

УДК 622.834

## СВЯЗЬ МЕЖДУ ГОРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ И СДВИЖЕНИЕМ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Ефремов И.А., Ильюшенко В.Г. (АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», г. Донецк, Украина),  
Назимко В.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)

*Процес зсування у часі та просторі є безперервним, а напружений стан дискретний. Гірський тиск є миттєвою геомеханічною характеристикою масиву, тоді як зсування – інтегральною, здатною накопичуватися і, на деякий час, запам'ятовувати історію процесу. Однак згодом історія зсувань забувається під дією релаксації напружень і повзучості порід. Тому, в кінцевому результаті, процес зсування є безповоротним і протікає в напрямі збільшення ентропії. Геомеханічні процеси протікають в двох принципово протилежних напрямках: у бік самоорганізації і у бік релаксації. При цьому самоорганізація може реалізуватися лише на обмежений період часу.*

*Ground movement is continuous geomechanic process whereas stress state is discrete in space and in time. Ground pressure characterizes current state of the rock mass. Ground movement is integral process that may accumulate historical information and to remember it for some period. However relaxation and creep cause to dissipate this information. That is why ground movement is irreversible and evolves entropy production. Geomechanic processes develop at two main directions: to self-organization and to relaxation. Self-organization may maintain for limited period.*

Взаимодействие горного давления и сдвижений массива горных пород в процессе отработки месторождений полезных ископаемых является основной проблемой, от решения которой

зависит безопасность, эффективность и экономичность подготовительных и очистных работ. Решению этой проблемы посвящен ряд фундаментальных работ [1-5]. Этими исследованиями заложены основы геомеханики массива горных пород и установлены основные количественные параметры сложной схемы сдвижений толщи при разработке месторождений полезных ископаемых.

Вместе с тем, причинно-следственная связь между горным давлением и сдвижением массива горных пород до сих пор остается недостаточно изученной. Так, смещение на контуре подготовительных выработок рассматривается, как проявление горного давления. С другой стороны, посадка крепи очистных забоев жестко считается следствием обрушения тяжелых кровель, то есть динамических сдвижений подработанной толщи. То, что обрушение кровли произошло под действием горного давления, с практической точки зрения, интересует меньше, поскольку большинство технологий управления тяжелыми кровлями основано на управлении сдвигами и реже используют способы воздействия на уровень горного давления. Таким образом, прояснение зависимости горного давления и процессов сдвижений массива горных пород имеет первостепенное значение для понимания единства этих двух основных компонент.

На уровне изучения взаимозависимости этих двух важнейших компонент горный массив должен рассматриваться, прежде всего, как термодинамическая система [6, 7]. В табл. 1 приведены независимые термодинамические параметры и типичные физические процессы, которые определяются этими параметрами.

Универсальным термодинамическим параметром горного массива является энтропия, как функция его состояния. Чаще всего подразумевается геомеханическое состояние, которое является частным случаем термодинамического.

К классическим термодинамическим параметрам следует отнести температуру, давление и объем горного массива.

Таблица 1

Взаимосвязь термодинамических и физических параметров горного массива с физическими процессами и его геомеханическими состояниями

Независимый термодинамический или физический параметр	Составляющие параметра	Типичные физические процессы или состояния, зависящие от параметра	Степень равновесности процесса или состояния
1	2	3	4
Температура		Подземная газификация угля	Близкий к равновесию
		Самовозгорание угля	Близкий к равновесию
		Взрывное разрушение пород	Крайне неравновесный
Давление	Нормальные компоненты напряжений	Зоны повышенного горного давления (ПГД) или разгруженные зоны	Близкое к равновесному
	Касательные компоненты		
Прочность и долговечность пород	На сжатие, срез, растяжение	Переход массива в запрельное состояние	Неравновесный
	Компоненты прочности в определенном направлении (перпендикулярно, параллельно напластованию и т.д.)		

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Влажность		Устойчивость подземных выработок	Слабо неравновесный
		Активизация сдвижений нарушенного массива при затоплении шахт	Слабо неравновесный
Скорость движения отдельных фаз горного массива		Диффузионная и фильтрационная дегазация	Слабо неравновесный или равновесный
		Длительные сдвигения массива горных пород при его подработке	Слабо неравновесный
		Обрушение кровли в очистном забое	Неравновесный
		Горный удар	Крайне неравновесный
		Выброс угля, породы и газа	Крайне неравновесный
		Прорыв воды в подземную выработку	Неравновесный
Объем		Упругое разуплотнение массива при его надработке	Обратимый

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
Блочность нарушенного массива		Фильтрация газа и воды через трещиноватый массив	Слабо неравновесный
Взаимное расположение отдельных блоков пород		Беспорядочное обрушение кровли и ее самоподбуртовка	Неравновесный
Энтропия		Описывает любые процессы и состояния	

Температура является одним из определяющих параметров в таких необратимых процессах как, самовозгорание угля, его дегазификация, взрывное разрушение пород, тепловыделение из окружающих пород в полость горных выработок и т.д. Большинство процессов характеризуются слабой неравновесностью, поскольку управляются медленными явлениями диффузии. Лишь при взрывном разрушении процесс является крайне неравновесным, поскольку скорость ударной волны весьма высока.

Влажность горного массива является одним из важнейших термодинамических параметров, определяющих его устойчивость. При размокании пород уменьшается прочность массива, в результате чего ухудшается устойчивость горных выработок. Отметим, что размокание является ярко выраженным необратимым процессом.

Объем массива является классическим термодинамическим параметром. При уменьшении объема уровень горного давления возрастает и наоборот. Пожалуй, это единственный процесс, который является почти обратимым.

Все процессы, сопровождающиеся массопереносом, или передачей энергии в горном массиве являются ярко

выраженными необратимыми, скорость которых определяет степень неравновесности. Поэтому хотя скорость и не является в чистом виде термодинамическим параметром, она включена в таблицу, поскольку определяет неравновесность и энтропию динамических процессов, протекающих в массиве горных пород.

Горное давление, характеризующееся нормальными и касательными компонентами напряжений, действующими в массиве горных пород, непосредственно формирует зоны ПГД и разгрузки, а также определяет процесс разрушения породного массива. Именно поэтому горное давление и прочность объединены жирной рамкой. Лишь в совокупности, напряжения и прочность (или долговечность) пород определяют переход массива в запредельное состояние, что также является необратимым процессом. Важно подчеркнуть, что после перехода массива в запредельное состояние горное давление влияет на дальнейший процесс сдвижений в гораздо меньшей степени, чем давление газа и граничные условия, при которых массив перешел в запредельное состояние. Так, при разрушении пород кровли в верхнем кутке крутонаклонного очистного забоя куски породы падают в пространстве на высоту десятков метров, причем в паузах между их столкновением с кровлей и почвой напряженное состояние в отдельных кусках или падающих блоках породы близко к нулевому. Во всяком случае, амплитуды волн механических напряжений, распространяющихся в отдельных блоках во время их свободного полета несоизмеримо меньше уровня горного давления, который привел к разрушению породы.

