

УДК 539.375:622.236

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД  
В УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОГО СЖАТИЯ**

**д.т.н. Ревва В.Н. (ИФГП НАНУ)**

*Наведені основні результати теоретичних та експериментальних досліджень автора з обраної тематики.*

**ROCK DEFORMATION AND FRACTURE UNDER TRUE TRIAXIAL  
COMPRESSION**

**Revva V.N.**

*The author's main results of theoretical and experimental research in the field are presented.*

При подземной разработке полезных ископаемых большинство процессов связано с деформированием и разрушением горных пород в условиях сложного напряженного состояния, а именно, трехосного неравнокомпонентного сжатия, поэтому теоретические, лабораторные и натурные исследования в этом направлении, несомненно, актуальны.

С увеличением глубины разработки угольных пластов, реструктуризацией угольной промышленности и закрытием шахт, и связанным с этим их затоплением, внедрением нетрадиционных технологий добычи указанные проблемы значительно усложняются.

Следует также отметить, что деформирование и разрушение горных пород, в отличие от других твердых тел, имеют свои специфические особенности, связанные, прежде всего, с дефектностью, неоднородностью, гетерогенностью среды и действием в горном массиве, особенно возле горных выработок, неравнокомпонентного объемного поля сжимающих напряжений.

В настоящей работе представлены теоретические и экспериментальные результаты автора по деформированию и разрушению горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия.

В обзорных работах [1–3] были проанализированы теоретические и экспериментальные исследования по выбранной тематике и на их основе сформулированы задачи дальнейших исследований.

Как известно, горный массив характеризуется существенной неоднородностью своей структуры, которая определяет большую изменчивость его физико-механических свойств, в том числе и упругих.

В [4–11] представлены результаты исследований по влиянию непрерывного и скачкообразного изменения упругих свойств на предельное состояние и механизм разрушения горных пород.

Для случая непрерывной неоднородности упругих свойств [4–6], когда модуль Юнга изменяется с глубиной, а коэффициент Пуассона постоянен, было установлено, что неоднородность упругих свойств приводит к умень-

шению прочности горных пород. Однако с увеличением глубины залегания пород непрерывное изменение их модулей за счет уплотнения не оказывает значительного влияния на прочностные свойства горного массива.

Для случая скачкообразного изменения упругих свойств (слоистость) [10–11] были оценены уровни коэффициентов интенсивности напряжений  $k_I$  и  $k_{II}$ , характеризующих локальное поле упругих напряжений у тупиковой части трещин нормального отрыва и поперечного сдвига в зависимости от расположения трещины конечного размера относительно границы раздела упругих свойств.

Было установлено, что когда трещина находится в более жесткой компоненте горной породы, имеющей границу раздела упругих свойств, ей выгодно распространяться от ближнего к границе конца при действии на нее нормального растягивающего напряжения и от дальнего конца при сдвиге. Когда же трещина находится в менее жесткой компоненте, при растяжении ей выгодно стартовать с дальнего от границы конца, а при сдвиге – с ближнего. Для обоих видов напряженного состояния трещина менее склонна к распространению при удалении от границы раздела упругих свойств, чем возле нее. Для трещины в слое более жесткой горной породы при действии растягивающего напряжения наиболее выгодная ее ориентация параллельно границе раздела упругих свойств, а при сдвиге – перпендикулярно. Обратная картина наблюдается для случая трещины в менее жесткой компоненте. Таким образом, впервые было установлено существенное влияние положения трещины относительно границы раздела упругих свойств на механизм локального разрушения скачкообразно неоднородных горных пород.

Выбросы породы и газа, как правило, приурочены к границам раздела физико-механических свойств горных пород. Под действием внешней нагрузки в окрестности границы раздела возникает концентрация напряжений, зависящая от степени изменчивости свойств пород. При подходе выработки к границе раздела пород с различными свойствами на пик напряжений от неравномерности свойств накладывается пик напряжений от влияния выработки и, в момент отделения части массива взрывом, инициируется разрушение пород также за пределами взрываеваемого массива.

Поскольку для описания предельного состояния необходимо определять характеристику трещиностойкости материала поперечному сдвигу, т.е. вязкость скольжения  $k_{IIc}$ , методика экспериментального определения которой для горных пород впервые была разработана и представлена в [7].

Решение задачи о предельном равновесии упругого пространства, ослабленного дисковидной трещиной, нагруженной антисимметричными напряжениями и подверженного на бесконечности действию сжимающих напряжений, позволило получить условие локального разрушения горных пород с учетом неоднородности их упругих свойств и неоднородности напряженного состояния, вызванной пригрузкой от взрывных работ [8]. Полученное условие локального разрушения использовано при разработке способа прогно-

за выбросоопасности горных пород по перепаду эффективной поверхностной энергии.

