

УДК: 622.273.01

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЯ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПЛАСТА L_1 ШАХТЫ ИМ. А.Г. СТАХАНОВА В СВЕТЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

к.т.н. Рязанцев Н.А. (ГП "Красноармейскуголь"), инж. Рязанцева Н.А.,
к.т.н. Лобков Н.И. (ИФГП НАН Украины)

Приведено результати досліджень поведінки вугілля та вмещаючих порід пласта L_1 в об'ємному полі стискуючих напружень. Показано, що в максимумі торного тиску за деформацією пласта 10...20%, відбувається критичний структурно-фазовий перехід зі збільшенням об'єму. Це явище супроводжується ударною хвилею та спонтанним руйнуванням вугілля.

PHYSICOMECHANICAL PROPERTIES OF COAL AND CONTAINING ROCKS OF THE STRATUM L_1 OF MINE IT. A.G.STAKHANOV IN VIEW OF DISPLAY OF THE GEODYNAMIC PHENOMENA

Ryazantcev N.A., Ryazantceva N.A., Lobkov N.I.

Results of researches of behaviour of coal and containing rocks of a stratum L_1 in a volumetric field of compressing pressure are resulted. It is shown, that in a pique of basic pressure at deformation of a stratum 10 ... 20 % occur critical structural - phase transition to increase in volume. This phenomenon is accompanied by an elastic wave and spontaneous destruction of coal.

За 30 лет эксплуатации шахты им. А.Г. Стаханова при проведении полевых и пластовых (по пласту L_1) выработок зафиксированы многочисленные выбросы в песчанике L_1Sl_1 . Динамических явлений по углю не отмечалось. Однако, в 2003 году во 2-й лаве центрального бремсберга пласта L_1 в зоне приближения песчаника к пласту было зафиксировано несколько иномальных геодинамических явлений, квалифицированных как внезапные выдавливания пласта.

Измерениями, проведенными в лаборатории МакНИИ методом толчения, установлено, что коэффициент крепости выдавленного массива угля составляет 1,06., вне зоны выдавливания - 1,29. Поверхностная прочность угля, измеренная прочностномером П-1, составила 80 у.е., прочность угля на одноосное сжатие - 15-20 МПа. Имеются многочисленные данные по определению прочности на одноосное сжатие и растяжение вмещающих пород пласта и песчаника L_1Sl_1 . Однако, все имеющиеся данные не отражают особенностей поведения угля и пород в массиве, так как угольный пласт и вмещающие породы находятся в объемном напряженном состоянии.

В связи с вышеуказанным, возникает определенный научный и практический интерес к исследованиям поведения угля и вмещающих пород пласта L_1 в объемном поле сжимающих напряжений. Возможно получен-

ные данные помогут отыскать причины возникновения аномальных геодинамических явлений при ведении горных работ в этой лаве.

Поведение угля и вмещающих пород в объемном поле сжимающих напряжений

Испытания угля и вмещающих пород, проведенные на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия конструкции ДонФТИ НАНУ, показали, что отличительной особенностью угля пласта l_1 является его вязкость, пластичность и значительная остаточная прочность. И на кромке забоя, когда минимальное сжимающее напряжение $\sigma_3 = 0$, и в глубине массива, когда $\sigma_3 = 10; 20$ МПа, предельные деформации достигают 10-13% (рис.1). На диаграммах отчетливо видны зоны пластического упрочнения угля, а хрупкость разрушения (о которой косвенно можно судить по крутизне ниспадающей ветви диаграмм в области разупрочнения, т.е. по величине модуля спада), возрастает при переходе от обобщенного растяжения (у груди забоя) в область обобщенного сдвига (в глубине массива, когда $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$).

