

Булат А., академик, доктор технических наук, профессор
 Пилипенко Ю., кандидат технических наук
 (Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины)

РАЗРУШЕНИЕ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОГО ГЕОМАТЕРИАЛА ПРИ СЖАТИИ

РУЙНУВАННЯ ФЛЮЇДОНАСИЩЕНОГО ГЕОМАТЕРІАЛУ ПРИ СТИСНЕННІ

Наведено результати досліджень зміни фізико-механічних та колекторських властивостей геоматеріалу різного ступеня флюїдонасиченості в граничній та позаграничній області деформування. Встановлено вплив швидкості поздовжніх та поперечних деформацій на зміну міцнісних і деформаційних параметрів вугілля та гірничих порід у залежності від типу флюїду та величини бічного підпору при різних енергетичних витратах на руйнування. Представлена апроксимація кривих параметричними сплайнами зміни фільтраційних параметрів геоматеріалу при руйнуванні.

THE DESTRUCTION OF FLUID SATURATED COMPRESSED GEOMATERIAL

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 the speed of longitudinal and transverse strains 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 approximation of filtration parameters changing curves by parametric splines under destruction was represented.

Ключові слова: руйнування, флюїд, проникність, контроль, апроксимація.

Ключевые слова: разрушение, флюид, проницаемость, контроль, аппроксимация.

Keywords: destruction, fluid, permeability, control, approximation.

Для обеспечения безопасности ведения горных работ необходимо получать надежную и достоверную информацию о структуре и состоянии углепородного массива, особенно при переходе разрывных дислокаций механизированными комплексами нового технического уровня. Малоамплитудные тектонические нарушения являются природными каналами миграции флюидов и газа метана. Поэтому для прогнозной оценки состояния горных выработок и поведения флюидонасыщенных пород и угля необходимо определять параметры физико-механических и коллекторских свойств, которые вычисляются при обработке полных диаграмм «напряжение – деформация» [8, 10]. Исследованиям влияния влаги на прочностные и деформационные свойства углей и горных пород посвящено значительное количество публикаций [1, 3, 9]. Все работы в той или иной степени базировались на изучении эффекта Ребиндера – Баренблатта для двухфазных (ДФ) или гетерогенных сред. Основной объем исследований выполнен применительно к проблемам добычи жидких и газообразных углеводородов на больших глубинах. Изучение фильтрационных свойств пород-коллекторов проводилось по схеме Кармана устройствами для исследования проницаемости зерна (УИПК-1м, УИК) или их аналогами [5]. 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 областях деформирования. Цель настоящего исследования: разработка теоретических предпосылок оценки динамики разрушения флюидонасыщенных горных пород и угля. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: исследовать влияние влаги на изменение прочностных и фильтрационных свойств геоматериала и выполнить аналитическое описание их взаимосвязи в удобной для инженерных расчетов форме. Результаты составят теоретическую основу для исследования поведения геоматериала в условиях объемного сжатия и воздействия на него газа и растворов с регулируемым реологическими свойствами.

Модель ДФ-среды и ее описание

Изучение физических свойств геоматериала проведено в различных направлениях по отношению к слоистости, трещиноватости при фиксированных значениях влажности и пористости исследуемых образцов. На рис. 1 представлена модель изменения проницаемости при деструкции геоматериала.

В приведенной модели приняты следующие обозначения: $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие; σ_y , σ_c – напряжения в области упругих дефор-