При создании способа профилактической обработки выбросоопасных угольных пластов водными растворами ПАВ возникла необходимость в оценке давления нагнетания жидкости, которая позволила бы избежать гидроразрыва пласта и обеспечить его равномерное увлажнение, что существенно повысило бы эффективность способа. На основании решения задачи математической теории трещин о предельном равновесии неоднородного упругого пространства, ослабленного трещиной, нагруженной нормальными растягивающими напряжениями и подверженного на бесконечности действию сжимающих напряжений, было получено выражение для критического давления жидкости, нагнетаемой в угольный пласт, с учетом неоднородности упругих свойств массива и начальной влажности угля в виде [9]

$$P^* = \rho H (\sin^2 \alpha + \lambda \cos^2 \alpha) + \left[ \frac{1}{\pi l g} \gamma_0 \sum_{n=0}^{\infty} a_n w^n - \frac{1}{4} (\rho H)^2 (1 - \lambda)^2 \sin^2 2\alpha \right]^{\frac{1}{2}},$$

где 
$$g = \frac{(G_1 + G_2 \vartheta_1)(G_2 + G_1 \vartheta_2)}{G_1 G_2 [G_2 (\vartheta_1 + 1) + G_1 (\vartheta_2 + 1)]},$$

$\rho$  – удельный вес вышележащих пород;  $H$  – глубина залегания;  $w$  – естественная влажность;  $\gamma_0$  – эффективная поверхностная энергия абсолютно сухого угля;  $G_i$  и  $\vartheta_i$  – модуль сдвига и коэффициент Пуассона породы и угля соответственно;  $\lambda$  – коэффициент бокового распора.

Экспериментальные исследования при противовыбросной обработке пластов «Безымянный» шахты «Красный Октябрь», «Каменка» шахты «Ольховатская» и «Алмазный» шахта «Стожковская» в натуральных условиях показали, что установленное в [9] критическое давление нагнетания жидкости с учетом неоднородности упругих свойств массива и естественной влажности угля  $P^*$  не приводит к гидрорасчленению угольного пласта, а обеспечивает равномерное увлажнение и снижение его выбросоопасности.

Большинство твердых тел имеют одинаковые значения пределов прочности на сжатие и растяжение, а для горных пород и углей они отличаются более чем на порядок, существенно изменяются и их другие механические характеристики. Поэтому особый интерес вызывают исследования поведения горных пород в условиях объемного сжатия при различных видах напряженного состояния.

Экспериментальные исследования проводились на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС) конструкции ИФГП НАН Украины, позволяющей в трех взаимно перпендикулярных направлениях создавать независимые друг от друга напряжения при замкнутой камере, в которую помещается призматический образец, и, объем которой изменяется идентично изменению объема образца [1]. На протяжении всего процесса

деформирования как в допредельном, так и запредельном состояниях фиксировались прилагаемая нагрузка и деформации образца.

Исследуя широкий спектр видов напряженного состояния [1,12–14], характеризуемых параметром Надаи-Лоде  $\mu_\sigma = 2 \left( \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) - 1$ , где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  –

главные напряжения, а также соответствующие им виды деформационного состояния  $\mu_\varepsilon = 2 \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) - 1$ , где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – главные деформации, было ус-

тановлено (рис. 1, 2), что для горных пород несоответствие параметров вида напряженного и деформационного состояний более существенно, чем для металлов. Например, для углей и алевролитов наблюдается картина, близкая к опытам Лоде и Квини [1]. Более сложная картина для песчаников. Во всех случаях  $\mu_\sigma \neq \mu_\varepsilon$ .

