

УДК 622.620.173/.174

А.Ф. Булат, академик НАН Украины, д-р техн. наук, профессор,
Ю.Н. Пилипенко, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

**РАЗРУШЕНИЕ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО ГЕОМАТЕРИАЛА
С НАРУШЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ПРИ СЖАТИИ**

А.Ф. Булат, академік НАН України, д-р техн. наук, професор,
Ю.М. Пилипенко, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

**РУЙНУВАННЯ ФЛЮЇДОНАСИЧЕНОГО ГЕОМАТЕРІАЛУ
З ПОРУШЕНОЮ СТРУКТУРОЮ ПРИ СТИСНЕННІ**

A.F. Bulat, Acad. NASU, D. Sc. (Tech.), Professor
Ju. N. Pilipenko, Ph. D. (Tech.) Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

**DESTRUCTION OF THE FLYUID-SATURATED GEOMATERIAL
WITH THE BROKEN STRUCTURE AT COMPRESSION**

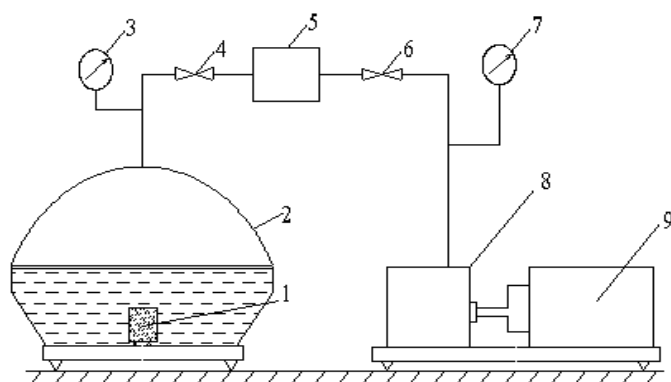
Аннотация. Исследованы изменения физико-механических и коллекторских свойств геоматериала различной степени флюидонасыщенности в предельной и запредельной области деформирования. Установлено влияние скорости нагружения образцов на изменение прочностных и деформационных параметров угля и горных пород в зависимости от типа флюида и величины бокового подпора при различных энергетических затратах на разрушение. Установлены зависимости сжимаемости от величины давления и параметров трещинно-порового пространства, а также динамики формоизменения от степени флюидонасыщенности геоматериала. Контроль процесса разрушения осуществлялся методом спектральной сейсмоакустики с определением уровня дезинтеграции Фурье-оценкой амплитудно-частотных и амплитудно-временных спектров.

Ключевые слова: геоматериал, разрушение, флюид, энергия, формоизменение, контроль

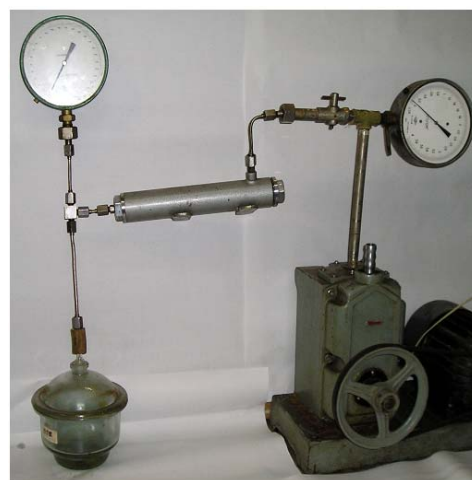
В горном массиве происходят тесно взаимосвязанные геомеханические и газодинамические процессы сдвигания, расслоения, деформирования и трещинообразования, интенсивность протекания которых зависит от уровня флюидо и газонасыщенности угольных пластов и боковых пород. Проблема осложняется когда выемочные столбы имеют малоамплитудную тектоническую нарушенность, асимметричную пликативную складчатость, которые являются природными каналами миграции флюидов и газа метана [1], особенно при высоких скоростях подвигания лав [2]. Устойчивость пород, их смещение и нагрузка на крепь зависят от показателей прочности, углов внутреннего трения и коэффициентов сцепления. Их численные изменения оказывают большое влияние на параметры конструктивных элементов систем разработок, поэтому для прогно-

за состояния горных выработок и поведения флюидонасыщенных пород и угля необходимо определение физико-механических и коллекторских свойств, которые вычисляют при обработке полных диаграмм «напряжение – деформация» [3]. Полученные результаты не могут быть использованы в полной мере при решении проблем дегазации и устойчивости выработок, так как не позволяют установить закономерности изменения фильтрационных свойств геоматериала в предельной и запредельной области деформирования. Цель работы: исследовать динамику разрушения структурно нарушенного геоматериала с различной степенью флюидонасыщения при изменении напряженного состояния среды. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: исследовать структуру трещинно-порового пространства геоматериала, влияние типа влаги и вида напряженного состояния на изменение прочностных и фильтрационных свойств углей и горных пород. Результаты составят основу решения задач о геомеханическом состоянии флюидонасыщенных угольных пластов в зонах разрывных дислокаций при их переходе очистными работами.

Аппаратура, оборудование и методика работ. Флюидонасыщение геоматериала проводилось с помощью вакуумной тарелки и насоса Комовского, а также разработанного и изготовленного более совершенного устройства, схема и внешний вид, которого представлены на рис. 1.



а



б

Рисунок 1 – Схема (а) и общий вид установки (б) для флюидонасыщения геоматериала

Устройство позволяет контролировать параметры давления, расход воды, время гидрообработки, степень насыщенности флюидом и состоит из обрабатываемого образца геоматериала 1, эксикатора 2 с рабочим реагентом, прецизионного манометра 3, дросселя 4, фильтра 5, вентиля 6, контрольного манометра 7, вакуумного насоса (КН-49НВ) 8 и электродвигателя 9. Принцип работы следующий: в рабочий реагент (вода, водные растворы анионных, катионных ПАВ,

моно и поликомпонентных веществ) помещается образец геоматериала 1, включается электродвигатель 9 и проверяется степень вакуумирования контрольным манометром 7, открывается вентиль 6 и проводится хронометраж флюидонасыщения. Уровень предела нижнего давления регулируется дросселем 4. Перепад давления в порах и трещинах образца и вакуумной камере эксикатора приводит к интенсивному проникновению флюида в геоматериал и выделению газа из пор и трещин. Продолжительность флюидонасыщения образца зависит от смачиваемости и проницаемости геоматериала. Исследованиями смачиваемости угля различной стадии метаморфизма установлено, что угольный пласт представляет многокомпонентную систему ингредиентов, каждый из которых обладает своими физическими и химическими свойствами. При обработке водой лучшие показатели смачиваемости характерны для угля марок Б, Д и частично ДГ. С увеличением степени метаморфизма смачиваемость угля уменьшается.

Методика работ включала изучение петрофизических свойств угля и горных пород, параметризацию линейных размеров трещин и поверхностную плотность, густоту по направлениям и степень раскрытости [4]. Линейный коэффициент интенсивности трещиноватости определялся непосредственно по замерам расстояний между трещинами по выбранному направлению. Площадной коэффициент интенсивности трещиноватости находился из выражения

$$W = m / S_0, \quad (1)$$

где m – число структурных блоков на площади обследования S_0 .

Коэффициент раскрытости Π трещин находится из соотношения

$$\Pi = S_T / S_0. \quad (2)$$

Для густоты трещин характерна анизотропия, которая определяется по следам трещин в трех взаимно перпендикулярных направлениях

$$V_{cp} = m_{11} m_{22} m_{33}, \quad (3)$$

или

$$V_{cp} = \frac{1}{I_{11}} \frac{1}{I_{22}} \frac{1}{I_{33}}.$$

Исследование трещинообразования основано на параметризации трещин до и после деформирования и разрушения геоматериала на прессах ПСУ-500 с регулируемым боковым подпором и ПСУ-50 с записью диаграмм «напряжение - деформация» и одновременным сейсмоакустическим контролем в лабораторно-сухом и флюидонасыщенном состоянии.

Пористость, проницаемость и коэффициент фильтрации флюида определялись косвенным способом по методике Т.Д. Гольф-Рахта [5] и прямыми измерениями с применением кернодержателя КЗ-8.

