

УДК 622.834

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА НЕОБРАТИМЫХ СДВИЖЕНИЙ ПОРОД ВОКРУГ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ ПРИ РАЗНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ

Назимко И. В.

(УкрНИМИ, г. Донецк, Украина)

За допомогою виконання комплексних натурних спостережень показано, що при відпрацьовуванні виїмкової ділянки процес зсуву та руйнування порід у виробку залежить від стадії, на якій вона підтримується.

Analyzing with full-scale tests have been used to shown when excavation occurs, processes of movement and destruction of rock mass in mine work depends from stage which it supported.

Обеспечение устойчивой работы выемочного участка при высоких нагрузках на очистной забой неразрывно связано с сохранением устойчивости примыкающих к нему выемочных выработок. Особенно острой является проблема обеспечения устойчивого состояния выемочных выработок на сопряжении с лавой и позади нее в зоне активных сдвижений. Именно на этом участке теряется более половины сечения выемочных выработок при отработке высоконагруженных лав. Вместе с тем устойчивая работа таких выемочных участков невозможна без обеспечения достаточного количества воздуха, необходимого для снижения ограничений на лаву по газовому фактору [1 - 4].

Именно поэтому весьма актуальной остается проблема сохранения позади действующей лавы не только конвейерного, но и вентиляционного штрека. В последнем случае даже при погашения вентиляционной выработки большое значение имеет сохра-

нение ее статочного сечения на погашенном участке, что позволяет обеспечить эффективный газоотсос взрывоопасного метана из тупиковой части выработки и выработанного пространства на уровне вентиляционного горизонта. В итоге обеспечение сохранности системы газоотсоса на вентиляционном штреке и прямой схемы проветривания на конвейерном дает возможность повысить коэффициент дегазации до 0,8 и более, что чрезвычайно важно не только с точки зрения экономических соображений, но и позволяет повысить безопасность очистных работ в целом в пределах выемочного участка [5 - 6].

Сдвигение пород вокруг выработки, поддерживаемой позади лавы подчиняется сложному механизму необратимых сдвижений массива горных пород, который намного сложнее упругого перераспределения напряжений и деформаций. Основным отличием необратимого деформирования пород является то, что связь между напряжениями и деформациями неоднозначна и зависит от пути нагружения. Чтобы получить конкретные зависимости напряжений и деформаций в такой системе необходимо использовать сложные математические модели, учитывающие не только процесс разрушения вмещающего массива, но и его сдвигения за пределом прочности.

Прежде чем решать такую сложную задачу целесообразно исследовать указанную систему с помощью термодинамики необратимых процессов, которая позволяет без детализации конкретных зависимостей напряжений и деформаций получить общую картину процесса необратимых сдвижений и при этом, не рискуя допустить грубую ошибку.

В процессе проходки и последующей эксплуатации выемочная выработка проходит через несколько характерных периодов, которые можно выделить с термодинамической точки зрения. Для этого необходимо использовать разработанные критерии устойчивости [7], и сопоставить характерные периоды возмущений с периодами релаксации.

Исходя из сказанного, можно выделить семь периодов эксплуатации выемочной выработки, которые различаются согласно вышеупомянутым критериям. На рис. 1 показаны схема планировки горных работ в пределах выемочного участка, отрабаты-

вающего лаву, примыкающую к ранее выработанному пространству, а также условный график смещения пород кровли в полость выработки во времени.