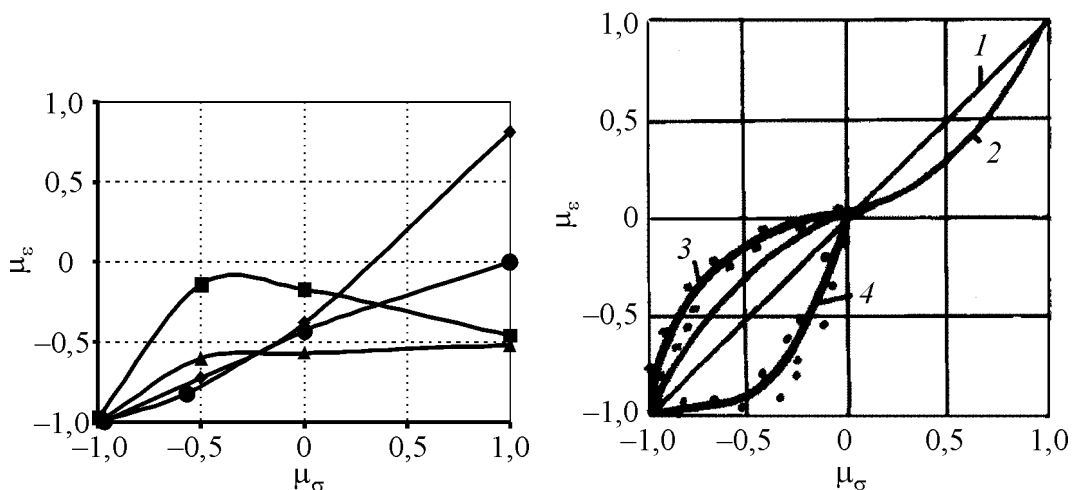


Рис. 1. Зависимость вида деформационного состояния от вида напряженного состояния для различных марок угля: ■ – Ж, ▲ – К, ● – Т, ◆ – антрацит

Рис. 2. Зависимость вида деформационного состояния от напряженного: 1 – теоретическая прямая; 2 – опыты Лоде на металлах; 3 – эксперименты на угольных образцах на УНТС при сжатии; 4 – то же при разгрузке

Несоответствие параметров вида напряженного и деформационного состояний при деформировании горных пород (а также других твердых тел) при различных видах нагружения, на наш взгляд, определяется не только анизотропией, а, прежде всего различием и конкуренцией двух процессов, происходящих в нагруженном образце: течения (пластической деформации) и зарождения микротрещин. Первый процесс связан с межмолекулярными силами и происходит без разрыва химических связей под действием сдвиговых напряжений, второй – связан с разрывом химических связей под действием растягивающей составляющей.

Песчаники представляют собой полиминеральное соединение с различными типами химических связей и могут быть предоставлены в виде жестких включений – зерен кварца и пластичной матрицы – цемента. Поэтому все описанные эффекты сначала относятся к цементу, а затем с ростом давления – к кварцу. Наложение эффекта от двух материалов приводит к более сложной зависимости между  $\mu_{\sigma}$  и  $\mu_{\epsilon}$  [см. рис. 2].

Из-за несоответствия видов напряженного и деформационного состояния по виду напряженного состояния судить о характере разрушения пород в большинстве случаев нельзя. Характер разрушения можно определить только по виду деформационного состояния. Также нельзя в полной мере оценить напряженное состояние пород по замеренным деформациям.

По характеру трещин в горном массиве можно восстановить деформационное состояние массива, на основании которого, учитывая закономерности несоответствия  $\mu_{\sigma}$  и  $\mu_{\epsilon}$ , – определить и вид напряженного состояния. Эти данные могут иметь большое значение при геометризации тектонических нарушений, уточнении их классификации и установлении ориентировки напряжений в горном массиве и вида напряженного состояния.

Следует отметить, что при отсутствии поверхности обнажения трещины отрыва в горном массиве не возникают. Разрушение происходит путем продольного и поперечного сдвигов либо их комбинации с отрывом. Самыми сложными, очевидно, будут сдвиго-надвиговые или сдвиго-сколовые трещины, возникающие в результате комбинации продольного и поперечного сдвигов, которые распространяются при виде деформационного состояния, соответствующем обобщенному сжатию [2].

При одном и том же виде напряженного состояния деформационное состояние различно в зависимости от бокового давления. Увеличение бокового давления (гидростатического) также подавляет эффект дилатансии [2].

Итак, при деформировании горных пород в объемном поле сжимающих напряжений деформационное состояние образцов не соответствует напряженному и изменяется от обобщенного сжатия до обобщенного сдвига. Деформационное состояние обобщенного сжатия приводит к разрушению путем комбинации поперечного и продольного сдвигов и сопровождается наибольшей дилатансией. В целом с увеличением гидростатического давления дилатансия подавляется [3].

Наряду с изучением прочности горных пород определенным научным и практическим интересом представляет исследование энергоемкости их деформирования и разрушения.

В результате экспериментальных исследований было установлено [1], что прочность песчаников различной степени метаморфизма, с различной пористостью зависит от вида напряженного состояния. Разрушение горных пород при обобщенном растяжении в неравнокомпонентном поле напряжений невыгодно. В условиях обобщенного сжатия с ростом бокового давления возрастает энергоемкость предельного деформирования и дилатансия,

сопровождающаяся увеличением вновь образованной поверхности и выхода мелких фракций (<0,2 мм). Наименее энергоемким является разрушение пород в области обобщенного сдвига.

При определенных соотношениях компонент тензора напряжений в горных породах наблюдается сверхпластичность. При деформировании горных пород происходит перестройка (разрыхление) структуры в плоскости сдвига и локальные фазовые превращения. С увеличением уровня гидростатического давления в осадочных породах изменяется механизм разрушения [1].