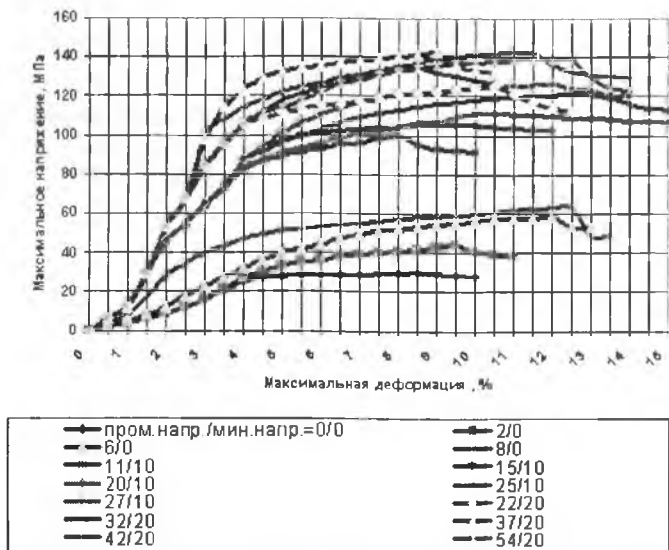


Рис. 1. Поведение угля при различных величинах минимального σ_3 и промежуточного напряжения σ_2 .

Несущая способность угля с ростом бокового давления существенно возрастает. Если при одноосном сжатии, когда $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = 0$, прочность составляет 15 МПа, то на глубинах более 800 м в глубине массива, где $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 20$ МПа, она увеличивается на порядок, достигая 150 МПа и более (рис.2).

Максимальная несущая способность угля наблюдается при обобщенном сдвиге, а минимальная — в области между сжатием и сдвигом (рис.3).



Рис. 2. Зависимость прочности угля и вмещающих пород от величины бокового давления σ_0 .

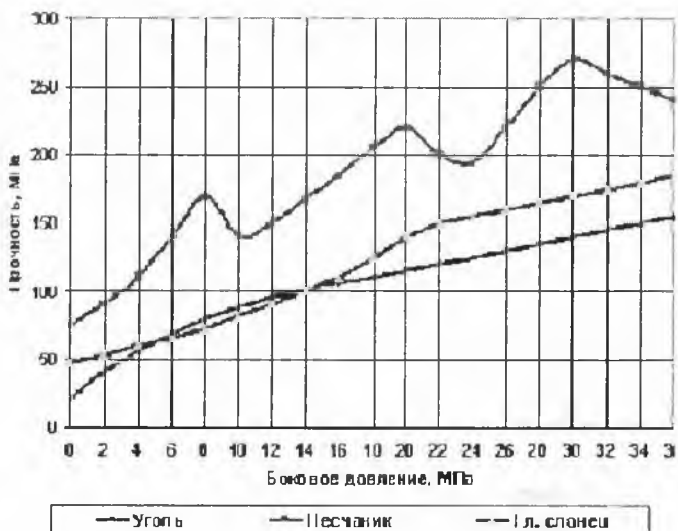


Рис. 3. Зависимость прочности угля и вмещающих пород σ_1 от параметра вида деформационного состояния μ_e при $\sigma_3 = 20$ МПа.

Пластичность угля характеризуется величиной октаэдрической сдвиговой деформации. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что эта величина в начале микроразрушения (дилатансии) и макроразрушением существенно отличается. Лишь при $\sigma_0 = 0$; 12 и 24 МПа начало ди-

латансии практически совпадает с макроразрушением (разрушение хрупкое при достижении предела сжимаемости). Во всех остальных случаях от микроразрушения до макроразрушения уголь способен выдержать степень деформации до 15%.

Кривые зависимости сдвиговой деформации на пределе сжимаемости и на пределе несущей способности от бокового давления находятся в противофазе и как бы зеркально отображают друг друга (рис.4).