Можно сказать, что после перехода в запредельное состояние существуют, при определенных граничных условиях, моменты, когда ранее существовавшее напряженное состояние забывается в отделившихся породных блоках и дальнейшее напряженное состояние в этих блоках после их падения определяется совсем другими граничными условиями. Это значит, что процесс сдвижений во времени и пространстве является *непрерывным*, а напряженное состояние *дискретно*. Более того, можно утверждать, что горное давление является

мгновенной геомеханической характеристикой массива, тогда как сдвигение интегральной, способной накапливаться и, в некоторой степени, запоминать историю процесса. Однако со временем история сдвижений забывается под действием релаксации напряжений и ползучести пород. Поэтому, в конечном итоге, процесс сдвижения является необратимым и протекает в направлении увеличения энтропии.

Наибольший вклад в увеличение энтропии горного массива вносят процессы дезинтеграции пород, переориентации и перемешивания блоков [8]. Поэтому параметры блочности, характеризующие указанные процессы, выделены в таблице отдельными строками.

Также следует отметить, что геомеханические процессы протекают в двух принципиально противоположных направлениях: в сторону самоорганизации и в сторону релаксации [7]. При этом самоорганизация может реализоваться лишь на ограниченный период времени. Например, региональная зона разгрузки сохраняется несколько десятилетий, а эффект саморасклинивания пород – несколько дней или недель в зависимости от свойств вмещающих пород [9, 10]. С течением времени преобладает процесс релаксации, когда в силу самопроизвольного увеличения энтропии градиенты горного давления уменьшаются. Это сопровождается перераспределением горных масс под действием ползучести, где происходит их передвижение из областей с высоким уровнем горного давления в области с низким уровнем.

Проиллюстрируем сказанное следующими примерами.

1. На шахте им. А.Ф. Засядько с помощью известного метода математического моделирования [11] были проведены исследования эволюции напряженного состояния массива в региональной зоне разгрузки при отработке пласта  $m_3$  на глубине 1200 м. На рис. 1 приведена планировка горных работ и очередность отработки смежных запасов, которые применялись при расчете перераспределения напряжений. При этом вначале была отработана разгрузочная лава 1, а затем смежные запасы

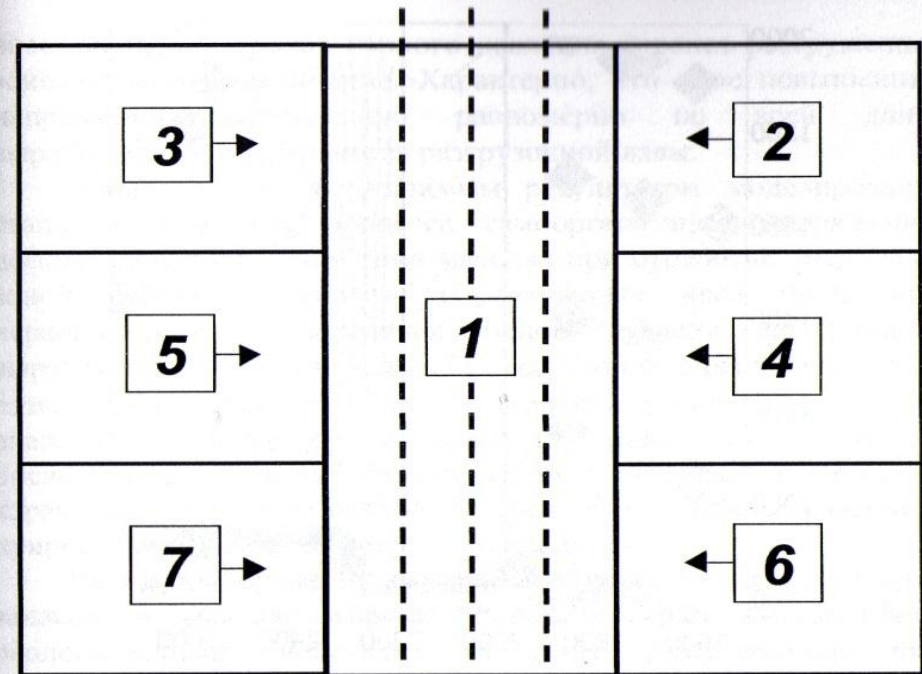


Рис. 1. Схема развития очистных работ [12]

вынимались таким образом, что лавы справа подходили к границе региональной зоны разгрузки раньше, чем слева.

Моделирование проводилось в два этапа: 1) без учета ползучести вмещающих пород; 2) с учетом ползучести, путем ввода ярко выраженных реологических свойств пород, проявление которых усиливается с ростом горного давления и увеличением метаносодержания угленосного массива, и давления, под которым находится свободный газ [12].

На первом этапе моделирования получена закономерная картина активизации горного давления в ранее выработанном пространстве разгрузочной лавы. На рис. 2 в двумерном и пространственном виде приведено распределение напряжений на момент доработки всех лав. Отметим, что после полной отработки смежных запасов происходит не только