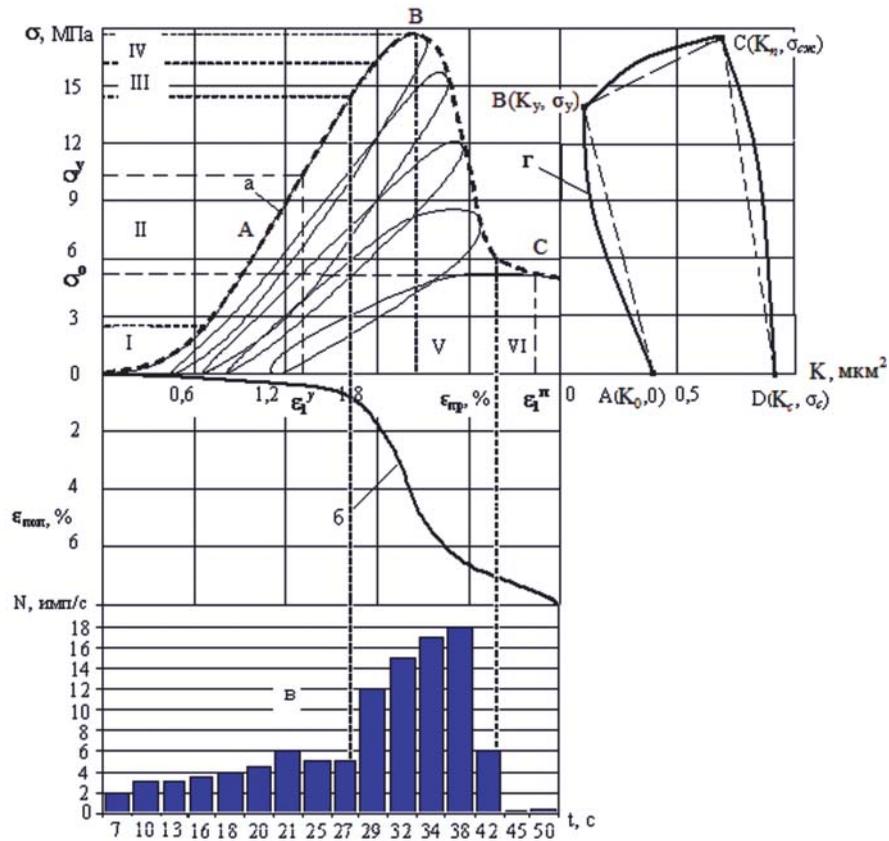


Рис. 1. Обобщенная модель разрушения геоматериала (а) и схема изменения его проницаемости (г) под нагрузкой

маций и остаточной прочности соответственно; продольные (ϵ_{np}) и поперечные ($\epsilon_{поп}$) деформации образца при объемном сжатии с боковым давлением P ; характерные области деформирования пород (I–VI) и соответствующие диаграммы изменения: в – интенсивности сейсмоакустической эмиссии; г – проницаемости: K_0, K_y, K_n, K_c – при нулевом напряжении, в области упругих деформаций, в области предельных и остаточных напряжений.

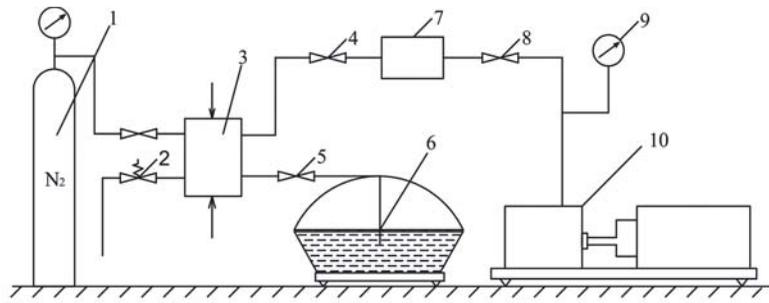
В задачах фильтрации растворов в геоматериале важным параметром является эффективная ширина трещин, определяющая законы движения жидкости и газа, которые характеризуются давлением, расходом и временем преодоления пути, а геоматериал – проницаемостью, трещиноватостью и напряженностью среды.

Аппаратура и оборудование

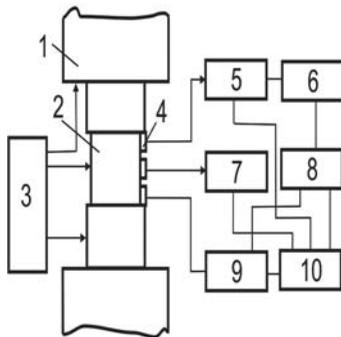
Разрушение угля и горных пород исследовалось с применением жестких испытательных систем на базе пресса ПСУ-500. Так как основным материалом для исследования был уголь, то значительный объем работ проведен на прессах П-20, П-50 с применением устройств цифровой индикации диаграмм « $\sigma - \epsilon$ » и « $\sigma - t$ » с применением датчиков перемещений фирмы Balluff. В качестве аналого-цифрового преобразователя использовалось устройство сбора данных (УСД)

National Instruments USB-6008/6009. Для определения закономерностей изменения фильтрационных и физико-механических свойств геоматериала при разрушении разработан стенд, схема которого представлена на рис. 2.

Стенд состоит из трех элементов: установка для флюидо- и водогазонасыщения, нагрузочное устройство и система контроля разрушения. Установка для флюидо- и водогазонасыщения включает следующие элементы и устройства: 1 – баллон с азотом; 2 – выпускной клапан; 3 – нагрузочное устройство; 4 – дроссель; 5, 8 – запорные вентили; 6 – сосуд с водой; 7 – фильтр; 10 – вакуумный насос и прецизионные манометры. Прием и обработка акустических сигналов в аналоговом режиме осуществляется с помощью информационно-измерительной системы АФ-15 и набора стандартных датчиков 4, а в цифровом виде – Н-Р-ресивером 6, 8, 9 Pioneer VSX-1520-s/-kc. Визуальный контроль – запоминающим осциллографом С8-14, а запись с подключением к порту 10 USB Blu-ray Disc BDP-1333 или ноутбука. Корректировка амплитудно-частотной характеристики выполнялась эквалайзером цифрового ресивера, а подавление помех и избирательные измерения СА сигналов проводились с помощью частотного фильтра ОСК-400-06-150. При соблюдении герметичности установка обеспечивает высокие эксплуатационные показатели работы.