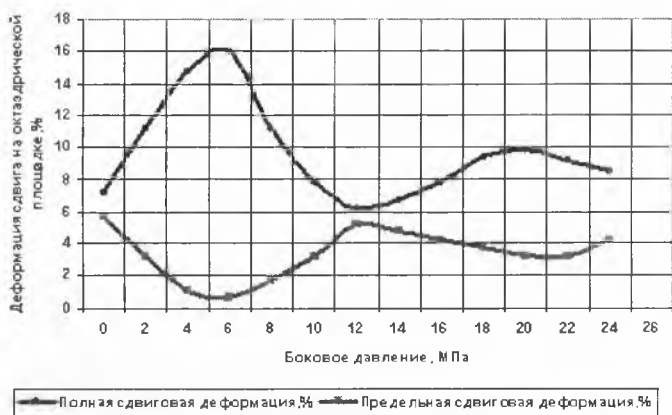


Рис. 4. Зависимость деформации сдвига угля γ от величины бокового давления σ_0 .

Примерно такая же картина наблюдается и в зависимости сдвиговой деформации от вида деформационного состояния. Если сдвиговую деформацию на пределе сжимаемости отождествить с упругой деформацией сдвига, тогда существует следующая закономерность: чем меньше величина упругой деформации, тем больше разрушающая деформация и, наоборот, чем больше упругая, тем меньше разрушающая (Рис.5).

Такая зависимость неизбежно сказывается на энергоёмкости разрушения угля. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что энергоёмкость разрушения угля изменяется периодически в зависимости от вида деформационного состояния, при этом максимумы энергоёмкости наблюдаются при обобщенном сдвиге ($\mu_\epsilon = 0$) и между сдвигом и растяжением ($\mu_\epsilon = 0,5$), а минимумы — при $\mu_\epsilon = -0,25$ и $+0,25$. Кривые зависимости предельной и полной энергоёмкости разрушения практически идеально подобны. Учитывая, что разница между ними — суть энергоёмкость дробления, следует отметить следующую закономерность: в глубине массива при $\sigma_3 > 10$ МПа энергоёмкость дробления угля величина постоянная, не зависит от вида деформационного состояния и составляет $1,5$ МДж/м³. На кромке забоя энергоёмкость дробления при растяжении меньше, чем при сдвиге и сжатии и не превышает $0,5$ МДж/м³ (рис.6).



Рис. 5. Зависимость сдвиговой деформации угля и вмещающих пород γ от параметра вида деформационного состояния μ_ϵ при $\sigma_3 = 20$ МПа.

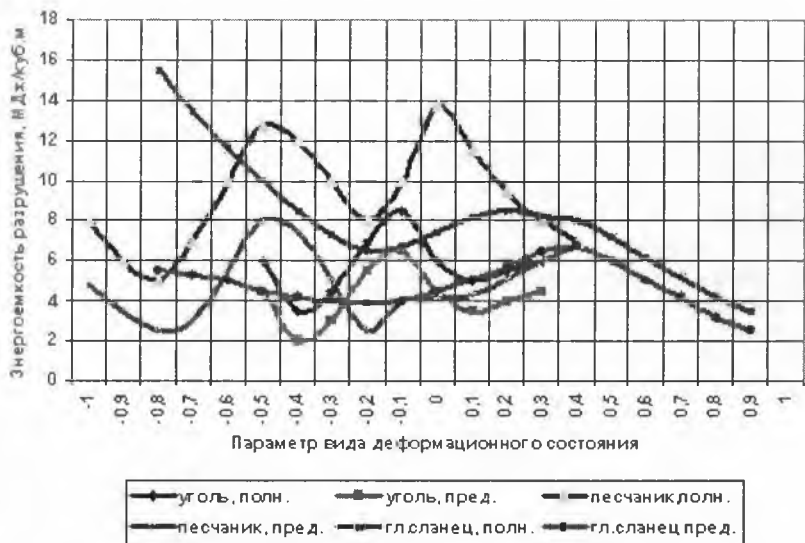


Рис. 6. Зависимость полной A_n и предельной энергоемкости A_{np} разрушения угля и песчаника от параметра вида деформационного состояния μ_ϵ при $\sigma_3 = 20$ МПа.