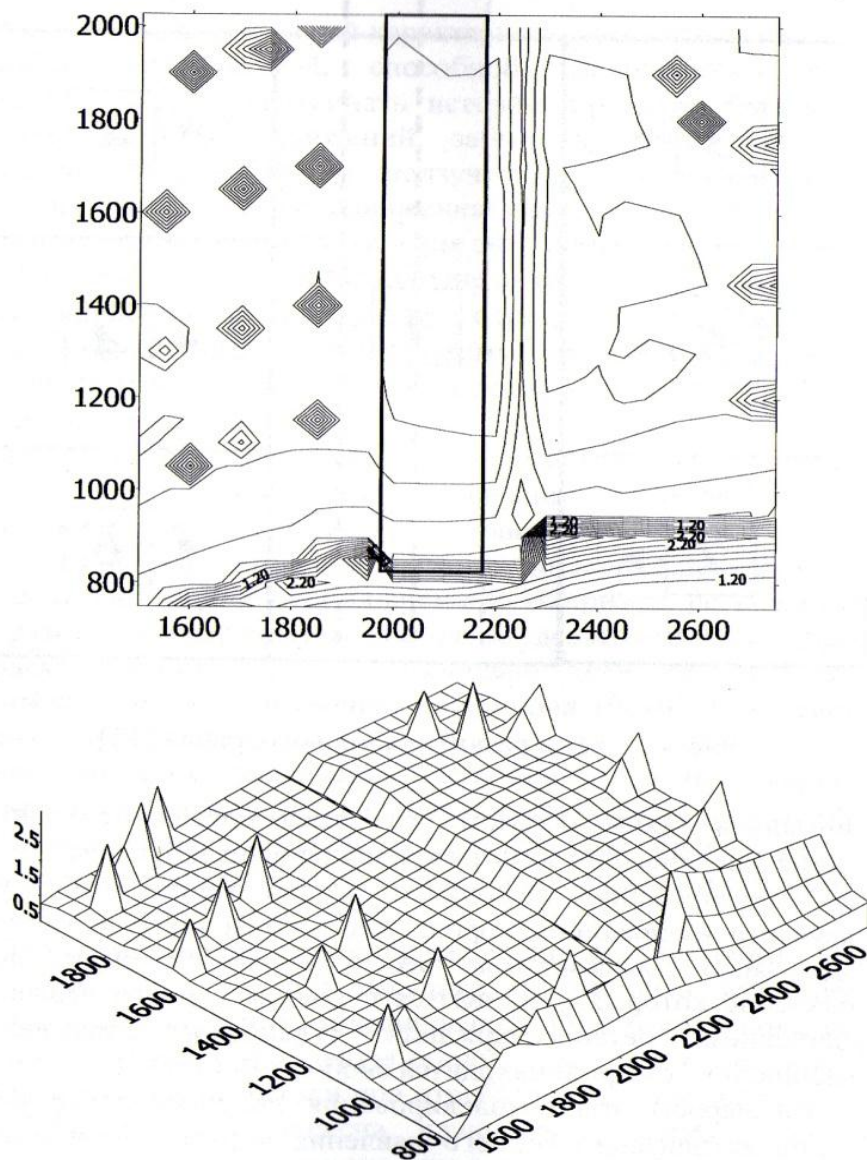


Рис. 2. Распределение горного давления при отработке пласта в несклонных к ползучести вмещающих горных породах [12]

восстановление уровня горного давления в ранее разгруженной зоне, но и его увеличение. Характерно, что поле повышенных напряжений распределено равномерно по всей длине выработанного пространства разгрузочной лавы.

Однако наиболее значимым результатом моделирования стало установление процесса самоорганизации напряженно-деформированного состояния массива при отработке смежных с зоной разгрузки запасов, в результате чего происходит неравномерное распределение горного давления по площади выработанного пространства. Так, со стороны первоочередного развития очистных работ прирост горного давления происходит дважды (примерно одинаковыми порциями), а со стороны последующего развития очистных работ – единожды. При этом характерно, что после отработки лав с обеих сторон суммарный прирост напряжений примерно одинаков.

На втором этапе моделирования, после полной отработки запасов в массиве горных пород с ярко выраженными реологическими свойствами, в ранее разгруженной зоне происходит перераспределение горного давления, которое характеризуется выраженной асимметрией. При этом максимум концентрации горного давления приурочен к участку, напротив которого была отработана последняя смежная лава. Выше по падению концентрация заметно меньше. Реология массива приводит к тому, что у того края региональной разгрузки, с которого начинается отработка смежных лав, суммарная пригрузка горного давления примерно в два раза больше, чем с противоположной стороны.

Механизм пространственной несимметрии перераспределения горного давления в ранее разгруженной зоне в процессе бесцеликовой отработки смежных запасов в склонных к реологии массивах объясняется проявлением необратимых сдвижений толщи во времени. В процессе релаксации напряжений, протекающей вследствие ползучести пород, происходит сглаживание градиентов жесткости массива во времени. Это приводит к тому, что выработанные пространства уплотняются с большей скоростью, в результате чего способны

воспринимать большую концентрацию напряжений при активизации сдвижений. При этом массив с большей скоростью забывает историю (путь) эволюции напряженного состояния. Поэтому первая смежная лава возмущает напряженное состояние в региональной зоне разгрузки менее заметно, чем вторая. Вторая лава, отрабатываемая с противоположной стороны раскрывает свод полных сдвижений, в результате чего дополнительные сдвигения активизируются по всему сечению первоначальной зоны разгрузки. В массивах, не склонных к ползучести эта зона еще не полностью уплотнена, вследствие чего она равномерно уплотняется и воспринимает дополнительную пригрузку по всему сечению региональной зоны разгрузки. Можно говорить, что зона разгрузки в этом случае реагирует как зазор, который равномерно закрывается и воспринимает пригрузку по всей своей протяженности.

В массивах с явно выраженным проявлением реологических свойств, к моменту отработки второй смежной лавы, породы в зоне региональной разгрузки уже в значительной степени уплотнились за счет ползучести и перераспределения горного давления в процессе его релаксации. Поэтому породы в области первоначальной разгрузки реагируют, скорее, как краевая часть массива, концентрируя напряжения напротив второй смежной лавы. Отсюда возникает перекося в эпюре пригрузки напряжений.

Таким образом, выполненный компьютерный эксперимент показал, что напряженное состояние по мере развития очистных работ меняется многократно, что отражает самоорганизацию процесса сдвижений. Со временем, самоорганизация массива, выраженная в неоднородном распределении напряжений, забывается, а уровень горного давления стремится к геостатике с разной скоростью, зависящей от степени ползучести. Релаксация действует как мощный фактор, стирающий историю процесса сдвижений и, тем более, историю перераспределения напряжений.

2. Рассмотрим на примере проявление прерывистости напряженного состояния массива. Для этой цели проведено

компьютерное моделирование динамического перераспределения сдвижений и напряжений вокруг очистного забоя в процессе его подвигания методом дискретных элементов [13]. Условия моделирования принимались следующими. Глубина работ 1000 м, вынимаемая мощность пласта 2 м. Пласт залегал в породах средней устойчивости и склонных к обрушаемости. Решались два варианта с различными прочностными характеристиками непосредственной и основной кровель. Непосредственная кровля имела мощность в три раза превышающую вынимаемую мощность пласта. Основная кровля была толще угольного пласта в 8 раз. В первом варианте прочность пород основной кровли на одноосное сжатие составляла 40 МПа, а во втором 70 МПа. Прочность непосредственной кровли в обоих вариантах была одинакова и равнялась 30 МПа. Отпор механизированной крепи соответствовал несущей способности крепи КД-90 и равнялся 500 кН/м<sup>2</sup>.

На рис. 3, а показано состояние вмещающих пород при их обрушении для первого варианта исходных условий. Видна слоистость массива и общий характер его разрушения. Отчетливо прослеживаются плоскости обрушения кровли по груди очистного забоя и по режущему ряду механизированной крепи. Крепь заметно деформирована, а обрушенные породы опустились на почву пласта.

