

УДК 622.236:539.375

ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД И УГЛЕЙ ПРИ ОБЪЕМНОМ НАГРУЖЕНИИ

д.т.н. Ревва В.Н., асп. Молодецкий А.В. (ИФГП НАНУ)

Здійснений аналіз сучасного стану досліджень деформування та руйнування гірських порід та вугілля в умовах об'ємного навантаження з урахуванням впливу проміжного головного напруження.

DEFORMATION AND FRACTURE OF ROCKS AND COALS UNDER TRUE TRIAXIAL LOADING

Revva V.N., Molodetskyu A.V.

Current state of research in the field of coals and rocks failure and deformation under true triaxial loading with a special attention to effects of intermediate principal stress.

Физико-механические свойства горных пород, как и многих других тел, зависят в значительной степени от вида и величины напряженного состояния, при которых они определяются.

Горные породы вокруг выработок находятся в основном в условиях трехосного неравномерного напряженного состояния. В направлении выработанного пространства напряжения в большинстве случаев будут минимальными. Что же касается напряжений в других направлениях, то они будут зависеть от ряда факторов. Одни исследователи считают, что наибольшее главное напряжение направлено вертикально, другие, наоборот, утверждают, что горизонтальные напряжения в ряде районов выше вертикальных [1–2]. Так или иначе, но вокруг горных выработок горные породы находятся не только при одноосном и двухосном напряженных состояниях, но и в условиях трехосного неравнокомпонентного напряженного состояния. Именно поэтому все большую актуальность приобретают исследования по определению физико-механических свойств углей и горных пород в условиях, моделирующих условия нахождения их в реальном массиве.

Первые исследования свойств горных пород в условиях объемного напряженного состояния были выполнены Киком в 1892 г., описание опытов которого приведено в работе [3]. Испытаниям подвергались шарообразные образцы пород, которые помещались в цилиндрическую обойму. Свободное пространство между стенками обоймы и образцом заполнялось квасцами. При сжатии под прессом шарообразные образцы превращались в эллипсоидные. Несколько позднее Адамс [4] испытывал в такой же обойме цилиндрические образцы. Оба исследования носили качественный характер. Они показали, что хрупкие при простых условиях разрушения горные породы в условиях высокого всестороннего сжатия становятся весьма пластичными. Затем Мюллер [5] проводил опыт на кубических образцах в обойме с двумя открытыми гранями, к одной из которых прикладывалась нагрузка от

пресса. Образец мог деформироваться только в сторону открытой стенки. Таким образом, Мюллер пытался смоделировать условия отжима угля в забое. Ему удалось показать, что прочность образцов угля в таких условиях повышалась.

Т. Карман [6] для создания в образце условий объемного сжатия помещал цилиндрический образец в камеру высокого давления и от пресса через шток дополнительно нагружал его. Для предотвращения проникновения в поры и микротрещины рабочей жидкости (глицерина) образец запаивался в фольгу. Приборы подобного типа, получившие широкое распространение во всем мире, имеют общее название «Приборы типа Кармана». Совершенствование конструкции и методики проведения испытаний выполнили Беккер [7], М.П. Воларович с сотрудниками [8, 9], М.М. Протоdjаконов и В.С. Вобликов [10], Хориба, Кобаяси [11], В.В. Матвеев [12], А.Н. Ставрогин [13], Я.А. Бич, А.И. Баженов, Н.А. Муратов [14], Ю.Д. Мазур-Джуриловский [15], Паттерсон [16] и ряд других исследователей. Английская фирма Triaxial cell выпускает небольшую установку этого типа [17]. Существенно отметить, что общим условием при испытаниях в приборах Кармана является соотношение трех главных напряжений $|\sigma_1| > |\sigma_2| = |\sigma_3|$.

Основные результаты исследований проведенных по схеме Кармана за истекшие годы сводятся к следующему:

1. С повышением гидростатического бокового давления прочность и пластичность горных пород и минералов возрастают. Увеличение прочности зависит от минерального состава, изменчивости физико-механических свойств породы и от конфигурации дефектов.

2. Процесс пластического деформирования горных пород сопровождается необратимым относительным изменением их объема (дилатансией). Дилатансия приводит к качественному изменению структуры материала. Увеличение гидростатического давления приводит к возникновению характерного максимума изменения объема, зависящего от свойств породы. В целом же увеличение бокового давления приводит к смене дилатансии уплотнением, т.е. к подавлению эффекта дилатансии.

3. Увеличение гидростатического (бокового) давления приводит к увеличению коэффициента поперечной деформации, коэффициента бокового распора. Данные об изменении модулей упругости, деформации, сдвига носят противоречивый характер. Наряду с данными об увеличении упругих констант с ростом бокового давления [9], приводятся данные и об их уменьшении [18].