Обработка результатов исследований заключалась в определении статических, динамических и энергетических параметров разрушения путем дифференцирования и интегрирования полных диаграмм «напряжение-деформация» в цифровом виде. Коэффициенты сжимаемости порового пространства геоматериала вычислялись по формуле, связывающей коэффициенты сжимаемости породы, ее порового пространства, твердой фазы и пористости.

$$C = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (4)$$

Сжимаемость является свойством определенного объема геоматериала, подвергнутого сжатию – общего объема породы V_n пустотного (порового) пространства $V_{пуст}$ ($V_{пор}$) или объема скелета $V_{ск}$. Сжимаемость общего объема пород V_n , скелета $V_{ск}$, и порового объема $V_{пор}$ определялась из уравнений [5]:

$$\begin{aligned} V_n &= V_{ск} + V_{пор}; \\ V_{пор} &= V_n \Phi \end{aligned} \quad (5)$$

и посредством основных уравнений

$$\begin{aligned} C_n &= \frac{1}{V_n} \left(\frac{dV_n}{dP} \right)_{\sigma=const}; \\ C_{ск} &= \frac{1}{V_{ск}} \left(\frac{dV_{ск}}{dP} \right)_{\sigma=const}; \\ C_{пор} &= \frac{1}{V_{пор}} \left(\frac{dV_{пор}}{dP} \right)_{\sigma=const}. \end{aligned} \quad (6)$$

При контроле разрушения исследовались акустоэмиссионные явления в углях и горных породах при различных режимах нагружения в условиях одноосного и объемного сжатия. Генерирование импульса при образовании единичной трещины можно записать в виде:

$$a_i(t) = z; a_0(t), \text{ где } i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Согласно этого для моментов времени t_1 и t_2 автокорреляционная функция имеет следующий вид [6]

$$R_{yi}(t_1, t_2) = M [a_i(t_1) \cdot a_i(t_2)] \quad (8)$$

Для случая $\tau = t_2 - t_1$ получим

$$R_{ai}(\tau) = \int_0^\infty \int_0^\infty g_i(\tau_1) g_i(\tau_2) R_{a0}(\tau - \tau_2 + \tau_1) d\tau_1 d\tau_2, \quad (9)$$

где ω – круговая частота спектральной плотности.

Спектральная плотность сейсмоакустического сигнала в интервале $\tau = t_2 - t_1$ связана с автокорреляционной функцией преобразованием Фурье [6]:

$$S_{ai}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty R_{ai}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty e^{-i\omega\tau} d\tau \times \int_0^\infty g_i(\tau_1) g_i(\tau_2) e^{-i\omega(\tau - \tau_2 + \tau_1)} R_{a0}(\tau - \tau_2 + \tau_1) d\tau_1 d\tau_2, \quad (10)$$

где $S_{ai}(\omega)$ может принимать только вещественные значения.

Тогда последовательность функций $S_{a1}(\omega), S_{a2}(\omega) \dots S_{an}(\omega)$ описывают состояние геоматериала при разрушении и связаны с изменением напряженно-деформированного состояния среды. Возникновение акустической эмиссии вызвано ростом трещин, а амплитудно-частотные и амплитудно-временные спектры отражают их относительные количественные характеристики. Поскольку процесс образования трещин носит дискретный характер, возникает необходимость в интерполяции событий в интервале $\tau = t_2 - t_1$ с целью выделения аномальных эффектов на уровне нормального фона. Это связано с трудностями математического характера, поэтому качественную и количественную оценку трещинообразования устанавливают, решая задачу о восстановлении поверхности по дискретной информации, заданной в узлах прямоугольной решетки наиболее универсальным методом кусочно-линейных сплайнов [7].

Пусть для прямоугольной области $\Omega[a, b] \times [c, d]$, где \times - декартово произведение множеств, введена сетка линий $\Delta_{N,M} = \Delta_N^x \times \Delta_M^y$ ($\Delta_N^x : a = x_0 < x_1 < \dots < x_N = b$; $\Delta_M^y : c = y_0 < y_1 < \dots < y_M = d$), которая делит область Ω на прямоугольные ячейки $\Omega_{ij} \{(x, y) : x \in [x_i, x_{i+1}], y \in [y_j, y_{j+1}]\}$ ($i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1$) через $C^{k,l}(\Omega)$, где k, l - натуральные числа, обозначим множество непрерывных на области Ω функций $f(x, y)$, имеющих непрерывные частные и смешанные производные $f_{(x,y)}^{(\nu,s)} = \partial^{\nu+s} f(x, y) / \partial x^\nu \partial y^s$ ($\nu \leq k, s \leq l$), а ν, s - натуральные числа.

При выборе конкретного алгоритма сплайн-интерполяции целесообразнее всего остановится на эрмитовых сплайнах, которые еще называют локальными. Их отличительной особенностью является то, что при построении сплайнов используется информация о поведении функции не во всей области ее определения Ω , а на некоторой, возможно, достаточно малой ее части. Такие сплайны могут учитывать разную гладкость функции на различных участках области Ω . Их, как правило, легче исследовать и удобнее вычислять.

Интерполяционным эрмитовым полиномиальным сплайном степени $2k+1$ по x и $2l+1$ по y для функции $f(x, y) \in C^{k,l}(\Omega)$ называют функцию $S_{2k+1,2l+1}(f; x, y)$, которая на каждом локальном прямоугольнике $\Omega_{ij} (i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1)$ имеет вид:

$$S_{2k+1,2l+1}(f; x, y) = \sum_{\nu=1}^{2k+1} \sum_{\mu=1}^{2l+1} a_{\nu\mu}^{(i,j)} (x-x_i)^\nu (y-y_j)^\mu, \quad (11)$$

а числа $a_{\nu\mu}^{(i,j)}$ определяются из условий $\delta_{2k+1,2l+1}^{(\nu,s)}(x_{i+p}, y_{j+q}) = f^{(\nu,s)}(x_{i+p}, y_{j+q})$, ($i = 0, 1, \dots, N; j = 0, 1, \dots, M; p, q = 0, 1; 0 \leq \nu \leq k, 0 \leq s \leq l$).

В качестве аппарата приближения функции $f(x, y) \in C^{\nu-1, l-1}(\Omega)$, можно использовать интерполяционный эрмитовый сплайн четной степени которой определяется следующими условиями:

1) в каждой ячейке $\Omega_{ij} (i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1)$,

$$S_{2\nu, 2l}(f; x, y) = \sum_{k=0}^{2\nu} \sum_{l=0}^{2l} b_{kl}^{(ij)} (x-x_i)^k (y-y_j)^l; \quad (12)$$

2) коэффициенты $b_{kl}^{(i,j)}$ находятся из соотношений:

$$S_{2\nu, 2l}^{(\nu_p, \mu_q)} \left(x_{i+\frac{2p-1}{1+p}}, y_{j+\frac{2q-1}{1+q}} \right) = f_{2\nu, 2l}^{(\nu_p, \mu_q)} \left(x_{i+\frac{2p-1}{1+p}}, y_{j+\frac{2q-1}{1+q}} \right), \quad (13)$$

где $p=0, 1, 2; q=0, 1, 2$.

Как следует из физических соображений, поверхность, которую нам нужно восстановить, принадлежит классу $C^{1,1}(\Omega)$. На этом классе интерполяционные сплайны $S_{1,1}$ дают хорошие результаты. Особо следует подчеркнуть, что функция $S_{1,1}(f; x, y)$ имеет простую и удобную для вычислений структуру и над произвольной ячейкой $\Omega_{ij} (i = 0, 1, \dots, N-1; j = 0, 1, \dots, M-1)$ задается формулой:

$$S_{1,1}(f; x, y) = f(x_i, y_j)(x_{i+1} - x)(y_{j+1} - y)/(h_x^i h_y^j) + f(x_i, y_{j+1})(x_{i+1} - x)(y - y_j)/(h_x^i h_y^j) + f(x_{i+1}, y_j)(x - x_i)(y_{j+1} - y)/(h_x^i h_y^j) + f(x_{i+1}, y_{j+1})(x - x_i)(y - y_j)/(h_x^i h_y^j), \quad (14)$$

где (x_{i+k}, y_{j+l}) ($k, l = 0, 1, \dots, n$) – координаты вершин элементарного прямоугольника; $\Omega_{ij}; f(x_{i+k}, y_{j+l})$ ($k, l = 0, 1, \dots, n$) – значения функции f в вершинах элементарного прямоугольника; $\Omega_{ij}; (x, y)$ – текущие координаты произвольной точки, расположенной в элементарном прямоугольнике; $\Omega_{ij}; h_x^i = x_{i+1} - x_i, h_y^j = y_{j+1} - y_j$ – параметры сторон элементарного прямоугольника Ω_{ij} .

Анализ приближения произвольной функции $f \in C^{1,1}(\Omega)$ сплайном $S_{1,1}(f; x, y)$ показал, что ее величина находится в прямой зависимости от максимальных шагов $h_x = \max\{h_x^i : 0 \leq i \leq N - 1\}$ и $h_y = \max\{h_y^j : 0 \leq j \leq M - 1\}$ сеток Δ_N^x и Δ_M^y , соответственно, а именно $\max\{f(x, y) - S_{1,1}(f; x, y) : (x, y) \in \Omega\} \rightarrow 0$ при одновременном стремлении h_x и h_y к 0. Все это позволяет определить минимально необходимое число узлов интерполяции (x_i, y_j) функции $f(x, y)$, требуемое для достижения определенной величины погрешности аппроксимации. Для изучения зависимости (14) применяют графические методы вычислительной математики (ГРАФОР), позволяющие получить наглядное представление о поведении $S_{1,1}(f; x, y)$ над областью Ω .

Построение сечений проводилось с целью количественных расчетов энергетических параметров разрушения интегральным способом и качественного анализа амплитудно-временных и амплитудно-частотных спектров механоэмиссионных событий [8]. Интерпретация выполненных экспериментальных исследований основана на положениях теории метода линий скольжения, которые использовались при оценке результатов контроля разрушения геоматериалов в лабораторно-сухом и флюидонасыщенном состоянии [9].