На рис. 3, б показаны зоны разрушения пород в момент обрушения кровли. Видно, что предельными деформациями сдвига охвачена значительная область примыкающих к очистному забою пород. Прежде всего, отметим расслоение пород вдоль контакта угольного пласта, а также непосредственной и основной кровель. Кроме того, в запредельное состояние перешла значительная область пород в кровле пласта. Практически вся непосредственная кровля впереди забоя разрушена предельными касательными напряжениями. Основная кровля также подверглась разрушению. Причем площадь разрушений впереди забоя сопоставима с площадью разрушений позади него. Также видны плоскости

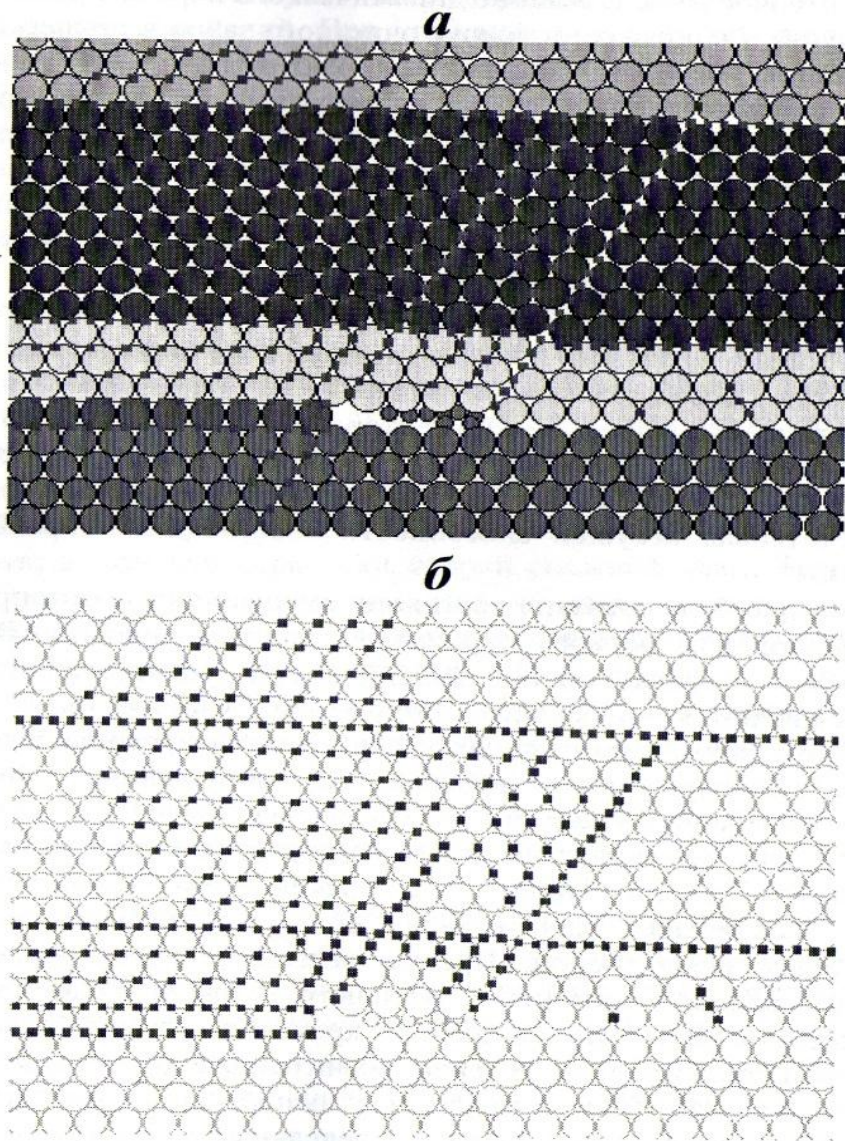


Рис. 3. Результаты расчета динамического перераспределения сдвижений и напряжений вокруг очистного забоя в процессе его подвигания методом дискретных элементов

отрыва слоев непосредственной и основной кровель в местах их обрушения. Обрушенные породы также разрушены растягивающими предельными деформациями.

На рис. 4 показано распределение нормальных вертикальных напряжений в момент обрушения кровли в обоих

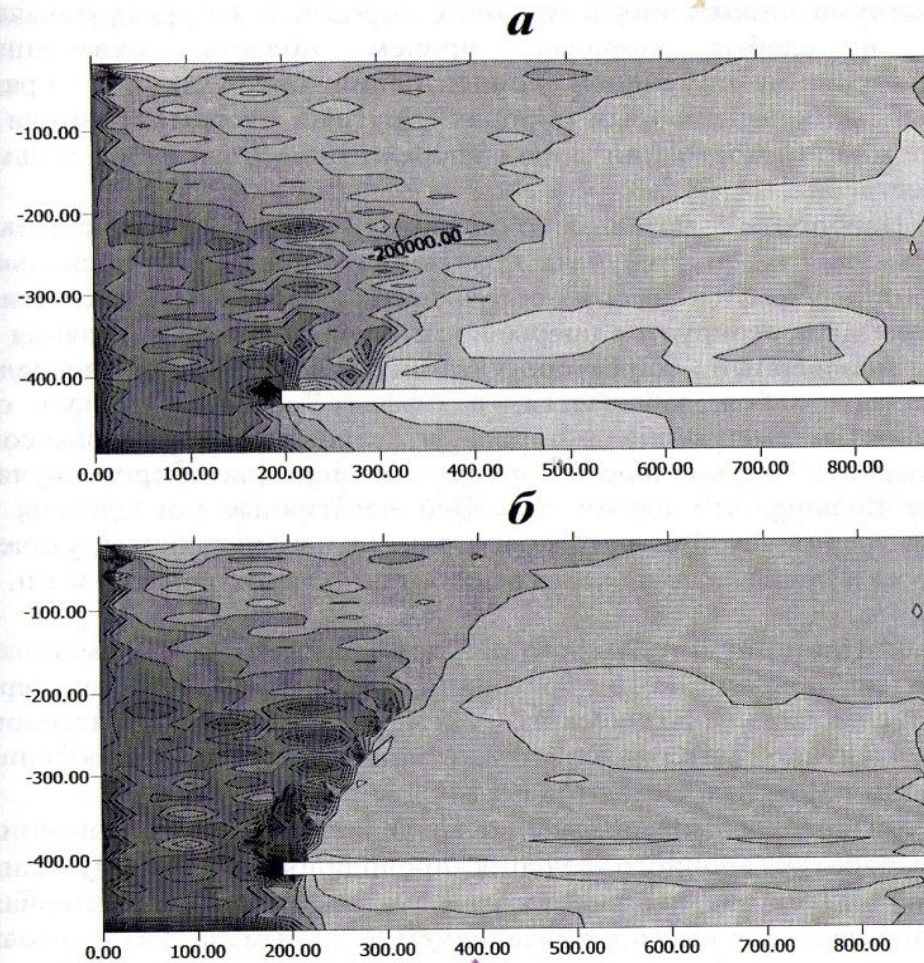


Рис. 4. Распределение нормальных вертикальных напряжений в момент обрушения кровли в обоих вариантах расчета

вариантах расчета. Видно, что в случае слабых кровель напряжения впереди очистного забоя концентрируются значительно меньше (рис. 4, а), чем когда кровли сложены более прочными породами. Это закономерно, поскольку прочные породы порождают большие зависания и допускают большую величину прогиба, чем слабые вмещающие породы. В точке максимума напряжения в прочных породах в 1,22 раза больше, чем в слабых породах, причем область, охваченная напряжениями с уровнем концентрации более двух в 4 раза больше в более прочных породах. Другими словами, разница в напряженном состоянии пород впереди очистного забоя весьма существенна.