а)



б)



в)

Рис. 2. Исследование фильтрационных свойств геоматериала (а), функциональная схема контроля трещинообразования (б) и внешний вид стенда (в)

Исследования проведены на образцах породы и угля различной стадии метаморфизма от ПАО «Павлоградуголь» до ПАО «Краснодонуголь». Специальными исследованиями изучено увлажнение геоматериала шахтной водой, минерализованной различными солями. Изменение прочности при влагонасыщении представлено на рис. 3.

Снижение прочности с ростом влажности породы объясняется образованием слоя связанной воды. На рис. 4. представлена зависимость изменения свойств геоматериала от степени влагонасыщенности, которая в свою очередь зависит от проницаемости среды.

При увеличении уровня влагонасыщения от 2 до 5% прочность геоматериала снижается от 4 до 23–28%. В режиме полного влагонасыщения тенденция снижения прочности и угла внутреннего трения угля выражается через уравнения регрессии в виде: $y = -8,3241 \ln(x) + 26,24$; $R^2 = 0,467$ и $y = -5,0753x^2 + 37,366x - 27,177$; $R^2 = 0,536$ соответственно.

Изменения коэффициента проницаемости под давлением всестороннего сжатия связано с характером деформирования пород и различным типом порового пространства. При изменении фиксированных значений бокового подпора происходит изменение анизотропии пород в трех взаимно перпендикулярных направлениях, причем преобладающее направление совпадает с направлением максимальных нагрузок.

Параметры напряжений σ_1 и нормированных величин бокового подпора σ_3/σ_1 представлены в табл. 2.

С ростом давления всестороннего сжатия в первую очередь закрываются трещины, а деформация скелета не столь значительна.

Как следует из табл. 3, параметр пластичности Надаи в области предельного и запредельного состояния изменяет свой диапазон по напряжениям от -1,0 до 1,46 и от -0,81 до -0,30 по деформациям. Анализ результатов определений показал, что с увеличением содержания влаги в геоматериале даже при снижении интенсивности напряжений происходит увеличение коэффициента разрыхления и рост параметров пластичности как по напряжениям, так и по деформациям. При этом энергия активации роста трещин, возникающих по плоскостям сдвига, скола и трещин Ределя под действием напряжений, возрастает. При достижении определенного уровня давления всестороннего сжатия возникает деформация, проявляющаяся на макроуровне в виде плоскостей скольжения, количество которых зависит от величины бокового подпора и скорости деформирования влагонасыщенных образцов угля и песчаника. На рис. 5 представлена зависимость проницаемости угля от величины бокового подпора.

Анализ интенсивности и модуля спектральной плотности сейсмоакустических сигналов показал, что значительные вариации акустоэмиссионных явлений с

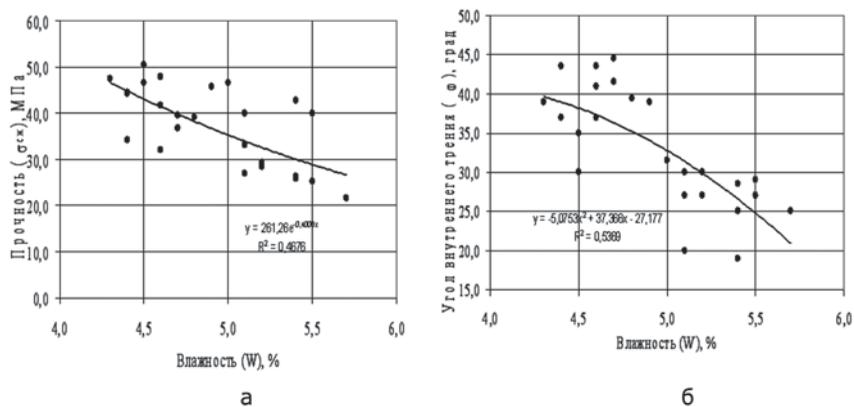


Рис. 3. Полные кривые «напряжение – деформация» угля во влагонасыщенном (а) и лабораторно-сухом (б) состоянии

Таблиця 2. Зависимость приращения энергии угля (марка Ж) от величины напряжений и бокового подпора

Параметр	Напряжение, МПа			
	10	20	30	40
σ_3/σ_1	0,4	0,7	1,5	2,2
Приращение энергии, кДж	3,6	2,8	1,7	1,2
Приращение объемной энергии, кДж	0,06	-0,38	-1,18	-2,63