Поведение глинистого сланца и песчаника в объемном поле сжимающих напряжений существенно отличается от поведения угля.

Прочность глинистого сланца с ростом бокового давления нарастает не так интенсивно и, при давлениях, соответствующих глубинам 200-600 м, оказывается даже меньше, чем прочность угля. Прочность песчаника с ростом бокового давления также возрастает не более чем в 3-4 раза, причем при давлениях 11, 23 и 36 МПа (соответствующие глубинам 450, 900 и 1450 м) наблюдаются аномально низкие значения прочности песчаника (рис.2).

При смене вида деформационного состояния прочность и глинистого сланца, и песчаника изменяется периодически, однако при одних и тех же напряжениях характер деформирования, разрушения и изменения прочности пород существенно отличается. Так, в глинистом сланце реализуется, в основном, разрушение по механизму отрыва со сдвигом, предельная сдвиговая деформация не превышает 10%. Причем, в области обобщенного сдвига (в глубине массива) прочность сланца оказывается меньше, чем угля. Разрушение глинистого сланца происходит практически без изменения объема (дилатансия не превышает 1%), а разрушение имеет вязкий характер (модуль спада практически равен нулю).

В песчанике разрушение идет по механизму сдвига со сжатием, дилатансия достигает 6%, а модуль спада в области обобщенного сжатия очень высок, разрушение хрупкое. В области же обобщенного сдвига модуль спада песчаника меньше, чем угля, т.е. разрушение угля более хрупкое (рис.3).

Следует также отметить, что дилатансия угля не превышает 2%, причем максимум наблюдается при обобщенном сдвиге. Это связано с тем, что из-за значительной внутренней пористости угля, разрушение его происходит в основном за счет схлопывания пор и трещин (рис.7), после чего деформация выравнивается по всему объему и разрушение происходит в плоскости действия максимальных сдвиговых деформаций. В неоднородном горном массиве, когда имеется граница раздела «уголь-песчаник», плоскостям сдвига и трещинам, образовавшимся в угле, энергетически невыгодно пересечь эту границу, и они развиваются параллельно границе раздела. Именно этим объясняется препарация угля вблизи песчаника кровли и почвы при внезапных выдвиганиях пласта.

Отсутствие существенного увеличения объема угля свидетельствует о том, что деформации сжатия со стороны максимального и промежуточного напряжений компенсируются деформациями растяжения в сторону минимального сжимающего напряжения (в сторону груди забоя) за счет течения без разрыва сплошности пласта, а коэффициент бокового распора близок к единице ($|\epsilon_1| \approx |\epsilon_3|$).

Следует отметить, что разрушение угля при $\sigma_3 > 20$ МПа сопровождается спадом нагрузки на 15-17% без изменения объема, а затем идет уменьшение объема (уплотнение угля) за счет схлопывания пор с нарастающим несущей способности.

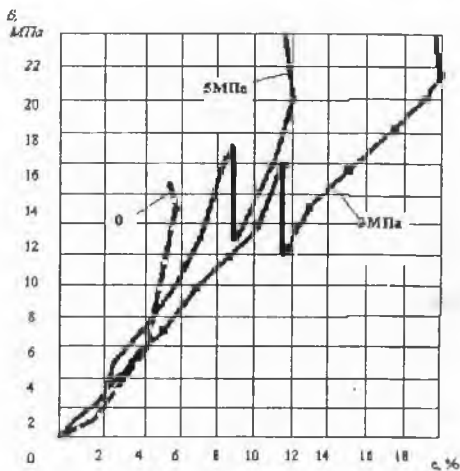


Рис. 7. Спад несущей способности угля при схлопывании пор вблизи кромки забоя, когда минимальное напряжение $\sigma_3 < 10$ МПа.