Результаты выполненных работ. Исследование динамики разрушения проведено на образцах породы и угля различной степени метаморфизма, отобранных на шахтах «Павлоградуголь», «Добропольеуголь», «Орджоникидзеуголь», «Краснодонуголь», «Макеевуголь» и АП «Шахта им. А.Ф. Засядько».

Влияние структуры геоматериала. Изучение прочности проведено в различных направлениях по отношению к слоистости, трещиноватости при фиксированных значениях влажности. При незначительном содержании фюзинита в углях Донбасса его неравномерное распределение в объеме образца создает неоднородность, влияющую на его прочностные свойства и определяет особенности его деформирования. Однако, основным фактором, влияющим на разрушение геоматериала является структурная нарушенность и, особенно, ее параметры, среди которых ведущее место занимает трещиноватость и вещественный состав геоматериала. Зависимость прочности от интенсивности трещиновато-

сти для песчаника (1), угля (2), аргеллита (3), алевролита (4) представлена на рис. 2 а, б.

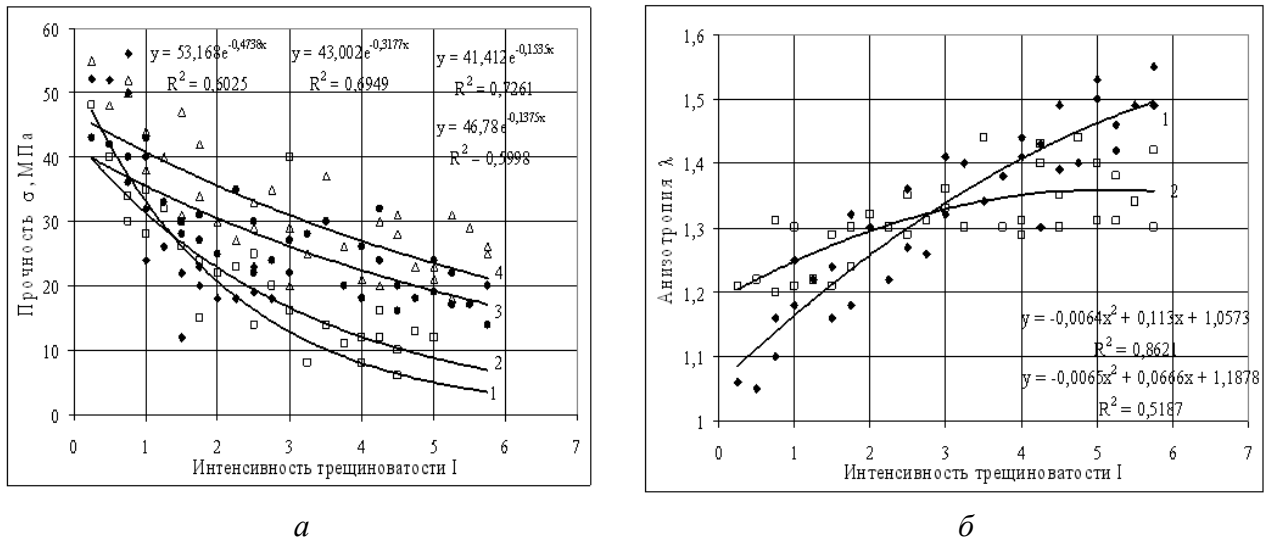


Рисунок 2 – Зависимость прочности на сжатие (а) и анизотропии прочности (б) от интенсивности трещиноватости в плоскости (1) и по нормали (2) к слоистости

Так как трещиноватый геоматериал является сложной разноориентированной средой со значительной суммарной площадью поверхности микротектоноструктурных элементов, то за счет этого возникают различия прочности и фильтрационных свойств. Влияние петрофизических особенностей на коллекторские свойства геоматериала приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Изменение параметров коллекторских свойств геоматериала в зависимости от петрофизических особенностей

Наименование породы	Структура	Текстура	Удельная поверхность контактирования, $S_{уд.}$, м ² /кг	Пористость, P, %
Алевролит	кристаллобластовая	пятнистая	0,0013	0,9
Аргиллит	полосчатая	очковая	0,0731	1,1
Песчаник	псаммитовая	массивная	0,124	3,4
Глинистый сланец	пелитовая	тонкослоистая	0,68	1,6

Как следует из табл. 1 на фильтрационные свойства геоматериала в значительной мере оказывает влияние генетика осадконакопления горных пород и структурно-текстурные особенности строения. Результаты испытаний угля пласта l_1 шахты им. А. Ф. Засядько приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Показатели дисперсного состава и формы угля

Номера точек	1	2	3	4	5	6	7	8
circularity	0,645	0,639	0,646	0,564	0,646	0,623	0,595	0,638
Area, мкм ²	987	2063	3628	1428	1500	1342	3826	1090
Perimetr, мкм	93,4	128,7	116,4	96,4	85	92,8	137	79,5
Диаметр Feret, мкм	36,2	49,3	44,9	37,7	32,8	35,7	52,1	30,8
D – фрактальная размерность	1,678	1,814	1,812	1,733	1,786	1,731	1,837	1,720
Количество частиц менее 10 мкм, %	46,5	50	60,8	53,6	57,1	56,3	41,9	61,3

Примечание: номера точек 1-8 соответствуют образцам угля с нарушенностью структуры

Изучение дисперсного состава проб выполнялось по следующим показателям: площадь, периметр, диаметр Ферета (расстояние между двумя касательными на противоположных сторонах частицы, перпендикулярными направлению, в котором рассматривается частица). Указанные параметры в значительной степени определяют проницаемость угля и изменение анизотропии проницаемости, которые представлены на рис. 3 а, б.

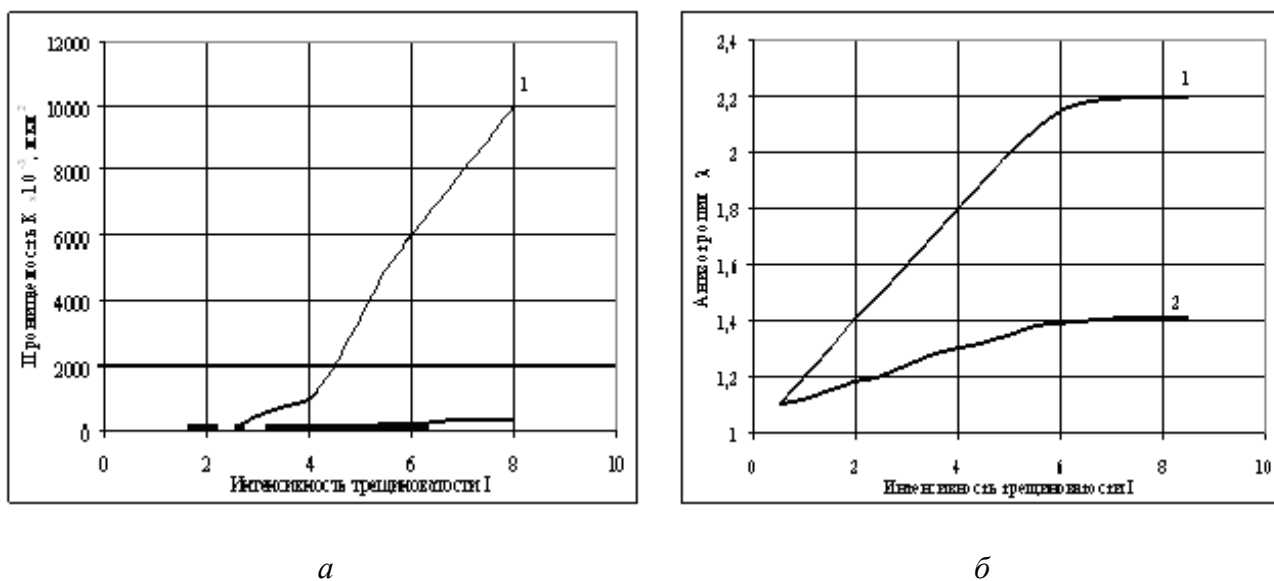
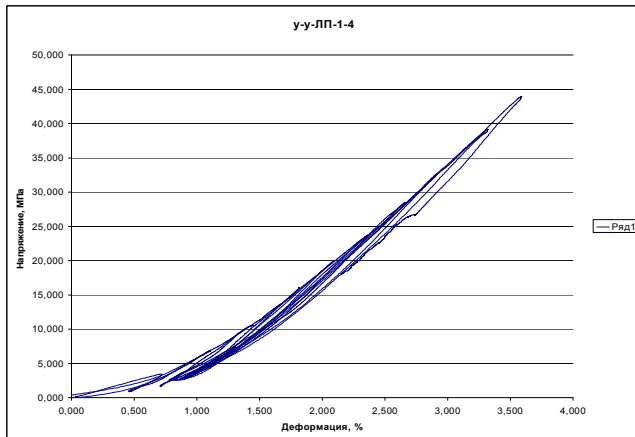


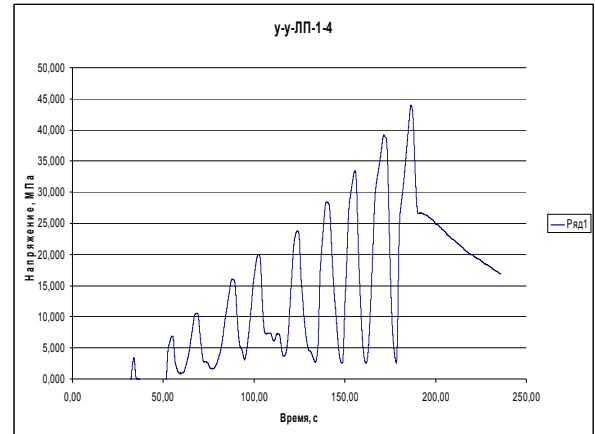
Рисунок 3 – Зависимость проницаемости (а) и анизотропии проницаемости (б) геоматериала от интенсивности трещиноватости в плоскости (1) и по нормали (2) к слоистости

Показатель формы частиц circularity (чем меньше его значения, тем форма частицы больше отличается от правильной формы круга и тем больше ее активная поверхность) отражает степень проницаемости геоматериала.