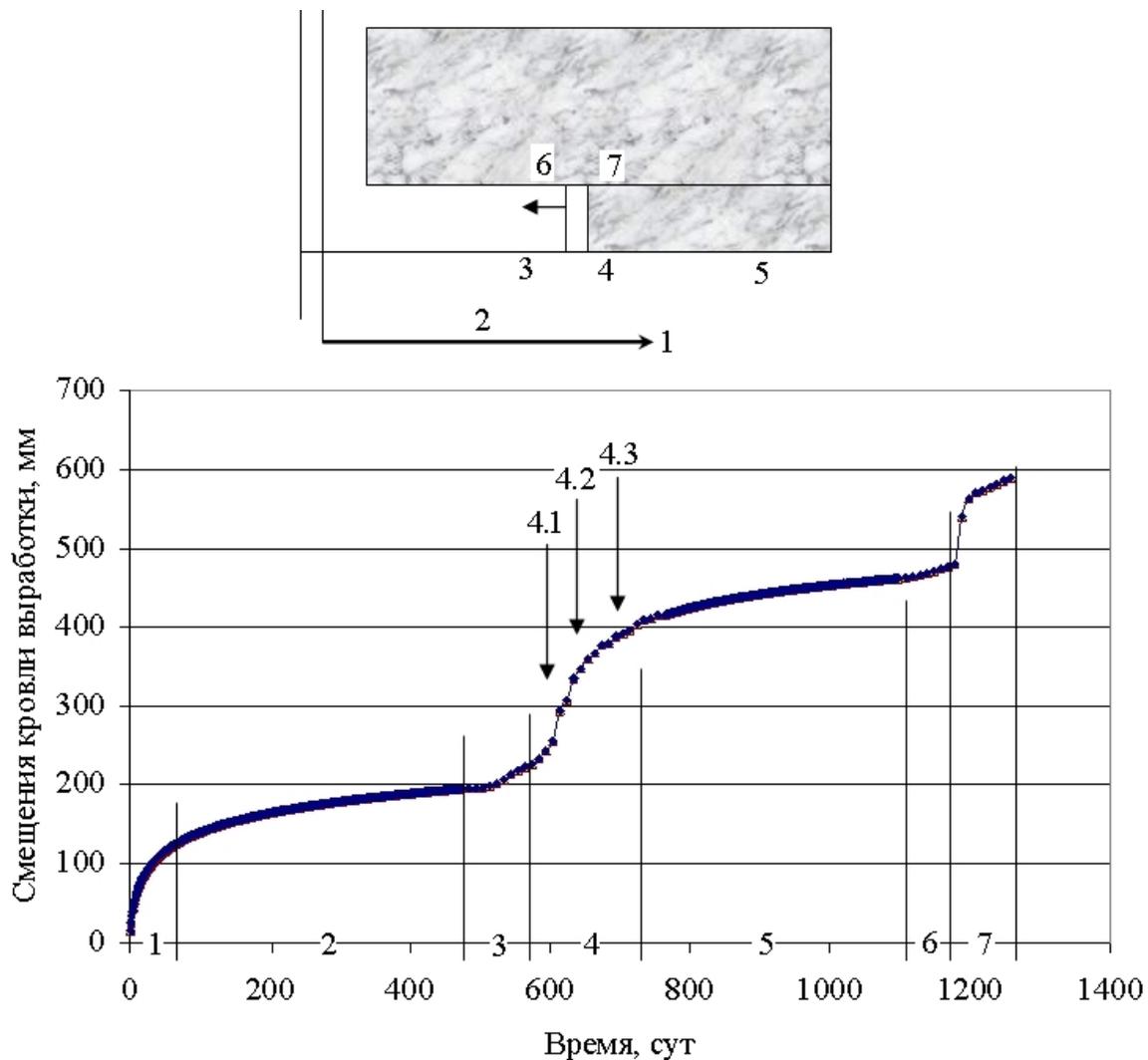


Рис. 1. Характерные периоды деформирования пород вокруг выемочной выработки при ее повторном использовании

Расчет величины уменьшения сечения выработки производился согласно методике ВНИМИ для среднестатистических условий: глубина заложения выработки 800 м, прочность вмещающих пород 50 МПа, площадь сечения выработки 13 м². Выработка проходила комбайном, крепь трехзвенная металлическая арочная податливая. Выработку позади первой лавы поддержи-

вают литой полосой с коэффициентом усадки 0,3. В зонах опорного давления и активных сдвижений от первой и второй лавы применяют два ряда крепей усиления.

Первый период совпадает с моментом проходки выработки. В процессе проходки и усадки сечения, вокруг выработки создается существенное возмущение напряженного состояния массива горных пород. В условиях пологого залегания в кровле и почве выработки образуется разгрузка от первоначального горного давления, а в боковых стенках генерируются зоны повышенной концентрации напряжений. Чаще всего длительность первого периода составляет от нескольких суток до 1-2 месяцев. Данному периоду присущи высокий градиент горного давления, достигающий 20 МПа/м в боковых стенках выработки, и весьма малое время возмущения. При скорости проходки подготовительной выработки порядка 100-200 м/мес. время возмущения характерного объема породы, сопоставимого с поперечным размером сечения выработки, составляет порядка суток.

Время релаксации горного давления в типичных осадочных массивах составляет несколько лет. Кроме того, подготовительные выработки проходят на современных глубинах разработки, соизмеримых с 1000 м. Отсюда следует вывод о том, что согласно критерию устойчивости в данном случае должны возникать диссипативные структуры, которые способны эффективно рассеивать энергию горного давления. Указанные структуры должны влиять на проявление горного давления, и это влияние должно сказаться на результатах его проявления.

