановленими закономірностями логнормального розподілення тиску на кріп підготовчих виробок, встановлених за даними вимірювань на одиночних станціях [4]. Іншими словами, встановлено логнормальність розподілення тиску не тільки по периметру підготовчої виробки, але й в просторі по площі контакту кріпи з оточуючими породами. Та ж закономірність встановлено і по відношенню к

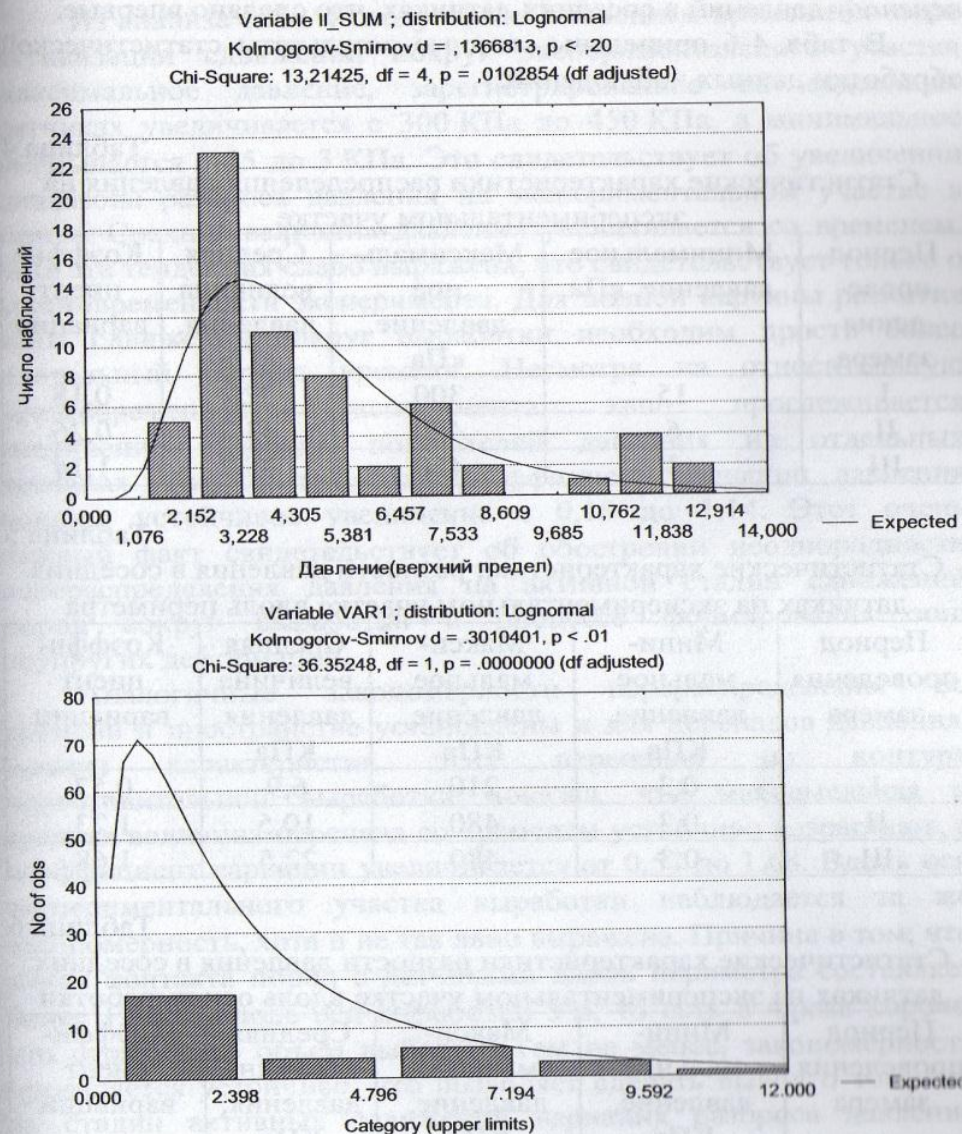


Рис. 6. Логнормальні закони розподілення гірського тиску і його перепадів в сусідніх датчиках в просторі контакту вмещаючих порід з кріпю підготовчої виробки



перепаду давлений в соседних датчиках, что сделано впервые.