Результаты, полученные при деформировании горных пород по схеме Кармана, имеют существенное значение для понимания физики и механики горных пород, однако в целом ряде случаев нас интересуют более сложные схемы нагружения, когда все три главных напряжения различны.

Круг экспериментальных исследований для случая, когда все три главных напряжения различны по величине, гораздо уже [18–25]. Основной задачей

экспериментальных исследований являлось выявление влияния вида напряженного состояния или промежуточного сжимающего напряжения на прочность и деформируемость горных пород. Долгое время считалось, что изменение промежуточного напряжения не влияет на прочность пород.

Из всех проведенных исследований наиболее широкий диапазон видов напряженного состояния охвачен в [21–25]. В [21–23] вид напряженного состояния оценивается параметром Надаи–Лоде μ_σ . Здесь показано, что закономерности изменения прочности пород при смене вида напряженного состояния сложны, зависимость прочности пород от параметра Надаи–Лоде имеет максимум при $\mu_\sigma = -0,6$. Прочность породы сильно зависит от промежуточного главного напряжения σ_2 . Резкое повышение прочности пород (до 2 раз) наблюдается при небольшом повышении σ_2 над наименьшим главным напряжением σ_3 , т.е. в области близкой к обобщенному сжатию, что объясняется строгой ориентировкой поверхностей разрушения параллельно направлению σ_2 (реализация дефектов, ориентированных перпендикулярно σ_2 , не происходит). При увеличении σ_2 и переходе напряженного состояния в область обобщенного сдвига и растяжения объемная прочность пород уменьшается.

В [24–25] вид напряженного состояния оценивается с помощью отношения минимального и промежуточного напряжения – $f = \frac{\sigma_3}{\sigma_2}$.

Показано, что весьма сильное влияние на прочность пород промежуточное главное напряжение оказывает при малых значениях σ_3 , т.е. при наличии обнаженной плоскости, и при значениях $0,5 < f < 1$. В интервале $0,15 < f < 0,5$ с увеличением σ_3 влияние σ_2 сглаживается. Предполагается существование определенных высоких значений шарового тензора, при которых главное промежуточное напряжение не будет оказывать существенного влияния на сопротивляемость пород разрушению. Падение прочности при $f < 0,5$ не отмечается.

Следует отметить, что интервал $0,5 < f < 1$ соответствует параметру μ_σ в интервале $-0,6 > \mu_\sigma > -1$ и данные различных авторов в этой области совпадают. Интервал $0,15 < f < 0,5$ соответствует $0 > \mu_\sigma > -0,6$, данные в этой области не совпадают. Интервал $f < 0,15$, соответствующий $1 > \mu_\sigma > 0$ в [24–25] не исследовался.

В неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений, как показано в [18] разрушение происходит хрупко за счет скачкообразного прорастания критически ориентированных сдвиговых трещин. В [23] отмечается, что объемный модуль деформации и модуль сдвига с увеличением бокового сжатия растут. Прочность также растет. Однако этот рост не одинаков для разных видов напряженного состояния. Максимальный рост этих величин происходит при обобщенном отрыве, а наименьший при сдвиге. При увеличении предварительного обжатия возрастает предельная деформация и снижается величина коэффициента поперечной деформации.

Следует отметить, что шаг изменения видов напряженного состояния в проведенных исследованиях оставался довольно значительным. Наиболее детально изучено поведение горных пород лишь в области близкой к обобщенному сжатию $-0,6 > \mu_\sigma > -1$. Кроме того, при определении в процессе экспериментов деформированного состояния образцов, Лоде [26] установил несоответствие напряженного состояния деформационному, т.е. неравенство μ_σ и μ_ϵ . Некоторые авторы [27] считают это экспериментальной ошибкой, поэтому истинное состояние вопроса во многом остается неясным. Как отмечал Лоде, скорее во всех случаях имеет место неравенство $|\mu_\epsilon| < |\mu_\sigma|$, чем равенство, а причиной тому является анизотропия свойств твердых тел.

Эксперименты по деформированию и разрушению горных пород в неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений показали, что в ряде случаев теряет смысл понятие предела прочности. Более правильно в этих случаях говорить о несущей способности образца или энергоемкости разрушения.

Несмотря на то, что с точки зрения практики свойства и особенности поведения горных пород при объемном неравнокомпонентном сжатии представляют наибольший интерес в отечественной и мировой литературе, им уделено недостаточное внимание. Связано это, прежде всего с отсутствием необходимого экспериментального оборудования. Среди установок трехосного сжатия, появившихся за последнее время, можно выделить следующие.

В ИГТМ НАН Украины разработано устройство [28] для испытания на прочность образцов горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии, в котором автоматически поддерживается заданная величина бокового подпора элементами, работающими на принципе сухого трения. Силовые элементы конструкции устройства рассчитывались на создание максимального давления на образец до 30 МПа. Несомненным достоинством данного устройства является его жесткость. С использованием указанной установки для изучения процессов, происходящих внутри испытуемого образца, применялись методы акустической эмиссии и ультразвуковой.