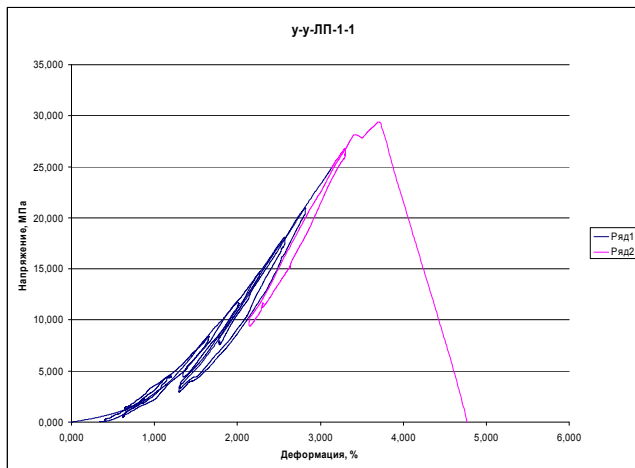
Статические характеристики разрушения. Вариации прочности пород при одноосном сжатии исследованы с применением методов контроля, подтверждающих высказанные предположения о роли увлажнения горных пород и углей на их разрушение. Результаты испытаний пород и угля при одноосном сжатии образцов кубической формы представлены на рис. 4-6, с учетом их генетических особенностей и направления главных напряжений в условиях естественного залегания.



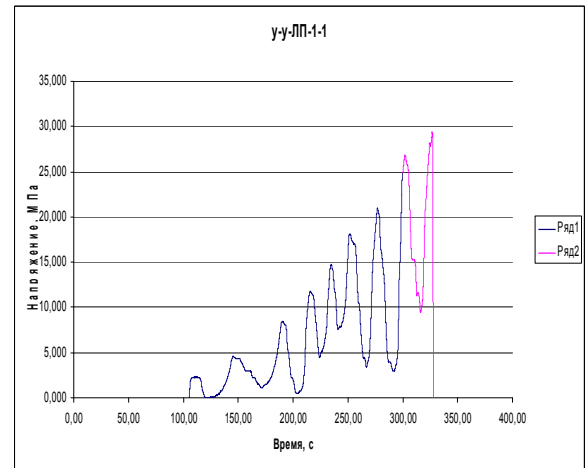
а



б



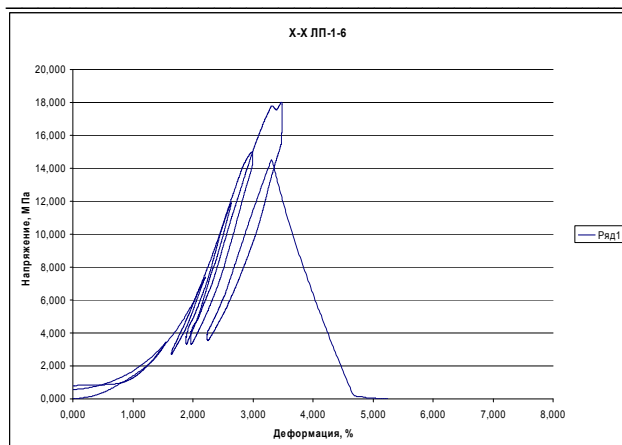
в



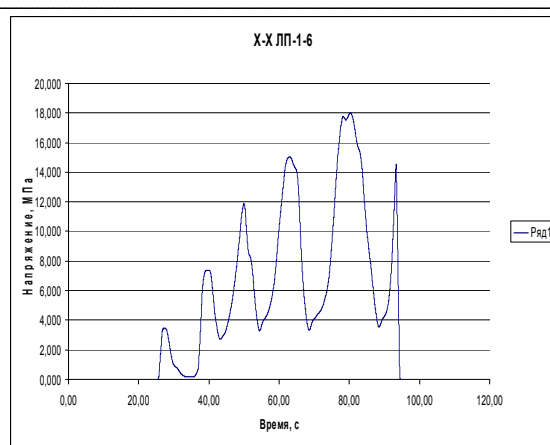
г

Рисунок 4 – Диаграмма «напряжение-деформация» (а, в) и диаграмма «напряжение-время» (б, г) при одноосном сжатии геоматериала с различным уровнем флюидонасыщенности по направлению Y-Y

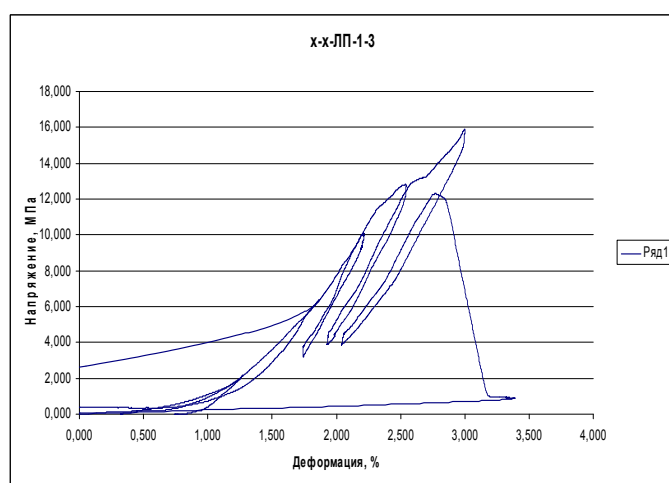
Два вида разрушения сдвиг и отрыв участвуют в дезинтеграции геоматериала с ростом влажности. В разрушение вовлекается большее число элементов с низким сопротивлением сдвигу, приводящему к снижению уровня напряженности среды, особенно в зависимости от ориентации слоистости (рис. 5).



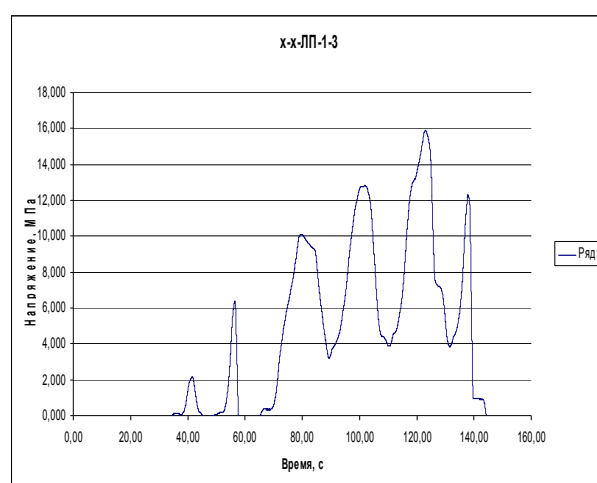
а



б



в



г

Рисунок 5 – Диаграмма «напряжение-деформация» (а, в) и диаграмма «напряжение-время» (б, г) при одноосном сжатии геоматериала с различным уровнем флюидонасыщенности по направлению X-X

Увеличение напряженного состояния в образцах геоматериала создает условия для скольжения кристаллов относительно друг друга, искажает структуру вещества, изменяет основные параметры кристаллической решетки. Это вызывает дифференцирование прочностных и деформационных свойств геоматериала. Прочность пород на одноосное сжатие снижается с ростом количества насыщающей жидкости, что ведет к адсорбции жидкости полярными частицами, уменьшения сцепления между частицами и, следовательно, снижения величины напряжений, необходимых для разрушения геоматериала. Из этого следует, влияние на параметры качественных и количественных характеристик разрушения геоматериала уровня структурной нарушенности является определяющим, а зависимость влияния влажности на прочность ее количеством с учетом структуры и ориентации образцов.