Далее следует спокойный второй период эксплуатации выемочной выработки, который заканчивается при подходе лавы к рассматриваемому пикету выработки на расстояние длины зоны динамического опорного давления. Характерная длительность второго периода сопоставима с годом, а возмущение напряженного состояния остается неизменным или меняется слабо. При этом постоянно действуют только градиенты горного давления, которые под воздействием случайных возмущений напряженного состояния окружающих пород порождают необратимые потоки их сдвижений, в результате чего смещение пород кровли в дан-

ном примере достигает 200 мм, а сечение выработки уменьшается на 15-20 %.

Эмпирическая кривая смещений пород на контуре выработки имеет гладкий вид. Причина заключается в том, что смещения на контуре выработки являются интегральной характеристикой проявления горного давления и отражают последствия сложного взаимодействия породных слоев и блоков, окружающих полость выработки. На самом деле смещения указанных элементов распределены в пространстве неоднородно, а во времени протекают неравномерно. Этот факт иллюстрируется результатами инструментальных наблюдений с помощью глубинных реперов.

На рис. 2 показан фрагмент плана горных выработок в районе экспериментального участка на пласте m_3 в условиях шахты им. Засядько. Глубина заложения экспериментальных выработок составляла 1200 м.

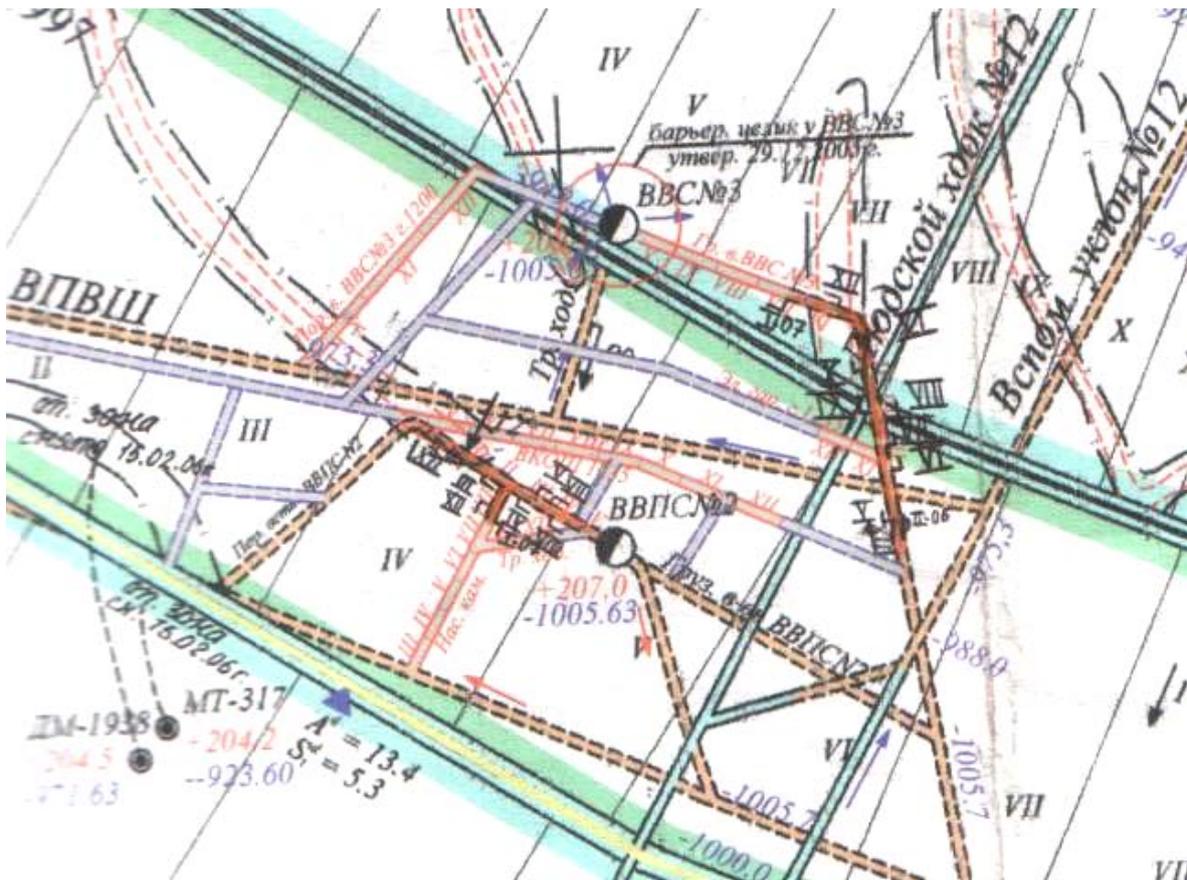


Рис. 2. Фрагмент плана горных выработок в окрестности экспериментального участка

Грузовая ветвь воздухоподающего ствола № 2 была пройдена в надработанном массиве по нижележащему пласту нерабочей мощности. В кровле выработки располагались перемежающиеся слои песчаника и алевролита с пределом прочности на одноосное сжатие 45-60 МПа. В почве расположены аргиллит и алевролит, имеющие прочность 40-50 МПа. Выработка имела арочное сечение площадью в свету 15 м², закреплена металлической податливой арочной крепью из спецпрофиля СВПЗЗ с шагом 0,8 м. Застыжка сетчатая и бетонная. В кровле выработки пробурена скважина диаметром 40 мм на глубину 6 м. С отставанием 10 м от подготовительного забоя в замерной скважине установлено 8 глубинных реперов, позиции которых относительно устья скважины указаны в табл. 1. При этом охвачены интервалы породного массива длиной 0,7 – 1,0 м, что дало возможность достаточно детально исследовать динамику сдвижений толщи и ее расслоения в кровле выработки по мере удаления подготовительного забоя и поддержания выработки в зоне установившегося горного давления.