В [29] для определения рациональных параметров гидродинамического воздействия на угольные пласты была проведена серия лабораторных экспериментов по разрушению пористых тел при различных параметрах процесса на специальной установке, позволяющей создавать давление до 40 МПа.

В конце прошлого столетия в США широкое развитие получили лабораторные исследования транспортных свойств горных пород в условиях трехосного напряженного состояния с целью более достоверного прогноза продуктивности резервуаров углеводородов. Для достижения поставленной цели были разработаны и созданы экспериментальные установки объемного нагружения, среди которых наибольший интерес представляют следующие.

Установка трехосного нагружения для испытаний кубических образцов пород с ребром 50 мм была описана Сойерсом с сотрудниками (1990) [30]. Машина может создавать сжимающие напряжения до 120 МПа вдоль каждого из главных направлений. Вначале она использовалась для измерения

скоростей продольных (P) и поляризованных поперечных (S) волн, а также механических свойств сухих образцов. Смарт (1995) [31] описал альтернативную трехосную камеру для испытаний цилиндрических образцов, в которой для приложения разных минимальных и средних напряжений в радиальных направлениях использовались несколько гибких трубок, проложенных между стенками камеры и оболочкой образца. Подача жидкости под разными давлениями в эти трубки обеспечивает дифференцированное радиальное давление вокруг образца. Вертикальное давление прикладывается вдоль оси к подготовленным плоскопараллельным торцам образца. Однако в подобной геометрии минимальные и главные средние напряжения ограничены по величине (обычно максимальная разность давлений не должна превышать 15 МПа).

В Имперском Колледже (Лондон) была разработана установка трехосного нагружения (Кинг с сотрудниками 1995) [32], позволяющая прикладывать к кубическому образцу породы с ребром 51 мм все три главные компоненты напряжения независимо друг от друга и любой величины от нуля до 115 МПа в двух горизонтальных направлениях и до 750 МПа в вертикальном направлении. Установка была успешно применена для создания сети разломов и микротрещин, ориентированных перпендикулярно минимальному главному напряжению, и для определения проницаемости, скорости ультразвуковых P - и поляризованных S -колебаний и таких механических характеристик, как прочность и деформируемость. В дальнейшем эта трехосная установка была модифицирована с целью нагнетания в кубические образцы с ребром 40 мм одно- и двухфазных внутрипоровых жидкостей при повышенных давлениях. Модифицированная система была оснащена устройством контроля подачи жидкости и в данной конфигурации могла развивать девиаторные компоненты свыше 200 МПа и внутрипоровое давление до 145 МПа. В настоящее время экспериментальная система позволяет измерять самые различные петрофизические характеристики, такие как проницаемость, скорости акустических волн и электропроводность в разных направлениях при моно- и мультифазовом внутрипоровом наполнении. Согласование податливостей и высокая плоскопараллельность торцов и опор обеспечивают однородность распределения граничных напряжений с минимальными торцевыми и краевыми эффектами (Аль-Харти с сотрудником 1998) [33]. Обозначения главных напряжений вдоль осей образца следующие: максимальное напряжение (σ_1) считается действующим вдоль оси z , среднее (σ_2) – вдоль оси y , а минимальное (σ_3) – вдоль оси x .

Конструкция экспериментальной установки, использованной в [34] включает в себя следующие основные элементы.

– Специальную нагружающую раму, в которой вертикальный гидроцилиндр создает максимальное давление (z -направление), и в которой размещено опорное кольцо из алюминиевого сплава с четырьмя горизонтальными гидроцилиндрами, сконструировано так, чтобы получить две ортогональных

компоненты напряжения в горизонтальной плоскости. Величины всех трех главных компонент контролируются гидравлической следящей системой с обратной связью. Деформации образца измеряются датчиками линейных перемещений, размещенных попарно на каждой из главных осей, а внешние давления передаются образцу через оригинальные пластмассо-керамические композитные опорные пластины, отражающие геометрию 40-миллиметрового куба.

– Газовый аккумулятор (баллон) с регуляторами давления для создания и поддержания давления внутрипоровой среды. Образец изолируется от атмосферы, заранее наносимой резиновой оболочкой, которая удерживается нагружающими плитами и обеспечивает возможность создания повышенного давления в порах.

– Блоки измерения капиллярного давления и электрических параметров, включая два газо-масляных устройства для точных измерений изменения объема пор и движений жидкости.

– Газожидкостную гидродинамическую систему для измерения проницаемости породы в направлении оси z . Система состоит из расходомера и двух датчиков давления с цифровыми табло, отображающими давления на входе и на выходе жидкости. Давление на входе создается и поддерживается с помощью газового аккумулятора (баллона).

– Самописец, непрерывно регистрирующий в ходе эксперимента приложенные нагрузки, внутрипоровые давления и смещения.