На рис. 6 а, в представлены результаты испытаний образцов угля на одноосное сжатие с учетом наследственных характеристик формирования геоматериала в естественных условиях залегания

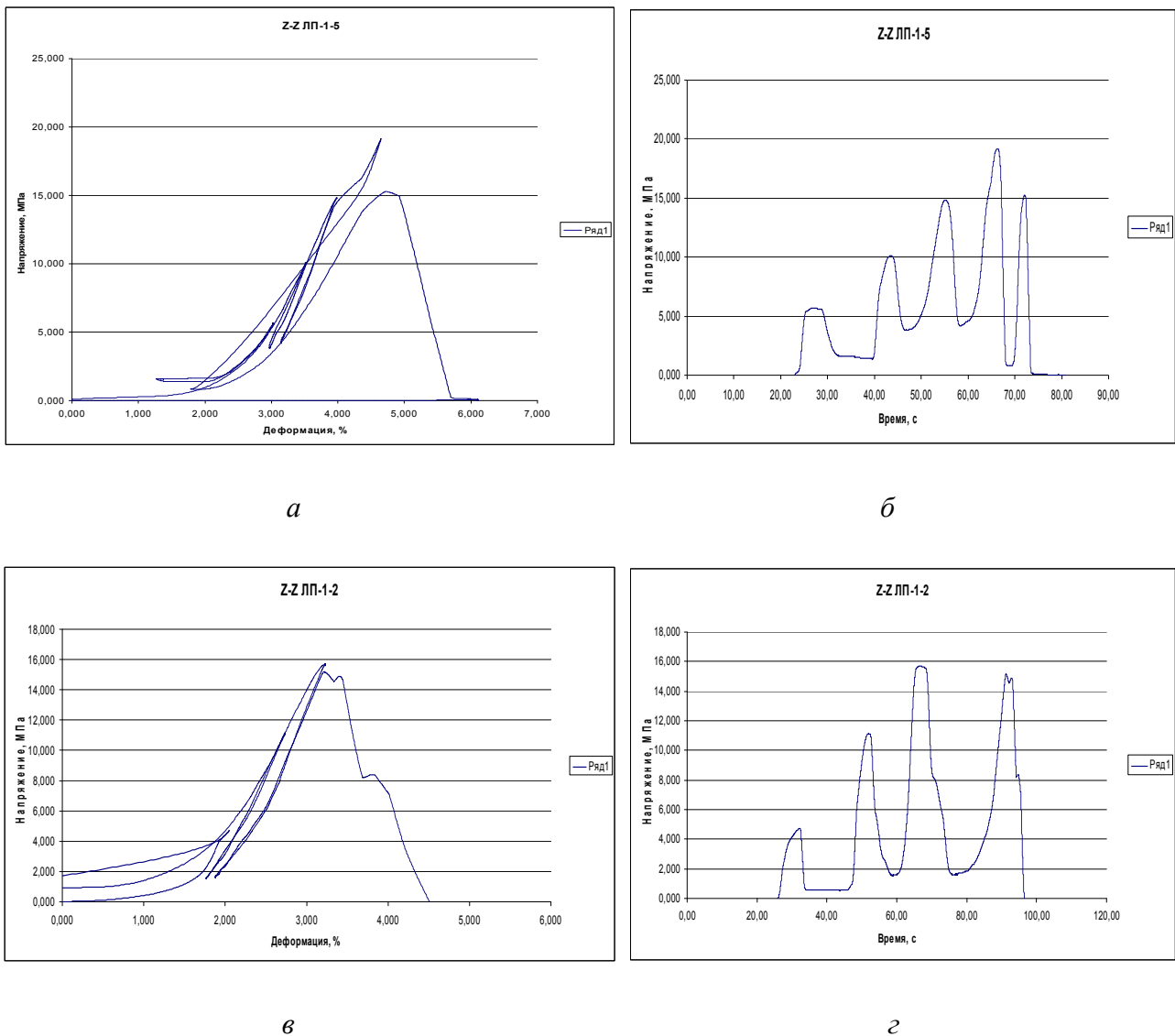


Рисунок 6 – Диаграмма «напряжение-деформация» (а, в) и диаграмма «напряжение-время» (б, г) при одноосном сжатии геоматериала с различным уровнем флюидонасыщенности по направлению Z-Z

Из приведенных результатов следует, что влияние условий нагружения (вида напряженного состояния и скорости деформирования) на прочностные и деформационные свойства пород является основным фактором при флюидонасыщении, оказывающим влияние на количество вовлекаемых в процесс деформирования структурных элементов (слоистость, трещиноватость, направленные величины главных напряжений).

С целью установления влияния нарушенности образца на его прочностные свойства при флюидонасыщении были проведены испытания на трехосное сжатие. При этом образцы подвергали сжатию по следующей схеме: $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$. Напряжение

$\sigma_1 = \text{const} = 15-45$ МПа. Напряжения $\sigma_2 = \sigma_3$ изменяли ступенчато через 2 МПа от 2 до 20 МПа. Изменение прочности угля при объемном равнокомпонентном сжатии представлено на рис. 7 а, б, в, г.

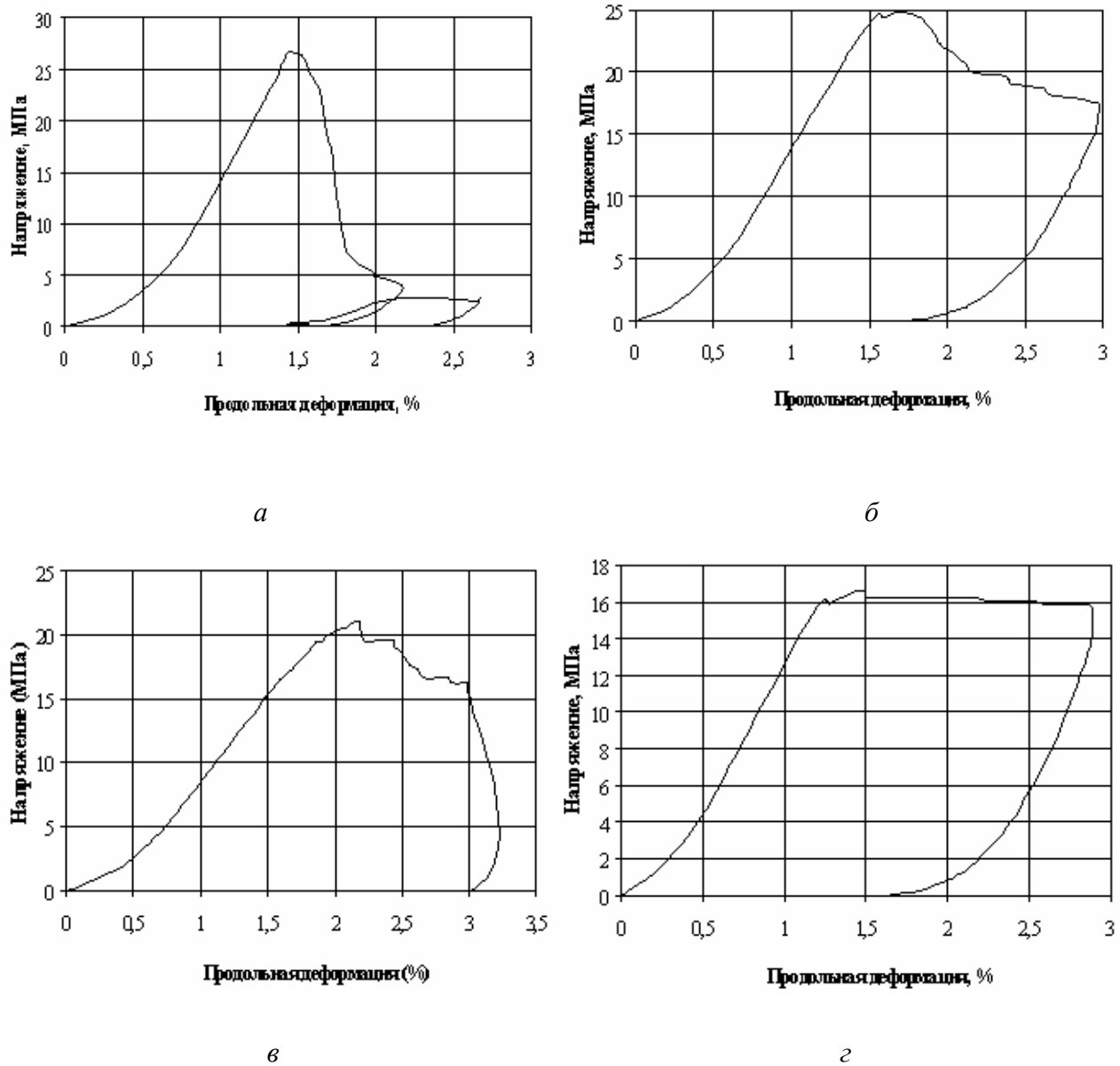
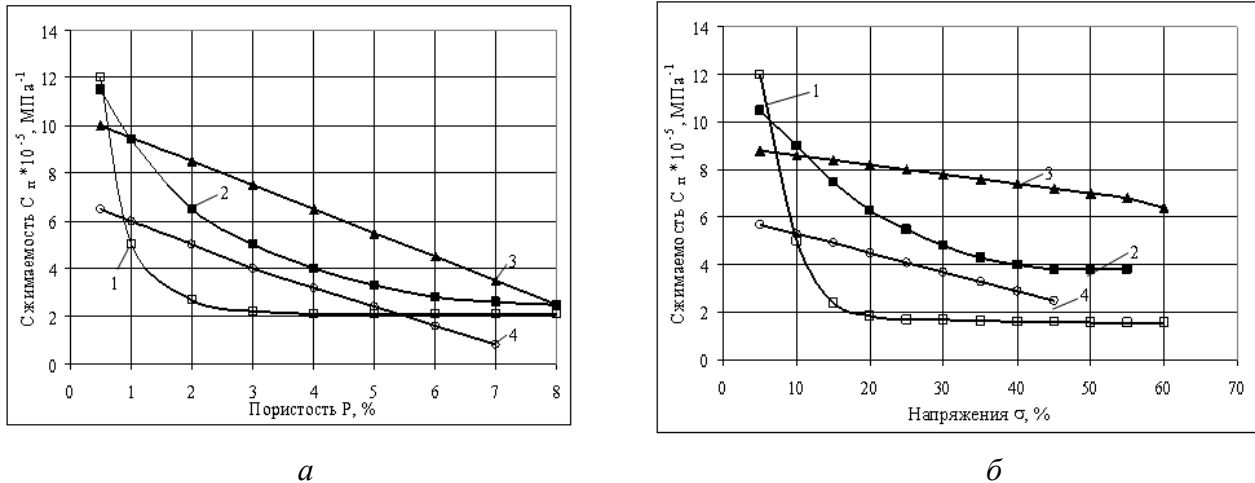