В табл. 4-6 приведены сводные результаты статистической обработки данных наблюдений.

Таблица 4

Статистические характеристики распределения давления на экспериментальном участке

Период проведения замера	Минимальное давление, кПа	Максимальное давление, кПа	Средняя величина давления, кПа	Коэффициент вариации
I	15	300	32,2	0,18
II	6	420	43,2	0,26
III	3	450	35,7	1,14

Таблица 5

Статистические характеристики разности давления в соседних датчиках на экспериментальном участке вдоль периметра

Период проведения замера	Минимальное давление, кПа	Максимальное давление, кПа	Средняя величина давления, кПа	Коэффициент вариации
I	0,3	210	6,9	0,57
II	0,3	480	10,5	1,23
III	0,3	480	22,5	1,68

Таблица 6

Статистические характеристики разности давления в соседних датчиках на экспериментальном участке вдоль оси выработки

Период проведения замера	Минимальное давление, кПа	Максимальное давление, кПа	Средняя величина давления, кПа	Коэффициент вариации
I	0,3	210	3,0	1,10
II	0,3	390	21,0	0,68
III	0,3	360	16,8	0,96

Из анализа табл. 4 следует, что с течением времени по мере активизации сдвижений вокруг экспериментального участка максимальное давление, зарегистрированное на отдельных датчиках увеличивается с 300 кПа до 450 кПа, а минимальное уменьшается с 15 до 3 кПа. Это свидетельствует об увеличении диапазона разброса давления на экспериментальном участке в целом. Средняя величина давления увеличивается со временем, хотя эта тенденция слабо выражена, что свидетельствует только о кратковременности эксперимента. Для полной картины развития зоны сдвижений вокруг выработки необходимо просто более длительный период времени. Несмотря на относительную кратковременность эксперимента, явно прослеживается увеличение вариации показателей давления на отдельных датчиках. Так, за три года коэффициент вариации давления показал устойчивое увеличение с 0,18 до 1,14. Этот очень важный факт свидетельствует об обострении неоднородности перераспределения давления на активной стадии сдвижений пород вокруг выработки в процессе формирования зон неупругих деформаций.

Аналогичные закономерности перераспределения во времени и пространстве установлены и для перепадов давления. Анализ характеристик этих перепадов по контуру подготовительной выработки показал, что максимальная и средняя величина перепада со временем устойчиво возрастают, а коэффициент вариации увеличивается от 0,57 до 1,68. Вдоль оси экспериментального участка выработки наблюдается та же закономерность, хотя и не так явно выражена. Причина в том, что длина контакта пород с датчиками вдоль периметра составляет более 13 м, а вдоль оси выработки 3 м, то есть в 4 раза короче, что ограничило объем выборки. Тем не менее, закономерность проявляется устойчиво, что позволяет сделать вывод о том, что на стадии активных сдвижений вариация разброса давления окружающих пород на крепь подготовительной выработки в пространстве и во времени увеличивается. Эта закономерность имеет большое значение с точки зрения оценки устойчивости пород на контуре выработки и, в частности, с позиций прогноза



обрушения кровли. Тенденция к увеличению перепадов давления на смежных участках кровли свидетельствует об усилении неоднородности сдвижений, что в свою очередь указывает на увеличении вероятности возможного обрушения.