Таким образом, на глубинах порядка 900 м, соответствующих расположению вентиляционного штрека 2-й лавы центрального бремсберга пласта I₁, наименьшую прочность в объемном поле сжимающих напряжений в области обобщенного сдвига имеет глинистый сланец. При мощности более 0,05 м, разрушаясь, он выполняет роль демпфера между песчаником и углем, реализуя запасы потенциальной энергии в виде пластического течения.

При мощности менее 0,05 м и больших скоростях нагружения, глинистый сланец разрушается вместе с верхней частью угольного пласта взрывоподобно, образуя тонкодисперсный порошок типа инертной пыли.

Угольный пласт, при этом, имеет наибольшую хрупкость разрушения без увеличения объема, после чего начинает уплотняться за счет схлопывания пор. Коэффициент бокового распора не превышает единицы, поэтому объяснить значительные (до 1 м) выдвигания пласта с точки зрения механики разрушения практически невозможно. Как правило, деформации не превышают 15-20%.

Вместе с тем, наблюдаемые при динамических явлениях процессы интенсивного энерго- и массопереноса требуют объяснения.

Волновые процессы при динамических явлениях

Современной науке известен лишь один способ распространения механической энергии в веществе – перенос ее бегущими деформационными волнами, распространяющимися от места приложения механической нагрузки.

Различные природные и технологические процессы, воздействуя на породный массив, вызывают в породных слоях собственные и вынужденные колебания с частотами, зависящими от мощности породных слоев [2]:

$$f_0 = V_{\text{сдв.}}/m;$$

где $V_{\text{сдв.}}$ – скорость сдвиговых волн, м/сек.
 m – мощность слоя, м.

Частота собственных колебаний многослойной структуры соответствует мощности этой структуры, равной сумме мощностей слагающих слоев:

$$f_0 = V_{\text{сдв.}}/\sum m_i;$$

Собственные упругие колебания распространяются вдоль поверхностей напластования, затухают мало и в соседние слои не проникают. Деформационные волны, распространяющиеся перпендикулярно напластованию, затухают в многослойной структуре более значительно, чем в однородной сплошной среде. При прохождении n слоев, коэффициент ослабления волны существенно возрастает [3].

При	$n = 2;$	3;	4;	5;
	$k_0 = 2-2,6;$	2,7-4;	4-6,8;	5,6-11.

При переходе через границу раздела слоев меняются величины смещений, скорости смещений и энергии волны. Кроме основной волны, возникает ряд вторичных волн, обусловленных многократным отражением и преломлением. При этом деформационные волны сжатия-растяжения и сдвиговые волны распространяются независимо. Сдвиговые волны горизонтальной и вертикальной поляризации также распространяются независимо.

При нормальном падении на границу раздела, а также при скользящем падении, происходит полное отражение как сдвиговых (поперечных) волн, так и волн сжатия-растяжения (продольных) без их трансформации (со скачком фазы на π). В других случаях происходит трансформация волн.

При переходе волны из слоя с меньшей скоростью звука, в слой с большей скоростью, возможно явление полного внутреннего отражения (при углах падения $60-70^\circ$, угол преломления равен 90°). Поэтому угольный пласт, заключенный между двумя высокоскоростными слоями песчаников, становится волноводом (волна, войдя в такой слой, выйти из него не может). Происходит концентрация энергии в пласте (самонакачка).

Сами по себе свободные и вынужденные колебания – суть стоячие волны. В стоячих волнах энергия колебаний не распространяется в пространстве, а дважды за период переходит полностью в кинетическую, а затем в потенциальную. В результате взаимодействия с границами раздела, появляется и бегущая волна.

При отражении волны от границы раздела с меньшей акустической жесткостью, волна сжатия трансформируется в волну растяжения (противофазное отражение), при этом отражается около 80% энергии и амплитуда волны резко снижается. Таким образом, в результате отражения продольных волн, в угольном пласте, зажатом между двумя песчаниками, возникают локализованные зоны сжатия, приуроченные в вертикальном на-

правлении к середине пласта. На границах раздела «уголь-кровля» и «уголь-почва» деформации сжатия равны нулю. Расстояние между максимумами деформаций сжатия вдоль напластования равно половине длины волны.