Таблиця 3. Изменение псевдопластических свойств угля при увеличении степени флюидонасыщения

Напряжение, МПа	Степень флюидонасыщения, %	Интенсивность напряжений, МПа	Коэффициент разрыхления	Параметр пластичности Надаи	
				по напряжениям	по деформациям
11,8	л/с	10,2	1,050		
6,1	–	5,6	1,070		
4,9	–	5,0	1,070		
3,6	–	4,5	1,090		
15,2	2	13,8	0,992	-0,73	-0,39
12,4	2	9,0	0,994	-0,60	-0,38
4,0	2	3,0	0,998	0,14	-0,33
2,1	2	1,8	0,999	1,46	-0,30
17,6	5,2	12,6	0,987	-1,00	-0,81
16,6	5,2	11,6	0,988	-1,00	-0,77
16,2	5,2	11,2	0,989	-1,00	-0,78
16,2	5,2	11,2	0,989	-1,00	-0,77
14,3	8	12,9	0,989	-0,71	-0,49
8,7	8	7,4	0,991	-0,52	-0,47
3,1	8	2,3	0,995	0,52	-0,42
1,0	8	1,8	0,997	1,00	-0,38

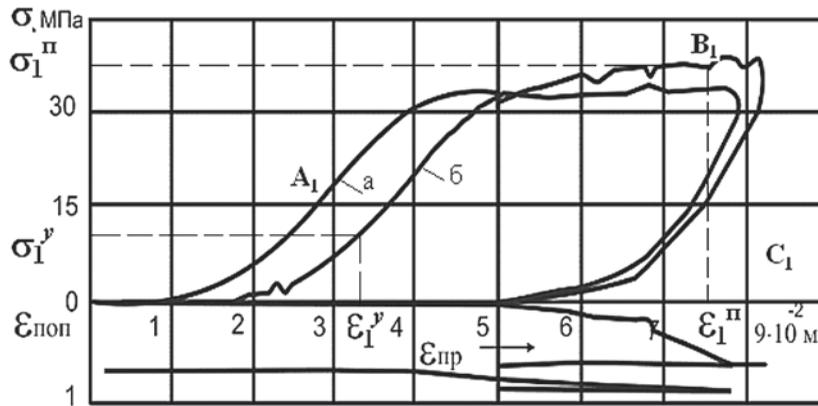


Рис. 4. Зависимость прочности (а) и угла внутреннего трения (б) угля (Д-Г) от степени влагонасыщения

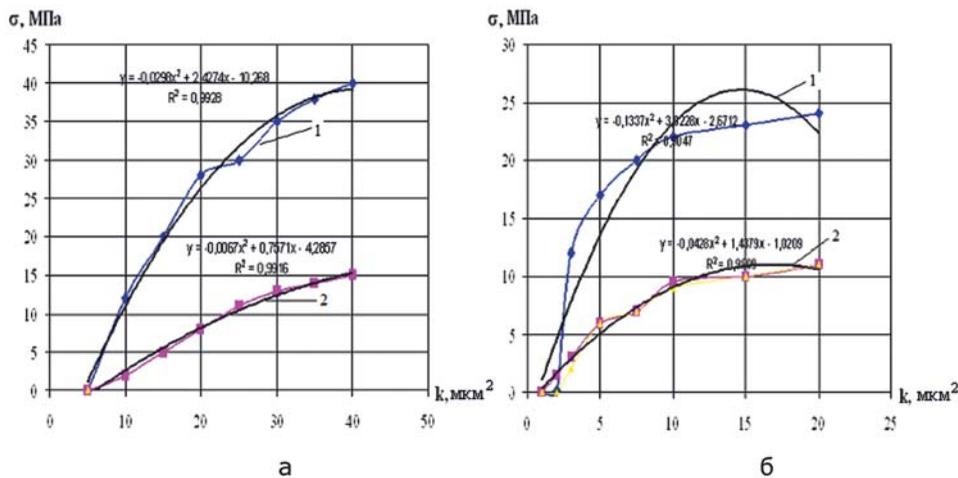


Рис. 5. Зависимость проницаемости геоматериала от напряжений при различной величине бокового подпора (1,2) лабораторно-сухого (а) и флюидонасыщенного (б) угля в условиях объемного сжатия

увеличением всестороннего давления свидетельствуют о существенной перестройке внутренней структуры образцов. Для определения этих изменений были выполнены микроскопические исследования микронарушенности угля с поверхности естественного скола образца параллельно и перпендикулярно напластованию. Визуальным осмотром и аппаратурным контролем геоматериала установлено, что разрушенный образец выглядит менее плотным и характеризуется проявлением сдвиговых трещин и различной прочностью компонентов среды.