На рис. 7 и 8 приведены пространственные распределения давления и его приращения на экспериментальном участке. Распределения выполнены на развертке поверхности контакта окружающих пород с наблюдательными станциями на экспериментальном участке выработки. Прямоугольником выделена площадь контакта с кровлей. Примыкающие участки

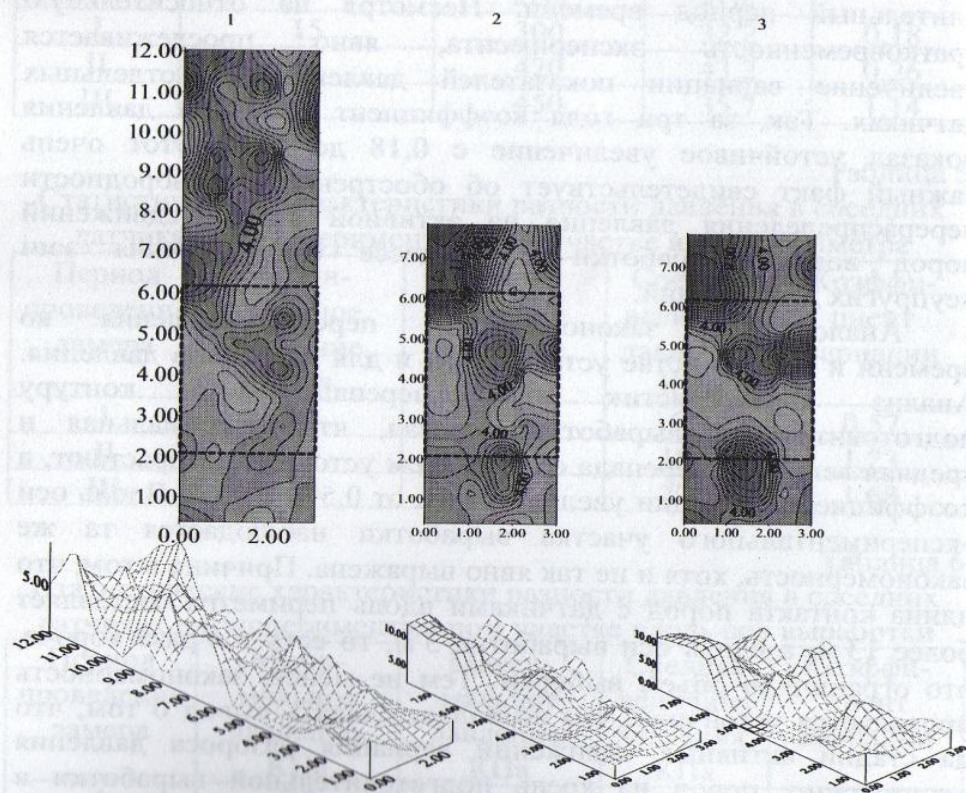


Рис. 7. Пространственный характер перераспределения давления по всей секции измерительных станций во времени