Преломленная волна, имея ту же фазу, распространяется вдоль границ раздела «уголь-кровля» и «уголь-почва» единым цугом со скоростью распространения сдвиговых волн в песчанике. При этом, амплитуда колебаний Y -компоненты (в сторону забоя по простиранию) в угле вблизи границы раздела на порядок больше, чем в песчанике. Таким образом, создаются предпосылки для каналирования энергии [4].

Сигнал Y -компоненты имеет достаточно простую конфигурацию. Первый пакет низкочастотный (~ 110 Гц), образуется волнами сдвига и всегда доминирует. Его частота зависит от соотношения скоростей поперечных волн угля и песчаника. Второй пакет, чаще всего, каналовая волна с частотой практически не зависящей от параметров угля и породы (470-500 Гц). Амплитуда сдвиговых колебаний зависит от резкости акустических границ. Чем резче граница, тем больше вклад боковых волн сдвига.

Для X -компоненты (по падению) боковые волны сжатия имеют частоту 45-80 Гц, при этом, зависимость частоты от параметров угля и пород отсутствует. Сдвиговые волны более высокочастотные (130-140 Гц) и их частота зависит от соотношения скоростей поперечных волн. Каналовая волна имеет величину не более 5% от амплитуды падающей волны, ее частота 480-500 Гц.

Для Z -компоненты (вертикальная) боковые волны сжатия имеют частоту 60-100 Гц, боковые волны сдвига – 180-210 Гц, каналовые волны – 550-580 Гц, а их амплитуда составляет 20-60% от амплитуды падающей волны.

Таким образом, колебания X - и Z -компонент состоят из боковых волн сжатия и сдвига, пакетов, образуемых ими в результате резонанса и каналовых волн. Волны сжатия имеют частоту до 100 Гц, сдвига – до 300 Гц.

Y -компонента состоит из боковых волн сдвига, пакетов и каналовых волн.

В сдвиговых (поперечных) волнах участки максимальных смещений не совпадают с участками их максимальных относительных деформаций (фазы отличаются на четверть периода во времени, а в пространстве – на половину длины стоячей волны или на четверть длины бегущей волны). Поэтому в стоячей волне узлы абсолютных деформаций совпадают с пучностями напряжений и наоборот.

Исследования показывают, что при нанесении удара по поверхности многослойной структуры, распространение колебаний идет вдоль слоев-резонаторов без просачивания волн в соседствующие с ней структуры. Физические свойства слоев-резонаторов таковы, что границы между ними представляют собой поверхности, по которым возможно взаимное проскальзывание слоев относительно друг друга и расслоение. В пределах

слоя колебания распространяются прямолинейно во все стороны от источника и отражаются от границ этого слоя [2].

Плотность потенциальной энергии, накопленной в пласте, составляет:

$$E_n = \frac{1}{2} \rho v^2 \varepsilon^2;$$

где ρ – плотность угля (породы);

v – фазовая скорость волны в угле (породе);

ε – относительная деформация пласта.

Плотность кинетической энергии:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho v_i^2;$$

где v_i – скорость частиц, совершающих колебания в рассматриваемой точке.

Таким образом, скорость смещения частиц зависит от величины самой деформации. При синфазном отражении волн, происходит локализация деформации, величина ее достигает десятков и сотен процентов. В силу дискретности (квантованности) деформаций [5], деформирование угля (и вмещающих пород) под нагрузкой - имеет толчкообразный характер. Каждый такой толчок соответствует структурно-фазовому переходу, микроразрушению и установлению нового равновесного состояния. При величине деформации, обуславливающей соизмеримость скорости смещения частиц и фазовой скорости волны, происходит критический структурно-фазовый переход, сопровождающийся спонтанным разрушением угля (или породы) и возникает ударная волна. Фазовая скорость волны, как показывают исследования, гораздо ниже скорости поперечных волн и составляет сотни метров в секунду, поэтому возникновение критических переходов возможно уже при степени деформации 10-20%.