Измерения проницаемости и электросопротивления проводились в трех главных направлениях. Для этого кубический образец поворачивался соответствующей стороной; его грани предварительно помечались индексами x , y и z . Каждый раз образец нагружался, откачивался для удаления воздуха, и напряжения постепенно доводились до заданного уровня. В этих экспериментах в качестве проточной жидкости использовался 5%-ный раствор NaCl, а внутрипоровое давление поддерживалось на низком уровне в районе 6,9 МПа. После вычисления проницаемости и регистрации электросопротивления в данном направлении напряжения плавно сбрасывались, образец разгружался, поворачивался и нагружался вновь. Напряжения при повороте образца также поворачивались и плавно доводились до соответствующего уровня. После достижения равновесия и вычисления транспортных свойств во втором направлении все процедуры повторялись для третьего направления.

Для каждого из отобранных глубинных и поверхностных образцов песчаников с месторождений Сан-Биз и Спрингвелл выполнялась целая серия экспериментов. Каждый образец подвергался испытаниям при высоких и низких напряжениях, плюс при трехосном и эквивалентном гидростатическом напряженном состоянии. В случае низких напряжений образцы испытывались при эквивалентном гидростатическом напряжении 6,9 МПа и в трехосном напряженном состоянии при соотношении максимального, среднего и минимального напряжения 1,0; 0,8; 0,6, т.е. абсолютных величинах

8,6; 6,9 и 5,2 МПа, соответственно. В случае высоких напряжений гидростатическое напряжение поддерживалось на уровне 34,5 МПа, а соотношение компонент при трехосном нагружении было тем же самым, что соответствовало абсолютным значениям 43,1; 34,5 и 25,9 МПа.

Пятипроцентный раствор NaCl был использован в качестве проточной жидкости при всех измерениях проницаемости и электросопротивления. Были вычислены коэффициенты анизотропии проницаемости и сопротивления при высоких и низких напряжениях, а все данные по электросопротивлению были скорректированы с учетом температуры на момент измерения. Во всех случаях проводилось сравнение между гидростатическим и трехосным напряженным состоянием.

Помимо кубических образцов, ряд измерений был выполнен на цилиндрических керновых образцах в камере Хасслера (Аль-Харти, 1999) [34]. Цилиндрические образцы вырезались из кернов, как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении и испытывались на проницаемость и удельное сопротивление в двух направлениях x и z .

Изменение объема пор оценивалось по объему рассола, вытесняемого при приложении напряжений. Этот объем вместе с электросопротивлением регистрировался непрерывно в процессе каждого набора заданного уровня напряжений на кубических образцах. В начале каждого опыта к образцу прикладывалось небольшое всестороннее давление около 3 МПа, затем подсоединялись гидравлические линии, и образец прокачивался рассолом для удаления воздуха из системы. Затем производилось постепенное увеличение напряжений с шагом приблизительно 0,69 МПа вплоть до уровня 6,9 МПа; а далее с шагом 6,9 МПа до уровня 34,5 МПа. На каждом шаге записывались значения объема и электросопротивления. Такие эксперименты проводились как при гидростатическом, так и при трехосном напряженном состоянии.

На наш взгляд, из существующих в настоящее время установок трехосного сжатия наиболее эффективной является установка неравнокомпонентного сжатия (УНТС), разработанная и используемая в ИФГП НАНУ [35]. Она позволяет фиксировать прилагаемую нагрузку и деформации образца горной породы независимо по трем взаимно перпендикулярным направлениям на протяжении всего процесса деформирования как в допредельной, так и в запредельных областях. Достигается это благодаря постоянной замкнутости рабочей камеры, в которую помещается кубический образец, и, объем которой изменяется идентично изменению объема образца.

На УНТС получен ряд важных результатов [35].

При деформировании и разрушении горных пород в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия деформационное состояние образцов не соответствует напряженному и при $\sigma_3 \neq 0$ изменяется от обобщенного сжатия до обобщенного сдвига. Это несоответствие, в частности, может привести к неверной интерпретации данных относительно замера напряжений методом разгрузки и реконструкции полей напряжений.

Учитывая то, что дилатансионное разрыхление при деформировании материала является функцией сдвиговых деформаций, деформационное состояние сжатия приводит к разрушению образцов горных пород комбинацией поперечного и продольного сдвигов и сопровождается наибольшей дилатансией. Увеличение уровня гидростатического давления снижает предельную величину сдвиговых деформаций и подавляет эффект дилатансии. Максимум дилатансии совпадает с максимумом вновь образованной поверхности при разрушении горной породы.

В объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений в горных породах обобщенный отрыв энергетически невыгоден. Разрушение происходит путем комбинации продольного и поперечного сдвигов с отрывом (скол, кручение, раздир и др.). Наименее энергоемким является обобщенный сдвиг.