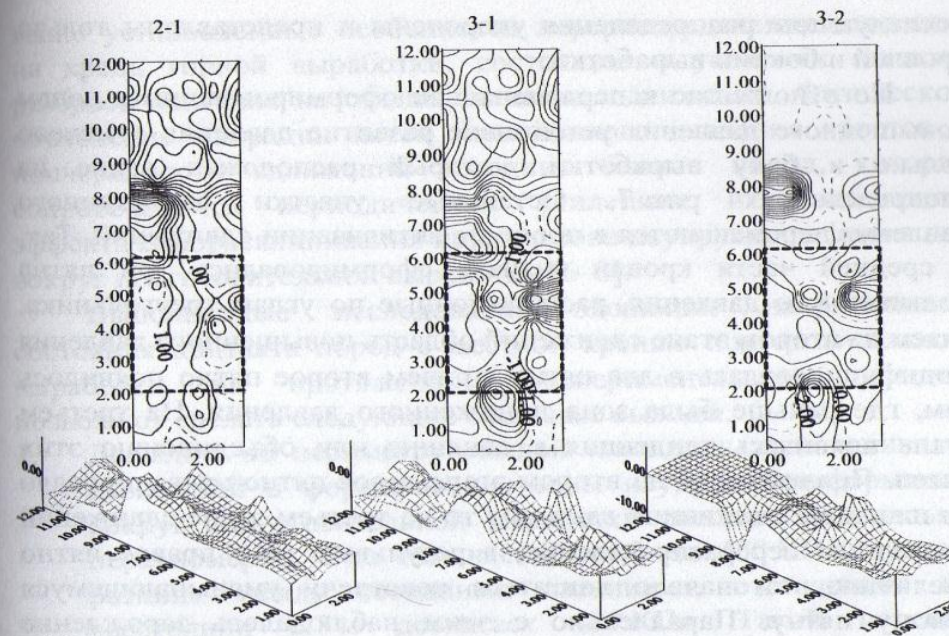


Рис. 8. Особенности приращения давления на разных этапах эксперимента

отражают контакт с боковыми стенками выработки. Верхний сектор на самом левом распределении отражает почву выработки. Общий обзор распределения на рис. 7 свидетельствует о том, что на первом этапе сдвижений основной прирост давления пришелся на почву выработки. Это объясняется лучшим контактом наблюдательных станций с породами почвы выработки, поскольку станции опускались под действием собственного веса, а породы почвы поднимались навстречу в ходе течения.

В целом пространственное распределение давления явно неравномерно. Участки большего давления размерами примерно  $1 \times 1$  м разбросаны по всей площади контакта пород с наблюдательными станциями. По мере активизации сдвижений датчики в почве выработки вышли из строя, поэтому



последующие распределения укорочены и представлены только кровлей и боками выработки.

По отношению к первоначально сформировавшимся зонам повышенного давления устойчивое развитие давления отмечено только в боку выработки, который расположен выше на распределениях рис. 7. Остальные участки повышенного давления перемещаются в процессе активизации сдвижений. Так, в средней части кровли вначале сформировались три пятна повышенного давления, расположенные по углам треугольника. Затем на втором этапе сдвижений область повышенного давления модифицировалась в два пятна, причем второе пятно появилось там, где раньше была зона пониженного давления. На третьем этапе появилась тенденция к слиянию или объединению этих пятен. Причем, если на втором этапе левое пятно превалировало по площади и величине давления то на третьем этапе сдвижений произошло перераспределение, в результате чего правое пятно увеличилось и начало двигаться навстречу уменьшающемуся левому пятну. Параллельно с этим наблюдалось зарождение пятна повышенного давления на переходе от кровли к левому боку выработки (изображен на развертке снизу) а затем его расширение на третьем этапе.

На рис. 8 приведена эволюция приращения давления по мере развития сдвижений вокруг экспериментального участка выработки. Пунктирными линиями показаны места, где давление не изменялось. Судя по этим линиям можно сделать два важных вывода. Во-первых, видно, что активизация сдвижений приводит к поляризации распределения давления окружающих пород на контур выработки, поскольку области повышенного давления увеличиваются, в то время как рядом с ними возникают зоны, где давление уменьшается. Поскольку эти зоны перемещаются, мигрируют в пространстве, это означает о сильной роли случайных процессов, управляющих перераспределением горного давления. Другими словами, зоны повышенного давления мигрируют в пространстве, перемещаясь в любом направлении независимо от того, какое давление было в том месте, куда они перемещаются. Эта закономерность обогащает

выше установленные особенности перераспределения давления на крепь горной выработки, состоящие в усилении степени разброса давления на стадии активных сдвижений. Физическое объяснение миграции пятен повышенного давления кроется в поочередности сдвижений соседних блоков пород, которая сопровождается периодическим усилением и ослаблением эффекта саморасклинивания пород в зоне неупругих деформаций вокруг подготовительной выработки [6–8].

Выполненные исследования эволюции напряженного состояния контакта пород с жесткой крепью подготовительной выработки на протяженном экспериментальном участке позволяют сделать следующие основные выводы.