Результаты определения очагов генерирования трещин и записи формы акустических сигналов были использованы для исследования частотных особенностей АЭ при образовании трещин различного типа. Идентификацию трещин выполняли по частотному составу и диапазону генерирования, амплитуде, времени вступления и знаку первой фазы. Перечисленные параметры в пределах одного цикла нагружения при изменении нагрузки изменялись незначительно. Однако при тех же координатах и уровне нагрузки встре-

чались отдельные акустические сигналы других частот и амплитуд. Форма записи сигнала и его параметры также существенно отличаются при параметризации импульсов.

В связи с этим была выдвинута гипотеза, что при разрушении образцов угля, ввиду различия их строения и состава, образуются разные виды трещин: сдвиговые, сколовые, Редела и их комбинации. Результаты изучения АЭ при разрушении образцов угля указывают на возникновение очагов структурной нарушенности, которые приводят к образованию магистральных трещин, скорость распространения которых изменяется в пределах от 0,3 до 1,9 км/с, но не более чем скорость продольных волн в образцах керна или кубика. Возникшие области нарушенности структуры являются участками микротрещинообразования. Неоднородности этих участков в объеме образца являются особенностью подготовки процесса разрушения угля при наличии естественных дефектов (кливаж, отдельные трещины) и являются, как правило, очагами развития магистральных трещин и окончательного разрушения геоматериала.

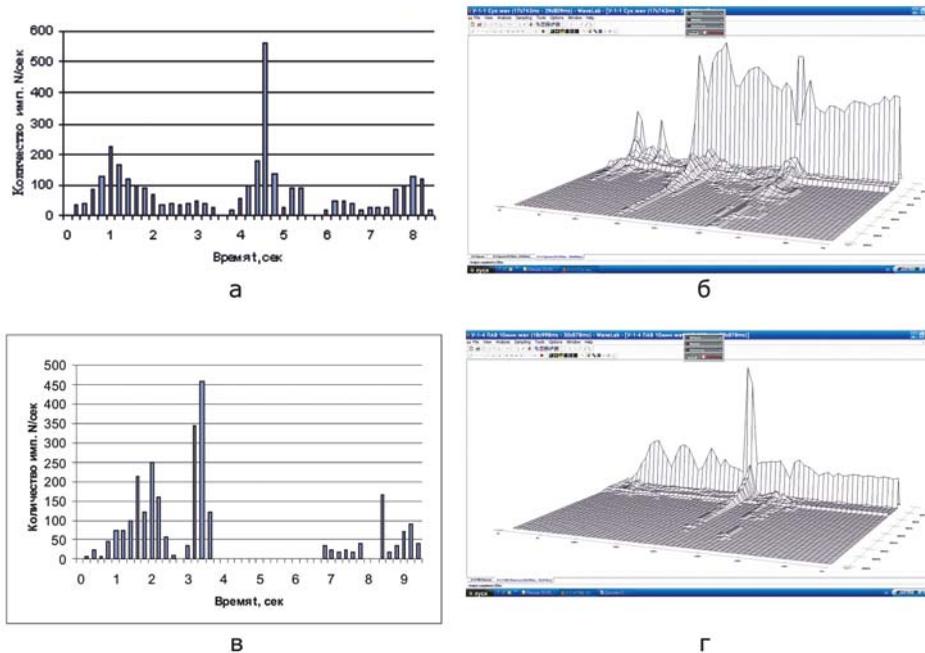


Рис. 6. Динамические характеристики разрушения лабораторно-сухого (а, б) и флюидонасыщенного (в, г) угля при сжатии

Для оценки влияния флюидонасыщенности на интенсивность трещинообразования проведена обработка данных механоэмиссионных измерений путем Фурье-анализа спектрограмм по результатам сейсмоакустических исследований. При стремлении модуля спада спектральной плотности к нулю разрушение геоматериала происходит путем пластического течения, а при стремлении к единице деструкция происходит в виде хрупкого разрушения по плоскостям ослабления. Анализ изменений проницаемости и диаграмм «напряжение – деформация», коэффициента разрыхления, скорости продольных и поперечных деформаций, энергетических характеристик во всем временном интервале разрушения и акустической эмиссии позволил выделить основные этапы проявления напряженного состояния геоматериала и последовательность развития сколовых и сдвиговых деформаций с различной скоростью нагружения, по которым выявлены закономерности.

В наиболее общем виде взаимосвязь проницаемости и напряженно-деформированного состояния среды описывается с помощью параметрических сплайн-функций [2, 4], а процесс фильтрации жидкости в геоматериале – законом Дарси в элементарной форме [3]

$$K = \frac{Q \cdot \mu \cdot l}{A \cdot \Delta P}, \quad (1)$$

где Q – объем фильтрата; μ – динамическая вязкость; l – геометрические параметры образца; A – площадь сечения образца; ΔP – разность давлений.