При определенных соотношениях компонент тензора напряжений в горных породах наблюдается сверхпластичность. При деформировании горных пород в объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений происходят перестройка (разрыхление) структуры в плоскости сдвига и локальные фазовые превращения. С увеличением уровня гидростатического давления в осадочных породах изменяется механизм разрушения.

Полная диаграмма «напряжение-деформация» позволяет оценить энергоемкость и характер разрушения, остаточную прочность и несущую способность породы, что является важнейшей информацией для решения многих проблем горного дела.

При разрушении горных пород в объемном неравнокомпонентном поле сжимающих напряжений максимум модуля спада и максимумы дилатансии совпадают. Хрупкое разрушение с динамическим эффектом и значительным спадом напряжений наблюдается при распространении трещин поперечного и продольного сдвига, и сопровождаются наибольшим разрыхлением и дроблением материала.

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

Основное различие в поведении образцов горных пород при разгрузке и пригрузке заключается в величине накопленной энергии и виде деформационного состояния в образце. При разгрузке за счет развития трещин поперечного и продольного сдвига значительно возрастает степень дробления материала.

Предельные разрушающие напряжения ранее нагруженных образцов горных пород почти не отличаются от ранее ненагруженных. Результаты испытаний на образцах горных пород без предварительного обжатия вполне приемлемы для горнотехнических расчетов, т.е. влиянием истории нагружения образцов можно пренебречь.

Вид напряженного состояния характеризуется положением промежуточного главного напряжения σ_2 по отношению к наибольшему σ_1 и наи-

меньшему σ_3 главным напряжениям. Оценивать его принято параметром Надаи – Лоде [36]

$$\mu_{\sigma} = (\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3),$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Ясно, что при фиксированных σ_1 и σ_3 величина параметра μ_{σ} может изменяться в зависимости от σ_2 в пределах от -1 до $+1$. При $\mu_{\sigma} = -1$ промежуточное главное напряжение равно наименьшему ($\sigma_2 = \sigma_3$), а при $\mu_{\sigma} = +1$ – наибольшему главному напряжению ($\sigma_2 = \sigma_1$).

Понятие о виде напряженного состояния можно использовать в существующих теориях прочности для оценки процессов разрушения углей, горных пород, полимеров, стеклопластиков и других материалов. Наиболее широко используемой применительно к горным породам является теория Кулона–Мора. Однако эта теория не учитывает влияния изменения промежуточного главного напряжения. Если бы наличие промежуточного главного напряжения не оказывало влияния на показатели свойств, было бы безразлично, при каком виде напряженного состояния изучать свойства горных пород. Однако в настоящее время можно считать доказанным, что это основное условие теории прочности Мора не соответствует опытным результатам.

Прочность и деформируемость горных пород при напряженном состоянии вида $\sigma_3 = \sigma_2 < \sigma_1$ ($\mu_{\sigma} = -1$) изучены весьма тщательно.

При напряженном состоянии вида $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$, т.е. при $\mu_{\sigma} = +1$, свойства горных пород изучались весьма мало, в основном при растяжении. Практически все работы посвящены изучению показателя прочности – величины максимального сжимающего напряжения, взятого по абсолютной величине. Первыми тщательно поставленными опытами на образцах каррарского мрамора были механические испытания, выполненные Бёкером [7]. Он установил, что величина показателя прочности каррарского мрамора при $\mu_{\sigma} = +1$ увеличилась на 10% по сравнению с величиной показателя прочности, полученной Карманом в опытах на обобщенное сжатие (при $\mu_{\sigma} = -1$). Как показал Муррель, разница в величинах показателей прочности уменьшается с уменьшением гидростатического давления.

Экспериментальные исследования по изучению влияния вида напряженного состояния на величины показателей прочности глин выполнены Е.А. Воробьевым, который установил, что для глин с выраженными пластическими свойствами величины показателей прочности практически не отличаются при значениях $\mu_{\sigma} = -1$ и $\mu_{\sigma} = +1$. Подобное обстоятельство было отмечено также А.Л. Крыжановским [38] для илов Сиваша, М.Н. Гольдштейном и С.С. Бабицкой [39] для глин нарушенной структуры (паст).

Для серых и бурых глин с упругими связями расхождение в значениях коэффициентов (в известной формуле Кулона для оценки прочности сыпучих материалов) при $\mu_{\sigma} = -1$ и $\mu_{\sigma} = +1$ составляло от 0 до 122%.