Наоборот, позади очистного забоя вертикальные напряжения в обоих случаях практически одинаковы, поскольку они определяются весом обрушенных пород. Именно этим фактом иллюстрируется прерывность напряженного состояния и его мгновенный характер. Разница напряжений впереди очистного забоя забывается, а эффект остается только от прочности вмещающих пород и запоминается процессом сдвижений. Так, блочность обрушенных пород во втором случае будет больше, что влечет за собой негативные последствия с точки зрения устойчивости подготовительных выработок, утечек воздуха и дренажа воды через выработанное пространство и т.п.

3. Принцип интегрирования для сдвижений и временный характер напряженного состояния рассмотрим на примере независимого физического моделирования методом эквивалентных материалов и математического моделирования методом конечных элементов [9, 14].

Физическое моделирование воздействия горного давления на выработку арочного сечения проводилось для следующих условий. Масштаб моделирования 1:50. Эквивалентный материал – гипсо-песочная смесь с добавлением воды и мела. Разделитель между слоями пород – молотая слюда крупных фракций. Глубина заложения выработки 600 м. Вмещающие породы – средней для Донбасса крепости, с пределом прочности на одноосное сжатие

40–50 МПа. Нагружение модели осуществлялось в несколько этапов с регулярным шагом пригрузки. Регистрация сдвижений пород производилась по заранее установленным в тело модели реперам путем фиксации их местоположения на прозрачной пленке после каждого этапа нагружения.

На конечном этапе моделирования была получена следующая картина сдвижений (рис. 5). Приведенные траектории

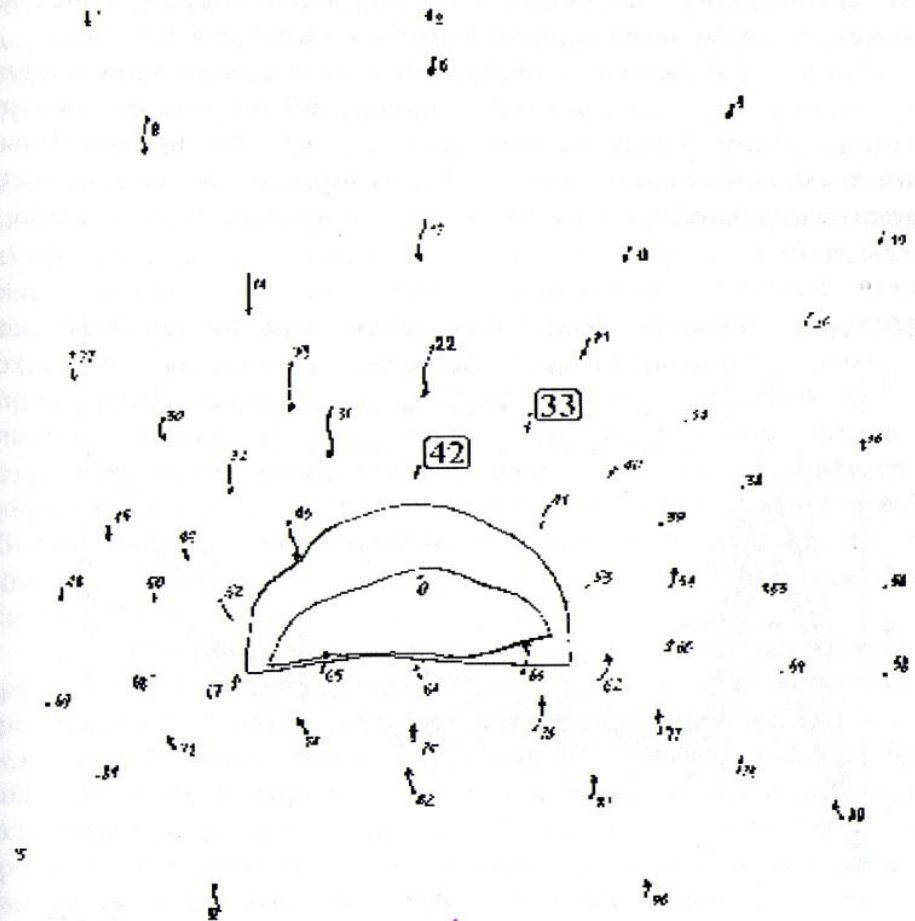


Рис. 5. Кинематика сдвижений реперов (блоков пород) вокруг моделируемой выработки [9]



сдвижений реперов характеризуют сдвигение некоторого объема моделируемых пород вокруг каждого из них.

На фоне общей традиционной тенденции их радиального перемещения в сторону центра полости выработки отмечается явно выраженная неравномерность сдвижений. Векторы сдвижений отдельных реперов часто отклоняются от радиального направления (см. реперы № 17, 22, 31, 43, 62, 76, 82 и др.). При этом активизация смещений моделируемых пород наиболее выражена в левом замке кровли выработки и в правом почвы.

После оцифровки результатов моделирования были получены графики зависимости приращений полных сдвижений от приращений нагрузки, то есть от уровня приложенных граничных напряжений (рис. 6). Такой подход дал возможность выделить неравномерность компонент приращений сдвижений в

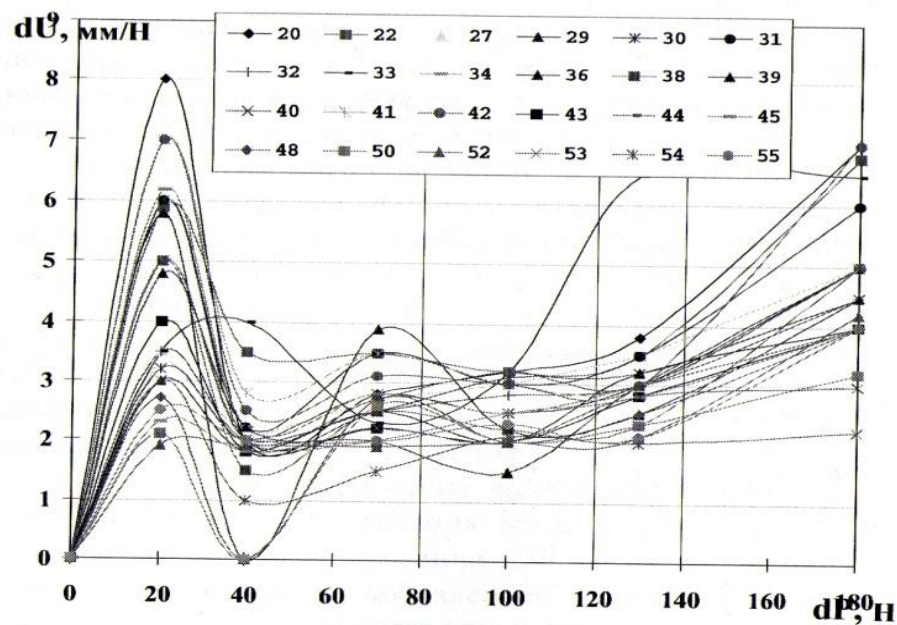


Рис. 6. Распределение приращения полных сдвижений породных блоков под нагрузкой [9]

чистом виде. На графике можно наблюдать непропорциональность изменения приращений полных сдвижений реперов под нагрузкой, включающую существенные различия в направлении и темпе роста смещений.