Рисунок 7 – Диаграммы деформирования и разрушения угля с различной флюидонасыщенностью: лабораторно-сухое состояние (а), влажность 2 % (б), влажность 5.2 % (в), 4-8 % после 92 ч флюидонасыщения (г)

Для горных пород (крепких, средней прочности и слабых) наблюдается закономерное уменьшение объемной сжимаемости с ростом давления всестороннего сжатия на скелет породы. На рис. 8 а, б представлены результаты определений сжимаемости геоматериала при объемном равнокомпонентном сжатии в лабораторно-сухом и флюидонасыщенном состоянии с учетом величин фиксированной пористости и действующих напряжений.



Песчаник и уголь в лабораторно-сухом (1,2) и в флюидонасыщенном (3,4) состоянии;
Рисунок 8 – Зависимость сжимаемости от пористости (а) и величины напряжений (б)
геоматериала при объемном сжатии

На фильтрационные свойства оказывает влияние генетика осадконакопления горных пород и их структурно-текстурные особенности строения, что приводит к снижению уровня напряжений во всех частях геоматериала и изменению проницаемости, которая зависит от типа трещинно-порового пространства и направления главных напряжений. При изменении фиксированных значений бокового подпора происходит изменение анизотропии пород в трех взаимно перпендикулярных направлениях, причем преобладающее направление совпадает с направлением максимальных нагрузок. С ростом давления всестороннего сжатия в первую очередь закрываются трещины, а деформация скелета происходит менее значительно. Кроме того, с увеличением содержания влаги в геоматериале даже при снижении интенсивности напряжений происходит увеличение коэффициента разрыхления и увеличение параметров пластичности, как по напряжениям, так и по деформациям.

Динамические характеристики разрушения. В зависимости от скорости нагружения изменяется прочность угля и горных пород в зависимости от степени влагонасыщения. С изменением условий нагружения и форм влаги (рыхлосвязанная, прочносвязанная) в процесс деформирования включается разное число плоскостей сдвига, которые в силу обстоятельств и взаимного влияния друг на друга вызывают разрушение среды. Влияние скорости нагружения на прочность геоматериала при сжатии описывается корреляционными уравнениями. В лабораторно-сухом состоянии для прочных s_1 и слабых s_2 пород:

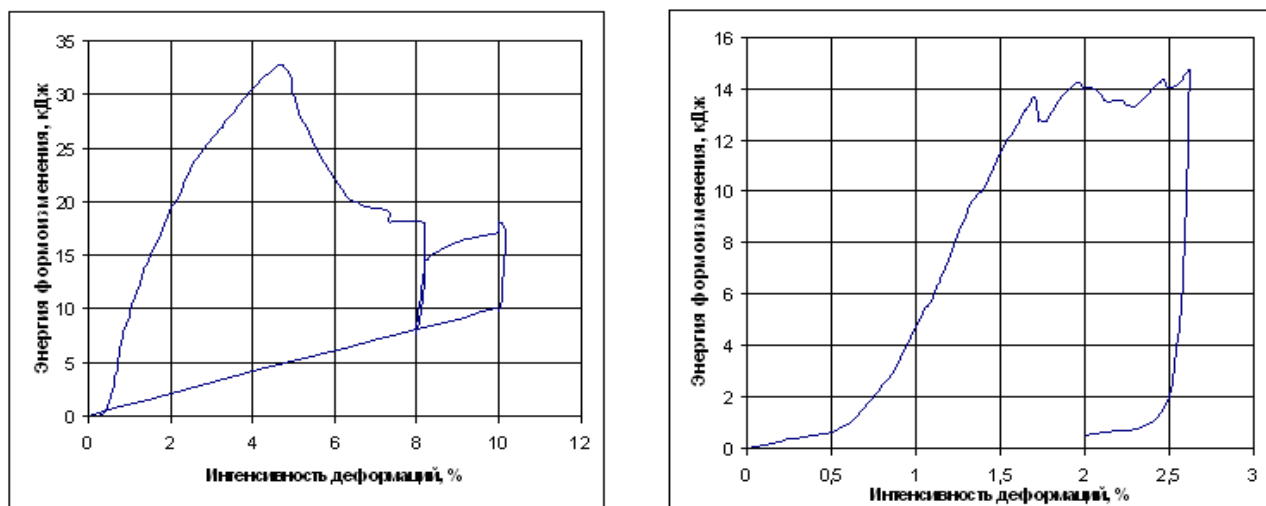
$$\begin{cases} s_1 = -0,00006\sigma_1^3 + 0,0097\sigma_1^2 - 0,298\sigma_1 + 2,2312, & R^2 = 0,69; \\ s_2 = 0,00005\sigma_2^3 - 0,0033\sigma_2^2 + 0,1751\sigma_2 - 0,7118, & R^2 = 0,89. \end{cases}$$

В увлажненном состоянии для прочных s_3 и слабых s_4 пород:

$$\begin{cases} s_3 = -0,0009\sigma_3^3 + 0,0495\sigma_3^2 - 0,3695\sigma_3 + 0,228, & R^2 = 0,59; \\ s_4 = 0,0053\sigma_4^3 - 0,2625\sigma_4^2 + 5,0033\sigma_4 - 27,941, & R^2 = 0,68. \end{cases}$$

При этом следует ожидать, что разрушение произойдет не по всем единичным плоскостям сдвига, включившимся в процесс деформирования, а по какой-то одной плоскости в силу статистического разброса пределов прочности и упругости на каждой единичной плоскости или с учетом иерархии трещиноватости и пористости.

Зависимость энергии формоизменения от степени флюидонасыщенности. Оценка влияния пластифицирующих действий жидкости на прочностные свойства горных пород и угля проводится по изменению энергии пластического формообразования при разрушении геоматериала. На рис. 9 а, б представлена динамика энергии формоизменения геоматериала при разрушении в лабораторно-сухом и влагонасыщенном состоянии.



а

б

а – лабораторно-сухое состояние; б – увлажнение 5 %

Рисунок 9 – Зависимость энергии формоизменения образца при разрушении от интенсивности деформаций угля с различным уровнем влагонасыщения

При объемном сжатии и разрушении геоматериала имеет место процесс неравномерного формоизменения, под которым понимается способность геоматериала разрушаться с минимальными затратами энергии. Построения годографов энергии формоизменения указывают на упорядоченный процесс нагружения геоматериала в начальной стадии разрушения и хаотичный при развитии интенсивного трещинообразования. Аномалии пластичности наблюдаются по мере локализации деформации, являющейся случайным статистическим про-

цессом неравномерного формоизменения. Под этим понимается не столько способность породы разрушаться с минимальными затратами энергии, сколько деформироваться без больших остаточных деформаций. Для определения этих изменений были выполнены микроскопические исследования микронарушенности угля с поверхности естественного скола образца, параллельно и перпендикулярно напластованию, откуда следует, что разрушенный образец выглядит менее плотным с характерными проявлениями сдвиговых трещин на контактах с различной прочностью среды.

Диагностика разрушения геоматериала. Для сравнительной оценки влияния флюидонасыщенности на интенсивность трещинообразования проведена обработка результатов регистрации сейсмоакустической эмиссии и амплитудно-частотных спектров разрушения. Значительные вариации акустоэмиссионных явлений с увеличением всестороннего давления свидетельствуют о существенной перестройке внутренней структуры образцов. На рис.10, *а, б* представлены изменения амплитудно-частотных характеристик геоматериала при разрушении.