1. Давление по периметру каждой станции в ходе активных сдвижений и формирования зоны неупругих деформаций вокруг подготовительной выработки распределено весьма неравномерно. Оно изменяется от 3 до 450 КПа, причем разница между соседними датчиками, отстоящими на расстоянии 0,7 м достигает 480 КПа. Такой перепад давления на порядок больше максимально возможной погрешности измерений и может быть объяснен случайными процессами, возникающими при саморасклинивании разрушенных пород в зоне неупругих деформаций, сопровождающимся поочередным сдвижением соседних блоков.
2. Установлена логнормальность распределения давления не только по периметру подготовительной выработки, но и в пространстве по площади контакта крепи с окружающими породами. Та же закономерность установлена и по отношению к *перепаду* давлений в соседних датчиках, что сделано впервые.
3. Наряду с ростом общего уровня давления происходит увеличение диапазона разброса давления во времени на экспериментальном участке в целом. В процессе развития сдвижений во времени общее увеличение давления вокруг выработки сопровождается его падением на отдельных датчиках, причем величина падений в несколько раз



превышает максимально возможную погрешность измерений. Так за три года наблюдений коэффициент вариации давления показал устойчивое увеличение с 0,18 до 1,14. Этот очень важный факт свидетельствует об обострении неоднородности перераспределения давления на активной стадии сдвижений пород вокруг выработки.

4. Эта закономерность имеет большое значение с точки зрения оценки устойчивости пород на контуре выработки и, в частности, с позиций прогноза обрушения кровли. Тенденция к увеличению перепадов давления на смежных участках кровли свидетельствует об усилении неоднородности сдвижений, что в свою очередь указывает на увеличение вероятности возможного обрушения.
5. Зоны (пятна) повышенного давления имеют размер порядка 1×1 м и перемещаются, мигрируют в пространстве, что свидетельствует о сильной роли случайных процессов, управляющих перераспределением горного давления. Другими словами зоны повышенного давления мигрируют в пространстве, перемещаясь в любом направлении независимо от того, какое давление было в том месте, куда они перемещаются. Эта закономерность обогащает выше установленные особенности перераспределения давления на крепь горной выработки, состоящие в усилении степени разброса давления на стадии активных сдвижений.

### СПИСОК ССЫЛОК

1. Расчеты параметров крепи выработок глубоких шахт / Заславский Ю.З., Зорин А.Н., Черняк И.Л. – К.: «Техника», 1972. – 156 с.
2. Протождьяконов Н.М. Давление горных пород и различное крепление. – М.: «Госгортехиздат», 1930. – 261 с.
3. Орлов В.В. Натурные измерения проявления горного давления на шахтах им. Абакумова и Щегловка-Глубокая // Разработка месторождений полезных ископаемых. – К.: «Техника». – 1966. – №7. – С. 5–17.

4. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. – М.: «Недра», 1994. – 382 с.
5. Шашенко А.Н., Тулуб С.Б., Сдвижкова Е.А. Некоторые задачи статистической геомеханики. – К.: «Пульсар», 2002. – 304 с.
6. Nazimko V.V., Peng S.S., Lapteev A.A., Alexandrov S.N., Sazhnev V.P. Damage mechanics around a tunnel due to incremental ground pressure // 36th U.S. Rock Mechanics Symposium. – J. Rock Mech. & Min. Sci. – 1997. – 34:3–4. – Paper No. 222.
7. Nazimko V.V., Lapteev A.A., Sazhnev V.P. Rock mass self-supporting effect utilization for enhancement stability of a tunnel // 36th U.S. Rock Mechanics Symposium. – J. Rock Mech. & Min. Sci. – 1997. – 34:3–4. – Paper No. 223.
8. Stabilization of ground movement with yield rock bolts using spatial effect / S.V. Naprasnikov, S.N. Alexandrov, V.P. Sazhnev, V.V. Nazimko / Dnipropetrovsk: NMUU, 1999. – P. 261–264.

*Здано до редакції 10.03.2003 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н. Литвинським Г.Г.*