Исследования поведения горных пород за пределом прочности имеет большое значение для решения многих актуальных задач горного дела [1, 11–15].

В объемном поле сжимающих напряжений на образцах угля, глинистого сланца и песчаника запредельные ветви деформирования не удается зафиксировать лишь в отдельных случаях.

В связи с тем, что неоднородность, трещиноватость и пластичность горных пород приводит к значительному несоответствию деформационного и напряженного состояний в образце, даже при одинаковом напряженном состоянии параметры запредельного деформирования (остаточная прочность и модуль спада) подвержены значительным колебаниям. В зависимости от величины бокового давления и вида напряженного состояния одна и та же порода может вести себя и как разупрочняющаяся, и как упрочняющаяся, а разрушение может быть как устойчивым, так и неустойчивым.

В шахтных условиях хрупкое разрушение и резкий сброс нагрузки часто сопровождается динамическими явлениями. Учитывая, что для угля максимум модуля спада наблюдается при  $\sigma_3 \neq 0$  в области обобщенного сдвига, следует считать, что очаг хрупкого разрушения формируется в глубине массива. Песчаник сохраняет способность к динамическому разрушению как вблизи контура выработки, так и в глубине массива.

Для регистрации запредельной ветви диаграммы «напряжение-деформация» особо хрупких и газонасыщенных пород на установке УНТС использовался метод разгрузки. Зная заведомо прочность горной породы в данном напряженном состоянии по предварительным экспериментам, образец нагружался при большем боковом давлении несколько выше предела прочности, а затем осуществлялась разгрузка по  $\sigma_3$  до необходимой величины. При этом, энергия запасенная в машине при нагружении образца, рассеивалась еще до разрушения образца, а последнее происходило только за счет энергии, накопленной в образце.

В результате было установлено [1], что как предельная, так и остаточная прочности газонасыщенного образца существенно ниже, чем ненасыщенного. Накопленная в газонасыщенном образце энергия меньше, чем в ненасыщенном, а затраченная на разрушение гораздо больше.

Таким образом, учет запредельной ветви деформирования [1] позволяет оценить энергоемкость и характер разрушения, остаточную прочность и не-

сущую способность породы – свойства, без которых не могут быть решены многие проблемы горного дела.

Учитывая результаты по дилатансии горных пород при разрушении [1], следует отметить, что максимумы модуля спада и максимумы дилатансии совпадают. Поэтому можно уверенно утверждать, что хрупкое разрушение с динамическим эффектом и значительным спадом напряжений наблюдается при распространении трещин сложного сдвига и сопровождается наибольшим разрыхлением и дроблением материала.

Распространение в горных породах трещин отрыва, наоборот, приводят к минимальному разрыхлению и дроблению материала, наименьшему спаду напряжений и наименьшей величине модуля спада.

С точки зрения выбороопасности представляет определенный интерес изучение поведения горных пород при разрушении в напряженном состоянии, моделирующем призабойную зону, т.е. когда  $\sigma_3 \rightarrow 0$ . При этом важно оценить влияние пути подхода к такому напряженному состоянию на прочность и энергоёмкость разрушения пород. Больше всего в данном случае интересуют различие в характере разрушения пород путем нагрузки и разгрузки. Для оценки этого различия рассмотрено два пути: постепенное увеличение главного напряжения  $\sigma_1$  при фиксированных  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  до разрушения, постепенная разгрузка, предварительно нагруженного образца, по оси наименьшего главного напряжения  $\sigma_3$  до разрушения.

Установлено [15], что энергоёмкость разрушения и его характер для горных пород существенно зависят от пути подхода к данному напряженному состоянию. В то же время прочность песчаника от пути нагружения не зависит.

Характерным различием разрушения при нагрузке и разгрузке является неодинаковое деформационное состояние, формирующееся перед разрушением. При нагрузке вид деформационного состояния не соответствует виду напряженного состояния (опережает его) и складывается таким образом, что  $\mu_\epsilon = 0$ , т.е. наблюдается практически чистый сдвиг. При этом плоскости разрушения направлены под углом близким к  $45^\circ$  к наибольшему сжимающему напряжению. При разгрузке деформационное состояние очень хорошо соответствует напряженному состоянию  $\mu_\sigma = \mu_\epsilon$  и близко к обобщенному сжатию. Как было показано выше, в этом случае образуются трещины сложного сдвига. Плоскости разрушения при этом направлены под самыми различными углами к максимальному сжимающему напряжению, а некоторые почти параллельны плоскости разгрузки.

Таким образом, основное различие в поведении образцов при разгрузке и нагрузке заключается в величине накопленной энергии и виде деформационного состояния в образце. При разгрузке за счет распространения трещин сложного сдвига значительно возрастает степень дробления материала.