Допустим, кривая, характеризующая зависимость проницаемости среды от напряжений (рис. 1г), задана в

плоскости $OX_1 X_2$ своими параметрическими уравнениями $X_k = \varphi_k(t)$ ($k=1,2$); $t \in [a,b]$; где $\varphi_k(t)$ – гладкие функции. Ее можно аппроксимировать при помощи сплайн-кривых. Введем на отрезке $[a,b]$ произвольное разбиение δn : $a = t_0 < t_1 < \dots < t_{n-1} < t_n = b$ и обозначим $\varphi_k^{(i)}(t) = d^i \varphi_k / dt^i$ ($i=0,1$); $\varphi_k^{(0)}(t) = \varphi_k(t)$ ($k=1,2$); $h_j = t_{j+1} - t_j$ ($j=0,1,\dots,n-1$).

Кривой γ поставим в соответствие параболическую эрмитовую сплайн-кривую $Y_2(\gamma)$, которая на каждом промежутке $[t_j, t_{j+1}]$ ($j=0,1,\dots,n-1$) задается уравнениями:

$$Y_2(j, \varphi_k, t) = \sum_{p,i=0}^1 \varphi_k^{(i)}(t_{j+p}) \psi_{j,p}(t) \quad (k=1,2), \quad (2)$$

где

$$\psi_{1,0}(t) = \begin{cases} (t-t_j)(2t_{j+1}+t_j-3t)/2h_j, & t_j \leq t \leq t_{j+1/2} \\ (t_{j+1}-t)^2/2h_j, & t_{j+1/2} \leq t \leq t_{j+1} \end{cases};$$

$$\psi_{1,1}(t) = \begin{cases} -(t-t_j)^2/2h_j, & t_j \leq t \leq t_{j+1/2} \\ (t_{j+1}-t)(t_{j+1}+2t_j-3t)/2h_j, & t_{j+1/2} \leq t \leq t_{j+1} \end{cases};$$

$$\psi_{0,1}(t) = 1 - \psi_{0,0}(t);$$

$$\psi_{0,0}(t) = \begin{cases} 1 - 2\left(\frac{t-t_j}{h_j}\right)^2, & t_j < t < t_{j+1/2} = (t_j + t_{j+1})/2 \\ 2\left(\frac{t_{j+1}-t}{h_j}\right)^2, & t_{j+1/2} \leq t \leq t_{j+1} \end{cases};$$

интерполирует в точках $A_j(\varphi_1(t_j), \varphi_2(t_j))$ ($j=0,1,\dots, n$) и имеет в A_j тот же угол наклона касательной к оси OX_1 ,

что и γ . Подставляя в формулу (2) вместо $\varphi_k^{(1)}(t_j)$ их приближенные значения $\varphi_k^{(1)}(t_j)$, рассчитанные на основании имеющейся информации о кривой γ , при $j=0$ и $j=n$, соответственно, получим:

$$\begin{cases} \varphi_k^{(1)}(t_0) = [\varphi(t_1) - \varphi(t_0)]/h_0, \\ \varphi_k^{(1)}(t_n) = [\varphi(t_n) - \varphi(t_{n-1})]/h_{n-1} \end{cases} \quad (3)$$

Применяя для остальных t_j ($j=2,\dots,n-1$) интерполяционные полиномы Лагранжа $l_2(\varphi_k, t)$ степени 2, интерполирующие $\varphi_k(t)$ в точках t_{j-1}, t_j, t_{j+1} , и вычисляя значения их первых производных в точках t_j , запишем:

$$\begin{aligned} \varphi_k^{(1)}(t_j) = l_2^{(1)}(\varphi_k, t_j) = & -\varphi_k(t_{j-1}) \frac{h_j}{h_{j-1}(h+h_{jn})} - \\ & -\varphi_k(t_j) \frac{h_{j-1}-h_j}{h_{j-1} \cdot h_j} + \varphi_k(t_{j+1}) \frac{h_{j-1}}{h_j(h_{j+1}+h_j)}. \end{aligned} \quad (4)$$

В качестве параметра целесообразно использовать длину ломаной с вершинами в точках интерполяции A_j ($j=0,1,\dots,n$), отсчитываемую от A_0 . В этом случае $t_0=0, t_n=\alpha$, где α – длина всей кривой.

Используем кусочно-полиномиальные функции для описания деформационных кривых $G(\varepsilon_1)$ и $R(\varepsilon_3)$, полученные для одной и той же пробы при объемных испытаниях на сжатие (рис. 1а) и в лабораторно-сухом и влагонасыщенном состоянии (рис. 3).

Отметим, что участку ОА деформационной кривой (рис. 1а) соответствует дуга АВ (рис. 1г), участку АВ – дуга ВС, участку ВС – дуга CD.