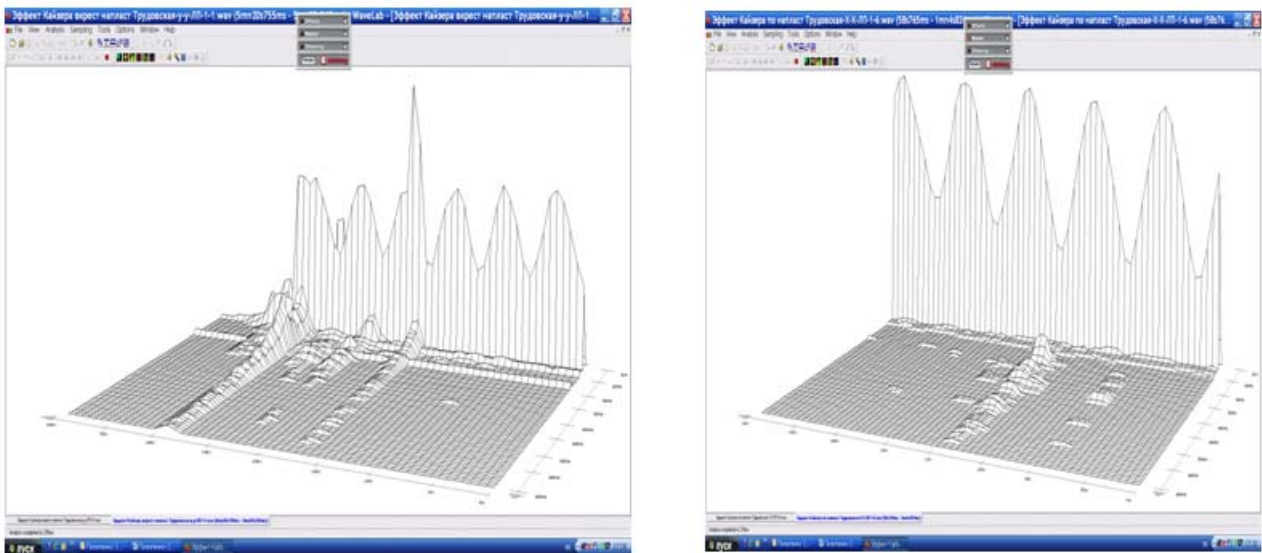
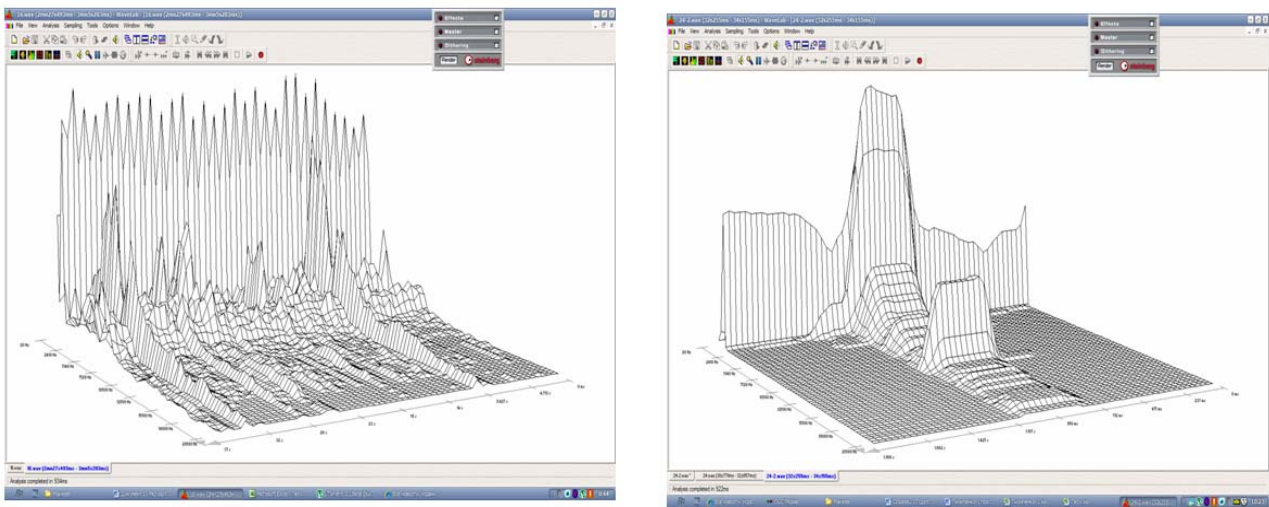
*а**б*

Рисунок 10 – Динамические характеристики разрушения лабораторно-сухого (*а*) и флюидонасыщенного (*б*) угля при сжатии

Характерной особенностью разрушения угля является широкий спектр частот для лабораторно-сухого состояния с образованием различных типов трещин, как по размерам, так и по направлению. Флюидонасыщенному геоматериалу свойственна однотипность трещин с локализацией очагов разрушения. Определение очагов генерирования трещин и формы акустических сигналов были использованы для их идентификации: по частотному составу и диапазону генерирования импульсов при разрушении, амплитуде, времени вступления и знаку первой фазы. Неоднородности в объеме образца являются особенностью разрушения при наличии естественных дефектов (кливаж, отдельные трещины)

и, как правило, становятся очагами развития магистральных трещин и окончательного разрушения геоматериала. На рис. 11 а, б представлены спектрограммы разрушения угля в области предельного состояния.



а) б)
Рисунок 11 – Разрушения лабораторно-сухого (а) и флюидонасыщенного (б) угля при сжатии в области предельного состояния

Совместный анализ диаграмм «напряжение-деформация», интенсивности сейсмоакустической эмиссии и амплитудно-частотных характеристик позволили выделить особенности эмиссионных событий. Начальный этап: пригрузка образцов, снижение проницаемости проявляется при закрытии трещин и частичной изоляции пор при развитой системе трещино-порового пространства. Акустические сигналы определяются в виде «шороха» – низкие частоты импульсов, незначительная амплитуда, слабая энергетическая плотность сигналов. Для упругого деформирования среды характерны: смыкание берегов трещин, проницаемость имеет минимальные значения, появляются отдельные импульсы небольшой длительности, время нарастания продолжительное, энергетические показатели слабые. Кроме того, для геоматериала свойственно закрытие естественных трещин и пор и образование минимальных пространственных соединений между собой. Отдельные импульсы связаны с дефектностью геоматериала и упругим сжатием каркаса среды. Этап упругопластического деформирования начинается с роста проницаемости и акустической активности процесса трещинообразования.

Изменение амплитудно-временных и амплитудно-частотных спектров механоэмиссионных явлений связано с ростом микротрещин и их консолидацией. Интенсивность процессов трещинообразования оценивается по величине спектральной плотности акустических сигналов и параметрам модуля постоянной спада. Стремление модуля спада спектральной плотности к нулю указывает на разрушение геоматериала в виде пластического течения, а к единице - деструкция происходит в виде хрупкого разрушения по плоскостям ослабления.

Применение метода линий скольжения позволяет вычислить деформирующие усилия полей напряжений в сечениях геоматериала и локализовать явления, возникающие при трещинообразовании и разрушении среды сейсмоакустическим методом.

Анализ диаграмм «напряжение-деформация», изменений коэффициентов разрыхления, скоростей продольных и поперечных деформаций, энергетических характеристик во всем временном интервале разрушения и акустической эмиссии позволили выделить основные этапы проявления напряженного состояния геоматериала и последовательность развития сколовых и сдвиговых деформаций при трещинно-поровых образованиях с помощью Фурье-анализа спектрограмм. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3- Изменение сейсмоакустической активности угля пласт m_3 шх. Им. А.Ф. Засядько при разрушении

На- пряже- ние, МПа	Продоль- ная дефор- мация, $\xi_{\text{пр}}$, %	Попереч- ная дефор- мация, $\xi_{\text{поп}}$, %	Модуль спектральной плотности сейсмоакустической эмиссии,				
			0,5кГц	1кГц	5кГц	10кГц	20кГц
1	$\frac{00}{00}$	$\frac{00}{00}$	$\frac{0.08}{0.42}$	$\frac{0.07}{0.41}$	$\frac{0.07}{0.41}$	$\frac{0.09}{0.39}$	$\frac{0.09}{0.40}$
3	$\frac{0.34}{0.42}$	$\frac{0.14}{0.21}$	$\frac{0.15}{0.4}$	$\frac{0.13}{0.5}$	$\frac{0.15}{0.3}$	$\frac{0.21}{0.3}$	$\frac{0.25}{0.1}$
10	$\frac{0.72}{0.85}$	$\frac{0.23}{0.29}$	$\frac{0.28}{0.15}$	$\frac{0.25}{0.15}$	$\frac{0.24}{0.14}$	$\frac{0.21}{0.13}$	$\frac{0.20}{0.13}$
15	$\frac{0.98}{0.85}$	$\frac{0.37}{0.43}$	$\frac{0.85}{0.07}$	$\frac{0.83}{0.06}$	$\frac{0.82}{0.05}$	$\frac{0.80}{0.04}$	$\frac{0.79}{0.04}$
10	$\frac{1.73}{1.08}$	$\frac{0.54}{0.63}$	$\frac{0.41}{0.08}$	$\frac{0.37}{0.08}$	$\frac{0.35}{0.06}$	$\frac{0.30}{0.04}$	$\frac{0.30}{0.03}$

Примечание: числитель – лабораторно-сухое, знаменатель – флюидонасыщенное состояния геоматериала

Особенностью разрушения геоматериала в области предельного состояния является рост проницаемости за счет образованием линий скольжений в виде сдвиговых трещин. Их интенсивное развитие наблюдается при совпадении направления главных палеонапряжений и действующих нагрузок.