Все большую актуальность приобретают исследования поведения горных пород и углей в условиях объемного нагружения с учетом таких влияющих

факторов, как водо- и газонасыщение, глубина разработки, температура окружающей среды и др. [1,16–26].

Эффективная поверхностная энергия (ЭПЭ) является константой материала, интегрально учитывающая все механизмы разрушения и характеризующая сопротивляемость горных пород развитию в них трещин. Это позволяет использовать эту характеристику в качестве параметра неоднородности горного массива. На примере песчаников экспериментально было исследовано влияние структурных факторов на ЭПЭ. С этой точки зрения целесообразно выделять песчаники с преимущественно силикатным и карбонатным цементами. Величина ЭПЭ песчаников [1] с силикатным цементом имеет близкую к функциональной зависимость от содержания цемента (кварца), пористости и протяженности контактов. Для песчаников с карбонатным цементом наблюдается зависимость, близкая к функциональной, от пористости и размера зерна.

Наличие пор и трещин в песчаниках предполагает заполнение их флюидами, поэтому представляет интерес оценка влияния водо- и метанонасыщения пород на ЭПЭ и поведение их в объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений.

Экспериментальные исследования влияния водонасыщения на ЭПЭ песчаников показывают, что они гидрофильны. При увлажнении ЭПЭ песчаников [1] (рис. 3), с силикатным цементом (как правило, высокопористых) уменьшается до 8 раз. При этом наибольшее уменьшение происходит при содержании влаги 1,2–1,5%. При дальнейшем увлажнении ЭПЭ изменяется незначительно. В песчаниках с карбонатным цементом (особенно с базальным) ЭПЭ уменьшается незначительно (до 1,8 раз), при этом наибольшее снижение происходит при содержании влаги 0,5–0,75%.

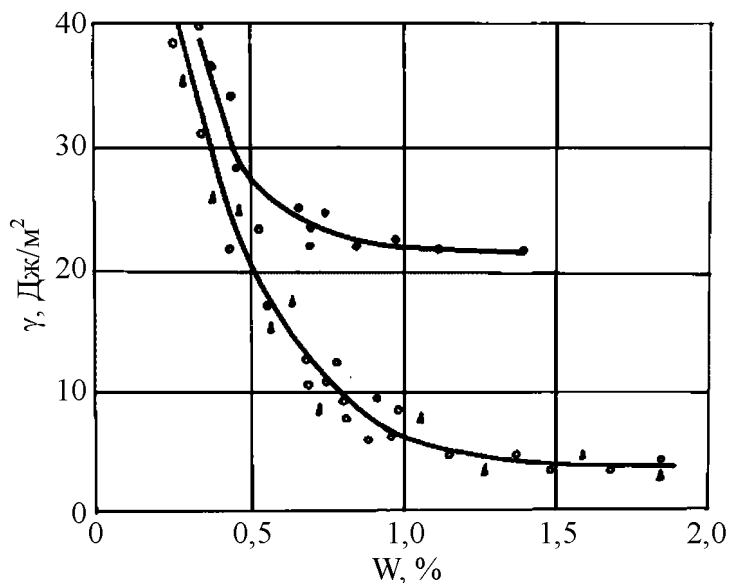


Рис. 3. Зависимость ЭПЭ песчаников от влажности: ● — глинисто-карбонатный цемент; ○ — глинисто-сланцеватый цемент; ▲ — кремнисто-сланцеватый цемент.



Учитывая, что газоносность песчаников колеблется в пределах  $0,2\text{--}5,25\text{ м}^3/\text{т}$ , а также то, что в естественных условиях влажность их составляет  $0,4\text{--}1,6\%$ , т.е. центры сорбции заняты водой, можно предположить, что практически весь метан в песчанике находится в свободном состоянии. И лишь в очень сухих высокопористых песчаниках большая его часть может находиться в сорбированном состоянии.

Экспериментально [1] оценено влияние метанонасыщения песчаников на снижение аффективной поверхностной энергии. При насыщении метаном песчаников с карбонатным цементом изменения поверхностной энергии очень незначительны. При этом время насыщения составляет  $5\text{--}6$  ч. Для песчаников с силикатным цементом снижение поверхностной энергии довольно значительно (до 4 раз), а насыщение происходит через  $10\text{--}12$  ч. Таким образом, в отсутствие воды метан довольно сильно снижает поверхностную энергию песчаников, однако слабее, чем вода. При их совместном воздействии, вода, в силу большей энергии сорбции по сравнению с метаном, изолирует внутреннюю поверхность песчаников, поэтому основная масса метана находится в свободном состоянии.