Авторы объясняют такое поведение моделируемых пород проявлением в массиве эффекта их саморасклинивания, который возникает из-за недостатка степени свободы при попытке одновременного сдвижения смежных блоков пород в радиальном направлении к горизонтальной оси выработки. При этом было установлено, что эффект характеризуется непостоянством места проявления и неустойчивостью во времени.

Проведенное для идентичных граничных условий математическое моделирование [14] подтверждает данные выводы. Его результаты показали, что в локальных местах саморасклинивания смежных блоков пород наблюдаются максимальные концентрации напряжений. Однако такой максимально напряженный локальный участок не может сохранять устойчивое равновесие длительное время. В определенный момент, под действием горного давления, на этом участке происходит дополнительное разрушение пород, в результате чего интенсивность сдвижений возобновляется, а напряжения заново перераспределяются по всему приконтурному объему массива. Данный процесс повторяется многократно, что можно наблюдать на участке 40-70 Н, 100-140 Н и так далее (см. рис. 6).

Результаты представленных независимых исследований эффекта саморасклинивания пород позволяют в явном виде проследить принцип интегрирования (накопления) сдвижений отдельных блоков пород и временный, мгновенный характер максимальных напряжений, неоднократно реализуемых между различными блоками пород. Наличие характерных мест проявления эффекта саморасклинивания, зависящих от конкретных геотехнологических условий, позволяет его четко фиксировать в одном и том же месте на различных этапах моделирования (периодах эксплуатации выработки). Это свидетельствует о том, что максимальные напряжения постоянно

реализуются между разными, сдвигающимися в радиальном направлении, блоками пород.

Таким образом, картину сдвижений после полной потери выработкой своего сечения, можно восстановить только по ретроспективному анализу траекторий сдвижения породных блоков. При этом историю перераспределения напряжений на границах каждого такого блока восстановить практически невозможно, так как они не обладают устойчивыми признаками и мгновенно «забываются» на очередном этапе сдвижения.

4. Авторы статьи [15], основываясь на собственных исследованиях и на результатах экспериментов других авторов, разработали новый подход к описанию деформирования вмещающих горную выработку пород на основе термодинамики необратимых процессов и динамического моделирования. Это позволило адекватно описать процесс развития зоны разрушений вокруг горной выработки в виде скачков зоны неупругих деформаций.

При описании этого подхода авторы в явном виде показали, что путь сдвижений разрушенных пород вокруг выработки (путь интегрирования по сдвижениям) «запоминается» и зависит от скорости нагружения системы «крепь – окружающие породы».

Результаты шахтных инструментальных наблюдений авторов свидетельствуют о том, что, в отличие существующих представлений, зона разрушения вокруг выработки развивается скачкообразно. При этом каждое последующее положение границы зоны не всегда охватывает предыдущее. Так, последующие друг за другом скачки границы зоны разрушений могут затрагивать совершенно отдельно расположенные участки окружающего массива. Более того, при определенных условиях последующий скачок границы дополнительных разрушений может происходить в пределах ранее разрушенного массива.

Шахтные эксперименты других авторов [9] также надежно зафиксировали неконцентрический характер роста зоны разрушений. На рис. 7 по положениям зоны разрушений вокруг выработки можно наблюдать, что новое положение границы зоны

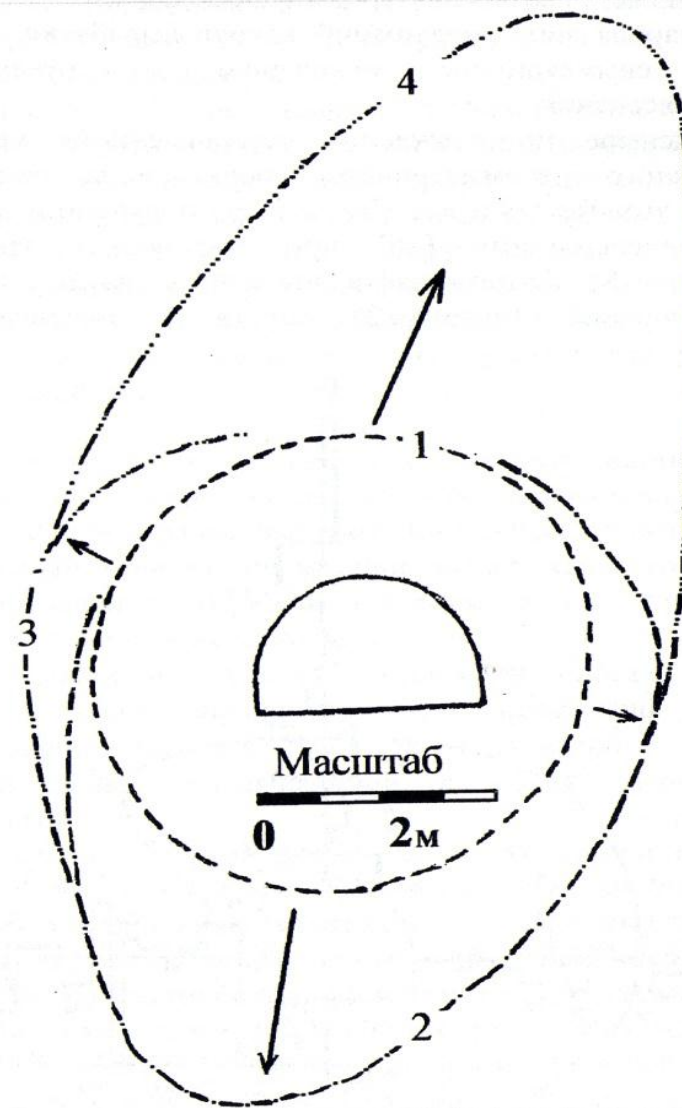


Рис. 7. Положение зон разрушений вокруг штрека [9]:  
1 – первоначальное; 2-4 – после отхода лавы на 25, 155 и 182 м соответственно

разрушений не охватывало предыдущее. Однако в конечном итоге суммарная зона разрушений вокруг выработки занимает примерно симметричное положение относительно ее поперечного сечения.