Ударная волна существенно отличается от упругой: скорость ее зависит от интенсивности; на фронте ударной волны параметры состояния и движения среды изменяются скачком; ударные волны сопровождаются перемещением среды в направлении распространения фронта возмущения; при образовании ударных волн энтропия среды возрастает.

Характер разрушения угля и пород при динамических явлениях свидетельствует о том, что деформирование и разрушение имеет волновую природу и может быть объяснено только локализацией деформации. Для локализации деформации основное значение имеет перенаселение пород дислокациями и дисклинациями разного уровня и, как следствие, препарация угля (породы). При наличии свободной поверхности и возможности развития сдвиговых деформаций, возникают явления отжима, выдвигания пласта и т.п. При запрещенном сдвиге, происходит накопление дисклинаций (микровихрей), возникают ротационные явления с внезапным массо- и энергопереносом в сторону свободной поверхности (внезапные выбросы, горные удары, землетрясения и пр.).

Выброс – это вихрь в горном массиве, с быстрым (несколько секунд) разрушением и массопереносом значительного объема горной породы (угля).

Внезапное выдавливание – локализация сдвиговой деформации у границ раздела слоев с проскальзыванием пласта в сторону свободной поверхности как единого целого.

Горный массив имеет блочное, иерархическое строение, поэтому при некотором энергетическом уровне критическая амплитуда колебаний может достигаться лишь в одном из блоков или подблоков, что обуславливает локальное проявление АГДЯ [6].

Ротационные и сдвиговые эффекты могут проявляться одновременно, вызывая комбинированные явления. Так, во 2-й лаве центрального бремсберга пласта l_1 наряду с preparацией угля вследствие локализации сдвиговой деформации у кровли и почвы (зона локализации порядка 1 см) и внезапного выдвигания пласта по ослабленным плоскостям, наблюдаются и отдельные ротационные структуры в виде колбовидных (грушевидных), щелевидных полостей у кровли и трубообразных полостей под углом 45° к напластованию (рис. 8).

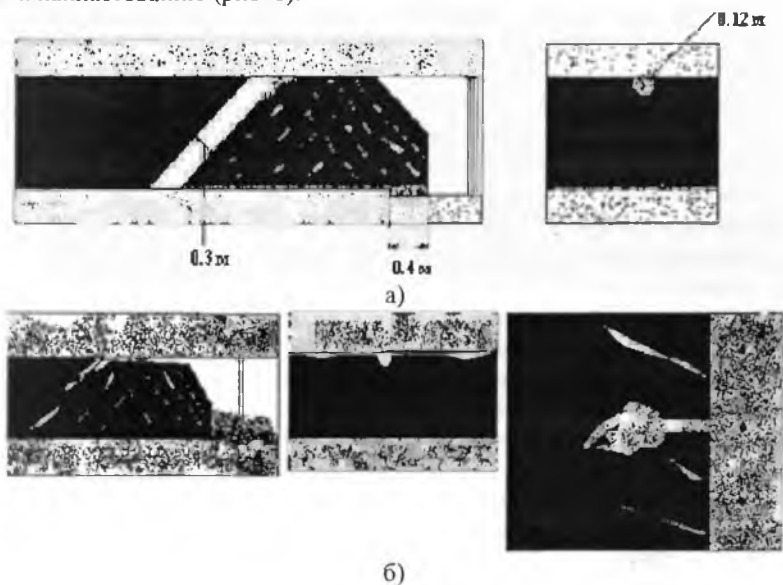


Рис. 8. Характерные щели и полости в пласте l_1 при динамических явлениях во 2-й лаве центрального бремсберга шахты им. А.Г. Стаханова: а) трубообразная полость под углом 45° и щели толщиной 1 см, забитые бурой угольной пылью у кровли и почвы; видно выдвигание пласта на 0,4 м относительно подрубанной почвы; б) щелевидные полости у кровли и колбовидная полость с диаметром «горлышка» 100-120 мм, разорвавшая корпус комбайна на две части.