Давление порового флюида уменьшает нормальное напряжение, но не оказывает влияния на касательные напряжения, что, в конечном итоге, приводит к охрупчиванию, так как для меньшего нормального напряжения существующие касательные напряжения вызовут разрушающую текучесть по границам зерен. Для непроницаемых пород (песчаники с карбонатным цементом) правило эффективных напряжений недействительно и механический эффект отсутствует. В этом случае проявляется лишь эффект Ребиндера (пластификация).

Экспериментальное исследование [1,16–19] разрушения водо- и метанонасыщенных песчаников в объёмном поле сжимающих напряжений, а также при одноосном сжатии, разрыве и сдвиге позволило установить следующее.

Основное различие влияния воды и газа сводится к тому, что их влияние на физико-механические свойства пород в корне противоположно: водонасыщение снижает модуль упругости и модуль сдвига, газонасыщение их увеличивает; водонасыщение приводит к пластификации пород, газонасыщение – к ее уменьшению и охрупчиванию; водонасыщение локализует разрушение в одной плоскости и приводит к разрушению путём скольжения, газонасыщение интенсифицирует трещинообразование по всему объёму образца, разрушение носит взрывоподобный характер, трещины близки к трещинам отрыва.

Особый интерес представляет изучение влияния вида напряженного состояния углей, находящихся в предельном состоянии, на их сорбционные свойства.

На установке УНТС [20–22] была испытана серия образцов углей, где моделировалось все виды напряженного состояния. Сорбционные свойства испытанных образцов определялись на ЯМР-спектрометре широких линий.

В результате экспериментальных исследований (рис. 4) было установлено, что сорбционная способность угля после обобщенного сдвига наименьшая, а

скорость десорбции – наибольшая. Изменение сорбционных свойств угля после разрушения говорит о том, что в его структуре идут изменения не только на макро-, но и на микроуровне – происходит уменьшение сорбционных центров. Наибольшее изменение в структуре углей вызывает обобщенный сдвиг.

В результате физического моделирования на УНТС установлено [23–24], что с увеличением глубины залегания углей возрастают их упругие свойства и прочность и проявляется тенденция к более вязкому разрушению угля (рис. 5).

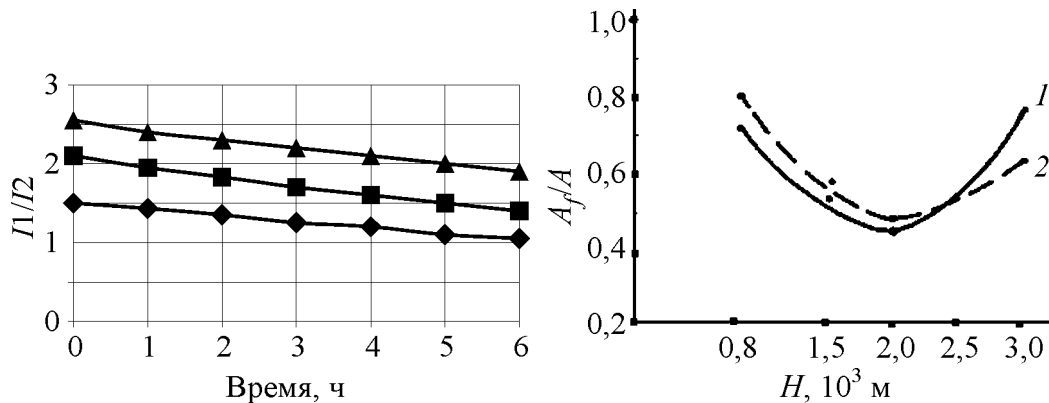


Рис. 4. Зависимость от времени интенсивностей линий спектров ЯМР метанонасыщенных образцов углей: ▲ – из целика; ■ – после обобщенного сжатия; ◆ – после обобщенного сдвига

Рис. 5. Зависимость отношения энергии формоизменения к полной энергии деформирования угольных образцов пл. Песчанка (1) и пл. Андреевский (2) от глубины залегания пластов

Термонапряжения оказывают существенное влияние на устойчивость горных выработок при перепадах температур горных пород и окружающей среды больше  $100^\circ\text{C}$ . Влияние температуры на предельное состояние горных пород тем значительнее, чем меньше уровень их трещиностойкости [25,26] (рис. 6).