Приближенные уравнения деформационных кривых будут иметь следующий вид:

$$G(\varepsilon_1) = \begin{cases} \sigma_{сжк} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^n}\right)^2 + 2\sigma_{сжк} \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1^n}\right); & 0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_1^n \\ \sigma_{сжк} + (\sigma_c - \sigma_{сжк})(\varepsilon_1 - \varepsilon_1^n)^2 / (\varepsilon_1^0 - \varepsilon_1^n)^2; & \varepsilon_1^n \leq \varepsilon_3 \leq \varepsilon_1^n \end{cases} \quad (5)$$

$$R(\varepsilon_3) = \begin{cases} \sigma_{сжк} \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_3^n}; & 0 \leq \varepsilon_3 \leq \varepsilon_3^n \\ \sigma_{сжк} + (\sigma_c - \sigma_{сжк})(\varepsilon_3 - \varepsilon_3^n)^2 / (\varepsilon_3^0 - \varepsilon_3^n)^2; & \varepsilon_3^n \leq \varepsilon_3 \leq \varepsilon_3^0 \end{cases} \quad (6)$$

где ε_1 и ε_3 – соответственно продольная и поперечная деформация образца; $\varepsilon_1^n, \varepsilon_3^n$ и $\varepsilon_1^0, \varepsilon_3^0$ – значения деформации, соответствующие пределу прочности на сжатие и остаточному напряжению на полных деформационных кривых.

Решая соотношения $\sigma = G(\varepsilon_1)$ и $\sigma = R(\varepsilon_3)$ на участках монотонности ОАВ и АВ (рис. 1а, 1г) или, что то же самое, на участках АВС и CD (рис. 1а) относительно ε_1 и ε_3 , получим:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(\sigma) = \begin{cases} \varepsilon_1^n [1 - (1 - \frac{\sigma}{\sigma_{сжк}})^2]^{1/2}; & 0 \leq \sigma \leq \sigma_{сжк} \\ \varepsilon_1^n + (\varepsilon_1^0 - \varepsilon_1^n) [(\sigma - \sigma_{сжк}) / (\sigma_c - \sigma_{сжк})]^{1/2}; & \sigma_c^0 \leq \sigma \leq \sigma_{сжк} \end{cases} \\ \varepsilon_3(\sigma) = \begin{cases} \sigma \frac{\varepsilon_3^n}{\sigma_{сжк}}; & 0 \leq \sigma \leq \sigma_{сжк} \\ \varepsilon_3^n + (\varepsilon_3^0 - \varepsilon_3^n) [(\sigma - \sigma_{сжк}) / (\sigma_c - \sigma_{сжк})]^{1/2}; & \sigma_c \leq \sigma \leq \sigma_{сжк} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

Используя формулы (6) и (7), вычислим коэффициент Пуассона полной деформационной

кривой $\nu = \frac{\varepsilon_3(\sigma)}{\varepsilon_1(\sigma)}$. На участке восходящей кривой (ОАВ) (рис. 1, г) (1) получим:

$$\nu = \nu_n \frac{\sigma / \sigma_{сжк}}{1 - [1 - (\frac{\sigma}{\sigma_{сжк}})^2]^{1/2}}, \quad (8)$$

$$\text{где } \nu_n = \frac{\varepsilon_3^n}{\varepsilon_1^n}.$$

На участке кривой (ВС) (рис. 1г) имеем:

$$\nu = \frac{\varepsilon_3^n + (\varepsilon_3^0 - \varepsilon_3^n) \left(\frac{\sigma_{сжк} - \sigma}{\sigma_{сжк} - \sigma^0} \right)^{1/2}}{\varepsilon_1^n + (\varepsilon_1^0 - \varepsilon_1^n) \left(\frac{\sigma_{сжк} - \sigma}{\sigma_{сжк} - \sigma_y} \right)^{1/2}}. \quad (9)$$

Разрешая соотношения (8) и (9) относительно σ , получим на кривой ОАВ:

$$\sigma = 2\sigma_{сжк} \frac{\nu \nu_n}{\nu^2 + \nu_n^2}, \quad 0 \leq \nu \leq \nu_n; \quad (10)$$

кривой ВС:

$$\sigma = \sigma_{сжк} - (\sigma_{сжк} - \sigma_c) \left(\frac{\nu - \nu_n}{\nu - \nu_n + (\nu_0 - \nu) \varepsilon_1^0 / \varepsilon_1^n} \right)^2, \quad \nu_n \leq \nu \leq \nu_0, \quad (11)$$

где $\nu_0 = \frac{\varepsilon_3^0}{\varepsilon_1^0}$ – выражения напряжений через коэффициент Пуассона полной деформационной кривой.