Таблица 1

Положение глубинных реперов относительно кровли
выработки

	Интервалы между параметрами реперов, мм
Выше анкеров	5244-1797 < 2487
А	1797-0 < 2799
К	5244-0 < 5389
6	5244-4495 < 757
5	4495-3596 < 914
4	3596-2696 < 919
3	2696-1797 < 911
2	1797-899 < 931
1	899-0 < 957

На рис. 3 приведены результаты мониторинга смещений глубинных реперов в течение 430 суток. Активный период смещений пород в полость выработки составлял около 120 суток, а наиболее интенсивная его часть длилась 40 суток. Удлинение интервала скважины между ее устьем и самым дальним репером за период наблюдений составило 143 мм. При этом скорость расслоений толщи в течение активного периода превышала 1 мм/сут, а на начальной стадии деформирования сечения выработки достигала 5,8 мм/сут. Отличительной особенностью графиков смещений пород является факт скачкообразного или ступенчатого во времени смещения отдельных интервалов. Скачкообразные деформации отдельных интервалов наблюдаются как в глубине массива (пара реперов 4-5), так и на контуре выработки (пара 1-К). При этом величина скачкообразного прироста деформаций превышает 10 мм, что на порядок больше погрешности измерений. Таким образом, зарегистрированные скачкообразные приращения смещений достоверны и не обусловлены погрешностями измерений.

Характерно также, что скачки смещений отдельных породных слоев или блоков выражены только в период активной стадии сдвижений пород вокруг полости выработки. Спустя 120 суток и более такие скачки практически не заметны.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о качественном различии процессов необратимых сдвижений пород вокруг выработки на стадиях 1 и 2 (см. рис. 1). С помощью натуральных экспериментов невозможно исследовать процесс необратимых сдвижений пород вокруг выработки полностью в силу сложности подземных экспериментов. Однако скачкообразные приращения смещений являются косвенным признаком наличия пространственно-временных структур, которые могут формироваться вокруг выработки на активной стадии сдвижений массива горных пород в процессе их разрушения.

Обратим внимание, что деформирование массива горных пород вокруг подготовительной выработки позади удаляющегося подготовительного забоя протекает под действием пространственного градиента горного давления, величина которого не превышает 10-15 МПа/м.