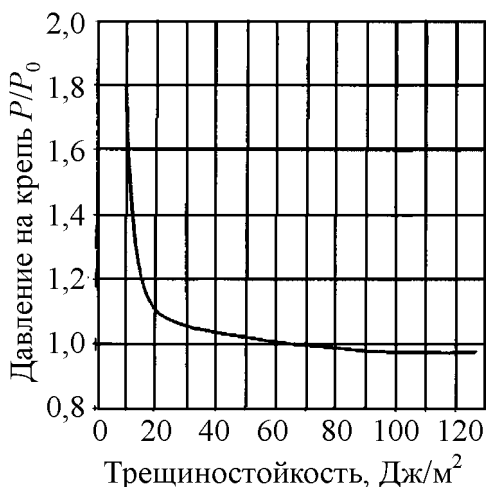


Рис. 6. Зависимость давления на крепь от уровня трещиностойкости (ЭПЭ) горной породы в окрестности выработки при  $T_1 = 300^\circ\text{C}$

Основные научные результаты, представленные в настоящем обзоре, нашли свое отражение при разработке способов, методических указаний и нормативных документов, которые связаны с прогнозом и управлением состоянием горного массива и внедрены на ряде угольных шахт [27–33].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.
2. Ревва В.Н. Экспериментальные исследования горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного нагружения//Горнометаллургические проблемы Донбасса: Сб. научн. тр. / ДНТУ – Донецк: ИНФО. – 1995. – №1. – С.46 – 58.
3. Ревва В.Н., Молодецкий А.В. Деформирование и разрушение горных пород и углей при объемном нагружении // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: ИФГП НАНУ. – 2007. – №10. – С. 81–94.
4. Журавлев В.І. Ревва В.М. Крихке руйнування тіла при дії на щілину нерівноважених сил // Теоретична і прикладна механіка. – 1972. – №3.– С. 13–20.
5. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В., Дуброва С.Б., Ревва В.Н. Поведение горных пород при неравнокомпонентном объемном нагружении и механизм разрушения разномодульных сред. // Сб. докл. Всесоюз. конф. «Механика разрушения горных пород». – Фрунзе: Илим. – 1980. – С. 380–386.
6. Алексеев А.Д., Ревва В.Н. Влияние неоднородности материала на вязкость разрушения. // Трещиностойкость материалов и элементов конструкций. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 199–203.
7. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Экспериментальные исследования вязкости скольжения хрупких тел // ФХММ. – 1980. – №2. – С. 105–107.
8. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Бойко И.А. Вязкость скольжения разномодульных горных пород // Сб. науч. трудов «Аналитические и численные исследования в механике горных пород». – Новосибирск: ИГД СО АН СССР. – 1981. – С. 88–90.
9. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Стариков Г.П. Аналитический расчет давления жидкости, нагнетаемый в трещину, расположенную на границе раздела разномодульных сред // Сб. «Аналитические методы и применение ЭВМ в механике горных пород». Новосибирск: ИГД СО АН СССР. – 1982. – С. 3–5.
10. Alexeev A.D., Revva V.N., Astrov-Shumilov S.K., Gryaduchii Y.B., Khamulyak V.G. Investigation of the mechanism of discrete media fracture with the example of rock failure//Proceedings of the first international forum on DDA. – Berkley/California/USA. – 1996. – P. 480–487.
11. Alexeev A.D., Revva V.N., Gryaduchii Y.B., Khabanov A.N. Study of the Mechanism of Destruction of Rock with a Discrete Inhomogeneity//Proceedings of the Second International Conference on DDA. – Kyoto/Japan. – 1997. – P. 448 – 450.
12. Alexeev A.D., Revva V.N., Alysev N.A., Zhitlyonok D.M. True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction//International Journal of Coal Geology. – 2004. – N58. – P. 245 – 250.
13. Алексеев А.Д., Кузнецов Э.Н., Ревва В.Н., Соколов К.И. Установка для испытания призматических образцов на трехосное сжатие // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – Т.7. – №1. – С. 64–66.