Сравнения показателей прочности скальных горных пород при значениях $\mu_{\sigma} = +1$ и $\mu_{\sigma} = -1$ проводились недостаточно, и результаты их не выявили определенных закономерностей. Так, в работах А.Д. Алексеева, В.И. Журавлева и Л.П. Когана [40], Сатерленда [41] и Моги [42] утверждается, что с увеличением промежуточного главного напряжения увеличивается прочность пород на 25–30% и приводит к уменьшению угла внутреннего трения. Лундберг [43] и Бради [44] отмечают уменьшение прочности при уменьшении величины σ_2 , а в работах Г.Н. Кузнецова и М.Н. Будько [45], Мурреля, Дигби [46] и Хоббса [47] не выявлено влияния σ_2 на прочностные характеристики горных пород, бетонов и эквивалентных материалов.

В [48] выделены основные переменные и параметры термодинамической системы угольный пласт при протекании геомеханического процесса объемного нагружения, показаны изменения величин главных напряжений и других параметров в трех основных зонах нагружения угольного пласта – в зоне «нетронутого» массива, в зоне влияния выработки при активном нагружении и в зоне предельных состояний. Характер изменения промежуточного главного напряжения σ_2 термодинамической системы угольный пласт весьма своеобразен по отношению к двум другим главным напряжениям σ_1 и σ_3 . Определенная закономерность заключается в том, что сначала в глубине массива промежуточное главное напряжение, примерно равно минимальному сжимающему главному напряжению σ_3 , затем σ_2 становится примерно равным полусумме минимального и максимального сжимающих напряжений, т.е. $\sigma_2 = 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)$, и, наконец, на кромке забоя в очистной выработке или вблизи подготовительной выработки промежуточное главное напряжение приближается к максимальному сжимающему напряжению σ_1 , т.е. $\sigma_2 \cong \sigma_1$.

Кроме этой выявленной закономерности, усматривается и характер изменения параметра Надаи–Лоде μ_{σ} , который непрерывно меняется от -1 до 0 и затем до $+1$. По классификации А. Надаи такое изменение μ_{σ} свидетельствует об изменении вида напряженного состояния от обобщенного сжатия до обобщенного сдвига и затем до обобщенного растяжения. Таким образом, связывая величины дополнительного параметра Надаи–Лоде, который характеризует вид напряженного состояния, с изменением нагружения угольного пласта и с изменением состояния термодинамической системы угольный пласт, можно в определенной мере дать прогноз об изменении напряженного состояния, об изменении прочностных и деформационных свойств угольных пластов и вмещающих пород и о возможном характере разрушения угольного пласта и вмещающих пород впереди забоев очистных и подготовительных выработок.

При изучении закономерностей изменения механических свойств материалов во всех опытах с образцами углей марок Т, А, Ж и др., горных пород и песчано-цементных смесей наблюдались общие черты. Во-первых, прочностные и деформационные характеристики указанных твердых тел при различных значениях σ_2 и μ_σ закономерно изменяются. Во-вторых, на диаграммах $\sigma_1 - \varepsilon_1$ и $\sigma_{cp} - \varepsilon_{cp}$ выделяются характерные участки различного деформирования при различных σ_2 и μ_σ . В-третьих, величина коэффициента Пуассона при нагружении углей в объемном напряженном состоянии в среднем равна 0,365 и колеблется в пределах 15–20%. В-четвертых, деформирование образцов происходит таким образом, что отношение изменения размеров образцов к начальным размерам находится в пределах 3–12%. Это позволяет сделать вывод о том, что для математического описания уравнений связи между статическими и кинематическими переменными можно использовать механические модели механики сплошных сред.

Отличительной чертой деформирования образцов углей при напряженном состоянии обобщенного растяжения является реализация компоненты деформации растяжения по направлению действия минимального сжимающего напряжения. При этом компонента девиатора деформации по направлению действия минимального сжимающего напряжения является растягивающей и достигает значительных величин. Выделение компонент девиатора деформации позволило проверить один из постулатов деформационной теории пластичности о пропорциональности девиаторов напряжения и деформации. Разрушение углей при напряженном состоянии обобщенного растяжения реализуется в виде отделения частей образца плоскостью отрыва. Таким образом, характер разрушения образцов углей при μ_σ , близком к +1, соответствует разрушению отрывом.

К новым результатам при анализе экспериментальных данных деформирования углей в напряженном состоянии обобщенного сжатия можно отнести, во-первых, различные диаграммы между статическими и кинематическими переменными, во-вторых, данные по сравнению тензоров девиатора напряжения и девиатора деформации, в-третьих, установление закономерных отличий в величинах параметра Надаи–Лоде для напряжений и параметра Надаи–Лоде для деформаций. Кроме того, представляет определенный интерес характер разрушения образцов углей, близкий к разрушению сдвигом.

Поскольку деформирование и разрушение угольного пласта и вмещающих пород есть термодинамический процесс изменения системы, поэтому актуальным являются исследования по влиянию вида напряженного состояния при разрушении массива на его физические свойства.