Независимое подтверждение установленного механизма скачкообразного несимметричного роста зоны разрушений вокруг подготовительной выработки было получено с помощью шахтного эксперимента [16] при постоянных граничных условиях (рис. 8). Авторы зафиксировали развитие вторичной зоны разрушений (позиция 2) спустя 5 месяцев после

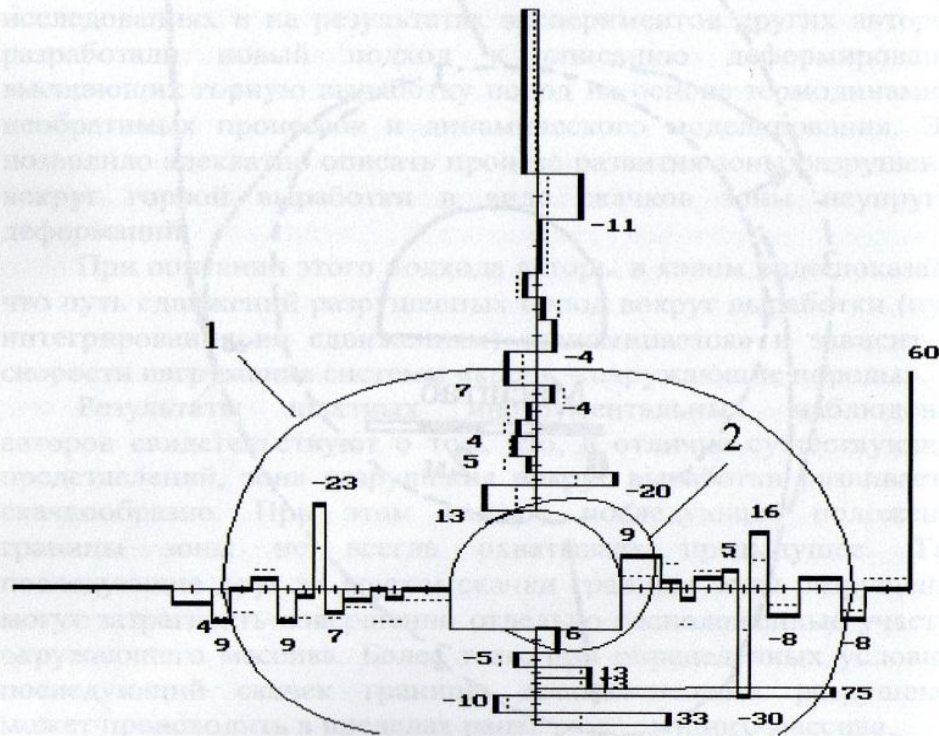


Рис. 8. Порядок развития зон разрушений вокруг подготовительной выработки [16]. Цифрами указаны деформации вмещающих пород (знак « $\leftrightarrow$ » – растяжение)

образования первичной зоны (граница 1). Таким образом, закономерность роста зоны подтверждается и при постоянной величине горного давления.

Ссылаясь на приведенные исследования, авторы [15] подчеркивают, что процесс развития зоны разрушения вокруг выработки носит динамический характер, при котором вид и направление последующего разрушения зависит от ранее накопленной поврежденности окружающих пород. Таким образом сохраняется история сдвижений, и прерывается преемственность между мгновенными полями напряжений, существующим на отдельных этапах роста зоны разрушений вокруг выработки.

5. Проследим на примере исследования закономерностей движения газа в окрестности действующего очистного забоя, примыкающего к ранее выработанному пространству [17], как интегральный процесс сдвижений задает характер не только перераспределению горного давления, а и направлению и интенсивности газовых потоков.

Для граничных условий отработки пласта  $m_3$  шахты им. А.Ф. Засядько авторами было проведено численное моделирование потоков газа вокруг очистного забоя 15-й западной лавы, примыкающей к ранее выработанному пространству.

На рис. 9 показана расчетная схема задачи фильтрации метана в слоистой среде вмещающих угольный пласт пород. Расчетная область была разбита на 1949 конечных элементов и состояла из семи характерных областей, отличающихся величиной коэффициентов фильтрации или сопротивлением движению газа через поры и трещины. В средней части расчетной области показана темной полосой проекция выработанного пространства 15-й западной лавы, наклоненная под углом  $9^\circ$ . Справа по падению расположен нетронутый горными работами массив горных пород, имеющий максимальное сопротивление движению газа (100 условных единиц). Цифры на модели указывают относительные

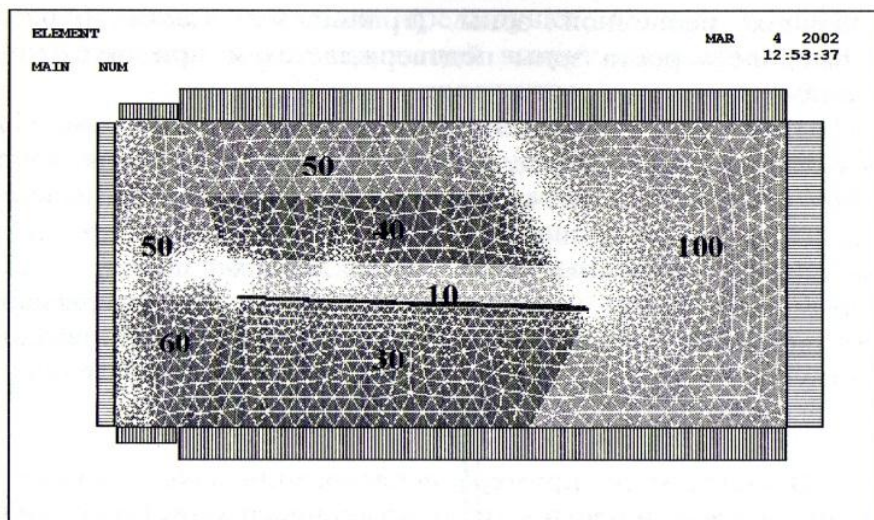


Рис. 9. Расчетная схема для конечно-элементного моделирования движения газа в горном массиве [17]. Цифры – относительное сопротивление массива

величины фильтрационных характеристик процесса.

Решение задачи осуществлялось в стационарной постановке и поэтому не зависело от абсолютных величин коэффициентов фильтрации и давления газа на границах расчетной области. На рис. 10 приведено распределение изолиний давления газа в окрестности расчетной области.

При описании отличительных особенностей распределений изолиний давления и выяснении причин их возникновения авторы используют ретроспективный анализ сдвижений, произошедших ранее в исследуемом участке массива, а также новых сдвижений, спровоцированных отработкой лавы.

Например, разрыв изолиний давления над краевой зоной полных сдвижений со стороны падения объясняется действительным разрывом толщи, линия которого обычно наклонена к плоскости пласта под углом  $70-80^{\circ}$  и тем обстоятельством, что перепад проницаемости нетронутого

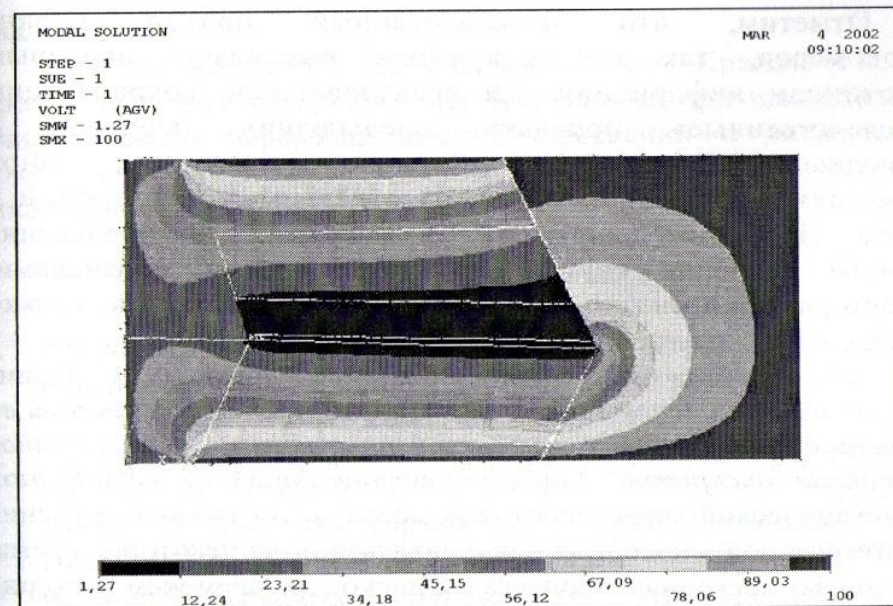


Рис. 10. Расчетное распределение давления газа в горном массиве [17]. Оттенки характеризуют интенсивность движения газа