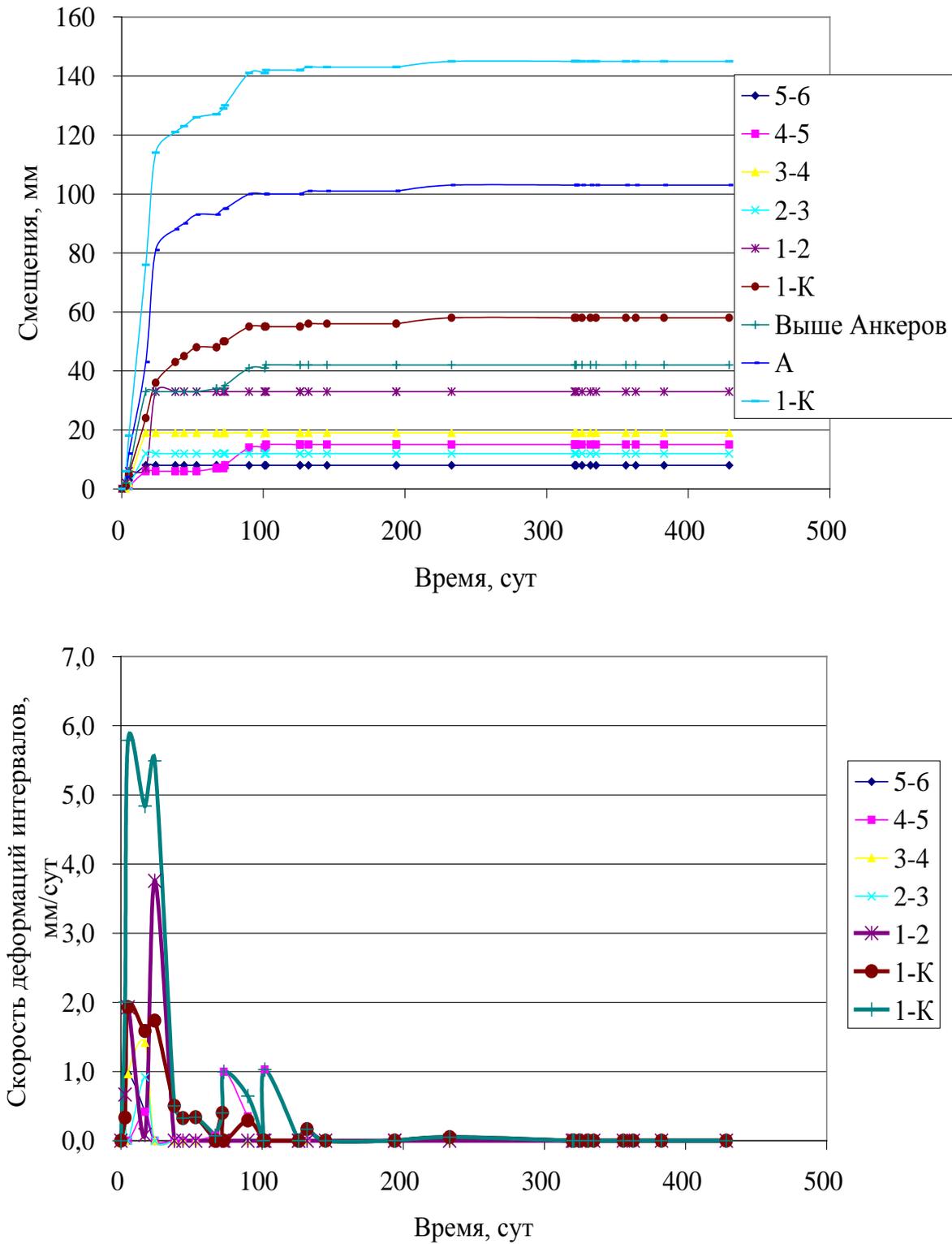


Рис. 3. Характер смещений глубинных реперов и скорости расслоения кровли выработки процессе ее проходки

Этот градиент обусловлен наличием концентрации горного давления в боковых стенках выработки. Важно в данном случае то, что напряжения вокруг выработки не изменяются или изменяются очень медленно в результате процессов релаксации.

На второй стадии установившегося деформирования наоборот, наблюдается плавное изменение смещений, что также согласуется с критерием устойчивости для случая, когда время возмущения сопоставимо или больше времени релаксации горного давления и сдвижения пород во времени можно описать реологическими параметрами.

Третья и четвертая стадии деформирования сечения выработки приурочены к влиянию динамического опорного давления и зоны активных сдвижений от первой лавы (см. рис. 1). В целом механизм разрушения и необратимого сдвижения пород на этих стадиях описывается теми же критериями, что и на стадии 1, однако имеются существенные различия, которые усиливают термодинамические потоки необратимых сдвижений на стадиях 3 и 4. Это объясняется различным исходным состоянием системы на стадии 1 и в период стадий 3 и 4. Если на первой стадии происходило возмущение нетронутого массива горных пород образованием полости выработки, то на стадиях 3 и 4 источник возмущения иной, более мощный и обусловлен динамическим опорным давлением впереди движущейся лавы и зоной активных сдвижений позади этой лавы. При этом происходит возмущение массива, ослабленного полостью выработки, в результате чего обеспечиваются дополнительные степени свободы для формирования термодинамических потоков, что в свою очередь создает благоприятные условия для возникновения диссипативных структур вокруг выработки. Таким образом, система пропускает интенсивный поток сначала энергии динамического опорного давления, а затем поток разности потенциальных энергий массива до и после оседания.