Следует отметить, что внезапное увеличение объема с возникновением ударной волны происходит в результате не только структурно-фазовых переходов второго рода в угольном веществе, но и в результате перехода кристаллогидратной воды, находящейся в угле, в свободную [7]. О наличии этого перехода свидетельствует появление свободной воды в виде «испарины» на кровле и повышенная влажность выброшенного штыва.

Выводы

Исследование угля и вмещающих пород 2-й лавы центрального бремсберга пласта I_1 шахты им. А.Г. Стаханова в объемном поле сжимающих напряжений показали, что при определенных условиях наиболее «слабым звеном» в породном массиве оказывается глинистый сланец, который, деформируясь пластически, выступает в роли демпфера между углем и песчаником.

В условиях деформированного состояния, соответствующего обобщенному сдвигу, наиболее хрупко разрушается уголь. При этом разрушение угля происходит за счет схлопывания пор и трещин без существенного увеличения объема. Величина деформации в сторону обнажения примерно равна величине вертикальной деформации, поэтому объяснить внезапные выдвигания пласта методами механики не удастся.

Процессы интенсивного энерго- и массопереноса при динамических явлениях могут быть объяснены с позиций распространения в горном массиве деформационных волн и «самонакачки» энергии в угольном пласте при взаимодействии волн с границами раздела.

При достижении в пике опорного давления степени деформации 10-20%, скорость смещения частиц в угольном пласте достигает фазовой скорости волны и происходит критический структурно-фазовый переход с увеличением объема, сопровождающийся возникновением ударной волны и спонтанным разрушением угля. Вследствие локализации деформации возникает акустическое течение, сопровождаемое при затрудненном сдвиге ротационными эффектами (вихреобразованием). В силу дискретности деформаций ротационные и сдвиговые эффекты, которые часто проявляются одновременно, приводят к возникновению различных аномальных гео- и газодинамических явлений.

Заблаговременное прогнозирование указанных явлений практически невозможно, так как они формируются (возникают) и протекают в течение очень короткого времени (порядка 2с). Говорить можно лишь о потенциальной опасности угольных и породных пластов к тем или иным геодинамическим явлениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168с.
2. Андреев В.П., Гликман А.Г. Геоакустический метод выявления поверхностей ослабленного механического контакта. – Уголь, 1985, №9.- С.25-29.
3. Снижение выбросоопасности при динамическом воздействии на угольный массив //под. ред. Петросяна А.Э. – М.: Наука, 1985. – 184 с.
4. Анцыферов А.В. Обобщенные характеристики волновых полей, формируемых на угольных пластах Украины при применении сейсмоакустического прогноза условий залегания угля.- Физико-технические проблемы горного производства, вып.6. –Донецк: ООО «Апекс», 2003. - С.105-115.
5. Рязанцев Н.А. Явление квантования деформаций и возникновение деформационных волн в твердых телах /Сб. трудов регион.конф. «Наука-жизнь-производство».- Красноармейск: КФ ДонГТУ, 1996.- С.99-108.
6. Курленя М.В., Опарин В.И. О явлении знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия. – ФТПРПИ, 1990, №4.- С.3-13.
7. Носач А.К., Рязанцева Н.А., Бачурин Л.Л., Рязанцев Н.А. Распределение влаги в горном массиве и влияние горных работ на обводнение выработок /Сб. трудов регион.конф. «Наука-жизнь-производство».- Красноармейск: КФ ДонНТУ, 2001.- С.21-26.