14. Alexeev A.D., Revva V.N., Bachurin, Prokhorov I.Y. The effect of stress state factor on fracture of sandstones under true triaxial loading // *Int. J. Fract.* – 2008. – 149. – С. 1–10.
15. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Фролов О.В. Влияние истории нагружения на прочностные свойства образцов горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия // *Вісті Донецького гірничого інституту*. – Донецк: ДНТУ. – 2004. – №1. – С. 112–115.
16. Ревва В.Н., Недодаев Н.В., Ермаков В.Н., Улицкий О.А. Изменение физико-механических свойств угля и вмещающих пород при водонасыщении // *Известия Донецкого горного института*. – 1999. – №1. – С. 65–68.
17. Ревва В.Н., Недодаев Н.В., Борисенко Э.В., Ермаков В.Н., Улицкий О.А. Влияние водонасыщения на физико-механические свойства структурно-нарушенных горных пород // *Известия Донецкого горного института*. – 1999. – №3. – С. 47–48.
18. Кольчик Е.И., Ревва В.Н., Костенко В.К., Кольчик А.Е. Влияние водонасыщенности пород на их механические свойства // *Вісті Донецького гірничого інституту*. – 2007. – №1. – С. 64–69.
19. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Володарская Е.В., Юрченко В.М. Выход газа из твердого раствора в объем и на поверхность пор и трещин // *Физика и техника высоких давлений: Научн. журнал / ДонФТИ АН Украины*. – Харьков: ФТИНТ АН Украины. – 1992. – Т.2. – №4. – С. 83–92.
20. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Ульянова Е.В. Влияние давления на сорбционные свойства углей // *Физика и техника высоких давлений*. – 2001. – Т.11. – №1. – С. 9–11.
21. Ревва В.Н., Ульянова Е.В., Бачурин Л.Л., Кольчик И.Е. Влияние вида напряженного состояния на фазовое состояние метана в угле при его разрушении // *Физико-технические проблемы горного производства*. – Донецк: ИФГП НАНУ. – 2005. – №8. – с. 92 – 95.
22. Ревва В.Н., Ульянова Е.В., Васильковский В.В., Дегтярь С.Е. Влияние вида напряженного состояния на сорбционные свойства углей при их разрушении в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия // *Физико-технические проблемы горного производства*. – Донецк: ИФГП НАНУ. – 2005. – №8. – с. 92 – 95.
23. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Характер разрушения углей с увеличением глубины разработки пластов // *Физика и техника высоких давлений: Сб. научн. трудов / ДонФТИ АН УССР*. – Киев: Наукова думка. – 1989, №32. – С. 49–52.
24. Ревва В.Н., Стариков Г.П., Алексеев А.Д. Изменение механических свойств углей с увеличением глубины их залегания // *Физика и техника высоких давлений: Республ. научн. ж-л / ДонФТИ АН УССР*. – Киев: Наукова думка. – 1991, том 1, №3. – С. 43 – 46.
25. Ревва В.Н. Влияние температуры на предельное состояние породного массива в окрестности горной выработки // *Физика и техника высоких давлений*. – 1977. – Т.7. – №2. – С. 133–136.
26. Ревва В.Н. Оценка устойчивости кровли в окрестности горных выработок // *Физика и техника высоких давлений*. – 1997. – Т.7. – №4. – С. 114–116.
27. Способ определения степени упрочнения малоустойчивой кровли горной выработки: А.с. 1724881 СССР, МКИ E21D11/02.20/00 / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Е.В. Ульянова, Н.А. Рязанцев (СССР). – №4692258/03; Заявлено 16.05.89; Опубл. 07.04.92, Бюл. №13. – 4 с.
28. Способ определения удельной поверхностной энергии горных пород: А.с. 1747992 СССР, МКИ G01N3/00 / А.Д. Алексеев, В.Н. Ревва, Н.А. Рязанцев,

***Прогноз и управление состоянием горного массива***

- Г.П. Стариков (СССР). – №4797578/28; Заявлено 28.11.89; Оpubл. 15.07.92, Бюл. №26. – 4 с.
29. Спосіб визначення викиднебезпечності вугільних пластів. Патент на винахід 19119, Україна, E21F5/00 / А.Д. Алексеев, Г.Н. Фейт, Г.П. Старіков, Г.Г. Смірнова, О.М. Маліннікова, В.М. Ревва. – №4851738/54; Заявлено 23.09.93; Оpubл. 25.12.97, Бюл. №6. – 2 с.
30. Методические указания по региональной гидрообработке выбросоопасных угольных пластов водным раствором ПАВ через скважины, пробуренные из полевых выработок / А.Д. Алексеев, Н.М. Петухов, А.А. Гребенщиков, А.Е. Жуков, В.А. Канин, С.Г. Лунев, Г.П. Стариков, В.Н. Ревва. – Донецк: Препринт ДонФТИ АН УССР, 89-12, 1989. – 13 с.
31. Методические указания по обработке выбросоопасных угольных пластов в зонах геологических нарушений и повышенного горного давления водными растворами ПАВ / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, С.Г. Лунев, Н.В. Недодаев, А.И. Сердюков, В.Н. Ревва. – Донецк: Препринт ДонФТИ АН УССР, 90–11, 1990. – 13 с.
32. Компьютерный вариант составления паспортов управления кровлей и крепления лав пластов с углами падения свыше 35°C (Руководство). – Донецк: Минуглепром Украины. – 1998. – 123 с.
33. Запобігання раптовим викидам вугілля і газу в разі виймання крутих вугільних пластів щитовими агрегатами. СОУ 101.00171144.002-2004: Стандарт Мінпаливенерго України: Прийнято та надано чинності 30.06.2004. – Київ: Мінпаливенерго України. – 2004. – 14 с.