Разницу термодинамических потоков в зоне 3 и зоне 4 следует объяснить отдельно. На стадии 3 рассеивание энергии горного давления порождает энтропийную составляющую, которая подсчитывается как произведение градиентов напряжений на необратимые сдвижения разрушенных пород вокруг выработки. У

контура выработки величины указанных сдвижений составляют несколько сотен миллиметров, а на расстоянии 2-3 м от контура не превышают нескольких десятков миллиметров.

В то же время на стадии 4 процессы перераспределения напряжений носят более сложный характер. Потoki необратимых сдвижений возбуждаются в результате оседания массива горных пород под действием повышенных напряжений, существующих вокруг выработки со стороны нетронутого массива, а также под действием веса отслоившихся пород в результате выемки угольного пласта. С одной стороны выработки действуют градиенты напряжений, а с другой - постоянный перепад давления в виде веса толщи отслоившихся пород. При этом величины необратимых сдвижений со стороны выработанного пространства на порядок превышают смещения, которые вызывались градиентами опорного давления.

Важно также подчеркнуть, что в данном случае имеется два градиента горного давления. Один из них представлен пространственным градиентом, величина которого изменяется в пределах 10-15 МПа/м, второй градиент носит временной характер, а его величина определяется скоростью подвигания лавы и колеблется от 1 до 5 МПа/сут. Это означает, что в зонах 3 и 4 действуют более интенсивные и разноплановые термодинамические силы, чем в зоне 1.

В итоге термодинамические силы и потоки на стадиях 3 и 4 должны быть существенно более интенсивными, чем соответствующие потоки на стадии 1, а вероятность образования диссипативных структур более высока. Это подтверждается результатами шахтных инструментальных наблюдений, выполненных в аналогичных условиях.

Сечение выработки в свету составляло 13,8 м². Рамные податливые металлические крепи устанавливали с шагом 0,5 м и использовали деревянную, металлическую затяжку кровли и боков. Шаг установки рамной крепи 0,8 м. Анкерная крепь устанавливается по 11 штук в одном ряду между рамами с наклоном под углом 75-85° в сторону проходческого забоя. На один погонный метр расходуется 13,75 сталеполлимерных анкеров и 41,25 ампул с полимерным композитом. При использовании трех ампул длиной

500 мм при принятых параметрах шпура и анкера происходит полная инкапсуляция анкера по его длине.

Со стороны восстания (у сопряжения лавы со штреком) устанавливается два дополнительных анкера, подхватывающих верхняк рамной крепи, для того, чтобы при снятии стойки он не упал. Стойка снимается напротив окна лавы при ее проходе мимо конкретной секции крепи. После прохода лавы стойка устанавливается на прежнее место и прижимается гайками к верхняку с помощью скобы. Это дает возможность повторного использования выработки.

На рис. 4 показаны графики смещений вмещающих пород и скоростей расслоения интервалов в кровле аналогичной выработки при ее поддержании в зонах 3 и 4. При этом зарегистрированы последствия от возмущения, созданного первой лавой, которая сначала приближалась к измерительной станции, а затем удалялась от нее на расстояние 150 м в течение 45 суток. Скорость продвижения очистного забоя при этом составляла 110 м/мес, что обусловило довольно интенсивный прирост градиента горного давления во времени. Как показывают графики на рис. 4 величины смещений глубинных реперов в кровле достигают 300 мм против 140 мм на стадии 1, а скорость расслоения составляет 15 мм/сут., что почти в три раза выше, чем на стадии 1.

Характерно также наличие скачкообразного смещения отдельных реперов, причем отмечаются не только удлинения интервала скважины, но и его сокращение (пара реперов 3-4), которое свидетельствует о повторном сжатии ранее разуплотненного интервала. Именно этот момент позволяет предположить наличие более сложных структур вокруг выработки, возникающих в процессе диссипации энергии горного давления. О более интенсивных термодинамических силах на стадии 4 свидетельствует также то, что величина максимальных смещений в зоне динамического опорного давления достигает только 60 мм. В то же время приращение указанных смещений в зоне активных сдвижений превышает 250 мм. Это свидетельствует о существенно больших термодинамических силах и потоках сдвижений в зоне активных сдвижений позади движущейся лавы.