массива и только что подработанного, попавшего в зону активных сдвижений весьма значителен. Анализируя распределение области минимального давления газа авторы отмечают ее значительное различие в кровле и почве (до пяти раз). Этот факт они снова связывают со сдвижением пород, а именно с тем, что зона полных сдвижений растянута в подработанную толщу на расстояние порядка длины лавы, а в почву распространяется лишь на 0,5-0,6 ее длины.

Общее описание картины перераспределения газа в затронутой очистными работами толще тоже связано с историей накопления сдвижений. Так, внедрение зон повышенного газового давления в ранее под- и надработанный массив объясняется интенсивным газовым потоком со стороны только что под- надработанной толщи и тем, что ранее под- и надработанный массив после уплотнения не способен быстро пропустить или поглотить интенсивный приток газа.

Отметим, что использованный подход вполне закономерен, так как сдвигения выступают основным источником информации для исследователей, сохраняющим «наследственные» признаки предыдущих периодов и позволяющим оценить состояние той или иной геомеханической системы, как на отдельных этапах, так и в целом. При этом напряжения в массиве и распределение горного давления служат вспомогательными признаками, характеризующими геомеханическое состояние массива только на отдельных этапах.

Таким образом, выполненные исследования и анализ независимых экспериментов показали, что процесс *сдвижений во времени и пространстве является непрерывным, а напряженное состояние дискретно*. Горное давление является мгновенной геомеханической характеристикой массива, тогда как сдвигение – интегральной, способной накапливаться и, на некоторое время, запоминать историю процесса. Однако со временем история сдвижений забывается под действием релаксации напряжений и ползучести пород. Поэтому, в конечном итоге, процесс сдвигения является необратимым и протекает в направлении увеличения энтропии.

Геомеханические процессы протекают в двух принципиально противоположных направлениях: в сторону самоорганизации и в сторону релаксации. При этом самоорганизация может реализоваться лишь на ограниченный период времени. Например, региональная зона разгрузки сохраняется несколько десятилетий, а эффект саморасклинивания пород – несколько дней или недель в зависимости от свойств вмещающих пород. С течением времени преобладает процесс релаксации, когда в силу самопроизвольного увеличения энтропии градиенты горного давления уменьшаются. Это сопровождается перераспределением горных масс под действием ползучести. При этом массы передвигаются из областей с высоким уровнем горного давления в области с низким уровнем.

Полученные выводы являются геомеханической основой для повышения достоверности прогноза проявлений горного

давления.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Красько Н.И. за предоставленные материалы, использованные при иллюстрации динамического перераспределения сдвижений и напряжений вокруг очистного забоя в процессе его подвигания методом дискретных элементов.

## СПИСОК ССЫЛОК

1. Авершин С.Г. Сдвигение горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР. - М.: Углетехиздат, 1958. – 250 с.
2. Петухов И. М., Линьков А. М., Фельдман И. А. Защитные пласты. - Л.: Недра, 1972. – 424 с.
3. Якоби О. Практика управления горным давлением. - М.: Недра, 1987. – 566 с.
4. Фармер Я. Выработки угольных шахт. – М.: «Недра». – 1972. – 241 с.
5. Кратч Г. Сдвигение горных пород и защита подрабатываемых сооружений. - М.: Недра, 1978. – 494 с.
6. Онищенко Ю.А. Принцип пространственно-временного непостоянства параметров горных пород // РМПИ. – Киев: «Техника». – 1978. – №51 – С. 19-23.
7. Назимко В.В. Самоорганизация процессов сдвигения горного массива // РМПИ. – Киев: «Техника». – 1989. – №84. – С. 26-31.
8. Звягильский Е.Л., Минаев А.А., Назимко В.В., Александров С.Н., Пенг С.С. Геомеханические основы предотвращения провалов земной поверхности при ликвидации шахт. - Донецк: ООО "Норд Компьютер", 2001. – 333 с.
9. Nazimko V.V., Peng S.S., Laptev A.A., Alexandrov S.N., Sazhnev V.P. Damage mechanics around a tunnel due to incremental ground pressure // 36<sup>th</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium. – J. Rock Mech. & Min. Sci. – 1997. – 34:3-4, Paper No. 222.
10. Александров С.Н. Исследование в лабораторных условиях поведения вмещающих подготовительную выработку пород

- на образцах в режиме саморасклинивания // Проблемы гірського тиску. – Донецьк: “Норд Комп’ютер”. – 2002. – №7. – С. 41–50.
11. Назимко В.В. Геомеханические основы устойчивости подготавливающих выработок в зонах разгрузки при воздействии очистных работ: Дисс... докт. Техн. наук: 05.15.02; 05.15.11. – Днепропетровск, 1990. – 337 с.
  12. Шевченко В.В., Ефремов И.А., Бокий Б.В., Пожитько И.И., Папазов Н.М. Характер изменения горного давления в региональной зоне разгрузки при бесцеликовой отработке запасов // Днепропетровск: ИГТМ.– 2003. – №43. – С. в печати
  13. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // Geotechnique. – 1979. – Vol.29, №1. – С. 47-65.
  14. Численное моделирование увеличения несущей способности вмещающих выработку пород за счет эффекта их саморасклинивания / В.П. Сажнев, А.А. Лаптеев, С.Н. Александров, В.В. Назимко // Известия донецкого горного института. – 1996. – №2. – С. 67–70.
  15. Назимко В.В., Лаптеев А.А., Напрасников С.В. Динамическая модель развития зоны разрушений вокруг горной выработки // Физика и техника высоких давлений. – 1998. – Т.8, №3. – С. 137–145.
  16. Назимко В.В., Кузяра С.И., Сугаков В.А. Механизм развития зоны разрушения вокруг выработки вне зоны влияния очистных работ // Известия Донецкого горного института. – 1995. – №2. – С. 43-46.
  17. Шевченко В.В., Бокий Б.В., Назимко В.В. Особенности фильтрации метана в окрестности очистного забоя, примыкающего к ранее выработанному пространству // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ.– 2003. – №42. – С. в печати

*Здано до редакції 27.03.2003 р.*

*Рекомендовано до друку д.т.н. Гребьонкіним С.С.*