Таким образом, при сжатии и разрушении геоматериала имеет место процесс неравномерного формоизменения по линиям скольжения, которые представляют локальные области консолидации микротрещин. При пластификации геоматериала флюидом образование магистральных трещин происходит с минимальными затратами энергии за счет неравномерного адгезионного снижения

прочности и упругости. Так как на фильтрационные свойства оказывает влияние генетика осадконакопления горных пород и их структурно-текстурные особенности формирования, происходит снижение уровня напряжений во всем объеме геоматериала с изменением проницаемости, которая зависит от типа трещинно-порового пространства и направления главных напряжений. Благодаря чему происходит разрушение без больших остаточных деформаций. С ростом влажности в процесс деформирования вовлекается большее число элементов с низким сопротивлением сдвигу, что приводит к снижению уровня напряжений во всех частях геоматериала. Увеличение уровня влагонасыщения от 3 до 5 % снижает прочность геоматериала до 10 %, увеличение количества влаги до 10-15 % приводит к уменьшению прочности до 25-35 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угленородный массив Донбасса как гетерогенная среда / А.Ф. Булат, Е.Л. Звягильский, В.В. Лукинов [и др.]. – К.: Наукова думка, 2008. – 411 с.
2. Скипочка, С.И. Элементы геомеханики угленородного массива при высоких скоростях подвигания лав / С.И. Скипочка, Б.М. Усаченко, В.Ю. Куклин. – Днепропетровск: Лира, 2006. – 248 с.
3. Карманский, А.Т. Изучение гидро- и газодинамики углей. / А.Т. Карманский // Уголь, N 7, 1994. – С. 45–46.
4. Чернышев, С.Н. Трещины горных пород / С.Н. Чернышев. – М.: Недра, 1983. – 240 с.
5. Гольф-Рахт, Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов / Т.Д. Гольф-Рахт: Под ред. А.Г. Ковалева. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
6. Виноградов, В.В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
7. Вакарчук, С.Б. Аппроксимация кривых и поверхностей сплайнами – К.: Ин-т математики АН УССР, 1982. – 48 с.
8. Куксенко В.С. Диагностика и прогнозирование разрушения крупномасштабных объектов / В.С. Куксенко // Физика твердого тела. – 2005. – № 5, Т.47. – С. 788–792.
9. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика / В.Н. Николаевский // М.: Недра, 1996, - 447 с.

REFERENCES

1. Bulat A.F., Zvyagylsky Ye.L. and Lukinov V.V. (2008), *Ugleporodniy massiv Donbassa kak geterogennaya sreda* [Coal-rock array of Donbass as geterogen environment], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Skypochka, S.I., Usachenko B.M. and Kuklin V.Yu. (2006), *Elementy geomekhaniky ugleporodnogo massiva pri vysokirh skorostyakh podviganiya lav* [Elements geomechanic of coal-gas massif at high speeds of pushing of lavas], Lire, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Karmansky, A.T. (1994), «Study of hydro- and gas dynamic of coals», *Coal*, no. 7, pp 45–46.
4. Chernyshev, S.N. (1983) *Treshchiny gorntrh porod* [Cracks of mine breeds], Nedra, Moscow, Russia.
5. Golf-Rakht, T.D. *Osnovy neftepromyslovoy geologii I razrabotki treshchinovatykh kollektorov* [Essential principles of petroleum-trade geology and development of cracking collectors], Nedra, Moscow, Russia.
6. Vinogradov, V.V. (1989), *Geomerhanika upravleniya sostoyaniyem massiva vblizi gornyx vyrabotok* [Geomechanic of control by the state of array near the rock making], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
7. Vakarchuk, S.B. *Approksimatsiya krivyrh i poverkhnostey splaynami* [Approxymation of curves and surfaces by splines] – Institute of mathematics of AS of Ukraine, Kiev, Ukraine.
8. Kuksenko V.S. (2005), «Diagnostics and destruction prognostication of large-scale objects», *Physics of solid*, no 5, vol. 47, pp. 788–792.

9. Nikolaevskiy V.N. (1996) *Geomehanika i fluidodinamika* [Geomechanics and fluidodynamics], Nedra, Moscow, Russiya.

Об авторах

Булат Анатолий Федорович, академик Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, директор института, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, igtmnanu@yandex.ru

Пилипенко Юрий Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, geotechnika@mail.ua

About the authors

Bulat Anatoly Fedorovich, Academician of the National Academy of Science of Ukraine, Doctor of Technical Sciences (D. Sc), Professor, Director of the Institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, igtmnanu@yandex.ru

Pilipenko Juri Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, geotechnika@mail.ua

Анотація. Досліджено зміни фізико-механічних і колекторських властивостей геоматеріалу різного ступеня флюїдонасиченості у граничній і позамежній області деформації. Встановлено вплив швидкості навантаження зразків на зміну міцнісних і деформаційних параметрів вугілля і гірських порід залежно від типу флюїда і величини бічного підпору при різних енергетичних витратах на руйнування. Встановлено залежності стиснення від величини тиску і параметрів тріщино-порового простору, а також динаміки формозміни від ступеня флюїдонасиченості геоматеріалу. Контроль процесу руйнування здійснено методом спектральної сейсмоакустики з визначенням рівня дезинтеграції Фур'є-оцінкою амплітудно-частотних і амплітудно-часових спектрів.

Ключові слова: геоматеріал, руйнування, флюїд, енергія, формозміна, контроль

Abstract. The investigation results of changes of the physical-mechanical and reservoir geomaterial properties of fluid saturation different degrees in the limit and beyond limit deformation area were given. The influence of strain speed on changing of the strength and deformation parameters of coals and rocks, depending on the type of fluid and the value of the lateral overpressure at different energy costs of destruction was established. The dependences of the compressibility on the parameters of pressure and fracture-pore space, as well as the dynamics of forming the degree of fluid saturation geomaterial were established. Control of destruction process was carried out by spectral seismoacoustics method with measuring of disintegration level by Fourier evaluation of amplitude-frequency and amplitude-time spectra.

Keywords: geomaterial, destruction, fluid, compressibility, form-changing energy, control

Стаття поступила в редакцію 20.06. 2013

Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук В.Г. Шевченко

УДК 622.831: 553.635.1

С. И. Скипочка, д-р техн. наук, профессор,
Т. А. Паламарчук, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
В. Н. Сергиенко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
В. А. Амелин, магістр,
Т. Г. Войтович, аспірант
(ИГТМ НАН України)

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ ГИПСОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

С. І. Скіпочка, д-р техн. наук, професор,
Т. А. Паламарчук, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,
В. М. Сергієнко, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
В. А. Амелін, магістр,
Т. Г. Войтович, аспірант
(ІГТМ НАН України)

ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ В ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ ГПСОВИХ РОДОВИЩ

S. I. Skipochka, D. Sc. (Tech.), Professor,
T. A. Palamarchuk, D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,
V. N. Sergienko, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
V. A. Amelin, M.S (Tech.),
T. G. Vojtovich, Doctoral Student
(IGTM, NAS of Ukraine)

SPECIFICS OF DEFORMATION PROCESSES IN THE ROCKS OF GYPSUM DEPOSITS

Аннотация. Механизм деформирования блочно-структурированного гипсосодержащего массива состоит в деформировании породных блоков, их взаимном скольжении и вращении. При этом пучение вмещающих пород вызвано «давлением кристаллизации гипса». В работе представлена трехлинейная зависимость между сдвиговым и хрупким разрушением. Показано, что следует учитывать последствия влияния бокового давления, как в „единстве”, так и в „противоборстве” разных компонентов напряжений, а увеличение зоны хрупких разрушений является ключевым для понимания процессов пучения. По границе естественных крупных блоков формируются трещины. После формирования первичной (базовой) трещины происходит релаксация растягивающих напряжений в кровле. Вторичные трещины или пересекают первичные, или наблюдаются вблизи от них. Показано, что рост дефектов в массиве – необратимый процесс, требующий постоянных исследований, наблюдений и прогноза. Выявленные закономерности развития блокообразования в кровле гипсовых шахт позволили обоснованно подойти к выбору способов и средств контроля кровли в зависимости от ее текущего геомеханического состояния.

Ключевые слова: гипсовые месторождения, кровля, деформации, мониторинг.