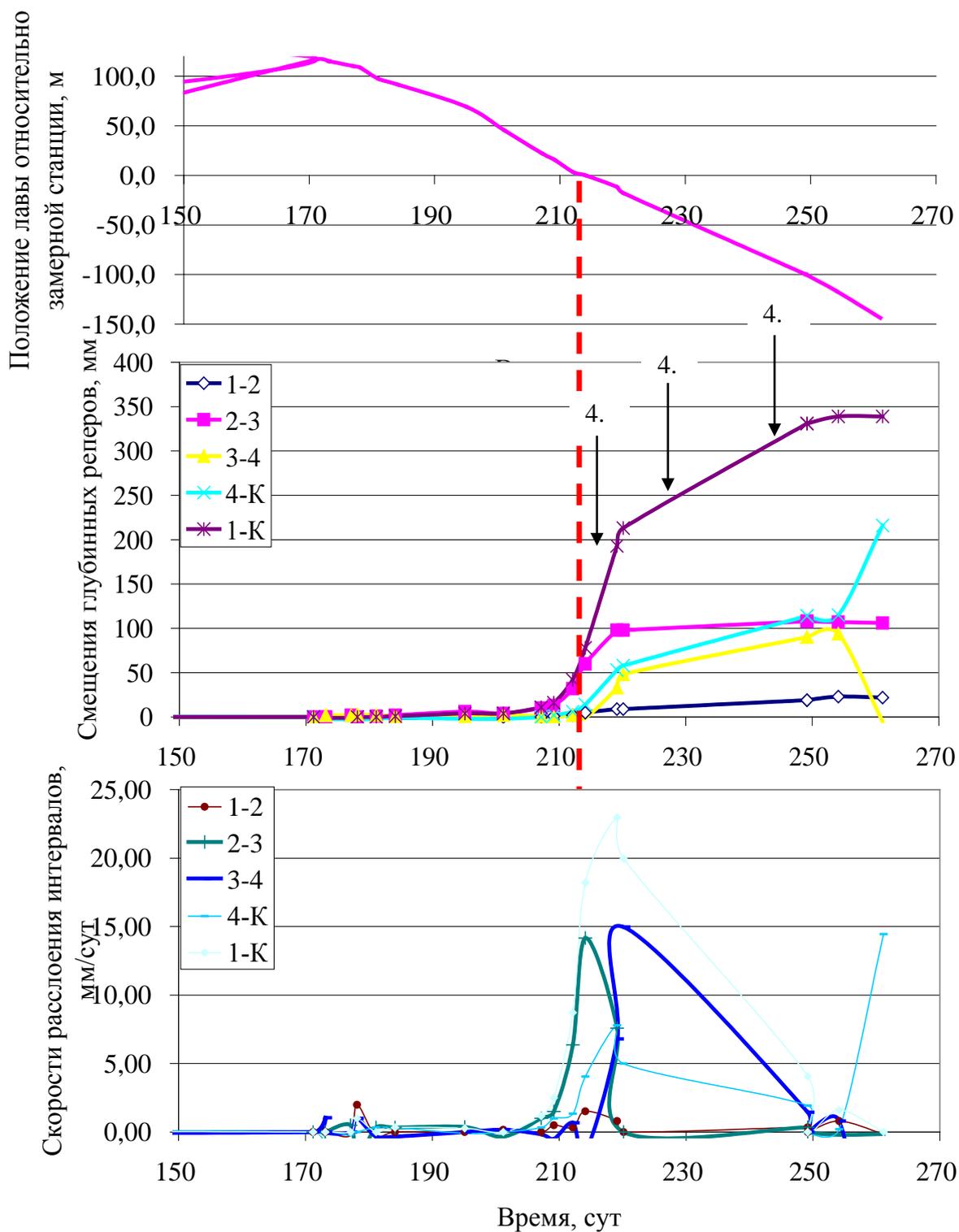


Рис. 4. Смещение глубинных реперов и скорость расслоения в зонах динамического опорного давления 3 и активных сдвижений 4

В качественном плане этап 5 аналогичен этапу 2 (см. рис. 1), а этапы 6 и 7 этапам 3 и 4. Этап поддержания выработки 5 характеризует характер деформирования массива во времени между отработкой первой и второй лавы, а этапы 6 и 7 отражают поддержание выработки в зоне динамического опорного давления и зоне активных сдвижений от второй лавы. Следует отметить, что поддержание выемочной выработки позади второй лавы не практикуется. Однако чем дальше будет сохраняться сечение выработки позади второй лавы хотя бы на уровне 3-4 м², тем эффективнее газоотсос из выработанного пространства, что в целом повышает эффективность дегазации. В связи с этим целесообразно разработать мероприятия по сохранению остаточного сечения выемочной выработки позади второй лавы, то есть после повторного ее использования. Мероприятия должны быть такими, чтобы сохранить как можно дольше остаточное сечение повторно используемой выработки без доступа в нее людей.