Первые попытки в этом направлении были предприняты в ИФГП НАН Украины. В результате экспериментальных исследований углей различных марок по деформированию и разрушению их в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия было установлено [49,50], что сорбционная способность углей после разрушения их в условиях обобщенного сдвига

($\mu_{\sigma} = 0$) наименьшая, а скорость десорбции – наибольшая. Изменение сорбционных свойств углей после разрушения свидетельствует о том, что в его структуре происходят изменения не только на макро-, но и на микроуровне – происходит уменьшение сорбционных центров, что и подтверждает существенное влияние вида напряженного состояния (или σ_2) на физические свойства углей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск: Ин-т горн. дела СО АН СССР, 1970. – 243 с.
2. Батугин С.А., Шаманская А.Т. Исследование напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки в условиях Таштагольского железнодорожного месторождения. – Физ. техн. пробл. разработки полез. ископаемых (ФТПРПИ), 1965, №2, С. 28–33.
3. Протодяконов М.М., Ильницкая Е.И., Карпов В.И. Методы исследования механических свойств горных пород в условиях объемного напряженного состояния. – В кн.: Механические свойства горных пород. – М.: Изд-во АН СССР, 1963, С. 38–56.
4. Adams F.D. An experimental contribution to the question of the depth of zone of flow in the Earth's Crust. – J, Geol., 1912, Vol. 20.
5. Muller O. Untersuchungen in karbongestein zur klarung von Gebirgsdruckfragen. – Glückauf, 1930, N47/48.
6. Karman T. Festigkeitsversuche under allseinigem. – Druck. – Ztschr. Vereines Dtsch. Ingr., 1911, N55.
7. Böker R. Die Mechanik der bleibenden Formänderungen in kristallisch aufgebauten Kornern. – Mitt.Forschungsarbeiten VDJ, 1915, P. 175–176.
8. Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. Деформационные и прочностные свойства. – М.: Наука, 1979, – 152 с.
9. Воларович М.П., Баюк Е.И. Влияние всестороннего давления до 4000 кг/см² на упругие свойства образцов горных пород. – Докл. АН СССР, 1960, Т. 135, №1, С. 65–69.
10. Протодяконов М.М., Вобликов В.С. Гипотеза разрушения углей и пород при объемном напряженном состоянии. – Тр. / Ин-т горн. дела АН СССР, 1955, Т. 2, С. 75–90.
11. Horibe T., Kobajashi R. Physical and mechanical properties of coal-measures rocks under triaxial pressure. – In: Intern.Conf. Strata Control. Н., 1960.
12. Матвеев Б.В. Руководство по проведению испытаний слабых горных пород на боковой распор. Л.: Всесоюз. н.-и. маркшейд. ин-т, 1961, 68 с.
13. Ставрогин А.Н. Исследование горных пород в сложных напряженных состояниях. – Горн. журн., 1961, №3, С. 34–39.
14. Бич Я.А., Баженов А.И., Муратов Н.А. А.с. 252687 (СССР). Установка для испытаний твердых тел при трехмерном напряженном состоянии сжатия. – Оpubл. В Б.И., 1969, №29.
15. Мазур-Джуриловский Ю.Д. К методике испытаний горных пород на гидравлических установках при сложных напряженных состояниях. – В кн.: Горное дав-

- ление, сдвигание горных пород и методика маркшейдерских работ. Л.: Всесоюз. н.-и. маркшейд. ин-т, 1968, сб. 70, С. 344–352.
16. Paterson M.S. A high-pressure, high-temperature apparatus for rock deformation. – Intern. J. Rock Mech. And Mining Sci, 1970, vol. 7, N5.
 17. Mining J. Simple triaxial cell. – 1968, vol. 271, N6952.
 18. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. – Киев: Наукова думка. – 1982. – 200 с.
 19. Ильницкая Б.И. Исследование свойств горных пород в различных условиях трехосного напряженного состояния. – В кн.: Исследования физических свойств горных пород. – М.: Недра. – 1973. С. 127–139.
 20. Mogi K. On the pressure dependense of strength of rocks and the Coulomb fracture criterion. – Tectonophysics. – 1974. – Vol. 21. – N3. – P. 273–285.
 21. Чирков С.Е. Прочность горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии. ФТПРПИ. – 1976. – №1. С. 11–17.
 22. Докукин А.В., Чирков С.Е., Норель Б.К. Моделирование предельно напряженного состояния угольных пластов. – М.: Наука. – 1981. – 152 с.
 23. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. – М.: Наука. – 1983. – 128 с.
 24. Олексієв А.Д., Журавльов В.І., Коган Л.П. Міцність гірничих порід у трьохосовому полі стиснувальних напружень. Теоретична і прикладна механіка. – 1971. – вип. 2. С. 87–91.
 25. Алексеев А.Д., Осыка Е.И., Недодаев Н.В., Чехова Г.Г. Исследование предельных состояний твердых тел при высоких давлениях. – В кн.: Физические исследования при высоких давлениях. – Ч. 1. – Таллин. – 1977. – С. 128–132.
 26. Lode W. Versucke über den oinflubder mitteleren Hauptspannung auf das FlieBen der metalle oisen, Kupker und Nickel. J. Phys. – 36. – 1926. S. 913–939.
 27. Taylor R., Sir Geoffrey Ingran and H. Quinney. The plastic distortion of metals. Phil. Trans. Roy. Soc. London. – 1931. – Ser.A. 230. – P. 323–362.
 28. Виноградов В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. – Киев: Наукова думка. – 1989. – 192 с.
 29. Булат А.Ф., Софийский К.К., Силин Д.П., Мучник Э.И., Барадудин Е.Г., Житленок Д.М., Жмыхов В.Н., Воробьев Е.А. Гидродинамическое воздействие на газонасыщенные угольные пласты. – Днепропетровск: Полиграфист. – 2003. – 220 с.
 30. Sayers C. M. Van Munster J.G., King M.S. Stress-induced ultrasonic anisotropy in Berea sandstone, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 27. – N5. – 1990. P. 436–499.
 31. Smart B.G.D. A true triaxial cell for testing cylindrical rock spesimens. Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstract, Vol. 32. – N3. – 1995. P. 269–275.
 32. King M.S., Chandry N.A., Chakeel A. Experimental ultrasonic velocities and permeability for sandstones with aligned cracks. Int. I. Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr. Vol.32. – N2. – 1995. P. 155–163.
 33. Al-Harthy S.S., Dennis J.W., Jing X.D. and Marsden J.R. Hysteresis true-triaxial stress path and pore pressure effect on Permeability. SPE 47269, presented at the SPE/ISRM Eurock held in trondheim, Norway. – 1998. P. 1–9.