Отметим участки АВ, ВС, CD зависимости проницаемости от механических напряжений, изображенные на рис. 1г.

На участке упругого деформирования АВ имеем:

$$\sigma = \sigma_y \left(\frac{K - K_0}{K_y - K_0} \right), \quad K_0 \leq K \leq K_y. \quad (12)$$

На участке ВС, соответствующем предельному состоянию, получим

$$\sigma = (\sigma_{сж} - \sigma_y) \left(\frac{K - K_n}{K_n - K_c} \right) + \sigma_{сж}, \quad K_c \leq K \leq K_n. \quad (13)$$

На участке CD, соответствующем пластическим деформациям, запишем:

$$\sigma = -\sigma_{сж} \left(\frac{K - K_c}{K_n - K_c} \right) + 2\sigma_{сж} \frac{K - K_c}{K_n - K_c}, \quad K_c \leq K \leq K_n. \quad (14)$$

Приравняв правые части формул (10) и (12) на участке упругих деформаций, получим:

$$2\sigma_{сж} \frac{v v_n}{v^2 + v_n^2} = \sigma_y \left(\frac{K - K_0}{K_y - K_0} \right)^2. \quad (15)$$

Разрешая (15) относительно К, запишем:

$$K_{эф} = \left(2 \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_y} \cdot \frac{v v_n}{v^2 + v_n^2} \right)^{\frac{1}{2}} [K_y - K_0] + K_0; \quad 0 \leq v \leq v_y, \quad (16)$$

где $v_y = \varepsilon_3^y / \varepsilon_1^y$.

Приравняв правые части соотношений (10) и (13) на участке ВС, соответствующем предельному состоянию, получим:

$$2\sigma_{сж} \frac{v v_n}{v^2 + v_n^2} = (\sigma_{сж} - \sigma_y) \left(\frac{K_n - K}{K_n - K_y} \right)^2 + \sigma_{сж}. \quad (17)$$

Из выражения (17) получим:

$$K_0 = (K_n - K_y) \left(\frac{\sigma_{сж}}{(\sigma_{сж} - \sigma_y)(v_n^2 + v^2)} \right)^{1/2} + K_n; \quad v_y \leq v \leq v_n, \quad (18)$$

Приравняв правые части соотношений (11) и (14), на участке трещиноватости CD, получим:

$$\left(1 - \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_0} \right) \left(\frac{v - v_n}{v - v_n + (v_0 - v) \varepsilon_1^0 / \varepsilon_1^n} \right)^2 = \left(\frac{K - K_c}{K_n - K_c} - 1 \right)^2. \quad (19)$$

Из (19) получим:

$$K_{инт} = (K_n - K_c) \left[\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{сж}} \right)^{1/2} \cdot \frac{v - v_n}{v - v_n + (v_0 - v) \varepsilon_1^0 / \varepsilon_1^n} + 1 \right] + K_c, \quad v_n < v < v_0 \quad (20)$$

Представленные выражения (16), (18), (20) в общем виде описывают изменение проницаемости К флюидонасыщенного геоматериала в упругой, предельной и запредельной области деформирования. При известных параметрах коэффициента Пуассона, величин деформаций и пределов изменения прочности геоматериала в лабораторно-сухом и флюидонасыщенном состоянии выполняется прогнозная оценка фильтрационных свойств углепородного массива.

1. Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М.: Недра, 1984. – 21 с.
2. Вакарчук С. Б. Аппроксимация кривых и поверхностей сплайнами – К.: Ин-т математики АН УССР, 1982. – 48 с.
3. Гольф-Рахт Т. Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов. – М.: Недра, 1986. – 608 с.
4. Завьялов Ю. С., Мирошниченко В. А., Иванов Б. И. Методы сплайн-функций. – М.: Недра, 1980. – 352 с.
5. Карманский А. Т. Закономерности изменения прочностных свойств пород при сложном напряженном состоянии, разных уровнях влажности и порового давления // Записки горного института (СПГИ). – 2009. – Т. 183. – С. 293–296.
6. Карманский А. Т. Изучение гидро- и газодинамики углей // Уголь. – 1994. – № 7. – С. 45–46.
7. Стрижало В. А. Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / В. А. Стрижало, Ю. В. Добровольский, В. А. Стрельченко, С. Н. Пичков. – К.: Наукова думка, 1990. – 232 с.
8. Углепородный массив Донбасса как гетерогенная среда / Булат А. Ф., Звягельский Е. Л., Лукинов В. В. и др. – К.: Наукова думка, 2008. – 411 с.
9. Шевелев Г. А., Перепелица В. Г. Фильтрация газа в шахтах – К.: Наукова думка, 2010. – 295 с.\
10. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries / Xu T., Tang C. A., Yang T. H. and others // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2006. – № 4. – P. 905–919.