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ геомеханических и термодинамических условий поддержания выемочной выработки в процессе отработки выемочного участка показывает, что механизм разрушения и необратимых сдвижений окружающих пород в полость выработки существенно зависит от стадии, на которой поддерживается выработка. Важно, что на тех стадиях, когда возникают интенсивные возмущения напряженно-деформированного состояния, процессы необратимых сдвижений характеризуются скачкообразными изменениями величины смещений, знакопеременным характером этих смещений (например, пара реперов 3-4) и наибольшей величиной скорости расслоения и повторного сжатия разрушенных пород, что является косвенным подтверждением формирования диссипативных кластерных структур вокруг выработки.

Очевидно также, что характер разрушения и необратимых сдвижений должен зависеть от интенсивности термодинамических сил и соответствующих им потоков. В технологических терминах это означает, что процесс разрушения и необратимых

сдвижений вмещающих пород вокруг выемочной выработки, примыкающей к обрабатываемой лаве должен зависеть от скорости подвигания этой лавы. На сегодня известно лишь то, что при увеличении скорости подвигания очистного забоя повышается скорость конвергенции на контуре выемочной выработки, хотя при этом абсолютные величины смещений уменьшаются. Второй момент очень важен с практической точки зрения, однако на нем внимание исследователей не акцентируется. Вместе с тем с практической точки зрения значение указанного обстоятельства сложно переоценить. Рост скорости конвергенции сам по себе еще не характеризует процесс сдвижения негативно. Только итоговые смещения являются конечным критерием оценки процесса деформирования выработки.

Термодинамический подход позволяет теоретически обосновать зависимость механизма разрушений и необратимых сдвижений пород от скорости нагружения (интенсивности термодинамических сил или скорости подвигания лавы), что дает возможность провести специальный эксперимент по целенаправленному изучению указанного эффекта.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Баранов В.А., Бокий Б.В., Гуня Д.П. Фактори природной газоносности пород Донбасса//Форум гірників – 2006. Матеріали міжнародної конференції. – Дніпропетровськ, НГУ, 2006. – С. 129 – 133.
2. Лукинов В.В., Клец А.П., Ефремов И.А., Бокий Б.В. Элементы технологии способа опережающей дегазации пород кровли высоконагруженных лав // Геотехническая механика. Сборник научных трудов.- Днепропетровск, ИГТМ НАНУ, 2006, вып. 67. – С. 67 – 73.
3. Бунько Т.В., Ефремов И.А., Кокоулин И.Е. Опыт внедрения компьютерной технологии организации проветривания на угольных шахтах Украины. // Геотехническая механика. Сборник научных трудов. – Днепропетровск, ИГТМ НАНУ, 2003, вып. 41. – С. 228 – 234.
4. Булат А.Ф., Боровський А.В., Ефремов И.А., Кокоулин И.Е.,

- Бунько Т.В. К вопросу проектирования вентиляции тупиковой выработки, проводимой в зоне сдвижения горных пород на шахте им. А.Ф. Засядько. // Геотехническая механика. Сборник научных трудов. – Днепропетровск, ИГТМ НАНУ, 2003, вып. 42 – С. 3 – 9.
5. Пилюгин В.И., Ефремов И.А., Гавриш Н.Н., Кочин А.Е., Жимилюк М.Б. Особенности формирования техногенно опасных зон в горном массиве // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк 2004, вип. 1 – С. 142 – 148.
 6. Баранов В.А., Ефремов И.А., Бокий Б.В. Изменение газоносности с глубиной на примере шахты им. А. Ф.Засядько. // Сборник научных трудов Национального горного университета. - Днепропетровск, НГУ, 2004, № 19, том 3. – С. 69 – 74.
 7. Ефремов И.А., Назимко И.В. Исследование связи между горным давлением и сдвигами массива горных пород // Вісті Донецького гірничого інституту. – Донецьк 2010, вип. 2 – С. 50 – 63.