34. Al. Harthy S.S., Jing X.D., Marsden J.R. and Dennis J.W. Petrophysical properties of sandstones under true triaxial stresses I: directional transport characteristics and pore volume Change. SPE 57287. Imperial College, London. UK. – 1999. P. 1–15.
35. Алексеев А.Д., Ревва В.Н., Рязанцев Н.А. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений. – Киев: Наукова думка, 1989. – 168 с.
36. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Мир, 1969, Т.1, 648 с.
37. Муррель Р.А. Критерий хрупкого разрушения горных пород и бетона в трехосном напряженном состоянии и влияние порового давления на этот критерий. – В кн.: Механика горных пород. М.: Недра, 1966, С. 359–372.
38. Крыжановский А.Л., Абелев М.Ю., Воронцов Э.И. Влияние вида пространственного состояния на механические свойства илов озера Сиваш. – В кн.: Строительство на слабых грунтах. Рига: АН Латв. ССР, 1970, С. 37–43.
39. Гольдштейн М.Н., Бабицкая С.С. О длительной прочности связанных грунтов. – В кн.: Вопросы геотехники. Днепропетровск: Транспорт, 1964, №7, С. 44–56.
40. Алексеев А.Д., Журавлев В.И., Коган Л.П. Міцність гірничих порід в трьохосовому полі стискуючих напружень. – Теор. і прикл. мех. Респ. міжвід. темат. наук.-техн. зб., 1971, вип. 2, С. 87–91.
41. Sutherland H.B., Mesdary M.S. The influence of the intermediate principal stress on the strength of sand. – In: Proc. 7th 91 st. Conf. Soil Mech. And Found. Eng., Mexico, 1969, Vol. 1.
42. Mogi Kigoo. Effect of the triaxial stress system on fracture and flow of rock. – Phys. Earth and Planet. Inter., 1972, Vol. 5, N4.
43. Lundborg N.A. A statistical theory of the poliaxial compressive strength of matirals. – Intern. J. Rock Mech. And Mining Sci., 1972, Vol. 9, N5.
44. Brady B.T. A statistical theory of brittle for rosk materials. Pt 11. Brittle bailure under homogeneous triaxial states of stress. – Intern. J. Rock Mech. And Mining Sci., 1969, Vol. 6, N3.
45. Кузнецов Г.Н., Будько М.Н. Исследование предельных состояний хрупкого материала в различных условиях трехосного сжатия. – В кн.: Горное давление, сдвигение горных пород и методика маркшейдерских работ. Л.: Всесоюз. н.-и. маркшейд. ин-т, 19668, сб. 70, С. 22–45.
46. Murrell S.A., Digky P.G. The theory of brittle fracture initiation under triaxial stress conditions. I. – Geophys. J. Roy. Astron. Soc, 1970, Vol.19, N4.
47. Hobbs D.W. Strength and deformation properties of plain concrete subject to combined stress. Pt. 2. Strength in multiaxial compression. – Cem. And Concr. Assoc. Techn. Rept., 1972, N42.
48. Норель Б.К. Изменение механической прочности угольного пласта в массиве. – М.: Наука, 1993, 128 с.
49. 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.
50. 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 // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – 2007. – №69. С. 37–45.